EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN

Mathematisch-
Naturwissenschaftliche
Fakultät

Fachbereich Mathematik

Modulhandbuch

Mathematik
Master of Education
Lehramt Gymnasium*

Wintersemester 2026

Stand 9. Oktober 2026

*Gültig für die Studien- und Prüfungsordnung von 2026.

Inhaltsverzeichnis

1 Beschreibung des Studiengangs **3**
1.1 Qualifikationsziele 3
1.2 Struktur des Studiengangs 4

2 Studienverlaufsplan **5**
2.1 Übersicht nach Modulen 5
2.2 Übersicht nach Studienverlauf 6
2.3 Übersicht Studienaufbau mit Semesterzuordnung 7

3 Modulbeschreibungen **9**
Abschnitt 1: Mathematik 9
Abschnitt 2: Fachdidaktik Mathematik 14
Abschnitt 3: Masterarbeit 16

4 Lehrveranstaltungen für das Modul Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik **18**
4.1 Katalog der Lehrveranstaltungen 18

1 Beschreibung des Studiengangs

1.1 Qualifikationsziele

Der Studiengang M.Ed. Lehramt Gymnasium mit Fach Mathematik soll den späteren Lehrern an Gymnasien die wissenschaftliche Befähigung für den Unterricht im Fach Mathematik vermitteln. Die übergeordneten und die fachspezifischen Qualifikationsziele, sowohl hinsichtlich der Inhalte des Studiums, als auch hinsichtlich der zu erwerbenden Kompetenzen, sind in der Rechtsverordnung des Kultusministeriums über Rahmenvorgaben für die Umstellung der allgemein bildenden Lehramtsstudiengänge in Baden-Württemberg vorgegeben.

Im Rahmen des Studiengangs M.Ed. Lehramt Gymnasium mit Fach Mathematik vertiefen die Absolventinnen und Absolventen ihre mathematischen und mathematikdidaktischen Kenntnisse und Kompetenzen, die es ihnen ermöglichen, gezielte Vermittlungs-, Lern- und Bildungsprozesse im Fach Mathematik zu gestalten und neue fachliche und fächerverbindende Entwicklungen selbständig in den Unterricht und in die Schulentwicklung einzubringen. Aufbauend auf den grundlegenden Fragestellungen in Linearer Algebra, Analysis, Numerik, Stochastik, Geometrie und Algebra aus dem Studiengang B.Ed. Lehramt Gymnasium mit Fach Mathematik erweitern sie ihre Stoff- und Methodenkompetenzen in den Gebieten der Fachdidaktik und einem oder mehreren weiteren mathematischen Gebieten aus den Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie, Analysis und Differentialgeometrie, Mathematische Physik, Numerische Mathematik und Optimierung oder Stochastik. Die Absolventinnen und Absolventen beherrschen die theoretischen Erklärungsansätze sowie Prinzipien und Methoden in der Mathematik, sind mit deren Erkenntnis- und Arbeitsmethoden vertraut und können diese in den zentralen Bereichen der Mathematik anwenden. Sie können mathematische Sachverhalte adäquat mündlich und schriftlich unter Verwendung geeigneter Medien darstellen und zentrale Fragestellungen mathematischer Gebiete und deren Bezug zur Schulmathematik erläutern. Sie sind in der Lage, mathematische Probleme planvoll, strategisch und unter Verwendung geeigneter Werkzeuge zu lösen sowie mathematische Beweise nachzuvollziehen und zu entwickeln. Die Absolventinnen und Absolventen können sich aufgrund ihres Überblickwissens grundlegende aktuelle Fragen der Mathematik erschließen und können diese kritisch hinterfragen. Ihr vertieftes Wissen können sie für die Entwicklung und Lösung eigener Ansätze einsetzen und sie können aus allgemeinen Konzepten der Mathematik konkrete Fragestellungen ableiten, analysieren, beweisen und interpretieren. Die Absolventinnen und Absolventen können die Resultate ihrer Arbeit ggf. vor einem wissenschaftlichen Publikum sowohl schriftlich als auch mündlich präsentieren, erläutern und vertiefend diskutieren. Sie haben gelernt, sich eigenständig neues Fachwissen anzueignen und sind dadurch im späteren Berufsleben in der Lage, sich neue mathematische Theorien, die Eingang in die Schulmathematik erhalten, zu erschließen.

Die Studierenden verknüpfen ihr fachwissenschaftliches Wissen mit didaktischen Methoden, setzen geeignete Medien ein und können theoretische Konzepte und empirische Befunde der mathematikbezogenen Lehr-Lern-Forschung nutzen, um in Ansätzen Denkprozesse und Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zu analysieren und individuelle Lernprozesse anzuleiten. Sie kennen und

bewerten die Konzepte für das schulische Mathematiklernen und -lehren auf der Basis fachdidaktischer Theorien und empirischer Befunde. Sie können grundlegend Mathematikunterricht mit heterogenen Lerngruppen auf der Basis fachdidaktischer Konzepte analysieren, planen und exemplarisch durchführen. Die Studierenden werden in die Lage versetzt, den allgemeinbildenden Gehalt mathematischer Inhalte und Methoden sowie die gesellschaftliche Bedeutung der Mathematik zu begründen und in den Zusammenhang mit den Zielen und Inhalten des Mathematikunterrichts zu stellen.

1.2 Struktur des Studiengangs

Die Regelstudienzeit für den Abschluss Master of Education Lehramt Gymnasium beträgt vier Semester, im Fach Mathematik sind 28 Leistungspunkte zu erbringen. Je nachdem ob der Einstieg zum Winter- oder zum Sommersemester erfolgt, ist das erste oder zweite Fachsemester weitgehend durch den Schulpraxisanteil ausgefüllt, der durch eine Fachdidaktikveranstaltung an der Universität begleitet wird. Fachlich findet eine Vertiefung in einem oder mehreren Bereichen der Mathematik durch die Belegung zweier vertiefender Module statt. Dabei haben die Studierenden die Möglichkeit, einen eigenen Schwerpunkt in den am Fachbereich angebotenen Studienschwerpunkten durch den Besuch von Vorlesungen mit Übungen und einem passenden Seminar zu setzen. Das Studium wird mit der Masterarbeit (15 Leistungspunkte) in einer der beiden gewählten Fachwissenschaften (einschließlich ihrer Fachdidaktiken) oder in den Bildungswissenschaften abgeschlossen. Mit dem Master-Abschluss steht den Studierenden (bei Erfüllung eventueller weiterer Voraussetzungen) der Einstieg in das Referendariat, das Berufsleben, in eine Promotion im Bereich der Fachdidaktik der Mathematik oder der Wechsel in ein weiterführendes Studium offen.

Einen Studienanteil an einer ausländischen Hochschule sinnvoll ins Lehramtsstudium zu integrieren, ist eine Herausforderung, da es gilt, zwei Fächer und die Bildungswissenschaften zu koordinieren; sei es, dass versucht wird, Anteile in allen Bereichen während des Aufenthaltes an der anderen Hochschule zu erbringen, oder sei es, dass versucht wird, das Studium an der Universität Tübingen so zu gestalten, dass Teile des Studiums in andere Semester verschoben werden, um Freiräume zu schaffen, so dass an der anderen Hochschule nicht in allen drei Bereichen Leistungen erbracht werden müssen. Hinzu kommt erschwerend, dass ein Semester durch den Praxisanteil weitgehend blockiert ist. Entsprechend ist es essentiell, dass ein sinnvolles Zeitfenster für einen Studienanteil an einer ausländischen Hochschule in einem persönlichen Beratungsgespräch mit der Studienfachberaterin oder dem Studienfachberater geplant wird. Grundsätzlich kommt aus Sicht der Mathematik hierfür jedes Fachsemester infrage. Die Entscheidung wird im Einzelnen von den bereits erbrachten Leistungen der oder des Studierenden und dem Angebot an der gewählten ausländischen Hochschule abhängen.

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.

EFS	Modul-nummer	Modultitel	Art der Veran-staltungen	Art des Moduls	Studien-leistung	Prü-fungs-form	ECTS-Punkte
Abschnitt 1: Mathematik							
2	MAT-40-51	Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1	V+Ü	PMW	ÜN	K o. mP	9
3	MAT-40-52	Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 2	V+Ü	PMW	ÜN	K o. mP	9
4	MAT-40-53	Seminar Vertiefung Mathematik	S	PMW	s.M.	R	4
Abschnitt 2: Fachdidaktik Mathematik							
1-2	MAT-80-03	Fachdidaktik Mathematik 3	S+SV	PMW	-	K, mP, R, H, P. o. T.	6
Abschnitt 3: Masterarbeit							
4	MAT-40-54	Masterarbeit (Mathematik)	MA	PM	s.M.	MA	15

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, T=semesterbegleitende Tests
Lehrform : V=Vorlesung, SV=Seminar oder Vorlesung, Ü=Übungen, S=Seminar, IC=Inverted Classroom
Studienleistung : ÜN=Übungsnachweis
Sonstiges : o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, EFS=empfohlenes Fachsemester

2.2 Übersicht nach Studienverlauf

Wir geben zunächst eine Übersicht über den möglichen Studienverlauf in Form einer Tabelle sowohl für den Einstieg im Wintersemester als auch für den Einstieg im Sommersemester.

Studienverlaufsplan bei Studienbeginn im Wintersemester				
FS	**LP**	**Mathematik**	**Fachdidaktik Mathematik**	**Masterarbeit**
1	3		Fachdidaktik 3 (6 LP)	
2	12	Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1 (9 LP)		
3	9	Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 2 (9 LP)		
4	4 + (15)	Seminar Vertiefung Mathematik (4 LP)		Masterarbeit (15 LP)
Erläuterung der Abkürzungen: FS=Fachsemester, LP=Leistungspunkte (ECTS-Punkte)				

Abbildung 2.1: Studienverlaufsplan bei Studienbeginn im Wintersemester

Studienverlaufsplan bei Studienbeginn im Sommersemester				
FS	**LP**	**Mathematik**	**Fachdidaktik Mathematik**	**Masterarbeit**
1	12	Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1 (9 LP)	Fachdidaktik 3 (6 LP)	
2	3			
3	9	Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 2 (9 LP)		
4	4 + (15)	Seminar Vertiefung Mathematik (4 LP)		Masterarbeit (15 LP)
Erläuterung der Abkürzungen: FS=Fachsemester, LP=Leistungspunkte (ECTS-Punkte)				

Abbildung 2.2: Studienverlaufsplan bei Studienbeginn im Sommersemester

2.3 Übersicht Studienaufbau mit Semesterzuordnung

Übersicht Studienaufbau mit Semesterzuordnung bei Studienbeginn im Wintersemester													
		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
Abschnitt 1: Mathematik									**22**				
Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	9	V	o	4			6		
2.	Übung					Ü	o	2			3		
Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 2								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	9	V	o	4				6	
2.	Übung					Ü	o	2				3	
Seminar Vertiefung Mathematik								2	4				
1.	Seminar	R		b	4	S	o	2					4
Abschnitt 2: Fachdidaktik Mathematik									**6**				
Fachdidaktik 3								4	6				
1.	Seminar	K o. mP o. R o. H	90-180 o. 20-30	b	3	S	o	2		3			
2.	Seminar / Vorlesung	K o. mP o. R o. H	90-180 o. 20-30	b	3	SV	o	2			3		
Abschnitt 3: Masterarbeit									**15**				
Masterarbeit									15				
1.	Masterarbeit	MA		b		MA	o						15

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem : b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform : MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit
Lehrform : V=Vorlesung, SV=Seminar oder Vorlesung, Ü=Übungen, T=Repetitorium, P=Praktikum, PS=Proseminar, S=Seminar
Status : o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges : o.=oder, SWS=Semesterwochenstunden, LP=Leistungspunkte=ECTS-Punkte

Übersicht Studienaufbau mit Semesterzuordnung bei Studienbeginn im Sommersemester

		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
Abschnitt 1: Mathematik									**22**				
Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	9	V	o	4		6			
2.	Übung					Ü	o	2		3			
Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 2								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	9	V	o	4				6	
2.	Übung					Ü	o	2				3	
Seminar Vertiefung Mathematik								2	4				
1.	Seminar	R		b	4	S	o	2					4
Abschnitt 2: Fachdidaktik Mathematik									**6**				
Fachdidaktik 3								4	6				
1.	Seminar	K o. mP o. R o. H	90-180 o. 20-30	b	3	S	o	2			3		
2.	Seminar / Vorlesung	K o. mP o. R o. H	90-180 o. 20-30	b	3	SV	o	2		3			
Abschnitt 3: Masterarbeit									**15**				
Masterarbeit									15				
1.	Masterarbeit	MA		b		MA	o						15

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem : b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform : BA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit
Lehrform : V=Vorlesung, SV=Seminar oder Vorlesung, Ü=Übungen, T=Repetitorium, P=Praktikum, PS=Proseminar, S=Seminar
Status : o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges : o.=oder, SWS=Semesterwochenstunden, LP=Leistungspunkte=ECTS-Punkte

3 Modulbeschreibungen

Abschnitt 1: Mathematik

Modulnummer: **MAT-40-51**	**Modultitel:** Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 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	jedes Semester		
Fachsemester	2		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Bemerkung	Es ist eine Lehrveranstaltung aus dem Katalog der Lehrveranstaltungen in Abschnitt 4.1 im Modulhandbuch im Umfang von 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen zu wählen. Über die Zulassung weiterer Lehrveranstaltungen oder anderer Lehrveranstaltungsformate (z.B. zwei Veranstaltungen mit je 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übungen) entscheidet die oder der Vorsitzende des Prüfungsausschusses auf schriftlichen Antrag der oder des Studierenden.		
Modulinhalt	Der Inhalt ergibt sich aus der Wahl der Lehrveranstaltung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben vertieftes Wissen in einem Teilbereich der Mathematik erlangt und weitere Erfahrungen in der Präsentation und Vermittlung mathematischer Themen gesammelt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und die Techniken ihrer Herleitung und Beweisführung wiederzugeben und kritisch zu hinterfragen. Zudem können sie die methodischen und theoretischen Grundlagen des gewählten mathematischen Teilbereichs miteinander verknüpfen und in den mathematischen Kontext einordnen. 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.		

	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe Bemerkung	V	o	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	o	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 ist ggf. Voraussetzung für die Module Seminar Vertiefung Mathematik und Masterarbeit.									
Teilnahmevoraussetzungen	-									
Modulverantwortliche	Die Studiendekanin oder der Studiendekan des Fachbereichs Mathematik									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem : b=benotet, nb=nicht benotet

Prüfungsform : MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio, T=semesterbegleitende Tests

Lehrform : V=Vorlesung, SV=Seminar oder Vorlesung, Ü=Übungen, S=Seminar, IC=Inverted Classroom

Status : o=obligatorisch, f=fakultativ

Sonstiges : h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-40-52**	**Modultitel:** Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 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	jedes Semester		
Fachsemester	3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Bemerkung	Es ist eine Lehrveranstaltung aus dem Katalog der Lehrveranstaltungen in Abschnitt 4.1 im Modulhandbuch im Umfang von 4 SWS Vorlesung und 2 SWS Übungen zu wählen. Über die Zulassung weiterer Lehrveranstaltungen oder anderer Lehrveranstaltungsformate (z.B. zwei Veranstaltungen mit je 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übungen) entscheidet die oder der Vorsitzende des Prüfungsausschusses auf schriftlichen Antrag der oder des Studierenden.		
Modulinhalt	Der Inhalt ergibt sich aus der Wahl der Lehrveranstaltung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben vertieftes Wissen in einem Teilbereich der Mathematik erlangt und weitere Erfahrungen in der Präsentation und Vermittlung mathematischer Themen gesammelt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und die Techniken ihrer Herleitung und Beweisführung wiederzugeben und kritisch zu hinterfragen. Zudem können sie die methodischen und theoretischen Grundlagen des gewählten mathematischen Teilbereichs miteinander verknüpfen und in den mathematischen Kontext einordnen. 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.		

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
siehe Bemerkung	V	o	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	o	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 ist ggf. Voraussetzung für die Module Seminar Vertiefung Mathematik und Masterarbeit.
Teilnahme-voraussetzungen	-
Modul-verantwortliche	Die Studiendekanin oder der Studiendekan des Fachbereichs Mathematik

Erläuterung der Abkürzungen:

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

Modulnummer: **MAT-40-53**	**Modultitel:** Seminar Vertiefung Mathematik		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	4		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	jedes Semester		
Fachsemester	4		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Seminar, Vortrag, Präsentation, E-Learning, Blended Learning		
Modulinhalt	Verschiedene Themen aus den weiterführenden Bereichen der Mathematik.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erarbeiten sich eigenständig ein zusammenhängendes Thema der Mathematik und bereiten dies in einer didaktisch ansprechenden Form vor. Sie lernen, ihre Arbeit vor einer Gruppe zu präsentieren, auf sachliche Fragen einzugehen und eine fachliche Diskussion zu führen. Die Arbeit und der Vortrag können die Grundlage für ein vertieftes Studium innerhalb einer Masterarbeit sein.		

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	4	ja	R	60-90	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 und Diskussionsbeiträgen oder durch die 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	-
Teilnahme-voraussetzungen	Die Teilnahme am Modul setzt den erfolgreichen Abschluss mindestens eines der Module Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1 oder 2 voraus.
Modul-verantwortliche	Die Studiendekanin oder der Studiendekan des Fachbereichs Mathematik

Erläuterung der Abkürzungen:

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

Abschnitt 2: Fachdidaktik Mathematik

Modulnummer: **MAT-80-03**	**Modultitel:** Fachdidaktik Mathematik 3		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	2 Semester		
Häufigkeit des Angebots	jedes Semester		
Fachsemester	1-2		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung, Übung, Seminar, Vortrag, Präsentation, E-Learning, Blended Learning, Projektarbeit, Fallstudien		
Modulinhalt	Im ersten Teil werden wechselnde Themen behandelt, die insbesondere einen verstärkten Professionsbezug haben und der didaktischen Begleitung und Aufarbeitung des Praxissemesters dienen. Im zweiten Teil werden wechselnde Themen der Fachdidaktik Mathematik behandelt, die bis zur aktuellen Forschung in der Fachdidaktik führen können.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden • kennen fachdidaktische Prinzipien und Unterrichtskonzepte und können sie bewerten und hinterfragen, • können fachliche Zugänge zu zentralen Begriffen und Sätzen der behandelten Gebiete vergleichen und beurteilen, • können kompetenzorientierten Mathematikunterricht auf der Basis fachdidaktischer Konzepte planen, durchführen, analysieren und bewerten, • können den allgemeinbildenden Gehalt mathematischer Inhalte und Methoden und die gesellschaftliche Bedeutung der Mathematik begründen und in den Zusammenhang mit Zielen und Inhalten des Mathematikunterrichts stellen, • können gezielt fachspezifische Medien anwenden, • können ein Portfolio anlegen und bedeutsame Erfahrungen, Erkenntnisse und Einsichten strukturiert dokumentieren.		

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
	Fachdidaktik 3: Professions-wissen	S	o	2	3	ja	K, mP, R, H, P. o. T.	90-180 o. 20-30	b	50
	Fachdidaktik 3: Wahlbereich	SV	o	2	3	ja	K, mP, R, H, P. o. T.	90-180 o. 20-30	b	50
	Das Modul besteht aus zwei Teilen (Professionswissen und Wahlbereich), bei denen sowohl die Lehr-Lernform (Vorlesung, Übung oder Seminar) als auch die Prüfungsform (Klausur, mündliche Prüfung, Referat, Portfolio, semesterbegleitende Tests oder Hausarbeit) in der Regel unterschiedlich ist. Dem wird dadurch Rechnung getragen, dass sich die Prüfungsleistung in diesem Modul aus zwei Teilen zusammensetzt, die gleich gewichtet werden.									
Verwendbarkeit	-									
Teilnahme-voraussetzungen	Für die Teilnahme am Modul gibt es keine Voraussetzungen.									
Modul-verantwortliche	Frank Loose, Walther Paravicini									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem : b=benotet, nb=nicht benotet

Prüfungsform : MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio, T=semesterbegleitende Tests

Lehrform : V=Vorlesung, SV=Seminar oder Vorlesung, Ü=Übungen, S=Seminar, IC=Inverted Classroom

Status : o=obligatorisch, f=fakultativ

Sonstiges : h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Abschnitt 3: Masterarbeit

Modulnummer: **MAT-40-54**	**Modultitel:** Masterarbeit (Mathematik)		**Art des Moduls:** Pflichtmodul
ECTS-Punkte	15		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 450 h	Kontaktzeit: regelmäßig, nach Bedarf	Selbststudium: 450 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	jedes Semester		
Fachsemester	4		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Masterarbeit		
Modulinhalt	Die Masterarbeit bildet den Abschluss des Masterstudiums. Die Studierenden haben unter Anleitung durch eine Betreuerin oder einen Betreuer eine begrenzte Aufgabenstellung aus dem Fach Mathematik (einschließlich der Fachdidaktik), die bis an die aktuelle Forschung heranführen kann, mit wissenschaftlichen Methoden zu bearbeiten und schriftlich 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 und ggf. mündliche Darstellung des Projekts und der Ergebnisse im Kontext des aktuellen Forschungsstandes. Die Ergebnisse sollen zur wissenschaftlichen Erkenntnis beitragen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden • sind in der Lage, sich innerhalb einer vorgegebenen Frist in eine Problemstellung, die bis an die aktuelle Forschung heranreichen kann, einzuarbeiten und eigenständig einen Lösungsansatz zu entwickeln, • können geeignete wissenschaftliche Methoden zunehmend selbständig anwenden und die Ergebnisse in wissenschaftlich angemessener Form darstellen, • können ein wissenschaftliches Thema selbständig bearbeiten und dabei ihr mathematisches Methodenwissen anwenden, • vertiefen ihre Problemlösekompetenz und können ihr Methodenwissen transferieren, • können die Ergebnisse ihres Projektes einem Fachpublikum präsentieren.		

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	-	15	ja	MA	-	b	100
	Als Studienleistung findet ein Prüfungsgespräch zu den Inhalten der Masterarbeit statt. Die Studienleistung wird mit bestanden oder nicht bestanden bewertet. Die Modulnote ist die Note der Masterarbeit. Das Modul ist nur bestanden, wenn die Prüfungsleistung und die Studienleistung erfolgreich erbracht sind.									
Verwendbarkeit	-									
Teilnahme-voraussetzungen	Fachliche Zulassungsvoraussetzung für die Zulassung zum Modul Masterarbeit ist neben den im Allgemeinen Teil der Studien- und Prüfungsordnung genannten Voraussetzungen der erfolgreiche Abschluss mindestens eines der Module Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1 oder 2.									
Modul-verantwortliche	Die Studiendekanin oder der Studiendekan des Fachbereichs Mathematik									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem : b=benotet, nb=nicht benotet

Prüfungsform : MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio, T=semesterbegleitende Tests

Lehrform : V=Vorlesung, SV=Seminar oder Vorlesung, Ü=Übungen, S=Seminar, IC=Inverted Classroom

Status : o=obligatorisch, f=fakultativ

Sonstiges : h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

4 Lehrveranstaltungen für das Modul Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik

4.1 Katalog der Lehrveranstaltungen

Im Folgenden werden die Lehrveranstaltungen aufgelistet, die in den Modulen Vertiefung spezielle Gebiete der Mathematik 1 und 2 eingebracht werden können. Weitere Lehrveranstaltungen können auf schriftlichen Antrag an die Vorsitzende oder den Vorsitzenden des Prüfungsausschusses genehmigt werden.

- Algebraische Kurven und Riemannsche Flächen 21
- Algebraische Topologie 1 22
- Algebraische Zahlentheorie 23
- Algorithmen der Numerischen Mathematik 23
- Automorphe Formen 24
- Bayessche Netzwerke und Kausalität 25
- Darstellungstheorie endlicher Gruppen 27
- Einführung in Dynamische Systeme 31
- Einführung in Geometrische Maßtheorie 32
- Einführung in Geometrische Maßtheorie – Maßtheoretische Methoden 33
- Einführung in Geometrische Maßtheorie – Varifaltigkeiten 33
- Einführung in Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie 34
- Einführung in Partielle Differentialgleichungen 35
- Einführung in Partielle Differentialgleichungen – Teil 1 36
- Einführung in Riemannsche Flächen 37
- Einführung in Stochastische Differentialgleichungen - Teil 1 37
- Einführung in die Analytische Zahlentheorie 27
- Einführung in die Berkovich Geometrie 28

- Einführung in die Mathematische Logik 29
- Einführung in die Mengenlehre 30
- Einführung in die Optimierung 30
- Elementare Zahlentheorie 38
- Elliptische Kurven und Kryptographie 39
- Explizite Mathematik 40
- Finanzmathematik und Numerik 41
- Funktionalanalysis 42
- Geometrie von Mannigfaltigkeiten 1 43
- Geometrische Gruppentheorie 43
- Geometry in Physics 44
- Gewöhnliche Differentialgleichungen - Analysis und Numerik 45
- Graphentheorie 46
- Groups and Representations 47
- Hyperbolische Geometrie: axiomatisch, spiegelungsgeometrisch, algebraisch 48
- Informationsgeometrie 48
- Informationstheorie, Mustererkennung und neuronale Netze 49
- Interacting Many-Body Quantum Systems 50
- Kommutative Algebra 51
- Konvexe Geometrie 52
- Kryptographie 53
- Lie-Gruppen 54
- Lineare Kontrolltheorie 55
- Mathematische Aspekte der 3d Computervision 56
- Mathematische Aspekte des Deep Learning 1 57
- Mathematische Beweistheorie 57
- Mathematische Einführung in Data Science 58
- Mathematische Statistik 59
- Nicht-parametrische Schätzung von Verteilungen 60

- Numerik stationärer Differentialgleichungen 61
- Numerik stochastischer Differentialgleichungen 61
- Optimale Kontrolle mit Gewöhnlichen Differentialgleichungen 62
- Optimaler Transport 63
- Optimierung mit Differentialgleichungen 64
- Problemlösestrategien 64
- Propagation des Chaos 65
- Software-Obsfuskierung: Gemischte boolesch-arithmetische Ausdrücke 66
- Spieltheorie 67
- Statistisches Lernen 1 68
- Stochastische Differentialgleichungen 68
- Theoretical Aspects of Machine Learning 69
- Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben 70
- Topologie 71
- Tropische Enumerative Geometrie 71
- Tropische Enumerative Geometrie - Teil 1 72
- Variationsrechnung 73
- Wahrscheinlichkeitstheorie 74
- Widerspruchsfreiheitsbeweise 75
- Zahlentheorie und Kryptographie 76

Veranstaltungstitel:	Algebraische Kurven und Riemannsche Flächen		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.		

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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Daniele Agostini, Ivo Radloff

Veranstaltungstitel:	Algebraische Topologie 1		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Mengentheoretische Topologie. • Grundlagen der Kategorientheorie. • Die Fundamentalgruppe eines punktierten topologischen Raumes. • Überlagerungstheorie. • Grundlagen der singulären Homologietheorie. • Anwendungen.		
Spezielle Qualifikationsziele	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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Anton Deitmar, Frank Loose		

Veranstaltungstitel:	Algebraische Zahlentheorie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Ganzzahlringe. • Klassenzahlen. • Der Dirichletsche Einheitensatz. • Erweiterungen von Dedekindringen. • Bewertungstheorie. • Lokale Körper.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der algebraischen Zahlentheorie kennengelernt.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen, • MAT-20-03 / MAT-20-06 Einführung in Galoistheorie.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Daniele Agostini, Anton Deitmar		

Veranstaltungstitel:	Algorithmen der Numerischen Mathematik		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		

Inhalt	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.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der algorithmischen Numerischen Mathematik kennengelernt.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-11 / MAT-20-13 Numerik.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Christian Lubich, Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Automorphe Formen		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle 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.		

Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen, • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis, • MAT-20-03 / MAT-20-06 Einführung in Galoistheorie.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Anton Deitmar

Veranstaltungstitel:	Bayessche Netzwerke und Kausalität		
Studienschwerpunkt	Stochastik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 115 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		

Inhalt	Ungewissheit ist eine Tatsache, und eine robuste künstliche Intelligenz für reale Anwendungen muss in der Lage sein, damit umzugehen. Daher war die Entwicklung mathematischer Darstellungen, die Wahrscheinlichkeiten effektiv einbeziehen, ein wichtiger Schritt in der Entwicklung der künstlichen Intelligenz. Das menschliche Verstehen geht jedoch weiter als das: Wir gehen über die Beobachtung von Ereignissen wie *Wenn der Rasensprenger in meinem Gewächshaus an ist, sind die Pflanzen nass* oder *Wenn die Pflanzen nass sind, ist der Rasensprenger an* hinaus und postulieren eine Beziehung von Ursache und Wirkung: *Wenn ich den Rasensprenger einschalte, werden die Pflanzen nass, aber wenn ich die Pflanzen gieße, wird das den Rasensprenger sicher nicht aktivieren*. In diesem Kurs werden Bayessche Netzwekre untersucht, die eine weit verbreitete Darstellung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind. Insbesondere werden gängige Inferenz- und Lernalgorithmen diskutiert. Darüber hinaus wird gezeigt, dass Bayessche Netzwerke nicht nur Wahrscheinlichkeitsverteilungen darstellen, sondern auch in der Lage sind, kausale Beziehungen auszudrücken. Schließlich wird die kausale Expressivität von Bayesschen Netzwerken untersucht, mit dem Ziel, kausale Strukturen aus Beobachtungsdaten zu lernen. • Teil I: Bayessche Netzwerke als effiziente Repräsentation von Wahrscheinlichkeitsverteilungen: – Berechnung von Wahrscheinlichkeiten mit Bayesschen Netzwerken. – d-Separation: Ein grafisches Kriterium für probabilistische Unabhängigkeit. – Parameter- und Strukturlernen in Bayesschen Netzwerken. • Teil II: Bayessche Netzwerke als Repräsentation für kausales Wissen: – Funktionale Kausalmodelle: Eine Repräsentation von kausalem Wissen. – Pearls Kausalleiter: Vorhersage der Auswirkungen externer Interventionen und Argumentation mit kontrafaktischen Fakten. – Kausale Bayessche Netzwerke. – Kausale Strukturentdeckung: Lernen von kausalen Beziehungen aus Daten. – Kontrafaktische Identifizierbarkeit: Beantwortung kontrafaktischer. Fragen mit kausalen Bayesschen Netzwerken.
Spezielle Qualifikationsziele	Im ersten Teil des Kurses haben die Studierenden gelernt, wie Bayessche Netzwerke Wahrscheinlichkeitsverteilungen darstellen und wie diese Darstellung zur effizienten Berechnung von Wahrscheinlichkeiten oder zur Bestimmung, ob zwei Zufallsvariablen unabhängig sind, verwendet werden kann. Im zweiten Teil haben die Studierenden gelernt, Inferenzaufgaben in der künstlichen Intelligenz gemäß Pearls Kausalleiter zu unterscheiden: probabilistisches, intervenierendes und kontrafaktisches Schließen, die im Allgemeinen immer detaillierteres Wissen erfordern. Sie sind mit Identifizierbarkeitsergebnissen vertraut, die Annahmen liefern, unter denen bestimmte Anfragen auf der Kausalleiter nur mit Wissen aus niedrigeren Ebenen beantwortet werden können. Sie wissen, wie man Fragen zu den Auswirkungen externer Interventionen beantworten kann, wenn man nur die korrekte Wahrscheinlichkeitsverteilung kennt, die oft aus Beobachtungsdaten geschätzt werden kann.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-12 Stochastik.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Judea Pearl: Causality: Models, Reasoning and Inference. Cambridge University Press 2009.
Veranstaltungs-verantwortliche	Stephan Eckstein

Veranstaltungstitel:	Darstellungstheorie endlicher Gruppen		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Gruppen und Gruppenwirkungen. • Darstellungen, Irreduzibilität, Schursches Lemma. • Halbeinfachheit, Satz von Maschke. • Charaktere, Orthogonalitätsrelationen. • Isotypische Zerlegung, Charaktertafeln. • Darstellungen der symmetrischen Gruppe. • halbeinfache Artinsche Algebren.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden lernen in der Vorlesung die Grundzüge der Darstellungstheorie und entwickeln ein Verständnis für das Zusammenwirken geometrischer und algebraischer Methoden.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Jürgen Hausen, Thomas Markwig		

Veranstaltungstitel:	Einführung in die Analytische Zahlentheorie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		

Inhalt	• Arithmetische Funktionen und Dirichlet-Reihen, • Primzahlsatz und Dirichletscher Primzahlsatz, • Nullstellen der Riemannschen Zetafunktion, Riemann-Hypothese und die Explizite Formel.
Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-05 Einführung in Funktionentheorie.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Komaravolu Chandrasekharan: Introduction to Analytic Number Theory. Springer 1968.
Veranstaltungs-verantwortliche	Anton Deitmar

Veranstaltungstitel:	Einführung in die Berkovich Geometrie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Inhalt	• Nicht-Archimedische Körper, Bewertungen, und Betragsfunktionen. • Ultra-metrische Dreiecksangleichung und induzierte Topologie. • Affinoide Bereiche. • Berkovich affine und projektive Gerade. • Analytifizierung algebraischer Varietäten.		
Spezielle 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.		

Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen, • MAT-20-03 / MAT-20-06 Einführung in Galoistheorie.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Annette Werner: Nichtarchimedische Geometrie. Vorlesungsskript.
Veranstaltungs-verantwortliche	Hannah Markwig

Veranstaltungstitel:	Einführung in die Mathematische Logik		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 115 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• Aussagenlogik. • Sprachen erster Stufe: – Vollständigkeit und Kompaktheit. • Berechenbarkeitstheorie: – Registermaschinen; – Gödelisierung. • Unvollständigkeit der Arithmetik: – Erster und zweiter Unvollständigkeitssatz. • Mengenlehre: – Ordinal- und Kardinalzahlen; – Unvollständigkeit der Mengenlehre.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine Voraussetzungen.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Rautenberg, Wolfgang: Einführung in die Mathematische Logik. Vieweg+Teubner 2008. • Ziegler, Martin: Mathematische Logik. Birkhäuser 2016.		

Veranstaltungs-verantwortliche	Anton Deitmar

Veranstaltungstitel:	Einführung in die Mengenlehre		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Inhalt	**Inhalte:** •		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden können		
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** •		
Veranstaltungs-verantwortliche	Frank Loose		

Veranstaltungstitel:	Einführung in die Optimierung		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 3 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• 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.		

Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Christian Lubich

Veranstaltungstitel:	Einführung in Dynamische Systeme		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Inhalt	• Die Keplerschen Gesetze. • Gleichgewichtslagen. • Stabilität. • Räuber-Beute-Modell. • Satz von Poincaré-Bendixson. • Limesmengen. • Periodische Bahnen. • Himmelsmechanik.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-05 Einführung in Gewöhnliche Differentialgleichungen.		

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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Frank Loose

Veranstaltungstitel:	Einführung in Geometrische Maßtheorie		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Maße, Überdeckungssätze, Differentiation von Maßen, Hausdorff-Maße und -Dichten. • Isodiametrische Ungleichung. • Sätze von Rademacher und Whitney. • Flächen- und Koflächenformel. • Abzählbar rektifizierbare Mengen, rektifizierbare Varifaltigkeiten.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Reiner Schätzle		

Veranstaltungstitel:	Einführung in Geometrische Maßtheorie – Maßtheoretische Methoden		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• Maße, Überdeckungssätze, Differentiation von Maßen, Hausdorff-Maße und -Dichten. • Isodiametrische Ungleichung. • Sätze von Rademacher und Whitney.		
Spezielle 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 maßtheoretischen Methoden der Geometrischen Maßtheorie kennengelernt und können diese Methoden in den weitergehenden Veranstaltungen erfolgreich anwenden.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Reiner Schätzle		

Veranstaltungstitel:	Einführung in Geometrische Maßtheorie – Varifaltigkeiten		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• Flächen- und Koflächenformel. • Abzählbar rektifizierbare Mengen, rektifizierbare Varifaltigkeiten.		

Spezielle 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 grundlegende Begriffe, Ergebnisse und Methoden der Geometrischen Maßtheorie kennengelernt und können diese Methoden in den weitergehenden Veranstaltungen erfolgreich anwenden.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Reiner Schätzle

Veranstaltungstitel:	Einführung in Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig im Wintersemester (im Wechsel mit dem Modul MAT-45-02)		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	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.		

Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen, • MAT-20-03 / MAT-20-06 Einführung in Galoistheorie.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Daniele Agostini, Jürgen Hausen

Veranstaltungstitel:	Einführung in Partielle Differentialgleichungen		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Harmonische Funktionen. • Maximumprinzipien. • Sobolev-Räume. • L^2-Theorie. • Wichtige Beispiele (Laplace-Gleichung, Wellengleichung, Wärmeleitungsgleichungen). • Fundamentallösungen (elliptische Situation). • Schwache Lösungen elliptischer Gleichungen.		
Spezielle 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.		

Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Gerhard Huisken, Reiner Schätzle

Veranstaltungstitel:	Einführung in Partielle Differentialgleichungen – Teil 1		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• Harmonische Funktionen. • Maximumprinzipien. • Sobolev-Räume.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Gerhard Huisken, Reiner Schätzle		

Veranstaltungstitel:	Einführung in Riemannsche Flächen		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-05 Einführung in Funktionentheorie.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Anton Deitmar, Reiner Schätzle		

Veranstaltungstitel:	Einführung in Stochastische Differentialgleichungen - Teil 1
Studienschwerpunkt	Numerik

Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• Einführung in Brownsche Bewegung und stochastische Integration. • Lösungskonzepte für stochastische Differentialgleichungen. • Stabilität stochastischer Differentialgleichungen. • Numerische Approximation stochastischer Differentialgleichungen.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur Konstruktion von Lösungen stochastischer Differentialgleichungen.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis, • MAT-20-12 Stochastik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Bernt Oksendal: Stochastic differential equations. Springer 2000.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl		

Veranstaltungstitel:	Elementare Zahlentheorie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		

Inhalt	• Teilbarkeit in den ganzen Zahlen. • Primzahlen. • Kongruenzen. • Quadratische Reste. • Arithmetische Funktionen. • Multiplikative Funktionen. • Klassische Sätze. • Anwendungen.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden vertiefen Grundkenntnisse über die ganzen Zahlen und erleben das Anwenden auf mathematische Probleme unterschiedlicher Art.
Teilnahme-voraussetzungen	Es werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Friedhelm Padberg: Elementare Zahlentheorie. Spektrum Akademischer Verlag 2001. • Stefan Mueller-Stach, J. Piontkowski: Elementare und algebraische Zahlentheorie. Vieweg 2006.
Veranstaltungs-verantwortliche	Thomas Markwig

Veranstaltungstitel:	Elliptische Kurven und Kryptographie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		

Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen, • MAT-20-03 / MAT-20-06 Einführung in Galoistheorie, • MAT-20-04 / MAT-20-05 Einführung in Funktionentheorie.
Literatur	**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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Thomas Markwig

Veranstaltungstitel:	Explizite Mathematik		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Applikative Theorien. • Explizite Mathematik. • Universen in expliziter Mathematik. • Anwendungen in der Beweistheorie.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit einem alternativen logischen Theorierahmen für Arithmetik und Subsysteme der Analysis vertraut und kennen deren Funktion in beweistheoretischen Untersuchungen.		
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.		

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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Reinhard Kahle

Veranstaltungstitel:	Finanzmathematik und Numerik		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	Der Kurs bietet eine umfassende Einführung in die mathematischen Modelle und numerischen Techniken, die für das Verständnis und die Lösung von Problemen im modernen Finanzwesen unerlässlich sind. Der Kurs befasst sich mit stochastischen Prozessen, der Modellierung von Zufallsphänomenen auf den Finanzmärkten und den numerischen Methoden, die für die Annäherung von Lösungen komplexer Finanzgleichungen erforderlich sind. Zu den Hauptthemen gehören die Mathematik hinter den Preisbildungsmodellen für Derivate, wie z. B. das Black-Scholes-Modell, und die Verwendung der stochastischen Kalkulation (SDE-Theorie) im Risikomanagement und in der Portfoliooptimierung. Durch die Integration von Theorie und numerischer Praxis überbrückt dieser Kurs die Kluft zwischen Finanzmathematik und realen Anwendungen und stattet die Studierenden mit den quantitativen Fähigkeiten aus, die sie für eine Karriere in den Bereichen quantitative Finanzen, Risikoanalyse und Financial Engineering benötigen.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen wichtige mathematischen Modelle für die Beschreibung von Problemen der Finanzmathematik und sie können numerische Ansätze zu ihrer Lösungen zielgerichtet anwenden.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-11 / MAT-20-13 Numerik, • MAT-20-12 Stochastik.		

Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Steven Shreve: Stochastic Calculus for Finance. Springer 2005.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Funktionalanalysis		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken der Theorie unendlich-dimensionaler 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.		
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.		

Veranstaltungs-verantwortliche	Anton Deitmar, Reiner Schätzle

Veranstaltungstitel:	Geometrie von Mannigfaltigkeiten 1		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Mannigfaltigkeiten und Untermannigfaltigkeiten. • Vektorfelder und Flüsse. • Metriken, Grundlagen der Riemannschen Geometrie. • Vektorbündel und Zusammenhänge. • Komplexe Strukuren. • Satz von Gauß-Bonnet auf Flächen.		
Spezielle Qualifikationsziele	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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Christoph Bohle, Frank Loose		

Veranstaltungstitel:	Geometrische Gruppentheorie
Studienschwerpunkt	Geometrie

Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Gruppenaktionen auf Graphen, freie Gruppen. • Quasiisometrien. • Wachstumstypen. • Hyperbolische Gruppen. • Enden.		
Spezielle Qualifikationsziele	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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Hannah Markwig		

Veranstaltungstitel:	Geometry in Physics		
Studienschwerpunkt	Mathematische Physik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig im Wintersemester		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	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.		

Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Christoph Bohle, Carla Cederbaum, Stefan Teufel

Veranstaltungstitel:	Gewöhnliche Differentialgleichungen - Analysis und Numerik		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Nichtlineare gewöhnliche Differentialgleichungen: Sätze von Hartman-Grobman und Poincare-Bendixson, Bifurkationstheorie. • Numerische Approximation: lineare Mehrschrittverfahren, adaptive Verfahren, geometrische Integration.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis, • MAT-20-11 / MAT-20-13 Numerik. Kenntnisse aus den folgenden Modulen sind hilfreich, aber nicht zwingend notwendig: • MAT-70-01 Algorithmen der Numerischen Mathematik.		

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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Graphentheorie		
Studienschwerpunkt	Stochastik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.		
Literatur	**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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Elmar Teufl		

Veranstaltungstitel:	Groups and Representations		
Studienschwerpunkt	Mathematische Physik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Stefan Keppeler		

Veranstaltungstitel:	Hyperbolische Geometrie: axiomatisch, spiegelungsgeometrisch, algebraisch		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen. Kenntnisse aus den folgenden Modulen sind hilfreich, aber nicht zwingend notwendig: • MAT-20-06 Einführung in Geometrie.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Hermann Hähl, Hannah Markwig		

Veranstaltungstitel:	Informationsgeometrie		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		

Inhalt	• 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).
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden haben ein elementares Verständnis davon, wie man Konzepte der Differentialgeometrie auf Probleme der Informationstheorie und Statistik anwenden kann.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Christoph Bohle

Veranstaltungstitel:	Informationstheorie, Mustererkennung und neuronale Netze		
Studienschwerpunkt	Stochastik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		

Inhalt	• Einführung in die Informationstheorie: – Die Möglichkeit der zuverlässigen Kommunikation über unzuverlässige Kanäle. Der Hamming-Code und Wiederholungskodes. • Entropie und Datenkompression: – Entropie, bedingte Entropie, gegenseitige Information, Shannon Informationsgehalt. Die Idee der Typizität und die Verwendung von typischen Mengen für die Quellencodierung. Shannons Theorem der Quellencodierung. Codes für die Datenkompression. Eindeutig dekodierbare Codes und die Kraft-MacMillan-Ungleichung. Vollständigkeit eines Symbolcodes. Präfix-Codes. Huffman-Codes. Arithmetische Kodierung. • Kommunikation über verrauschte Kanäle: – Definition der Kanalkapazität. Kapazität eines binären symmetrischen Kanals; eines binären Löschkanals; eines Z-Kanals. Gemeinsame Typizität, Zufallscodes und Shannons Theorem der Codierung verrauschter Kanäle. Reale Kanäle und praktische Fehlerkorrekturcodes. Hash-Codes. • Statistische Inferenz, Datenmodellierung und Mustererkennung: – Die Likelihood-Funktion und der Satz von Bayes. Clustering als Beispiel. • Approximation von Wahrscheinlichkeitsverteilungen: – Laplace Methode. (Approximation von Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch Gaußsche Verteilungen.) Monte Carlo Methoden: Importance Sampling, Rejection Sampling, Gibbs Sampling, Metropolis Methode. (Slice sampling, Hybrid Monte Carlo, Overrelaxation, exact sampling.) Variationsmethoden und Mean Field Theory. Ising-Modelle. • Neuronale Netze und inhaltsadressierbare Speicher: – Das Hopfield-Netzwerk.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit den grundlegenden Konzepten der Informationstheorie - wie Entropie und Kodierung verrauschter Kanäle - vertraut und wissen, wie diese bei der Berechnung und Annäherung von Wahrscheinlichkeiten angewendet werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-12 Stochastik.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • David J.C. MacKay: Information Theory, Inference, and Learning Algorithms. CUP 2003.
Veranstaltungs-verantwortliche	Stephan Eckstein

Veranstaltungstitel:	Interacting Many-Body Quantum Systems		
Studienschwerpunkt	Mathematische Physik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		

Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS
Inhalt	• Bosonen und Fermionen. • Bose-Einstein Kondensation. • Mean-field Theorie. • Nichtlineare Schrödingergleichung. • Hartree- and Hartree-Fock-Gleichung. • Bogoliubov Näherung.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden kenn den Unterschied zwischen Fermionen und Bosonen und deren Auswirkungen auf Vielteilchensysteme. Sie verstehen, dass bei kalten Temperaturen die Fluktuationen der Teilchenzahl in einem bestimmten Bereich für Fermionen deutlich unterdrückt sind. Sie verstehen, wie die bosonische Natur zum berühmten Effekt der Bose-Einstein-Kondensation führt und dass wechselwirkende Vielteilchensysteme in bestimmten Skalierungsregimen in guter Näherung durch nichtlineare Evolutionsgleichungen beschrieben werden können. Schließlich sind sie in der Lage, Korrekturen höherer Ordnung zu bestimmen und die Korrelationen führender Ordnung zwischen den Teilchen zu berechnen.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Elliott H. Lieb, Robert Seiringer, Jan Philip Solovej, Jakob Yngvason: The Mathematics of the Bose Gas and its Condensation. Birkhäuser 2000. • Niels Benedikter , Marcello Porta , Benjamin Schlein: Effective Evolution Equations from Quantum Dynamics. Springer 2016.
Veranstaltungs-verantwortliche	Peter Pickl

Veranstaltungstitel:	Kommutative Algebra		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig im Wintersemester (im Wechsel mit dem Modul MAT-45-01)		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		

Inhalt	• 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.
Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen, • MAT-20-03 / MAT-20-06 Einführung in Galoistheorie.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Daniele Agostini, Thomas Markwig

Veranstaltungstitel:	Konvexe Geometrie		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		

Inhalt	• Kegel, Polytope, Polyeder, Fächer, Polyederkomplexe. • Normalenfächer von Polygonen. • Triangulierungen, Unterteilungen, Sekundärfächer, Diskriminanten.
Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Günter M. Ziegler: Lectures on Polytopes. Springer 1998.
Veranstaltungs-verantwortliche	Hannah Markwig

Veranstaltungstitel:	Kryptographie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• Kurze Wiederholung zentraler Begriffe und Resultate aus Algebra und Zahlentheorie. • Historische Chiffren und deren Kryptoanalyse (Caesar, Vigenere, Substitution); Verschlüsselungsverfahren. • Diffie-Hellman-Verfahren und schnelle Exponentiation. • Diskrete Logarithmen: Shanks Algorithmus und Pollards Rho-Methode. • RSA-Verfahren: Korrektheit, Sicherheit und Angriffe. • Signaturverfahren.		

Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen die grundlegenden Begriffe und Ergebnisse der elementaren Zahlentheorie und Algebra sowie deren Anwendung in der Kryptographie. Sie können die behandelten Verfahren in Python bzw. SageMath exemplarisch umsetzen und wissen, worauf dabei zu achten ist. Anhand klassischer Chiffren verstehen sie typische Stärken und Schwächen; sie beherrschen das Diffie-Hellman-Verfahren und kennen die Man-in-the-Middle-Attacke. Sie können diskrete Logarithmen in zyklischen Gruppen berechnen, verstehen das RSA-Verfahren und können die Empfehlungen des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) einordnen. In verschiedenen Angriffszenarien sind sie in der Lage, bei fehlenden Voraussetzungen Schwachstellen des RSA-Verfahrens aufzuzeigen. 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. Die Übungen sind zentraler Bestandteil und unterstützen die Studierenden dabei, eigenständig und praxisnah zu arbeiten - insbesondere mit CAS-Systemen wie SageMath.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Jeffrey Hoffstein, Jill Pipher, Joseph H. Silverman: An introduction to mathematical cryptography. Springer 2008. • Christian Karpfinger, Hubert Kiechle: Kryptologie, Algebraische Methoden und Algorithmen, Vieweg 2010. • Dan Boneh, Victor Shoup: A Graduate Course in Applied Cryptography. 2023 (online Version: https://toc.cryptobook.us/). • Jonathan Katz, Yehuda Lindell: Introduction to Modern Cryptography. Chapman and Hall/CRC 2020.
Veranstaltungs-verantwortliche	Thomas Markwig

Veranstaltungstitel:	Lie-Gruppen		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		

Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen, • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-04 Integration auf Untermannigfaltigkeiten des $\mathbb{R}^n$.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Anton Deitmar, Frank Loose

Veranstaltungstitel:	Lineare Kontrolltheorie		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.		

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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Rainer Nagel

Veranstaltungstitel:	Mathematische Aspekte der 3d Computervision		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Grundlagen der projektiven Geometrie. • Visuelle Odometrie. • Klassische SLAM (Simultaneous Location and Mapping) Methoden und Deep Learning Varianten. • Computerexperimente unter Benutzung des Robot Operating Systems (ROS2).		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die mathematischen Grundlagen der 3d Computer Vision kennengelernt. Sie sind mit modernen Architekturen und den daraus resultierenden mathematischen Fragestellungen vertraut.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-12 Stochastik. Darüber hinaus sind Kenntnisse des Deep Learning erforderlich, wie sie etwa im Modul MAT-50-14 vermittelt werden.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Richard Hartley, Andrew Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press 2003. • Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox: Probabilistic Robotics. MIT Press 2005. • Luca Carlone, Ayoung Kim, Timothy D. Barfoot, Daniel Cremers, Frank Dellaert: SLAM Handbook: From Localization and Mapping to Spatial Intelligence. Cambridge University Press 2026.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Christoph Bohle		

Veranstaltungstitel:	Mathematische Aspekte des Deep Learning 1		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Inhalt	• Künstliche neuronale Netze und deren Training mittels Backpropagation/Stochastischem Gradientenabstieg. Wahrscheinlichkeitsbasierte Interpretation. Mathematische Fragestellungen in der Wissenschaft neuronaler Netze. • Klassische Architekturen für Computer Vision (CNNs) und sequenzielle Daten (RNNs). (Selbst-)überwachtes Lernen. • Transformer-Modelle, eine moderne Architektur basierend auf dem Attention-Mechanismus und deren Anwendungen in der natürlichen Sprachverarbeitung (GPT) und der Computer Vision. • Einfache neurowissenschaftliche Modelle für neuronale Netze. Biologische Plausibilität von Backpropagation und Transformern.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die Grundlagen der Informationsverarbeitung mittels künstlicher neuronaler Netze und biologisch plausiblere Alternativen kennen gelernt. Sie sind mit modernen Architekturen und den daraus resultierenden mathematischen Fragestellungen vertraut.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-12 Stochastik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville: Deep Learning. MIT 2016. • Simon J. D. Price: Understanding Deep Learning. MIT Press 2023. • Christopher M. Bishop, Hugh Bishop: Deep Learning - Foundations and Concepts. Springer 2024.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Christoph Bohle		

Veranstaltungstitel:	Mathematische Beweistheorie		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		

Inhalt	• Axiomatische Theorien, Unvollständigkeit. • Gentzens Konsistenzbeweis für die Arithmetik. • Ordinalzahlanalyse. • Beweisbar rekursive Funktionen. • Prädikative Analysis. • Theorien induktiver Definitionen.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit den Methoden und Resultaten der modernen Beweistheorie vertraut, insbesondere mit Kalkülen zu mathematischen Theorien und deren metamathematischen Eigenschaften.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Wolfram Pohlers. Proof Theory. Springer 2009.
Veranstaltungs-verantwortliche	Reinhard Kahle

Veranstaltungstitel:	Mathematische Einführung in Data Science		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	Der Vorlesung bietet einen mathematisch fundierten Überblick über die wichtigsten Techniken der Datenwissenschaft, von Regression und k-nächsten Nachbarn bis hin zu hochdimensionalen Phänomenen, Dimensionsreduktion und modernen Klassifizierern (Perzeptron, SVMs, Kernel-Methoden, neuronale Netze). Der Schwerpunkt liegt sowohl auf den theoretischen Grundlagen als auch auf der praktischen Python-Implementierung mit realen Datensätzen.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden können lineare, polynomiale und logistische Regressionsmodelle formulieren und lösen. Sie sind in der Lage, die k-nächste-Nachbar-Klassifizierung zu implementieren sowie weitere Klassifizierer (Perzeptron, SVM (Kernel-Methoden), Neuronale Netze) zu erstellen und zu evaluieren. Darüber hinaus wissen sie, wie man konvexe Ziele mit Hilfe von Gradientenabstiegstechniken optimiert.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-12 Stochastik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Sven A. Wegner: Mathematical Introduction to Data Science. Springer 2024.		

Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Mathematische Statistik		
Studienschwerpunkt	Stochastik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden können statistische Zusammenhänge mathematisch modellieren. Sie können statistische Schätz- und Testmethoden mathematisch konstruieren, analysieren, vergleichen und anwenden sowie deren Ergebnisse interpretieren.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-12 Stochastik. Kenntnisse aus den folgenden Modulen sind hilfreich, aber nicht zwingend notwendig: • MAT-75-01 Wahrscheinlichkeitstheorie.		
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.		

Veranstaltungs-verantwortliche	Martin Möhle, Elmar Teufl

Veranstaltungstitel:	Nicht-parametrische Schätzung von Verteilungen		
Studienschwerpunkt	Stochastik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 115 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	Dieser Kurs behandelt eine grundlegende Fragestellung der Statistik: Gegeben seien n Beobachtungen eines unbekannten Zufallsvektors. Wie gut lassen sich daraus die tatsächlichen Eigenschaften dieses Zufallsvektors, insbesondere seine Wahrscheinlichkeitsverteilung, erschließen? Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Rolle der Dimension des Zufallsvektors und den daraus resultierenden Phänomenen, die unter dem Begriff des Fluchs der Dimensionalität (curse of dimensionality) zusammengefasst werden. Darüber hinaus untersuchen wir, wie sich Vorwissen - etwa über Glattheitseigenschaften oder strukturelle Merkmale des Zufallsvektors - nutzen lässt, um die Auswirkungen dieses Fluchs der Dimensionalität zu überwinden. Im Gegensatz zur parametrischen Statistik, bei der angenommen wird, dass die Verteilung zu einer endlichdimensionalen Verteilungsfamilie gehört (beispielsweise bei der Schätzung des Erwartungswerts und der Kovarianzmatrix einer Normalverteilung), konzentriert sich der Kurs ausschließlich auf nichtparametrische Fragestellungen, bei denen eine solche parametrische Form nicht von vornherein vorausgesetzt wird. Diese nichtparametrischen Modelle erfordern geeignete Gütekriterien, die auf Abständen zwischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen beruhen. Behandelt werden sowohl die Dichteschätzung unter Verwendung von Verlustfunktionen vom L^p-Typ als auch die Schätzung bezüglich der Wasserstein-Distanz.		
Spezielle Qualifikationsziele	Das statistische Lernproblem von Verteilungen kann präzise formuliert werden. Die Wichtigkeit der gewählten Metrik und der Dimension der Verteilung ist klar verstanden. Grundlegende Beweisideen, sowohl zu oberen Schranken anhand von expliziten Schätzern, als auch zu unteren Schranken anhand von informationstheoretischen Methoden, werden beherrscht. Es wird strukturell verstanden, dass (und welche) Annahmen notwendig sind, um bessere Konvergenzraten zu erhalten als durch den Fluch der Dimensionen diktiert. In den Übungen wird gezeigt, dass selbstständig zu den behandelten Themen der Vorlesung gearbeitet werden kann.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-12 Stochastik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Alexandre B. Tsybakov: Introduction to Nonparametric Estimation. Springer 2009. • Jonathan Niles-Weed, Quentin Berthet: Minimax estimation of smooth densities in Wasserstein distance. The Annals of Statistics 50.3 (2022): 1519-1540. • Nicolas Fournier, Arnaud Guillin: On the rate of convergence in Wasserstein distance of the empirical measure. Probability Theory and Related Fields 162.3 (2015): 707-738. • Daniel Bartl, Stephan Eckstein: Fast Wasserstein rates for estimating probability distributions of probabilistic graphical models. arXiv:2510.09270 (2025).		

Veranstaltungs-verantwortliche	Stephan Eckstein

Veranstaltungstitel:	Numerik stationärer Differentialgleichungen		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	Numerische Behandlung von Randwertproblemen stationärer (d.h. zeitunabhängiger) gewöhnlicher und elliptischer partieller Differentialgleichungen, schwerpunktmäßig Verfahren der finiten Elemente.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der numerischen Behandlung von Randwertproblemen stationärer Differentialgleichungen kennengelernt.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-05 Einführung in Gewöhnliche Differentialgleichungen, • MAT-20-11 / MAT-20-13 Numerik. Kenntnisse aus den folgenden Modulen sind hilfreich, aber nicht zwingend notwendig: • MAT-70-01 Algorithmen der Numerischen Mathematik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Dietrich Braess: Finite Elemente. Springer Spektrum 2013. • Wolfgang Hackbusch: Theorie und Numerik elliptischer Differentialgleichungen. Teubner 1986.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Christian Lubich		

Veranstaltungstitel:	Numerik stochastischer Differentialgleichungen		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		

Inhalt	• Zufallszahlen-Generatoren, Ito-Taylor-Entwicklung. • Starke und schwache Approximation, Konsistenz. • Euler-Maruyama Verfahren, Milstein-Verfahren, stochastische Runge-Kutta-Verfahren. • Approximation gestoppter Diffusionsprozesse.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur numerischen Approximation von Lösungen stochastischer Differentialgleichungen.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis, • MAT-20-12 Stochastik.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Peter E. Kloeden, Eckhard Platen: Numerical solution of stochastic differential equations. Springer 1999.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Optimale Kontrolle mit Gewöhnlichen Differentialgleichungen		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-05 Einführung in Gewöhnliche Differentialgleichungen.		

Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Matthias Gerdts: Optimal Control of ODEs and DAEs. De Gruyter 2012.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Optimaler Transport		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Die Lehrveranstaltung führt in die Theorie des optimalen Transports an der Schnittstelle von Analysis, Wahrscheinlichkeit und Optimierung ein. Ausgehend von den klassischen Problemen nach Monge und Kantorovich werden die grundlegenden maßtheoretischen und analytischen Werkzeuge behandelt. • Darauf aufbauend werden zentrale Resultate wie Existenz und Dualität optimaler Transportpläne, c-zyklische Monotonie, das Brenier-Theorem sowie die geometrische Struktur von Wasserstein-Räumen vorgestellt. • Im zweiten Teil der Veranstaltung wird die algorithmische Perspektive des optimalen Transports untersucht. Behandelt werden die entropische Regularisierung, der Sinkhorn-Algorithmus sowie ausgewählte Anwendungen, etwa in Bildverarbeitung, Statistik und maschinellem Lernen.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studenten kennen die grundlegenden Begriffe, Methoden und zentralen Resultate der Theorie des optimalen Transports und sind in der Lage, diese in einen mathematischen Gesamtkontext aus Analysis, Wahrscheinlichkeit und Optimierung einzuordnen. Sie können die klassischen Formulierungen nach Monge und Kantorovich sowie wesentliche strukturelle Konzepte wie Dualität, c-zyklische Monotonie und die Wasserstein-Geometrie nachvollziehen und in einfachen Zusammenhängen anwenden. Zudem sind sie mit grundlegenden algorithmischen Ansätzen des optimalen Transports vertraut und können deren Bedeutung für ausgewählte Anwendungen einschätzen. In den Übungen vertiefen sie ihren Umgang mit den Inhalten der Vorlesung, entwickeln ihre Fähigkeit zum präzisen mathematischen Argumentieren weiter und üben die schriftliche und mündliche Darstellung eigener Lösungswege.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 Teilmodule Maß- und Integrationstheorie sowie Integration auf Untermannigfaltigkeiten des $\mathbb{R}^n$. • MAT-20-12 Stochastik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Alessio Figalli, Federico Glaudo: An Invitation to Optimal Transport, Wasserstein Distances, and Gradient Flows. EMS 2023. • Gabriel Peyré, Marco Cuturi: Computational Optimal Transport. Now Publishers 2019.		

Veranstaltungs-verantwortliche	Nicolai Jork, Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Optimierung mit Differentialgleichungen		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur Herleitung von Optimalitätsbedingungen für prototypische Steuerungsprobleme mit Nebenbedingungen in Form von partiellen Differentialgleichungen.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis, • MAT-20-11 / MAT-20-13 Numerik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Michael Hinze, Rene Pinnau, Michael Ulbrich, Stefan Ullrich: Optimization with PDE constraints. Springer 2009.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl		

Veranstaltungstitel:	Problemlösestrategien		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		

Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS
Inhalt	• Basic Tricks and Reductions. • Proofs and Logic. • Sets and Functions. • Elementary Combinatorics. • Counting and Cardinalities. • Pigeonhole Principle aka Box Principle. • Bounding, Estimation, and Inequalities. • Extremal Principle. • Invariance Principle: Invariants and Monovariants. • Colouring Proofs. • Graph-Theoretic Modelling.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden erwerben einen vielseitig einsetzbaren Werkzeugkasten mathematischer und heuristischer Problemlösungsstrategien, auf den sie sowohl im weiteren Studium als auch gegebenenfalls beim wettbewerbsorientierten Lösen mathematischer Probleme zurückgreifen können. Dazu gehören grundlegende Resultate und Beweistechniken ebenso wie typische Strukturmerkmale eines Problems, anhand derer sich geeignete Lösungsansätze erkennen oder ungeeignete Strategien frühzeitig ausschließen lassen.
Teilnahme-voraussetzungen	Es werden Kenntnisse aus der Linearen Algebra und dem Teilmodul Algebraische Strukturen vorausgesetzt.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • George Pólya: How to Solve It: A New Aspect of Mathematical Method. Princeton University Press 1973. • Arthur Engel: Problem-Solving Strategies. Springer 1998.
Veranstaltungs-verantwortliche	Thomas Markwig

Veranstaltungstitel:	Propagation des Chaos		
Studienschwerpunkt	Mathematische Physik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		

Inhalt	• Wechselwirkende Vielteilchensysteme (quantenmechanisch sowie klassisch), Bedeutung der Korrelationen. • Mean-field Situationen (Vlasov) und Kollisionen (Boltzmann). • Explizite Behandlung der Korrelationen. • Große Abweichungen vom Erwartungswert.
Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis, • MAT-20-12 Stochastik.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Peter Pickl

Veranstaltungstitel:	Software-Obsfuskierung: Gemischte boolesch-arithmetische Ausdrücke		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		

Inhalt	• Was ist Software-Obfuskierung und wozu braucht man das? Welche Techniken gibt es und warum ist Deobfuskierung so schwer? Was macht ein Reverse Engineer? Einführende Beispiele. • Mathematische Grundlagen: Ideale in $\mathbb{Z}$, GGT, Euklidischer Algorithmus, Zeitabschätzungen, Ringe und Felder, Berechnungen in Restklassenringne, Permutationen, Matrizen und Determinanten, Lineare Algebra über Ringen. • Boolsche Algebren und Boolsche Funktionen. • Grundlagen Mixed Boolean Arithmetic Expressions (MBA). • Obfuskierung mit MBAs und Permutationspolynomen. • Deobfuskierung mit MBAs; Analyse und Vergleich von state-of-the-art tools und dessen Schwächen. • Deobfuskierung mit Program Synthesis.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen erste Techniken im Bereich Software Obfuskierung und Deobfuskierung und verstehen die dafür notwendigen mathematischen Resultate. Sie können diese sicher anwenden.
Teilnahme-voraussetzungen	Es werden Kenntnisse aus der Linearen Algebra und dem Teilmodul Algebraische Strukturen vorausgesetzt.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Yongxin Zhou, Andrew Main, Yuxin Gu, Harrison Johnson. Information Hiding in Software with Mixed Boolean-Arithmetic Transforms. In: International Workshop on Information Security Applications (WISA). Springer, 2007, pp. 6175. • Bernhard Reichenwallner, Peter Meerwald-Stadler. Ecient Deobfuscation of Linear Mixed Boolean-Arithmetic Expressions. In: Proceedings of the 15th ACM Workshop on Articial Intelligence and Security (AISec 2022). ACM, 2022, pp. 119130.
Veranstaltungs-verantwortliche	Thomas Markwig

Veranstaltungstitel:	Spieltheorie		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Inhalt	Im Zentrum der Betrachtung stehen Nash- und verallgemeinerte Nash-Gleichgewichtsprobleme sowie ihre numerische Lösung.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen die grundlegenden Fragestellungen der Spieltheorie. Sie sind vertraut mit analytischen und numerischen Ansätzen zu deren Untersuchung.		
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.		

Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Christian Kanzow, Alexandra Schwartz: Spieltheorie. Birkhaeuser 2018.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Statistisches Lernen 1		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• Nicht-Parametrische Regression, Regressionsschätzer. • (Universelle) Konsistenz. • Ratenkonvergenz. • Satz von Stone. • Kernschätzer, k-NN-Schätzer. • Slow-Rate-Konvergenz, Minimax-Konvergenzraten.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-12 Stochastik.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Laslo Györfi, Michael Kohler, Adam Krzyzak, Harro Walk: A distribution-free theory of nonparametric regression. Springer 2002.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl		

Veranstaltungstitel:	Stochastische Differentialgleichungen		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h

Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig
Unterrichtssprache	Deutsch
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS
Inhalt	• 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.
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur Konstruktion von Lösungen stochastischer Differentialgleichungen.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis, • MAT-20-12 Stochastik.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Bernt Oksendal: Stochastic differtial equations. Springer 2000.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Theoretical Aspects of Machine Learning		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	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.		

Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-12 Stochastik.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben		
Studienschwerpunkt	Numerik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-11 / MAT-20-13 Numerik.		

Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Carl Geiger, Christian Kanzow: Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben. Springer 2002.
Veranstaltungs-verantwortliche	Andreas Prohl

Veranstaltungstitel:	Topologie		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.		
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.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Ulrich Groh, Rainer Nagel		

Veranstaltungstitel:	Tropische Enumerative Geometrie
Studienschwerpunkt	Geometrie

Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.		
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Grigory Mikhalkin, Johannes Rau: Tropical geometry. Manuscript 2018.		
Veranstaltungs-verantwortliche	Hannah Markwig		

Veranstaltungstitel:	Tropische Enumerative Geometrie - Teil 1		
Studienschwerpunkt	Geometrie		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		

Inhalt	• 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.
Spezielle 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.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.
Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Grigory Mikhalkin, Johannes Rau: Tropical geometry. Manuscript 2018.
Veranstaltungs-verantwortliche	Hannah Markwig

Veranstaltungstitel:	Variationsrechnung		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Inhalt	• Direkte Methode der Variationsrechnung. • Euler-Lagrange Gleichungen. • Palais-Smale Bedingung. • Mountain-Pass Lemma nach Ambrosetti-Rabinowitz.		
Spezielle 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.		

Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-04 / MAT-20-04 Aufbauende Pflichtmodule Analysis.
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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Reiner Schätzle

Veranstaltungstitel:	Wahrscheinlichkeitstheorie		
Studienschwerpunkt	Stochastik		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig im Wintersemester		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	Die Studierenden können maßtheoretisch fundiert grundlegende stochastische Abhängigkeitsstrukturen von Zufallsgrößen wahrscheinlichkeitstheoretisch modellieren, analysieren und interpretieren.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-20-01 Maß- und Integrationstheorie, • MAT-20-12 Stochastik.		

Literatur	**Exemplarische Literatur :** • Heinz Bauer: Wahrscheinlichkeitstheorie und Grundzüge der Maßtheorie. De Gruyter 2010. • Richard Durrett: Probability, Theory and Examples. Cambridge University Press 2019. • Hans-Otto Georgii: Stochastik. De Gruyter 2009. • Jean Jacod, Philip E. Protter: Probability essentials. Springer 2004. • Olav Kallenberg. Foundations of Modern Probability. Springer 2021. • Achim Klenke: Wahrscheinlichkeitstheorie. Springer 2020. • David Meintrup, Stefan Schäffler: Stochastik. Springer 2005. • Albert N. Shiryaev: Probability-1. Springer 2016.
Veranstaltungs-verantwortliche	Martin Möhle, Elmar Teufl

Veranstaltungstitel:	Widerspruchsfreiheitsbeweise		
Studienschwerpunkt	Analysis		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle Qualifikationsziele	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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden vorausgesetzt.		

Literatur	**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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Reinhard Kahle

Veranstaltungstitel:	Zahlentheorie und Kryptographie		
Studienschwerpunkt	Algebra		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Inhalt	• 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.		
Spezielle 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.		
Teilnahme-voraussetzungen	Neben Kenntnissen aus dem Modul Grundlagen der Mathematik (MAT-10-10) werden Kenntnisse aus den folgenden (Teil-)Modulen des Bachelorstudiengangs vorausgesetzt: • MAT-10-12 / MAT-20-06 Algebraische Strukturen.		

Literatur	**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.
Veranstaltungs-verantwortliche	Thomas Markwig