

Zusatz zum Modulhandbuch

für den Master Studiengang Quantum Engineering

Mit Modulbeschreibungen zu zusätzlichen Veranstaltungen gem. § 6 der Studienordnung für den Master Studiengang Quantum Engineering vom 27. Februar 2020

**zusammengestellt für die Fachrichtungen Physik und Systems Engineering
der Universität des Saarlandes**

RS-Sem	Modul	CP	SWS
Zusätzliche Veranstaltungen Studiengang Master Quantum Engineering PO 2020 (gemäß §6 der Studienordnung für den Master-Studiengang Quantum Engineering vom 27.Februar.2020)			
3	Angewandte Optik und Photonik	5	4
3	Applied Quantum Information Theory: Quantum Algorithms and quantum error correction	5	4
3	Optik für Fortgeschrittene – Advanced Optics	5	4
3	Nichtlineare Optik	5	4
3	Digitales Datenmanagement für die Ingenieurwissenschaften	4	3

Modul Angewandte Optik und Photonik: Optische Technologien in Industrie, Telekommunikation und Medizin					Abk. AOP
Studiensem. 1,3	Regelstudiensem. 3	Turnus Wintersemester	Dauer 1 Semester	SWS 4	ECTS-Punkte 5

Modulverantwortlicher	Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Martin Straub
Dozent	Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Martin Straub
Zuordnung zum Curriculum	Physikalische Wahlpflicht Bachelor- und Master Physik, Biophysikalische Wahlpflichtveranstaltung Master Biophysik, Allgemeine Wahlpflicht Master Quantum Engineering
Zulassungsvoraussetzungen	Keine formalen Voraussetzungen
Leistungskontrollen / Prüfungen	Klausur oder mündliche Prüfung
Lehrveranstaltungen / SWS	3 SWS Vorlesung, 1 SWS Seminar
Arbeitsaufwand	45 h Vorlesung, 45 h Vor- und Nachbereitung, 15 h Seminar, 45 h Vorbereitung des Seminarvortrags
Modulnote	Note der Prüfung

Lernziele/Kompetenzen

- Vertieftes Verständnis von Licht-Materie-Wechselwirkung, Strahlquellen und Detektoren, Design und Eigenschaften optischer Systeme, Fourier-optischen Methoden, optischer Sensorik und Messtechnik, Faseroptik, hochauflösender optische Mikroskopie und Lithographie, Mikro- und Nanooptik.
- Fähigkeit zur Beurteilung und Planung der praktischen Anwendung optischer Technologien
- Berechnung optischer Problemstellungen anhand komplexer Feld- und Materialgrößen
- Eigenständige Erarbeitung und Präsentation aktueller Forschungsthemen in Optik und Photonik anhand englischsprachiger Fachliteratur

Inhalt

- Radiometrie und Photometrie: Physikalische Größen und lichttechnischer Einsatz
- Licht-Materie Wechselwirkung in Dielektrika, Halbleitern und Metallen: Dispersion, Absorption, Streuprozesse. Polarisation, Dichroismus und Doppelbrechung, Flüssigkristall-Devices
- Strahlquellen und Detektoren in unterschiedlichen Spektralbereichen
- Design und Eigenschaften optischer Komponenten und Systeme: Adaptive Optik, dicke und asphärische Linsen, Gradient-Index-Optiken, Strahlverlaufsberechnung, Aberrationen
- Fourier-Optik und Kohärenztheorie, Anwendungen in Mikroskopie und Astronomie
- Optische Sensorik und Messtechnik: 3D-Formen, Vibration, Temperatur, Feuchtigkeit u.a.
- Faseroptik und optische Breitband-Telekommunikation
- Hochauflösende optische Fern- und Nahfeldmikroskopie, optische Überauflösungstechniken
- Projektions- und Laserrasterlithographie, optische 2D- und 3D-Nanostrukturierung
- Mikro-, Nano- und integrierte Optik, Plasmonik, photonische Kristalle und all-optische Devices

Weitere Informationen: Vorlesungsfolien in englischer Sprache

Unterrichtssprache: Deutsch, auf Wunsch Englisch

Literaturhinweise:

- [1] E. Hecht: **Optics**, 5th Global Edition, Pearson Higher Education, 2016, ISBN 978-1-292-09693-3;
E. Hecht, **Optik**, 7. Auflage, Reihe De Gruyter Studium, 2018, ISBN 978-3-11-052664-6
- [2] E. Hering, R. Martin: **Photonik**, Springer Verlag, 2006, ISBN 978-3-540-23438-8
- [3] J. Jahns, K.-H. Brenner: **Microoptics**, Springer Verlag, 2004, ISBN 0-387-20980-8
- [4] L. Novotny, B. Hecht: **Principles of Nano-Optics**, Cambridge UP., 2006, ISBN 978-0-521-83224-3

Modul Applied Quantum Information Theory: Quantum Algorithms and quantum error correction					Abk. AQIS
Studiensem. 1,2	Regelstudiensem. 2	Turnus	Dauer 1 Semester	SWS 4	ECTS-Punkte 5

Modulverantwortliche/r	Orth
Dozent/inn/en	Orth, Wilhelm-Mauch, Morigi
Zuordnung zum Curriculum	Teilmodul zum Modul Physikalische Wahlpflicht (PWP)
Zulassungsvoraussetzungen	Keine formalen Voraussetzungen
Leistungskontrollen / Prüfungen	Klausuren oder mündliche Prüfungen, Präsentation und Aufschrieb, Übungsaufgaben
Lehrveranstaltungen / SWS	3 SWS Vorlesungen, 1 SWS Übung
Arbeitsaufwand	Vorlesungen 15 Wochen à 3 SWS = 45 Stunden Übung 15 Wochen à 1 SWS = 15 Stunden
Modulnote	Vor- und Nachbereitung Vorlesung, Bearbeitung der Übungsaufgaben, Klausur- oder Prüfungsvorbereitung, Bearbeitung des kurzen Forschungsprojekts: 90 Stunden Mittelwert der Noten aus den Klausuren bzw. mündlichen Prüfungen, der Präsentation und dem Aufschrieb des kurzen Forschungsprojekts und den Übungsaufgaben

Lernziele/Kompetenzen

- Verständnis wichtiger Quantenalgorithmen
- Verständnis von Quantenfehlervermeidung und Quantenfehlerkorrektur
- Erlangung der technischen Kompetenz zur Programmierung von Quantencomputern
- Verständnis von Originalliteratur in diesem Gebiet
- Understanding of important quantum computing algorithms
- Understanding of quantum error mitigation and quantum error correction
- Practical knowledge of quantum computer programming
- Ability to comprehend original research literature in the field

Inhalt

- NISQ quantum algorithms: hybrid quantum-classical algorithms, variational quantum algorithms
- important quantum algorithm primitives: quantum Fourier transform, linear combination of unitaries (LCU), algorithms for optimization and Hamiltonian simulation
- quantum noise tomography: state tomography, gate tomography, gate set tomography
- quantum error mitigation: noise-agnostic and noise-aware error mitigation
- quantum error correction: stabilizer formalism, surface code, other error correction schemes
- practical implementation of quantum computing algorithms, tomography, error mitigation and correction using open source software packages and toolkits

Weitere Informationen

Unterrichtssprache: englisch

Literaturhinweise: Werden in der Vorlesung bekannt gegeben.

Modul Optik für Fortgeschrittene – Advanced Optics					Abk. AO
Studiensem. 1,3	Regelstudiensem. 3	Turnus Wintersemester	Dauer 1 Semester	SWS 4	ECTS-Punkte 5

Modulverantwortlicher	Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Martin Straub
Dozent	Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Martin Straub
Zuordnung zum Curriculum	Physikalische Wahlpflicht Bachelor- und Master Physik, Biophysikalische Wahlpflichtveranstaltung Master Biophysik, Allgemeine Wahlpflicht Master Quantum Engineering
Zulassungsvoraussetzungen	Keine formalen Voraussetzungen
Leistungskontrollen / Prüfungen	Klausur oder mündliche Prüfung
Lehrveranstaltungen / SWS	3 SWS Vorlesung, 1 SWS Seminar
Arbeitsaufwand	45 h Vorlesung, 45 h Vor- und Nachbereitung, 15 h Seminar, 45 h Vorbereitung des Seminarvortrags
Modulnote	Note der Prüfung

Lernziele/Kompetenzen

- Vertiefte Kenntnisse von Grundlagen und Anwendungen in den folgenden Bereichen:
 - Licht-Materie Wechselwirkung in Dielektrika, Halbleitern und Metallen
 - Design und Eigenschaften moderner optischer Systeme und Komponenten
 - Fourier-Methoden in der Optik
 - Hochauflösende optische Mikroskopie
 - Optische Lithographie, optische Nanostrukturierung, Mikro- und Nanooptik
- Einen besonderen Schwerpunkt bildet die nichtlineare Optik und ihre Anwendungen:
 - Lichterzeugung und –ausbreitung in nichtlinearen Medien
 - Nichtlinear-optische Spektroskopie
 - Optisch-induzierte transiente und stationäre Materialveränderungen
 - Nichtlineare Optik von Oberflächen, in Wellenleitern und in Plasmen
- Berechnung optischer Problemstellungen anhand komplexer Feld- und Materialgrößen
- Eigenständige Erarbeitung und Präsentation aktueller optischer Forschungsthemen

Inhalt

Lichtausbreitung in Materie: Dispersion, Absorption; Polarisierung: Dichroismus, Doppelbrechung u.a.
 Optische Komponenten und Systeme: Adaptive Optik, dicke Linsen, Strahlverlaufsberechnung, Aberrationen. Strahlquellen und Detektoren. Fourier-Optik und Kohärenztheorie. Optische Sensorik und Messtechnik. Lithographie, Holographie, optische Nanostrukturierung. Mikro-, Nano-, integrierte Optik.
Nichtlineare Optik: Wellenausbreitung in nichtlinearen Medien, nichtlineare Suszeptibilitäten, elektro- und magneto-optische Effekte, opt. Frequenzverdopplung, Summen- und Differenzfrequenzerzeugung, parametrische Verstärkung/Oszillation, stimulierter Ramaneffekt, Zwei-Photonen-Absorption, Spektroskopie, Kerr-Effekte, Selbstfokussierung und -phasenmodulation, transiente opt. Effekte, starke Licht-Materie-WW, Laserisotopentrennung. Nichtlineare Optik von Oberflächen, Wellenleitern und Plasmen.

Weitere Informationen: Vorlesungsfolien in englischer Sprache

Unterrichtssprache: Deutsch, auf Wunsch Englisch

Literaturhinweise:

- [1] E. Hecht: **Optics**, 5th Global Edition, Pearson Higher Education, 2016;
 E. Hecht, **Optik**, 7. Auflage, Reihe De Gruyter Studium, 2018,
 [2] Y. R. Shen, **The Principles of Nonlinear Optics**, Wiley, 2003.

Modul					Abk.
Nichtlineare Optik					NLO
Studiensem.	Regelstudiensem.	Turnus	Dauer	SWS	ECTS-Punkte
2	2	Sommersemester	1 Semester	4	5

Modulverantwortlicher	Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Martin Straub
Dozent	Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Martin Straub
Zuordnung zum Curriculum	Physikalische Wahlpflicht Bachelor- und Master Physik, Biophysikalische Wahlpflichtveranstaltung Master Biophysik, Allgemeine Wahlpflicht Master Quantum Engineering
Zulassungsvoraussetzungen	Keine formalen Voraussetzungen
Leistungskontrollen / Prüfungen	Klausur oder mündliche Prüfung
Lehrveranstaltungen / SWS	3 SWS Vorlesung, 1 SWS Seminar
Arbeitsaufwand	45 h Vorlesung, 45 h Vor- und Nachbereitung, 15 h Seminar, 45 h Vorbereitung des Seminarvortrags
Modulnote	Note der Prüfung

Lernziele/Kompetenzen

- Vertiefte Kenntnisse von Grundlagen (Experimente, Theorie) und Anwendungen nichtlinearer Optik
 - Verständnis grundlegender Unterschiede zwischen linearer und nichtlinearer Optik
 - Kenntnis in der linearen Optik nicht existenter optischer Effekte und ihrer technischen Bedeutung
 - Verständnis der Rolle nichtlinearer Optik in wichtigen Anwendungsgebieten wie optische Telekommunikation, hochauflösende Mikroskopie und Lithographie sowie Lasertechnologie
- Beherrschung der klassischen, semi-klassischen und teilweise auch quantenelektrodynamischen Behandlung nichtlinear-optischer Prozesse
- Eigenständige Erarbeitung und Präsentation aktueller nichtlinear-optischer Forschungsthemen

Inhalt

Wellenausbreitung und Wellenkopplung in nichtlinearen Medien; nichtlineare Suszeptibilitäten, ihre quantenphysikalische Darstellung und Symmetrien, Snellius-Gesetz der nichtlinearen Optik, Lichtfelder an Grenzflächen nichtlinearer Medien. Elektro- und magneto-optische Effekte, optische Frequenzverdopplung und höhere Harmonische, Summen- und Differenzfrequenzerzeugung, parametrische Verstärkung und Oszillation, stimulierter Raman-Effekt, Zwei- und Multiphotonen-Absorption. Nichtlinear-optische Spektroskopie: Quantum Beats, Sättigungsspektroskopie, dopplerfreie Zwei-Photonen-Absorptionsspektroskopie, Ramsey-Fringes. Vier-Wellen-Mischung, CARS, phasenkonjugierte Spiegel. Optisch induzierte Doppelbrechung, Kerr-Effekte, optische Bistabilität, Selbstfokussierung und Selbstphasenmodulation. Transiente optische Effekte: Optische Bloch-Gleichung, transiente Nutation, freier Induktionszerfall, Photonenechos, adiabatische Besetzungsinversion, selbstinduzierte Transparenz, Superfluoreszenz. Starke Licht-Materie Wechselwirkung. Laserisotopentrennung, Einzelmolekülspektroskopie. Nichtlineare Optik von Oberflächen, in Wellenleitern und Plasmen.

Weitere Informationen: Vorlesungsfolien in englischer Sprache

Unterrichtssprache: Deutsch, auf Wunsch Englisch

Literaturhinweise: [1] Y. R. Shen, **The Principles of Nonlinear Optics**, Wiley, 2003. [2] R. W. Boyd, **Nonlinear Optics**, Elsevier, 2008. [3] Y. V. G. S. Murti, C. Vijayan, **Physics of Nonlinear Optics**, 2nd ed., Springer, 2021. [4] G. New, **Introduction to Nonlinear Optics**, Cambridge University Press, 2011. [5] G. Agrawal, **Nonlinear Fiber Optics**, Elsevier, 2012. [6] M. Wegener, **Extreme Nonlinear Optics**, Springer, 2004. [7] Speziellere aktuelle Fachbücher, Übersichtsartikel und Publikationen.

Modul					Abk.
Digitales Datenmanagement für die Ingenieurwissenschaften					DDMI
Studiensem.	Regelstudiensem.	Turnus	Dauer	SWS	ECTS-Punkte
1	6	WS/SS	1 Semester	3	4

Modulverantwortliche/r	Prof. Dr. Andreas Schütze	
Dozent/inn/en	Prof. Dr. Kathrin Flaßkamp, Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki, Prof. Dr. Andreas Schütze, Tizian Schneider, Christian Fuchs, Franziska Louia, Markus Herrmann-Wicklmayr	
Zuordnung zum Curriculum	Bachelor/Master Systems Engineering, Bachelor/Master Quantum Engineering, (optional MWWT und Physik)	
Zulassungsvoraussetzungen	Keine formalen Voraussetzungen Teilnehmerzahl ist begrenzt, Teilnahme nach Anmelde Reihenfolge	
Leistungskontrollen / Prüfungen	Kurzvorträge, Projektdokumentation, eigenständige Vorbereitung eines Vorlesungsthemas	
Lehrveranstaltungen / SWS	2 h Lehrveranstaltung mit Praxisübungen, Kurzvorträgen, Planspielen etc. 1 h Kleingruppenarbeit	
Arbeitsaufwand	Präsenzveranstaltungen:	45 h
	Einarbeitung und Recherche:	50 h
	Präsentationsvorbereitung:	15 h
	Dokumentation:	10 h
	Gesamt:	120 h
Modulnote	Zusammensetzung aus mehreren Einzelnoten aus Kurzpräsentationen und -demonstrationen, Projektdokumentation und eigenständige Vorbereitung eines Vorlesungsthemas Details werden zu Beginn der Lehrveranstaltung erläutert	

Lernziele/Kompetenzen

In den Ingenieurwissenschaften findet die Wertschöpfung verstärkt in digitalen Artefakten statt. Die dadurch entstehenden Daten werden zunehmend größer, reichhaltiger und komplexer und erfordern daher sorgfältiges Datenmanagement. Neben reinen Mess- und Simulations-Daten, spielen auch Modelle (mathematisch oder algorithmisch) und Software (Programme) eine wichtige Rolle.

Ziel der geplanten Lehrveranstaltung ist es, dass Studierende bereits früh im Studium erfahren, was die Herausforderungen des Datenmanagements sind. Sie sollen sich mit etablierten wie neuen Kriterien zur Datenqualität vertraut machen, sie verstehen, einordnen und unterscheiden können.

Die Studierenden lernen Methoden des Projektmanagements kennen und wenden sie beispielhaft an, sodass sie sie in zukünftigen Projekten in Studium und späterem Berufsleben einsetzen können.

Die Studierenden können Methoden zum Wissensmanagement aufzählen und einordnen, wie diese qualitätssteigernd einzusetzen sind. Sie wenden beispielhaft entsprechende Softwaretools an.

Die Studierenden erarbeiten sich die Inhalte großteils selbst („Flipped classroom“) und erstellen gemeinsam eine „lebende“ Gesamtdokumentation der Lehrveranstaltungsinhalte, somit erwerben sie praktische Erfahrung in Präsentations- und Dokumentationsformen. Schließlich bewerten die Studierenden die jeweiligen Beiträge gegenseitig („peer review“) und üben damit den erforderlichen Perspektivwechsel und das kritische Bewerten wissenschaftlicher Ausarbeitungen.

Inhalt

- Projektmanagement und SCRUM
 - Grundbegriffe
 - Digitale Umsetzung von SCRUM
 - Projektdokumentation
 - Kollaboration im Projekt
 - Tools für Projektmanagement insbesondere mit SCRUM und Praxisbeispiele

- Metadaten für Big-, FAIR- und Open-Data
 - Eigenschaften von Big-, FAIR- und Open-Data
 - Spezifische Anforderungen an Mess- und Simulationsdaten
 - Schutz digitaler Daten
 - Forschungsdatenmanagement
 - Datenqualität
 - Zugehörige Tools und Praxisbeispiele

- Wissensmanagement
 - Wissensmanagement und Dokumentation
 - Ontologien
 - Semantic Web
 - Digitales Laborbuch
 - Regeln guter wissenschaftlicher Praxis
 - Zugehörige Tools und Praxisbeispiele

Weitere Informationen

Die Lehrveranstaltung ist nach dem Prinzip „Flipped Classroom“ konzipiert. Das bedeutet, Student*innen bereiten die zum kommenden Termin gehörenden Inhalte (Theorie, Methoden, Software usw.) vor der Veranstaltung eigenständig anhand von zur Verfügung gestellten Unterlagen vor. Die Veranstaltungstermine selbst sind dann auf Praxis und Anwendung der vorbereiteten Inhalte fokussiert.

Die Lehrveranstaltung ist nach der Einführungsveranstaltung in drei eng verzahnte, aufeinander aufbauende Themenblöcke (Projektmanagement/SCRUM, Metadaten, Wissensmanagement) gegliedert, deren Bearbeitung weitgehend digital durchgeführt wird. Die Teilnehmenden erhalten dafür geeignete Lehrmaterialien und werden durch die Dozent*innen betreut. Den Abschluss eines jeden Blocks bildet ein Review, das in Präsenz stattfindet und der Präsentation bzw. Demonstration der erarbeiteten Themen dient.

An den Reviews und der Lehrveranstaltung selbst sind die Arbeitsgruppen Messtechnik (Prof. Schütze), Modellierung und Simulation technischer Systeme (Prof. Flaßkamp) sowie Smarte Materialsysteme für innovative Produktion (Prof. Motzki) beteiligt, wodurch ein breiter Überblick an Lösungen geboten werden kann.

Die Teilnehmerzahl ist begrenzt, die Teilnahme erfolgt auf Basis der Reihenfolge der Anmeldungen.

Unterrichtssprache: deutsch

Literaturhinweise:

- ROHWEDER, Jan P., et al. Informationsqualität—Definitionen, Dimensionen und Begriffe. In: *Daten- und Informationsqualität*. Vieweg + Teubner, 2008. S. 25-45.
- WILKINSON, Mark D., et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data*, 2016, 3. Jg., Nr. 1, S. 1-9.
- DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft. Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis/Safeguarding Good Scientific Practice, 2013.
- NOY, N., et al. Ontology development 101. *Knowledge Systems Laboratory, Stanford University*, 2001, 2001. Jg.
- SUTHERLAND, J. Die SCRUM Revolution, Campus Verlag, 2015