

# FAKULTÄTSBERICHT 2018-2020

1.1.2018 - 31.12.2020



FRIEDRICH-SCHILLER-  
UNIVERSITÄT  
JENA

## Impressum

<b>Herausgeber:</b>	Dekan der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena Tel.: 03641 9 47000 / Fax: 03641 9 47002 E-Mail: dekanat-paf@uni-jena.de
<b>Redaktion, Layout und Satz:</b>	Dr. Angela Unkroth
<b>Mitarbeit:</b>	Dr. Agnes Sambale
<b>Druck:</b>	Druckzentrum der FSU Jena
<b>Redaktionsschluss:</b>	27. April 2021
<b>Auflage:</b>	60 Stück
<b>Titelfotos:</b>	Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (oben links) Jan-Peter Kasper/Fotozentrum der Friedrich-Schiller-Universität Jena (oben rechts und links unten), Visualisierung einer Simulation: Tim Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno (MPI für Gravitationsphysik) (rechts unten)

Für den Inhalt der Seiten über die einzelnen Arbeitsgruppen (S. 28-139) sind die jeweiligen Lehrstuhlinhaber und Professoren zuständig. Im vorliegenden Bericht wird zur besseren Lesbarkeit teilweise nur die männliche Sprachform verwendet. Die weibliche Form ist selbstverständlich immer mit eingeschlossen. Wir danken Frau Claudia Hilbert von der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät für ihre Unterstützung beim Layout.

**INHALT**

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Die Fakultät im Überblick</b>	<b>4</b>
<b>Forschung</b>	<b>6</b>
Forschungsprofil	6
Drittmittel	7
Beteiligung an Forschungsförderprogrammen	8
Wissenschaftlicher Nachwuchs	12
Publikationen	16
Tagungen	22
Forschungsberichte der Institute	28
Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte	28
Institut für Angewandte Optik und Biophysik	34
Institut für Angewandte Physik	40
Institut für Festkörperphysik	58
Institut für Festkörpertheorie und –optik	72
Institut für Optik und Quantenelektronik	78
Otto-Schott-Institut für Materialforschung	96
Theoretisch-Physikalisches Institut	108
Arbeitsgruppe Fachdidaktik der Physik und Astronomie	124
Gemeinsame Berufungen mit außeruniversitären Institutionen	130
Abbe Center of Photonics	136
Wissenschaftliche Werkstätten/Werkstattverbund	138
<b>Studium und Lehre</b>	<b>140</b>
Studienangebot	140
Studierendenwerbung und Outreach	142
Studieneingangsphase	144
Entwicklung der Studierendenzahlen	146
Abbe School of Photonics	148
Der Fachschaftsrat der Physikalisch-Astronomischen Fakultät	150
Der Alumni der Physikalisch-Astronomischen Fakultät e.V.	152
<b>Gleichstellung</b>	<b>154</b>
<b>Wirtschaft und Kooperationen</b>	<b>156</b>
Die Fakultät und ihre Partner	156
Forschungsmarketing und Forschungstransfer	162
<b>Internationales</b>	<b>165</b>
Gastwissenschaftler	165
Gastaufenthalte im Ausland	169
Internationale Studierende	170
<b>Personalia</b>	<b>171</b>
Berufungen und Pensionierungen	171
Personalstruktur	172
Preise und Ehrungen	173
Mitgliedschaften und Funktionen	178
Professoren A-Z	183
<b>Abkürzungen</b>	<b>188</b>

## VORWORT

Wie bereits in den vergangenen Jahren, haben sie nun den neuen Bericht der Fakultät für Physik und Astronomie vor sich liegen. In diesem Bericht finden sie in komprimierter Form Information über Lehre und Forschung aller Mitglieder der Fakultät im Zeitraum 2018 - 2020. Wenn Sie den Bericht unserer Fakultät kennen, dann werden sie auf den ersten Blick feststellen, beinahe alles so wie immer. Oder fast wie immer. Im Berichtszeitraum konnte die Fakultät neue Professorinnen und Professoren gewinnen, verdiente Kollegen sind in den Ruhestand getreten oder wurden wegberufen. Aber nach diesen quantitativen Veränderungen hat sich auch die Zusammensetzung der Professorenschaft geändert, sie wird zunehmend weiblicher und internationaler. Auch wenn wir hier auf einem guten Weg sind, sind auch weiterhin Anstrengung in diese Richtung erforderlich.

Unsere Anstrengungen der letzten Jahre, wieder mehr Studierende für ein Studium an unserer Fakultät zu gewinnen, haben sich ausgezahlt. Nach einem starken Rückgang der Studienanfängerzahlen im Bachelor und Master Physik in der Mitte des letzten Jahrzehnts sind sie in dem Berichtszeitraum wieder angestiegen und haben sich auf einem erfreulich hohen Stand stabilisiert. Aber auch die Anfängerzahlen im internationalen Masterstudiengang Photonics sowie für das Lehramt sind auf einem erfreulich hohen Niveau. Diese günstigen Zahlen garantieren, dass die Fakultät auch in den nächsten Jahren ausreichend qualifizierte Absolventen für Forschung und Lehre ausbilden kann. Gerade in der Forschung sind wir auch in den nächsten Jahren auf einen stetigen Zugang von neuem und interessiertem Nachwuchs angewiesen. Denn wie in den vergangenen Jahren, konnten die Mitglieder der Fakultät auch in dieser Berichtsperiode eine Vielzahl von spektakulären wissenschaftlichen Erkenntnissen gewinnen, die in den besten internationalen Journalen publiziert wurden. Damit geht einher, dass Drittmittel in einem noch nie da gewesen Ausmaß eingeworben werden konnten. An dieser Stelle möchte ich nur erwähnen, dass 2019 Professor Limpert seinen dritten Grant des European Research Council (ERC) erhalten hat, der Sonderforschungsbereich SFB 1375 „NOA -Nonlinear Optics down to Atomic scales“ bewilligt wurde und es eine starke Beteiligung der PAF am Jenaer Exzellenzcluster „Balance of the Microverse“ gibt. Dass die Mitglieder unserer Fakultät auch national und international wahrgenommen werden, manifestiert sich u.a. in vielen Einladungen zu Konferenzen und Vorträgen sowie den vielen erhaltenen Preisen und Ehrungen.

Was aber bei einem ersten Durchblättern des Berichts ein bisschen verloren geht, sind mehrere tiefgreifende Veränderungen, die in dem Berichtszeitraum stattgefunden haben. Es waren einerseits geplante Änderungen, aber auch unvorhergesehene, wobei alle gemeinsam haben, dass wir deren lang- und mittelfristige Auswirkungen für die Entwicklung der Fakultät noch nicht abschätzen können. Eine einschneidende geplante Änderung war die Inkraftsetzung des neuen Thüringer Hochschulgesetzes zum 1.10.2019. Mit diesem Stichtag wurden alle bestehenden Kommissionen aufgelöst und alle gewählten Funktionsträger haben ihr Amt verloren. Eine der ersten Aufgaben in dieser neuen Ära war die konstituierende Sitzung des neu gewählten Fakultätsrats. Nach den Vorgaben des neuen Gesetzes ist die Zusammensetzung des Fakultätsrats neu geregelt worden. Zwar gibt es nach wie vor noch zehn Professoren im Fakultätsrat, aber bei vielen Entscheidungen sind nur noch drei Professoren stimmberechtigt. Demgegenüber stehen drei Vertreter der Studierenden, drei Vertreter des Mittelbaus und neu sind drei Vertreter der Mitarbeiter aus Technik und Verwaltung. Eine der ersten Aufgaben war, die Fakultät wieder arbeitsfähig zu machen. Dazu gehörte die Einsetzung von Kommissionen, die nach neuen Vorgaben zusammengesetzt wurden, sowie die Wahl des Dekans. Nachdem sich Prof. Wipf bereits zum zweiten Mal für das Amt des Dekans zur Verfügung gestellt hat, wurde seinem Wunsch, nicht mehr zu kandidieren Rechnung getragen. Daher möchten wir an dieser Stelle Prof. Wipf unseren Dank für seine umsichtige Leitung der Fakultät und die gute Vorbereitung für den Übergang in die neue Ära aussprechen. Wie auch immer, die Wahl fiel auf mich und ich wurde kurz darauf von der Universitätsleitung in das Amt des Dekans eingesetzt. Um in dieser Phase des Umbruchs eine gewisse Kontinuität sicherzustellen, haben sich sowohl der Prodekan Prof. Nolte als auch der Studiendekan Prof. Schmidl bereit erklärt, sich für ein weiteres Semester wiederbestellen zu lassen. Auch an diese beiden Kollegen herzlichen Dank für die Sicherstellung des geordneten Übergangs.

Für das Sommersemester 2020 waren weitere Änderungen geplant. Mit Prof. Botti als neu ernannte Studiendekanin war zum ersten Mal in der Geschichte der Fakultät das Leitungsgremium der Fakultät nicht mehr rein männlich besetzt. Das Amt des Prodekans nahm Prof. Gies an, um im Dekanat sowohl Theorie als auch Experiment angemessen zu vertreten. Aufgrund der zunehmenden Belastung des Studiendekanats wurde auch das vor einigen Jahren abgeschaffte Amt des





Foto: Annegret Günther

Studienprodekanen wieder eingeführt und Prof. Wyrowski konnte für dieses Amt gewonnen werden. Somit waren nun alle Leitungsfunktionen entsprechend dem neuen Thüringer Hochschulgesetz besetzt.

Für das Jahr 2020 war vorgesehen, dass die FSU sich einem Audit zur Systemakkreditierung unterzieht. Unter den Studiengängen, die in dieser Phase überprüft werden sollten, waren auch Studiengänge der Physik. In der Vorbereitung mussten hier umfangreiche Berichte und Materialien erstellt werden, wobei die Hauptlast der Arbeit beim Studiendekanat und den Studiengangsverantwortlichen lag. Diese haben hervorragende Arbeit geleistet, wofür wir allen unseren Dank aussprechen möchten und besonders Dr. Sambale und Prof. Ammon hervorheben wollen.

Aber es kam dann doch anders als gedacht, und das nicht nur weil das Audit für die Systemakkreditierung in das Jahr 2021 verschoben wurde. Ziemlich pünktlich mit Beginn des Sommersemesters 2020 standen wir vor unserer größten Herausforderung der letzten Jahre, die auch niemand vorausgesehen hat. Auch wenn darüber schon viel gesagt worden ist, soll hier trotzdem noch einmal die Gelegenheit genutzt werden, ein paar Worte zu verlieren. In den ersten Monaten haben wir zuerst sehr wenig gewusst was zu tun ist. Aber wir wagen es zu behaupten, dass wir als Fakultät trotzdem sehr viel richtig gemacht haben. Das nicht zuletzt, weil wir wie Physiker agiert haben: zuerst die Fakten analysiert, daraus Schlüsse gezogen und dann uns neue Lösungen ausgedacht und diese auch umgesetzt haben. Mit viel Pragmatismus und Engagement fanden und finden wir seither für alle anstehenden Probleme gemeinsam neue Lösungen, die einerseits bewährten Ideen Respekt zollen aber andererseits auch von viel Neugier und Bereitschaft für Veränderungen geprägt sind. Aber all diese Lösungen konnten und können nur erfolgreich umgesetzt werden, weil alle Mitglieder unserer Fakultät zusammenarbeiten. Für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit möchten wir uns bei allen bedanken.

Danke an die Studierenden für ihre Bereitschaft sich auf neue Lehrformen einzulassen und Danke auch für ihr Verständnis und die Geduld mit den Lehrenden bei der Implementierung neuer digitaler Formate.

Danke an die Mitarbeiter aus Technik und Verwaltung, die nicht nur die ganze Zeit sichergestellt haben, dass der Betrieb weiterläuft sondern sich auch sehr engagiert und nachhaltig bei der Umsetzung neuer Maßnahmen beteiligen, obwohl sie oft als ers-

te Anlaufstelle den ganzen Unmut über Veränderungen abbekommen.

Danke an die wissenschaftlichen Mitarbeiter für ihren Einsatz in der Lehre, aber auch dass sie nach dem ersten Lockdown wieder die ersten waren, die zur Forschung zurückgekehrt sind und uns so eindrucksvoll gezeigt haben, dass „Aufgeben ist keine Option“ keine leere Phrase ist

Danke an die Kolleginnen und Kollegen, dass sie bereit waren neue Wege in der Lehre zu beschreiten und sehr viel Bereitschaft gezeigt haben, den Studierenden ein normales Studium unter den gegebenen Randbedingungen zu ermöglichen.

Auch wenn wir in der Zwischenzeit etwas mehr wissen, müssen wir weiter alles daran setzen auch in den nächsten Monaten so viel wie möglich richtig zu machen. Ob es das Richtige ist, das wird sich erst später herausstellen, aber nichts zu machen ist schon von vornherein das Falsche.

Wir alle hoffen, dass wir bald wieder in unser gewohntes Universitätsleben zurückkommen, jenes Leben, das wir im März 2020 verlassen haben. Dennoch wird das neue Leben auch dann nicht mehr das sein, das wir verlassen haben. Für uns als Fakultät birgt es aber auch die große Chance, dass wir uns alle beteiligen können an einem Neuanfang und die Möglichkeit haben an der Neugestaltung von neuen Formen in Lehre, Forschung und Kommunikation mitzuwirken.

Angesichts dieser Aussichten auf viele positive Veränderungen und dem Wissen aus den bisherigen Erfahrungen sehe ich der Zukunft voller Hoffnung, aber auch mit Respekt vor dem was noch alles kommen kann, entgegen. Ich hoffe, nein ich bin mir ziemlich sicher, dass Sie im nächsten Fakultätsbericht, neben dem sicher wieder hervorragenden Leistungsbericht mehr über unsere Erfolge bei der Bewältigung der neuen Herausforderungen lesen werden können.

Christian Spielmann, Dekan

# DIE FAKULTÄT IM ÜBERBLICK

## Dekanat

Dekan: Prof. Dr. Christian Spielmann  
Prodekan: Prof. Dr. Holger Gies  
Studiendekanin: Prof. Dr. Silvana Botti  
Studienprodekan: Prof. Dr. Frank Wyrowski

**Astrophysikalisches Institut und  
Universitätssternwarte (AIU)**  
Direktor: Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

**Institut für Angewandte Optik und Biophysik (IAOB)**  
Direktor: Prof. Dr. Christian Eggeling

**Institut für Angewandte Physik (IAP)**  
Direktor: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

**Institut für Festkörperphysik (IFK)**  
Direktor: Prof. Dr. Torsten Fritz

**Institut für Festkörpertheorie und –optik (IFTO)**  
Direktor: Prof. Dr. Ulf Peschel

**Institut für Optik und Quantenelektronik (IOQ)**  
Direktor: Prof. Dr. Malte Kaluza

**Otto-Schott-Institut für Materialforschung (OSIM)**  
Interfakultäres Institut mit CGF  
Geschäftsführender Institutsdirektor, Vertreter der PAF:  
Prof. Dr. Frank Müller

**Theoretisch-Physikalisches Institut (TPI)**  
Direktor: Prof. Dr. Bernd Brügmann

**AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie (PAD)**  
Leiter: Prof. Dr. Holger Cartarius

**SFB 1375–Nonlinear Optics Down to Atomic Scales (NOA)**  
Sprecher: Prof. Dr. Ulf Peschel

**Abbe Center of Photonics (ACP)**  
Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

**Abbe School of Photonics (ASP)**  
Sprecher: Prof. Dr. Thomas Pertsch

## Wissenschaftliche Werkstätten/Werkstattverbund

Technischer Leiter: Andreas Winnefeld

Elektronik  
Elektrotechnik  
Feinwerktechnik 1  
Feinwerktechnik 2 mit Lehrwerkstatt Industriemechaniker  
Servicepunkt Mechanik (Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät)  
Schlosserei/Schweißerei  
Konstruktion



### Legende

#### 1 Max-Wien-Platz 1

- Dekanat
- Studien- und Prüfungsamt
- Institut für Optik und Quantenelektronik

#### 2 Helmholtzweg 5

- Institut für Festkörperphysik

#### 3 Helmholtzweg 3

- Institut für Festkörperphysik

#### 4 Fröbelstieg 1 (Abbeaum)

- Institut für Angewandte Optik und Biophysik
- Institut für Festkörpertheorie und -optik
- Theoretisch-Physikalisches Institut

#### 5 Helmholtzweg 4

- PC-Pool
- Abbe School of Photonics
- Arbeitsgruppen des TPI und IAQB

#### 6 Fröbelstieg 3

- IOQ/ POLARIS - Labs
- Helmholtz-Institut Jena

#### 7 August-Bebel-Str. 4

- AG Physik- und Astronomiedidaktik
- Schülerlabor

#### 8 Zentrum für Angewandte Forschung (ZAF)

- Institut für Festkörperphysik
- Institut für Angewandte Optik und Biophysik

# FORSCHUNG

## Forschungsprofil

Die Schwerpunkte der Forschung an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät (PAF) liegen auf den Gebieten

- **Optik**
- **Festkörperphysik/Materialwissenschaft**
- **Gravitations- und Quantentheorie**
- **Astrophysik**

Wir stellen dies gern als Haus mit vier Säulen dar (siehe Abb.). Zwischen den Mitarbeitern, die auf diesen Schwerpunkten arbeiten, gibt es vielfältige Kooperationen und gemeinsame Projekte. Die Physik/Astronomie-Didaktik und das sich in den letzten Jahren stark entwickelnde Gebiet der Computational Physics wirken dabei als übergreifende und gleichsam verbindende Arbeitsgebiete.

Eine außerordentlich enge Vernetzung der Fakultät besteht mit außeruniversitären Forschungseinrichtungen wie dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, dem Leibniz-

Institut für Photonische Technologien, dem Helmholtz-Institut Jena und der Thüringer Landessternwarte Tautenburg, was durch gemeinsam berufene Professoren (siehe S. 130) und eine Vielzahl gemeinsamer Forschungsprojekte dokumentiert wird. Mit der lokalen Industrie und verschiedenen Fakultäten der Universität gibt es eine aktive Kooperation, die Anwendungsnahe und Interdisziplinarität sichert.

Eine immer wichtigere Rolle spielen die überregionalen Verbund- und Schwerpunktvorhaben, z.B. im Rahmen von Sonderforschungsbereichen und Forschergruppen, ZIK ultra optics sowie die internationale Kooperation z.B. in Form von EU -Projekten (S. 9). Insgesamt wurden in den Jahren 2018 bis 2020 etwa 56,5 Mio. Euro Drittmittel eingeworben. Die PAF nimmt damit einen Spitzenplatz innerhalb der Friedrich-Schiller-Universität (FSU) ein.

### Einbindung in die Profillinien der Universität

Der überwiegende Teil der Forschung an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät ist in die ersten beiden der drei Profillinien der FSU Light-Life-Liberty eingebunden und gestaltet diese intensiv mit.

Die Profillinie 1 „Light“ wird in starkem Maße von der PAF getragen, die mit Prof. Gerhard G. Paulus bis 2019 auch den Sprecher gestellt hat. Außer den Optik-Instituten (IAOB, IAP, IOQ, IFTO) tragen auch die anderen Institute zu dieser Profillinie bei. Zu nennen sind beispielsweise das IFK mit dem DFG Schwerpunktprogramm „SPP 1839 Tailored Disorder—A science- and engineering-based approach to materials design for advanced photonic applications“ und das TPI mit der „Research School Advanced Photon Science“.

In der Profillinie 2 „Life“ ist die PAF z.B. mit dem SFB PolyTarget, Verbundprojekt InfectControl, der hochauflösenden Mikroskopie (IAOB) oder der Forschung an Implantatmaterialien für die Medizin involviert.

Innerhalb der Universität wurde die Vernetzung der PAF durch die Einrichtung zweier interfakultärer Zentren institutionalisiert, dem Abbe Center of Photonics (ACP) und dem Zentrum für Medizinische Optik und Photonik (CeMOP). (siehe S. 136)

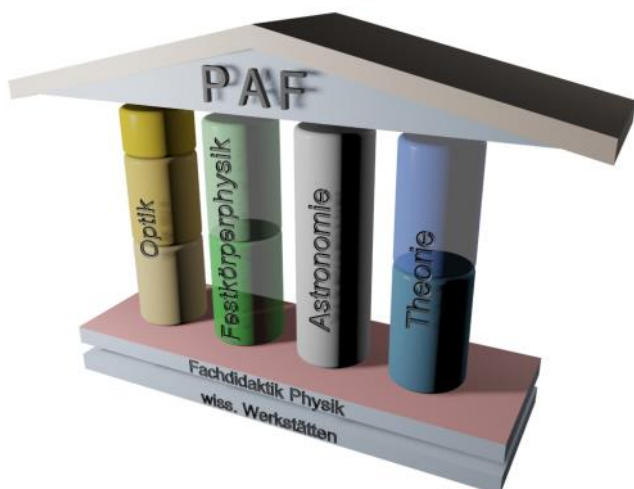
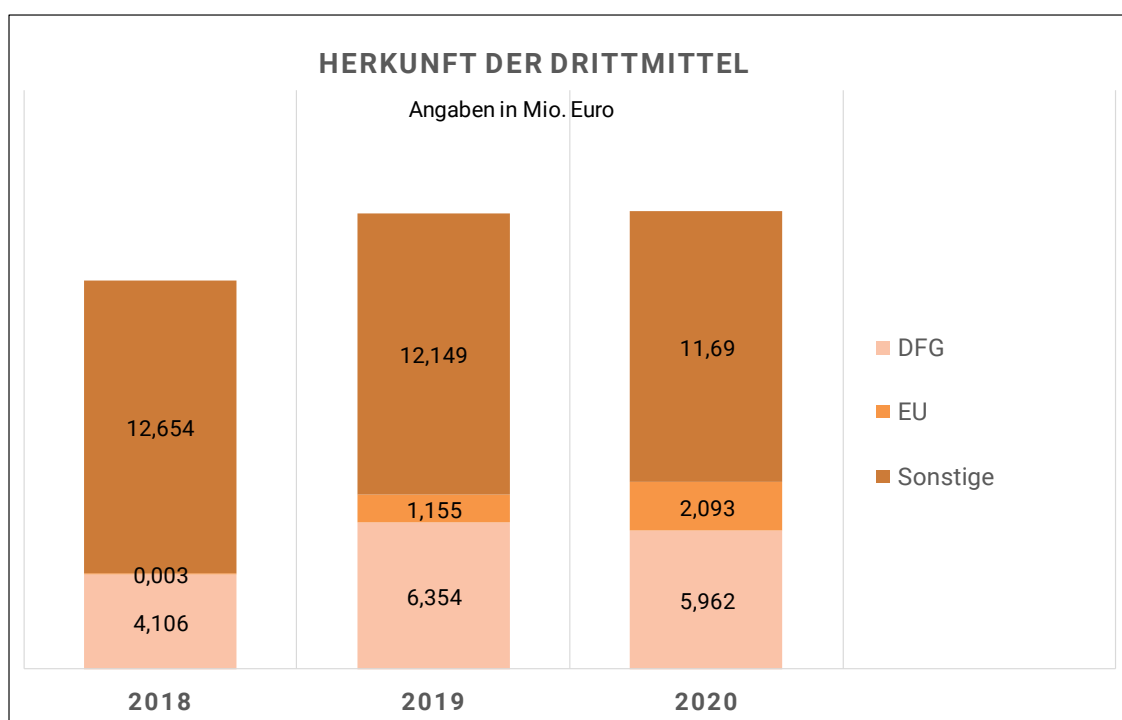
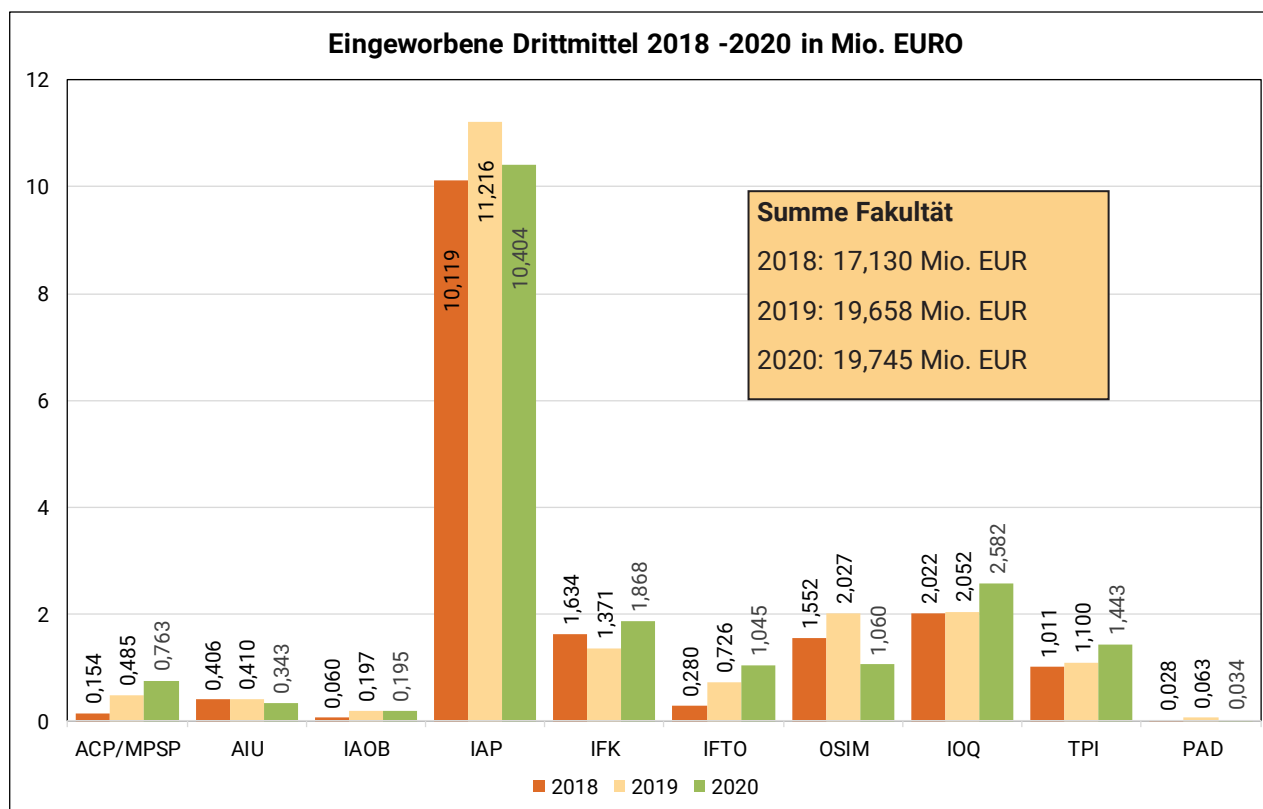


Abb.: Das Forschungs- und Lehrprofil der Physikalisch-Astronomischen Fakultät ruht auf den vier Säulen Optik, Festkörperphysik/Materialwissenschaft, Astrophysik und Theoretischer Physik. Die Fachdidaktik und die wissenschaftlichen Werkstätten wirken übergreifend und unterstützend.

## Drittmittel





## Beteiligung an Forschungsförderprogrammen

Die Institute der Physikalisch-Astronomischen Fakultät (PAF) sind an zahlreichen Forschungsförderprogrammen beteiligt. Im Folgenden wird eine Übersicht über die wesentlichen koordinierten Forschungsprojekte gegeben, die in den Jahren 2018 und 2020 an der PAF gearbeitet haben und zum Teil auch von der PAF koordiniert wurden.

### DFG – Exzellenzcluster

**EXC 2051–Gleichgewicht im Mikroversum**  
02/2020–01/2022  
beteiligte Institute: IAP, IOQ, IAOb

### DFG–Sonderforschungsbereich

**SFB 1375–Nonlinear Optics Down to Atomic Scales (NOA)**  
Seit 07/2019  
beteiligte Institute: IFTO, IFK, IAP, OSIM, IOQ  
Sprecher: Prof. Dr. Ulf Peschel

**SFB 1278 PolyTarget–Polymerbasierte Nanopartikel-Bibliotheken für die Entwicklung zielgerichteter anti-inflammatorischer Strategien**  
Seit 2017  
beteiligte Institute: OSIM, IAOb

### DFG– Forschergruppen

**FOR 2285**  
**Trümmerscheiben in Planetensystemen**  
beteiligte Institute: AIU, IFK, IAP  
Sprecher: Prof. Dr. Alexander Krivov

**FOR 2857**  
**Copper Iodide as multifunctional semiconductor**  
beteiligte Institute: IFTO

**FOR 2783–Probing the Quantum Vacuum at the High-Intensity Frontier**  
beteiligte Institute: IOQ, TPI, HI Jena  
Sprecher: Prof. Dr. Holger Gies

**FOR1905**  
**Dynamics of peroxisomal protein transport**  
beteiligte Institute: IAOb

### DFG– Schwerpunktprogramme

**SPP 1839**  
**Tailored Disorder–A science– and engineering-based approach to materials design for advanced photonic applications**  
beteiligte Institute: IFK

**SPP 1840 - QUTIF**  
**Quantum Dynamics in Tailored Intense Fields**  
beteiligte Institute: IOQ, TPI

**SPP 1959**  
**Manipulation of matter controlled by electric and magnetic fields: Towards novel synthesis and processing routes of inorganic materials**  
beteiligte Institute: IAP

**SPP 2122**  
**Neue Materialien für die laserbasierte additive Fertigung**  
beteiligte Institute: IAP

**SPP 1992**  
**Exploring the Diversity of Extrasolar Planets**  
beteiligte Institute: AIU

### DFG– Heisenbergprogramm

**JA 2625/2-1**  
**Kontrolle von transversaler Modenwechselwirkung in hoch-Leistungs- Faserlasersysteme**  
beteiligte Institute: IAP (Dr. Cesar Jauregui)

### DFG– Forschungsgroßgeräteinitiative

**MINIFLUX Jena**  
beteiligte Institute: IAOb (Prof. Ch. Eggeling)

### BMBF - Verbund-Zentrum für Innovationskompetenz (Meta-ZIK)

**astrOOptics**  
beteiligte Institute: IAP  
Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

**OptiCon– Optical in-situ investigation & modeling of high temperature conversion processes**  
beteiligte Institute: IAP  
Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

### BMBF - Zentrum für Innovationskompetenz (ZIK)

**ultra optics**  
beteiligte Institute: IAP, IOQ  
Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

## BMBF - Spitzenforschung 2016-2020

**Mikroelektronik aus Deutschland-Innovations-treiber der Digitalisierung**

**Verbundprojekt: ForMikro-ERMI**

beteiligte Institute: IFK, IPHT

## BMBF - Programm Zwanzig<sub>20</sub> - Partnerschaft für Innovation

**Allianz 3Dsensation**

beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

**InfectControl 2020 Transsektorale Forschungs-plattform TFP-TV9**

beteiligte Institute: OSIM (Prof. Jandt)

## BMBF - Innovative Regionale Wachstumskerne

**WK+ fo<sup>+</sup> - Freeform Optics Plus Jena**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Gross)

## BMBF-Verbundforschung

**APPA R & D: Licht-Materie-Wechselwirkung mit hochgeladenen Ionen**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Limpert)

**Aufbau von APPA bei FAIR**

beteiligte Institute: IOQ

**Mittlerer-Infrarot-Laser der Hochenergie-Klasse: Teilprojekt: Entwicklung eines diodengepumpten Lasers auf der Basis von Tm:YAG (HECMIR)**

beteiligte Institute: IOQ (Prof. Kaluza)

**LADIAG: Neue Diagnostiken für Hoch-Intensitätslaser - Teilprojekt 2: Entwicklung von Diagnostiken für die Messung der räumlich-zeitlichen Kopplungen sowie des Winkel-aufgelösten zeitlichen Kontrasts von Laserpulsen**

beteiligte Institute: IOQ (Prof. Kaluza)

**R & D Beschleuniger: Innovative Stromkomparatoren (CCC) für FAIR**

beteiligte Institute: IOQ, IFK, HIJ (Prof. Stöhlker)

**Hy-Fly-TP1: Infektionsrelevante Materialoberflächen im Infrastrukturbau Flughafen und Transportmittel Flugzeug**

beteiligte Institute: OSIM (Prof. Jandt)

**ULFI - Forschungsverbund "ULtra-Fast Imaging of plasmas " Zeitaufgelöste Bildgebung von relativistischen Plasmawellen mit ultra-kurzen Elektronenpulsen und optischer Kohärenztomographie"**

beteiligte Institute: IOQ (Profs. Paulus, Kaluza)

**LISElatDREAMS: Entwicklung eines Systems zur selektiven Filterung von Isobaren mittels Laser zur Erweiterung der Anwendbarkeit von Beschleuniger-Massenspektrometrie**

beteiligte Institute: IOQ (Dr. Forstner)

**KMU-innovativ-19: OsteoBioZement: Pharmakokinetik und Osteogenese von humanen mesenchymalen Stammzellen**

beteiligte Institute: OSIM (Prof. Jandt)

## Innovationsprogramm von Bund und Ländern

**NUCLEUS Jena – Ein Paradies für Innovationen**

beteiligte Institute: IAP

## Europäische Union: 7. Forschungsrahmenprogramm, Horizon 2020, ERC-Grants

**ERC-2014-ADG: Multi-dimensional interferometric amplification of ultrashort laser pulses**

beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

**ERC-2013-CoG: Advanced coherent ultrafast laser pulse stacking**

beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Prof. Dr. Jens Limpert

**ERC-2018-ADG: High-Flux Synchrotron Alternatives Driven by Powerful Long-Wavelength Fiber Lasers**

beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Prof. Dr. Jens Limpert

**H2020-EU.1.3.1. Lossless management—Optical design for manufacture at different length scales**

beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Dr. Frank Setzpfand

**EXPHON—H2020-MSCA-IF-2016**

**Exciton-Phonon Coupling from First Principles**

beteiligte Institute: IFTO

Sprecher: Prof. Dr. Silvana Botti

**H2020-FET Open SiLAS– SiliconLaser**

beteiligte Institute: IFTO

**H2020– EU.1.3.1. FUNctional GLASS**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Nolte)

**H2020– EU.1.3.2. Integrated devices based on spin-orbit photonics**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Nolte)

**H2020– ERC LIFEGATE: Holographic super-resolution micro-endoscopy for in-vivo applications**

beteiligte Institute: IAOb, IPHT (Prof. Čížmár)

**H2020–EU 1.1. Modeling the Gravitational Spectrum of Neutron Stars Binaries (BinGraSp)**

beteiligte Institute: TPI (Prof. Bernuzzi)

**ERC-Marie Curie: Fluorescence imaging & live microscopy of HIV (FILM-HIV)**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**ERC-Marie Curie: Development of fluorescence nanospectroscopy to elucidate the roles of nanoscale membrane heterogeneities in the activation of immune response**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**H2020-Marie Curie: LISA–Laser Ionization and Spectroscopy of Actinides**

beteiligte Institute: TPI, HI Jena (Prof. Fritzsche)

**EURAMET: Light-matter interplay for optical metrology beyond the classical spatial resolution limits**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Zeitner)

**Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)****2016 FGI 0017: Kompaktes, hochauflösendes Mikrokolorimeter als Breitbandspektrometer für den XUV- und Röntgenbereich**

beteiligte Institute: HI Jena, IOQ, IPHT

**2018 FGI 0022: Advanced STED: Next-Generation super-auflösende optische STED-Mikroskopie von zellulären Dynamiken**

beteiligte Institute: IAOb, IPHT

**2019 FGI 0001: Visualizing microbial infection using multimodal fluorescence microscopy**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**2019 FGI 0003: Visualizing microbial infection with ultrafast, high-resolution three-dimensional confocal fluorescence microscopy**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**2020 FGI 0031:****Multimodale spektroskopische Fluoreszenzmikroskopie von zellulären Dynamiken**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**2020 FGI 0032: Holoskop: Holografische Endoskopie für biomedizinische Fortschritte**

beteiligte Institute: IAOb, IPHT (Prof. Čížmár)

**Europäischer Sozialfonds (ESF)****2018 FGR 0074: Fortgeschrittene Verfahren zur hochauflösenden Röntgenbildgebung**

beteiligte Institute: HI Jena, IOQ, IAP

Sprecher: Prof. Dr. Matt Zepf

**2018 FGR 0080: Technologien und Verfahren für die Bildgebung und Spektroskopie im Wasserfenster**

beteiligte Institute: HI Jena, IOQ, IAP, IPHT

Sprecher: Prof. Dr. Gerhard G. Paulus

**DAAD****Franco-German Fellowship Programme on Climate, Energy and Earth System Research; "QUESTforENERGY"**

beteiligte Institute: IOQ (Prof. Spielmann)

**Weitere europäische Verbünde****German-Luxembourg collaboration, DFG: Investigation of nanoscale RAS polarizations in instructing cancer cell stemness, / EG 325/2-1**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**British Council UK: Investigation of Wnt-catenin signaling at the plasma membrane in health and disease, Newton Institutional Links Fund (Turkey/UK)**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**Medical Research Council UK: MRC Core Unit HIU-Oxford**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**Welcome Trust UK, Micron Oxford: Super-resolution imaging of cellular dynamics, Strategic Award**

Beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**Wellcome Trust UK / University of Oxford: Functionality, ease of use, and longevity upgrade of Leica STED 3X at the Wolfson Imaging Centre at the WIMM**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**ACTPHAST4.0, ForceBot: Combined fluorescence-force measurements using optical tweezing, Innovation Project**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

### Internationale Verbundprojekte

**International Project "Young Exoplanet Transit Initiative" (YETI)**

beteiligte Institute: AIU (Prof. Neuhäuser)

### Thüringer Innovationszentren

**Thüringer Innovationszentrum für Quantenoptik und Sensorik (InQuoSens)**

beteiligte Institute: IAP, ACP

### Landesprogramm ProExzellenz II

**ACP 2020—Agenda für exzellente Photonik**

beteiligte Institute: IAP, ACP, IOQ, IFTO, IFK

### Landesprogramm Forschergruppen

**TAB– FGR: Mikrostrukturtechnologie zur Überwindung von Leistungsgrenzen faserbasierter Lasersysteme**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Limpert)

**TAB– FGR: 3D-Bildaufnahme und -verarbeitung mit höchstem kontinuierlichem Datendurchsatz für die Mensch-Maschine Interaktion und adaptive Fertigung**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Gross)

**TAB– FGR: Achromatische Diffraktive Optiken auf Nichtplanaren Substratoberflächen**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Gross)

**TAB– FGR: UltraKurzgePulste Laserstrahlung zur flexiblen Fertigung maßgeschneiderter, optischer Komponenten für die individualisierte Produktion**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Nolte)

**Thüringer Forschergruppe zu quantenoptischer Bildgebung mit verschränkten Photonen am In-QuoSens (FOQUOS)**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Tünnermann)

**TAB– FGR: Erforschung neuartiger Herstellungsverfahren für mikrostrukturierte Fasern"; TP: Effiziente Mikrostrukturtechnologien laseraktiver Spezialfasern**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Limpert)

**TAB– FGR: 3D Erfassung mittels Wärmebildprojektion und Roboterhandlung von transparenten komplexen Objekten**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Gross)

**TAB– FGR: 2D-Sens**

beteiligte Institute: IAP (Dr. Eilenberger)

**TAB– FGR: Hochleistungsoptiken für (kohärente) weiche Röntgenstrahlung**

beteiligte Institute: IAP (Dr. Jan Rothhardt)

**TAB– FGR: Schnelle und sensitive Detektion von SARS Viren**

beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

### Land Thüringen Verbundprojekte

**Beschaffung eines Kurzpuls-Lasersystems mit einer Emissionswellenlänge im mittleren Infrarotbereich zur hochauflösenden Bildgebung biologischer Proben durch weiche Röntgenstrahlung**

beteiligte Institute: IAP (Dr. Jan Rothhardt)

**Grundlegende Betrachtung zu parallelisierten Ultrakurzpulsverstärkern (Verbund: Parallelisierte Ultrakurzpuls-Faserlasersysteme)**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Limpert)

**Systemdesign und Simulation von Endomikroskopen (Verbund: Piezoverstellbare Mikrooptik-Hybridsysteme für die Endomikroskopie und Biophotonik durch Kombination von GRIN-Optik, Freiform-Mikrooptik und diffraktiver Optik)**

beteiligte Institute: IAP (Prof. Gross)

### Weitere Verbundprojekte

**ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand): Development of an automated and low-cost fluorescence-correlation spectroscopy reader for industrial applications**

Beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling), K. Gall (Innovation, Osnabrück)

**Leibniz ScienceCampus InfectoOptics: Quantitative monitoring of tailored therapy against bacterial super-infection in viral pneumonia by spatio-temporal microscopy (PNEUTHERA)**

Beteiligte Institute: IAOb (Prof. Eggeling)

**Virtuelle Werkstatt für die Digitalisierung in den Wissenschaften (Carl Zeiss-Stiftung)**

Beteiligte Institute: TPI, IFTO

## Wissenschaftlicher Nachwuchs

Die Physikalisch-Astronomische Fakultät ist an mehreren strukturierten Doktorandenprogrammen beteiligt.

### Beteiligung an Graduiertenschulen, Graduiertenkollegs

#### Abbe School of Photonics (ASP)

Beteiligte Institute der PAF: IAP, IAO, IOQ, IFTO, TPI, IFK

Sprecher: Prof. Dr. Thomas Pertsch

#### GRK 2101 International Research Training Group „Guided Light, tightly packed: novel concepts, components and applications“

Beteiligte Institute: IAP, IFTO, IOQ, IFK

Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

#### GRK 2522/1 „Starke Dynamik und Kritikalität in Quanten- und Gravitationssystemen“

Beteiligte Institute: TPI

Sprecher: Prof. Dr. Holger Gies

#### Graduiertenkolleg HRS-APS Helmholtz Research School Advanced Photon Science

Beteiligte Institute: IOQ, TPI, HIJ

Sprecher: Prof. Dr. Christian Spielmann

#### Max Planck School of Photonics (MPSP)

Beteiligte Institute: IAP, IFTO, IOQ

Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

#### Graduiertenforschungskolleg „3D-Technologien in der Mensch-Maschine-Interaktion“ der Innovationsallianz 3Dsensation

Beteiligte Institute: IAP, IAOB

### Doktorandenprogramm der ASP

Das Promotionsprogramm der Abbe School of Photonics (ASP) ist als Graduiertenschule konzipiert, die einen hervorgehoben fakultätsübergreifenden Charakter hat und selber mehrere Graduiertenkollegs und -programme umfasst. Das übergeordnete Ziel des Ausbildungsprogramms der ASP ist die Herausbildung eines möglichst breiten methodischen und fachlichen Profils promovierter Nachwuchswissenschaftler. Innerhalb des Programms werden daher bei Finanzierung, Aufnahme, Betreuung und Qualifizierung der Promovierenden zahlreiche Drittmittelprogramme und -konzepte zusammengeführt werden, die jeweils spezifische Verfahrenswege des Drittmittelgebers (DFG, EU, BMBF, Land, Stiftungen, DAAD) vorschreiben. Genau aus diesem Grund hat sich die ASP als Graduiertenschule und organisatorische Dachstruktur mehr als bewährt, um einen hohen, fachspezifischen Standard für die Qualifizierung aller Photonik-Promovierenden an der FSU zu gewährleisten und kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Die Qualitätskontrolle zur Mitgliedschaft im Promotionsprogramm der ASP erfolgt in stringenter Weise zunächst durch die an strenge Qualitätskriterien gebundene Aufnahme der ACP-Mitglieder, die auf Antrag und nach individueller Prüfung erfolgt. Bei konsistenter fachlicher Verortung im Themenkreis Photonik erfolgt daraufhin die Auf-

nahme der den ACP-Mitgliedern zugeordneten Promovierenden durch die Graduierten-Akademie der Universität Jena. Entscheidend zur Zugehörigkeit ist jedoch die Verortung des Themas innerhalb der Photonik, sei es als methodische Entwicklung für eine bestimmte Anwendung, oder auch als intrinsischer Forschungsgegenstand.

Um einen internationalen Rekrutierungsprozess abzubilden, verwendet die ASP ein System, in dem alle Bewerbungen für Promotionen in der Jenaer Photonik digital erfasst werden. Dies stellt sich mehr und mehr als Vorteil dar, da sich der Wettbewerb um fachlich wirklich sehr gute Bewerber innerhalb der Photonik von Jahr zu Jahr kompetitiver gestaltet. Durch die Standardisierung des Bewerbungsprozesses können Bewerbungen verschiedener Nationalitäten objektiv verglichen sowie von einer großen Anzahl an Hochschullehrern zeitnah, sehr individuell und vergleichend im Auswahlprozess evaluiert werden. Dieses Verfahren führt aufgrund der schnellen Bearbeitungsvorgänge zu einer hohen Akzeptanz bei den Bewerbern. Seit 2009 wurden auf diese Weise knapp 4.000 Bewerbungen registriert und gesichtet, dies entspricht bis zu 500 Bewerbungen pro Jahr. Jährlich werden davon 50...80 Bewerber in das Programm aufgenommen. Wesentliche Auswahlkriterien sind die nachgewiesene und zu erwartende wissenschaftliche Exzellenz der Bewerber sowie die



Passfähigkeit seines Fachhintergrunds zum Promotionsthema.

Als ein herausragender Standort der Photonik hat die Region Jena eine lange Tradition der Symbiose exzellenter Grundlagenforschung und erfolgreicher wirtschaftlicher Verwertung. Neben der o.g. industriellen Netzwerkarbeit pflegt die ASP ein herausragendes, weltweites, akademisches Kooperationsnetzwerk. Länderschwerpunkte liegen dabei, jedoch nicht ausschließlich, in Australien, China, Frankreich, Kanada, den Niederlanden, den USA und Taiwan. Gemeinsam mit diesen Partnern beteiligt sich die ASP kontinuierlich an Ausschreibungsformaten, die durch Einwerbung von Drittmitteln den Promovierenden ein dauerhaftes, hochattraktives Angebot an externen Forschungsaufenthalten und -mobilitäten bietet.

Das Promotionsprogramm der ASP folgt dem Leitbild der eigenverantwortlich agierenden Nachwuchsforscher. Demzufolge basiert die Auswahl der Elemente der fachspezifischen Qualifizierungsprogramme und des Forschungstrainings bewusst nicht auf einem Punktesystem, sondern ganz wesentlich auf Freiwilligkeit und auf den individuellen Wünschen und Interessen der jeweiligen Promovierenden im Dialog mit den Betreuenden. Abweichend davon ist nur die Teilnahme an einem Kurs zu guter wissenschaftlicher Praxis gleich zum Beginn der Promotionszeit Pflicht.

Die fachliche Betreuung der Promovierenden wird durch die hohe Qualität der Forschungs- und Lehrtätigkeit der ASP-Hochschullehrer untersetzt. Das strukturierte Betreuungskonzept orientiert sich hinsichtlich seiner Qualität, Interdisziplinarität und begleitenden extracurricularen Aktivitäten an den Leitlinien der DFG-Graduiertenkollegs. In zunehmendem Maß erhalten die Promovierenden neben dem betreuenden Hochschullehrer einen zweiten Betreuer zugeordnet (Tandem-Betreuung), wobei Letzterer speziell bei interdisziplinären Forschungsthemen auch die notwendige fachliche Breite abbildet. Die weiteren Ausführungen unterliegen sehr dem jeweiligen individuellen Spielraum, der z.T. individuell zwischen Promovierenden und Betreuer ausgehandelt wird. Die Förderung der Promovierenden zu eigenständiger wissenschaftlicher Arbeit und die Verbreitung der eigenen Forschungsergebnisse auf internationalen Konferenzen sowie Publikationen in internationalen Fachzeitschriften haben dabei einen hohen Stellenwert. Jede(r) ASP-Promovierende besucht während des Promotionsverlaufs mindestens eine, in der Regel jedoch etwa drei internationale

Konferenzen. Forschungsaufenthalte bei Kooperationspartnern werden seitens der ASP systematisch und z.T. auch finanziell unterstützt, wenn diese für das jeweilige Promotionsvorhaben förderlich sind.

Neben dem Angebot von vorlesungsartig angelegten Spezialvorlesungen stehen ganzjährig Blockkurse, beispielsweise zur Erlernung numerischer Techniken, Programmiersprachen, Nanotechnologien oder Spektroskopiemethodiken zur Auswahl. In der Regel sind sämtliche ASP-Promovierende zudem zu allen Sommer- und Herbstschulen der strukturierten DFG-Programme sowie den Symposien und Blockveranstaltungen der „Jena Alliance Life in Focus – A Carl Zeiss Foundation Project“ eingeladen. Ein deutlicher Mehrwert in der Qualifizierung wird durch die umfangreichen, individuellen Forschungsk Kooperationen der betreuenden Hochschullehrer mit zahlreichen Forschungseinrichtungen weltweit erreicht. Zu nennen sind ebenso die langfristigen Forschungsk Kooperationen, die aus dem 10-jährigen ASP-Gastprofessorenprogramm (>60 Gastprofessoren aus über 25 Ländern) hervorgegangen sind. Internationalen Promovierenden erstattet die ASP die Kosten für bis zu zwei Deutsch-Sprachkurse aus Eigenmitteln. Weiterqualifizierungen zu Transferable Skills werden weitestgehend durch das Angebot der universitären Graduierten-Akademie abgedeckt, bei Bedarf werden die Ressourcen dafür jedoch aus Eigenmitteln aufgestockt.

Die ASP setzt seit ihrer Gründung 2008 ein holistisches Konzept zur Förderung von Internationalisierung und interkultureller Vielfalt um und war damit frühzeitig einer der Vorreiter innerhalb der FSU. Wichtigster Treiber ist die Erkenntnis, dass der Wettbewerb um die besten Köpfe notwendigerweise auf globaler Ebene gedacht und durchgeführt werden muss. Entsprechend ist der Standort Jena mittlerweile in der Photonikausbildung und -forschung in der nationalen und internationalen Wahrnehmung global bekannt und ausgezeichnet vernetzt. Auch aus dem Charakter der Forschungsthematik leitet sich direkt die umfassende Internationalisierung als strategische Zielsetzung ab. So beträgt heute der Anteil internationaler Promovierender 41 % (136 von 331, Stand 12/2020), was nicht zuletzt eine langjährige strategische Entwicklung basierend auf durchgängig sehr guten Erfahrungen mit Internationalität und Diversität widerspiegelt. Allerdings liegt das Augenmerk der weiteren Programmentwicklung eher auf Qualitätssteigerung in Synergie mit noch stärkerer In-

ternationalisierung, was beispielsweise durch eine fast lückenlose, systematische Einwerbung von Stipendien des GSSP-Programms des DAAD befördert wird.

Alle am ASP-Promotionsprogramm Beteiligten sind sich der Notwendigkeit bewusst, ein Forschungsumfeld zu fördern, das frei von Vorurteilen gegenüber Geschlechtern und Minderheiten ist und verschiedene Programme zur Unterstützung der beruflichen Entwicklung von Frauen anbietet. Die strategischen Maßnahmen zu Gleichstellung und Familienfreundlichkeit orientieren sich daher durchgängig an den Standards der DFG und ihrer koordinierten Programme. Der Fokus des ASP-Promotionsprogramm liegt dabei speziell darin, Faktoren auszugleichen, die für die frühe Karriereentwicklung einer Frau nachteilig sind, indem direkte Unterstützung durch fachkundige Mentoren, professionelle Netzwerkverbesserung und die Ausbildung von Schlüsselkompetenzen bereitgestellt werden. Dazu werden insbesondere familienfreundliche und Work-Life-Balance-Bedingungen nachdrücklich und aktiv verfolgt.

Die ASP sieht die Ausbildung von qualifiziertem Nachwuchs in Forschung und Entwicklung

der photonischen Technologien als ihre zentrale Aufgabe. Die hohe Nachwuchsqualität soll im ASP-Promotionsprogramm auch in Zukunft abgesichert werden. Die Ausübung von universitärer Lehre u.a. direkt am Beutenberg Campus ist strategisch gewollt, um Forschungsnähe der Studierenden frühzeitig herzustellen und sie für die Themen und Möglichkeiten der Promotion am Standort zu begeistern. Das Promotionsprogramm der ASP konnte bereits in den letzten Jahren entscheidend bei der strategischen Entwicklung des fachlichen Profils und der systematischen Drittmittelakquise mitwirken. Wesentliche Erfolge der FSU in den strukturierten Förderprogrammen der DFG und EU wurden maßgeblich durch entsprechende synergetische Effekte befördert. Eine sehr große Herausforderung in der unmittelbaren Zukunft liegt darin, weiterhin strukturierte Drittmittelprojekte mit gewohnt hoher Qualität und messbarem Erfolg durchzuführen, und damit gegenüber dem Fördergeber jeweils eine Verlängerung zu erwirken. Allein dies ist ein sehr hoher Anspruch. Darüber hinaus sind aktuell weitere Initiativen zur Einwerbung strukturierter Förderprogramme in Arbeit bzw. zur Begutachtung eingereicht.

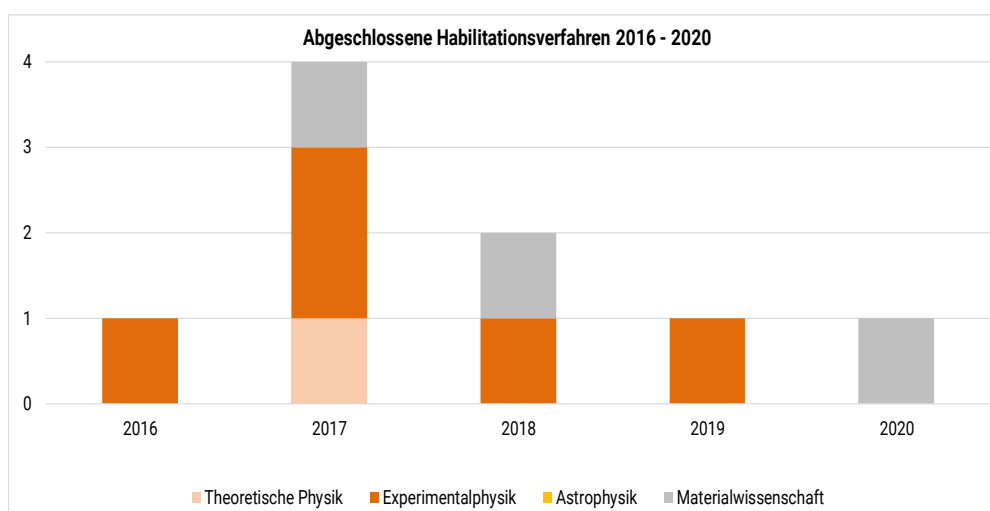
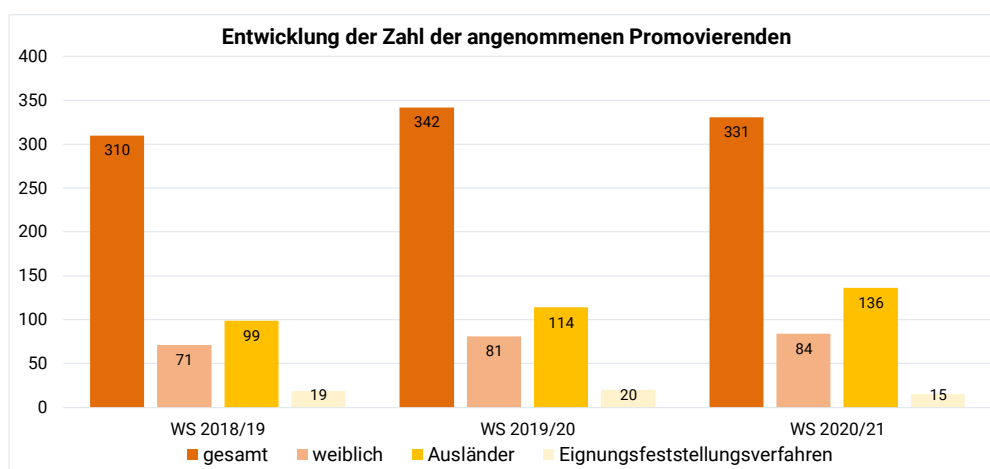
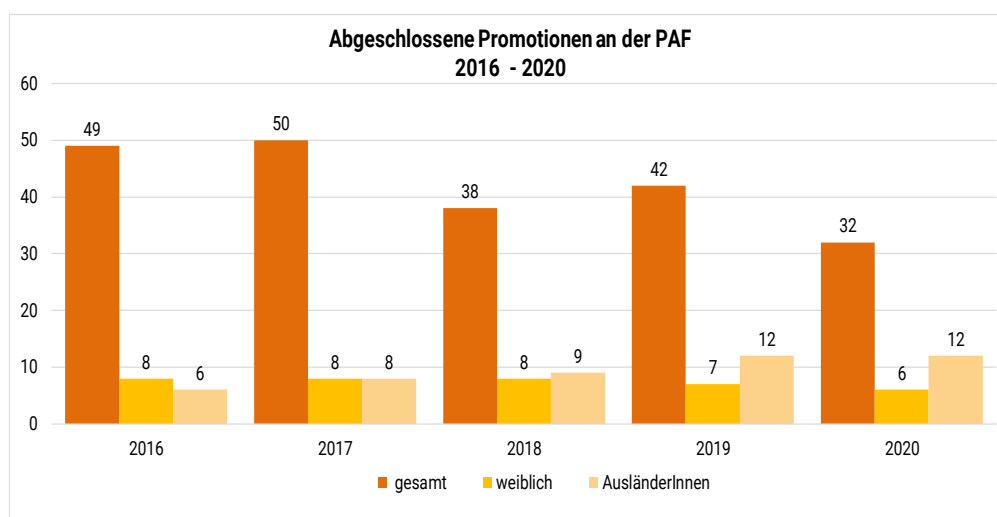


Abb. 1: Gruppenfoto der Konferenzteilnehmer der jährlichen, internationalen, von Promovenden für Promovenden organisierten Doktorandenkonferenz DokDok, hier 2019 in Eisenach. Foto: Brian Seyfart

Die folgenden Diagramme geben einen Überblick über die Promotionen und Habilitationen an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät in den vergangenen fünf Jahren. 2020 ist der Zahl der akademischen Abschlüsse insbesondere der Habilitationen aufgrund des Lockdowns gesunken. Die eröffneten Habilitationsverfahren konnten wegen fehlender Öffentlichkeit insbesondere bei den Lehrproben nicht abgeschlossen werden.

An der PAF gibt es über 300 Promovierende, ca. 1/3 davon kommen aus dem Ausland. Ein Teil dieser Promovierenden sowie Absolventen von Fachhochschulen müssen sich einem Eignungsfeststellungsverfahren unterziehen und erhalten ggf. Auflagen.

Der Anteil der Doktorandinnen entspricht mit ca. 23% in etwa dem Anteil der Studentinnen (25,6%) bei den Studierenden der Fakultät.



## Publikationen

Nachfolgend sind die wichtigsten Publikationen der letzten 3 Jahre der einzelnen Arbeitsgruppen der PAF aufgelistet, um einen Einblick in die vielfältige Forschungstätigkeit zu geben. Für eine statistische Übersicht siehe Seite 23.

### Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

#### Lehrstuhl für Astrophysik (Prof. Neuhäuser)

R. Neuhäuser, F. Giessler, V.V. Hambaryan, 2020, „Runaway star zeta Oph and pulsar PSRB1706-16 were released by a nearby supernova 1.8 Myr ago that ejected 60Fe found on Earth“. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 498, 889-903

#### Professur für Astronomie (Prof. Krivov)

A.V. Krivov, A. Ide, T. Löhne, A. Johansen, J. Blum, 2018, „Debris Disc Constraints on Planetesimal Formation“. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 474, 2564-2575

### Institut für Angewandte Optik und Biophysik

#### Lehrstuhl für Superaufgelöste Mikroskopie (Prof. Eggeling)

E. Sezgin, F. Schneider, S. Galiani, I. Urbancic, D. Waithe, B.C. Lagerholm, and C. Eggeling. 2019. Measuring nanoscale diffusion dynamics in cellular membranes with super-resolution STED-FCS. *Nat Protoc.* 14:1054-1083.

C. Favard, J. Chojnacki, P. Merida, N. Yandrapalli, J. Mak, C. Eggeling, and D. Mureauux. 2019. HIV-1 Gag specifically restricts PI(4,5)P2 and cholesterol mobility in living cells creating a nanodomain platform for virus assembly. *Science Advances.* 5:eaaw8651.

A.M. Santos, A. Ponjavic, M. Fritzsche, R.A. Fernandes, J.B. de la Serna, M.J. Wilcock, F. Schneider, I. Urbancic, J. McColl, C. Anzilotti, K.A. Ganzinger, M. Assmann, D. Depoil, R.J. Cornall, M.L. Dustin, D. Klenerman, S.J. Davis, C. Eggeling, and S.F. Lee. 2018. Capturing resting T cells: the perils of PLL. *Nat Immunol.* 19:203-205.

#### Lehrstuhl für Experimentalphysik/Kohärenzoptik (Prof. Kowarschik)

W. Stark, E. Wong, H. Babovsky and R. Kowarschik, "Subjective speckle suppression for 3D measurement using one-dimensional numerical filtering", *App. Opt.* 58(34), 9473-9483 (2019).

E. Wong, S. Heist, C. Bräuer-Burchardt, A. Stark, H. Babovsky and R. Kowarschik "Optimization-based extrinsic calibration of a three-dimensional sensor composed of an array projector and a single camera", *Opt. Eng.* 58(10), 104109 (2019).

E. Wong, S. Heist, C. Bräuer-Burchardt, H. Babovsky and R. Kowarschik, "Calibration of an array projector used for high-speed three-dimensional shape measurements using a single camera", *Appl. Opt.* 57, 7570-7578 (2018).

#### Lehrstuhl für Wellenleiteroptik/Faseroptik (Prof. Dr. Čižmár)

J. Trägårdh, T. Pikálek, M. Šerý, T. Meyer, J. Popp, T. Čižmár, Label-free CARS microscopy through a multimode fiber endoscope, *Optics express* 27 (21), 30055-30066, 2019

D. E. B. Flaes, J. Stopka, S. Turtaev, J.F. de Boer, T. Tyc, T. Cizmar, Robustness of Light-Transport Processes to Bending Deformations in Graded-Index Multimode Waveguides, *Physical Review Letters*, 20 (3) 233901

### Institut für Angewandte Physik

#### Lehrstuhl für Angewandte Physik (Prof. Tünnermann)

K. Dietrich, M. Zilk, M. Steglich, T. Siefke, U. Hübner, T. Pertsch, C. Rockstuhl, A. Tünnermann, E.B. Kley, Merging Top-Down and Bottom-Up Approaches to Fabricate Artificial Photonic Nanomaterials with a Deterministic Electric and Magnetic Response, *Advanced Functional Materials* 30 (3), 1905722 (2020).

C. Gaida, M. Gebhardt, T. Heuermann, F. Stutzki, C. Jauregui, J. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, R. Amezcua-Correa, A. Tünnermann, I. Pupezza, J. Limpert, Watt-scale super-octave mid-infrared intrapulse difference frequency generation, *Light-science & Applications* 7, 94 (2018).

V. Beladiya, M. Becker, T. Faraz, W. M. M. Kessels, P. Schenk, F. Otto, T. Fritz, M. Grünwald, C. Helbing, K. D. Jandt, A. Tünnermann, M. Sierka, A. Szeghalmi, Effect of an electric field during the deposition of silicon dioxide thin films by plasma enhanced atomic layer deposition: an experimental and computational study, *Nanoscale* 12 (3), 2089-2102 (2020).



**Professur für Festkörperplaser (Prof. Limpert)**

C. Jauregui, C. Stihler, J. Limpert, Transverse mode instability, *Advances in Optics and Photonics* 12 (2), 429-484 (2020).

C. Gaida, M. Gebhardt, T. Heuermann, F. Stutzki, C. Jauregui, J. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, R. Amezcua-Correa, A. Tünnermann, I. Pupeza, J. Limpert, Watt-scale super-octave mid-infrared intrapulse difference frequency generation, *Light-science & Applications* 7, 94 (2018).

T. Saule, S. Heinrich, J. Schötz, U. Kleineberg, I. Pupeza, N. Lilienfein, M. Högnér, O. deVries, M. Plötner, J. Weitenberg, D. Esser, J. Schulte, P. Russbuedt, J. Limpert, M.F. Kling, High-flux ultrafast extreme-ultraviolet photoemission spectroscopy at 18.4 MHz pulse repetition rate, *Nature communications* 10 (1), 458 (2019).

**Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)**

G. Q. Ngo, A. George, R. T. K. Schock, A. Tuniz, E. Najafidehaghani, Z. Y. Gan, N. C. Geib, T. Bucher, H. Knopf, S. Saravi, C. Neumann, T. Luhder, E. P. Schartner, S. C. Warren-Smith, H. Ebendorff-Heidepriem, T. Pertsch, M. A. Schmidt, A. Turchanin, F. Eilenberger, Scalable Functionalization of Optical Fibers Using Atomically Thin Semiconductors, *Advanced Materials* 32 (47), 7 (2020).

J. Berzins, S. Indrisiunas, K. van Erve, A. Nagaranjan, S. Fasold, M. Steinert, G. Gerini, P. Gecys, T. Pertsch, S.M.B. Baumer, F. Setzpfandt, Direct and High-Throughput Fabrication of Mie-Resonant Metasurfaces via Single-Pulse Laser Interference, *Acs Nano* 14 (5), 6138-6149 (2020).

K. Tanaka, D. Arslan, S. Fasold, M. Steinert, J. Sautter, M. Falkner, T. Pertsch, M. Decker, I. Staudé, Chiral Bilayer All-Dielectric Metasurfaces, *ACS Nano* 14 (11), 15926–15935 (2020).

**Lehrstuhl für Theorie Optischer Systeme (Prof. Gross)**

S. Schmidt, S. Thiele, A. Toulouse, C. Bösel, T. Tiess, A. Herkommer, H. Gross, H. Giessen, Tailored micro-optical freeform holograms for integrated complex beam shaping, *Optica* 7 (10), 1279-1286 (2020).

S. Merx, J. Stock, F. Widiyari, H. Gross, Beam Characterization by phase retrieval solving the transport-of-intensity equation, *Optics Express* 28 (14), 20898-20907 (2020).

X. Lu, H. Gross, Efficient simulation of surface scattering in symmetry-free optical systems, *Optics Express* 28 (26), 39368 - 39386 (2020).

**Professur für Experimentalphysik/Laserphysik (Prof. Nolte)**

M. Chambonneau, Q. Li, V. Yu. Fedorov, M. Blothe, K. Schaarschmidt, M. Lorenz, S. Tzortzakis, S. Nolte, Taming Ultrafast Laser Filaments for Optimized Semiconductor–Metal Welding, *Laser & Photonics Reviews* 2000433 (2020).

C. Vetter, R. Steinkopf, K. Bergner, M. Ornigotti, S. Nolte, H. Gross, A. Szameit, Realization of Free-Space Long-Distance Self-Healing Bessel Beams, *Laser & Photonics Reviews* 13 (10), 1900103 (2019).

H. Kämmer, G. Matthäus, K.A. Lammers, C. Vetter, M. Chambonneau, S. Nolte, Origin of Waveguiding in Ultrashort Pulse Structured Silicon, *Laser & Photonics Reviews* 13 (2), 1800268 (2019).

**Professur für Technische Physik (Prof. Wyrowski)**

H. Zhong, S. Zhang, O. Baladron-Zorita, R. Shi, C. Hellmann, F. Wyrowski, k-domain method for the fast calculation of electromagnetic fields propagating in graded-index media, *Optics Express* 28 (8), 11074-11084 (2020).

L. Yang, I. Badar, C. Hellmann, F. Wyrowski, Light shaping by freeform surface from a physical-optics point of view, *Optics Express* 28, 16202-16210 (2020).

Z. Wang, O. Baladron-Zorita, C. Hellmann, F. Wyrowski, Generalized Debye integral, *Optics Express* 28 (17), 24459-24470 (2020).

**Außerplanmäßige Professur für Mikro- und Nanostrukturtechnik (apl. Prof. Zeitner)**

K. Dietrich, M. Zilk, M. Steglich, T. Siefke, U. Hübner, T. Pertsch, C. Rockstuhl, A. Tünnermann, E.B. Kley, Merging Top-Down and Bottom-Up Approaches to Fabricate Artificial Photonic Nanomaterials with a Deterministic Electric and Magnetic Response, *Advanced Functional Materials* 30 (3), 1905722 (2020).

A. Tuniz, O. Bickerton, F.J. Diaz, T. Käsebier, E.B. Kley, S. Kroker, S. Palomba, C.M. de Sterke, Modular nonlinear hybrid plasmonic circuit, *Nature Communications* 11 (1), 2413 (2020).

G.K. Tadesse, W. Eschen, R. Klas, V. Hilbert, D. Schelle, A. Nathanael, M. Zilk, M. Steinert, F. Schrempel, T. Pertsch, A. Tünnermann, J. Limpert, J. Rothhardt, High resolution XUV Fourier transform holography on a table top, *Scientific Reports* 8, 8677 (2018).



## Institut für Festkörperphysik

### Lehrstuhl für Angewandte Physik/ Festkörperphysik (Prof. Fritz)

T. Kirchhübel, O. L. A. Monti, T. Munakata, S. Kera, R. Forker, and T. Fritz: "The role of initial and final states in molecular spectroscopies", Invited Perspective, Phys. Chem. Chem. Phys. **21**, 12730-12747 (2019).

DOI: 10.1039/c8cp07318j

### Lehrstuhl für Experimentalphysik/ Festkörperphysik (Prof. Ronning)

M. Zapf, M. Ritzer, L. Liborius, A. Johannes, M. Hafermann, S. Schönherr, J. Segura-Ruiz, G. Martinez-Criado, W. Prost, C. Ronning: "Hot electrons in a nanowire hard X-ray detector", Nature Communications **11**, 4729 (2020)

### Professur für Photonische Nanomaterialien (Prof. Staude)

A. Vaskin, S. Mashhadi, M. Steinert, K. Chong, D. Keene, S. Nanz, A. Abass, E. Rusak, D.-Y. Choi, I. Fernandez-Corbaton, T. Pertsch, C. Rockstuhl, M. Noginov, Y. Kivshar, D. Neshev, N. Noginova, I. Staude, "Manipulation of magnetic dipole emission from Eu<sup>3+</sup> with Mie-resonant dielectric metasurfaces", Nano Lett. **19** 1015–1022 (2019).

### AG Laborastrophysik (PD Dr. Jäger)

A. Potapov, J. Bouwman, C. Jäger, T. Henning: Dust/ice mixing in cold regions and solid-state water in the diffuse interstellar medium, Nat Astron (2020). <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01214-x>

### Lehrstuhl für Festkörperphysik/Quantendektion (Prof. H. Schmidt)

S.V. Vegesna, V. J. Bhat, D. Buerger, J. Dellith, I. Skorupa, O.G. Schmidt, H. Schmidt: "Increased static dielectric constant in ZnMnO and ZnCoO thin films with bound magnetic polarons", Scientific Reports <<https://www.nature.com/srep>> **10**, 6698 (2020)

### Juniorprofessur für Optik zweidimensionaler Festkörper (Jun.-Prof. Soavi)

G. Soavi, G. Wang, H. Rostami, D. G. Purdie, D. De Fazio, T. Ma, B. Luo, J. Wang, A. K. Ott, D. Yoon, S. A. Bourelle, J. E. Muench, I. Goykhman, S. Dal Conte, M. Celebrano, A. Tomadin, M. Polini, G. Cerullo, A. C. Ferrari: "Broadband, electrically tunable third-harmonic generation in graphene", Nature Nanotechnology **13**, 583 (2018)

### Apl. Professur für Dünne Schichten

#### (apl. Prof. Schmidl)

L. Schmidl, G. Schmidl, A. Gawlik, J. Dellith, U. Hübner, V. Tympel, F. Schmidl, J. Plentz, C. Geis & H. Haselmann, Combining super-resolution microscopy with neuronal network recording using magnesium fluoride thin films as cover layer for multi-electrode array technology, Scientific Reports (2019) **9**: 16110, DOI: 10.1038/s41598-018-52397-x

## Institut für Festkörpertheorie und -optik

### Lehrstuhl für Festkörpertheorie (Prof. Botti)

E.M.T. Fadaly, A. Dijkstra, J.R. Suckert, D. Ziss, M.A.J. van Tilburg, C. Mao, Y. Ren, V.T. van Lange, K. Korzun, S. Kölling, M.A. Verheijen, D. Busse, C. Rödl, J. Furthmüller, F. Bechstedt, J. Stangl, J.J. Finley, S. Botti, J.E.M. Haverkort, and E.P.A.M. Bakkers, "Direct-bandgap emission from hexagonal Ge and SiGe alloys", Nature **580**, 205 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2150-y>

### Lehrstuhl für Festkörperoptik (Prof. Peschel)

A.L.M. Muniz, M. Wimmer, A. Bisianov, U. Peschel, R. Morandotti, P. S. Jung, and D.s N. Christodoulides, "2D Solitons in PT-Symmetric Photonic Lattices," Phys. Rev. Lett. **123**, 253903 (2019)

## Institut für Optik und Quanten- elektronik

### Lehrstuhl für Quantenelektronik (Prof. Spielmann)

Z. Samsonova, D. Kartashov, C. Spielmann, S. Bodrov, A. Murzanev, V. Jukna, M. Petrarca, A. Couairo, P. Polynkin, "Measurements of fluence profiles in femtosecond laser sparks and superfilaments in air", PHYSICAL REVIEW A **97**, 6, DOI: 10.1103/PhysRevA.97.063841

Published: JUN 20 2018

Z. Sun, F. Tuitje, C. Spielmann, "Toward high contrast and high-resolution microscopic ghost imaging", OPTICS EXPRESS **27**, 23 (33653-33662)

DOI: 10.1364/OE.27.033652,

Published: NOV 11 2019

R. Hollinger, P. Malevich, V. Shumakova, S. Alisauskas, M. Zapf, R. Röder, A. Pugzlys, A. Baltuska, C. Ronning, C. Spielmann, D. Kartashov,

„Strong Light-Field Driven Nanolasers“, NANO LETTERS 19,6 (3563-3568) DOI: 10.1021/acs.nanolett.9b00510, Published: JUN 2019

Z. Samsonova, S. Höfer, V. Kaymak, A. Alisauskas, V. Shumakova, A. Pugzlys, A. Baltuska, T. Siefke, S. Kroker, A. Pukhov, O. Rosmej, I. Uschmann, C. Spielmann, D. Kartashov, „Relativistic Interaction of Long-Wavelength Ultrashort Laser Pulses with Nanowires“, PHYSICAL REVIEW X 9,2 Article Number: 021029, DOI: 10.1103/PhysRevX.9.021029, Published: MAY 14 2019

T. Helk, M. Zürch, C. Spielmann, „Perspective: Towards single shot time-resolved microscopy using short wavelength table-top light sources“, STRUCTURAL DYNAMICS-US 6,1 Article Number: 010902; DOI: 10.1063/1.5082686, Published: JAN 2019

F. Tuitje, P. M. Gil, T. Helk, J. Gautier, F. Tissandier, J.P. Goddet, A. Guggenmos, U. Kleineberg, S. Sebban, E. Oliva, C. Spielmann, M. Zürch, „Nonlinear ionization dynamics of hot dense plasma observed in a laser-plasma amplifier“, LIGHT-SCIENCE & APPLICATIONS 9,1 Article Number: 187, DOI: 10.1038/s41377-020-00424-2 Published: DEC 18 2020

#### Lehrstuhl für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

P. Wustelt, F. Oppermann, L. Yue, M. Möller, T. Stöhlker, M. Lein, S. Gräfe, G. G. Paulus, M. Saylor, „Heteronuclear Limit of Strong-Field Ionization: Fragmentation of HeH<sup>+</sup> by Intense Ultrashort Laser Pulses“, PHYSICAL REVIEW LETTERS 121,7 Article Number: 073203 DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.073203 Published: AUG 17 2018

L. Stoyanov, G. Maleshkov, M. Zhekova, I. Stefanov, G. G. Paulus, A. Dreischuh, „Controllable beam reshaping by mixing square-shaped and hexagonal optical vortex lattices“, SCIENTIFIC REPORTS 9 Article Number: 2128 DOI: 10.1038/s41598-019-38608-5 Published: FEB 14 2019

Y.Y. Zhang, D. Zille, D. Hoff, P. Wustelt, D. Würzler, M. Möller, A. M. Saylor, G. G. Paulus, „Observing the Importance of the Phase-Volume Effect for Few-Cycle Light-Matter Interactions“, PHYSICAL REVIEW LETTERS 124,13 Article Number: 133202, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.133202, Published: MAR 31 2020

#### Lehrstuhl für Relativistische Laserphysik (Prof. Kaluza)

M.C. Downer, R. Zgadzaj, A. Debus, U. Schramm, M.C. Kaluza, „Diagnostics for plasma-based electron accelerators“, REVIEWS OF MODERN PHYSICS 90,3 Article Number: 035002 DOI: 10.1103/RevModPhys.90.035002 Published: AUG 8 2018

J. Polz, A. P. L. Robinson, A. Kalinin, G.A. Becker, R.A.C. Fraga, M. Hellwing, M. Hornung, S. Keppeler, A. Kessler, D. Klöpfel, H. Liebetrau, F. Schorcht, J. Hein, M. Zepf, R.E. Grisenti, M.C. Kaluza, „Efficient Laser-Driven Proton Acceleration from a Cryogenic Solid Hydrogen Target“, SCIENTIFIC REPORTS 9 Article Number: 16534, DOI: 10.1038/s41598-019-52919-7 Published: NOV 11 2019

M.B. Schwab, E. Siminos, T. Heinemann, D. Ullmann, F. Karbstein, S. Kuschel, A. Sävert, M. Yeung, D. Hollatz, A. Seidel, J. Cole, S.P.D. Mangles, B. Hidding, M. Zepf, S. Skupin, M. C. Kaluza, „Visualization of relativistic laser pulses in underdense plasma“, PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 23,2 DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.23.032801 Published: MAR 2 2020

#### Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung (Prof. Zepf)

S. Kuschel, M.B. Schwab, M. Yeung, D. Hollatz, A. Seidel, W. Ziegler, A. Sävert, M.C. Kaluza, M. Zepf, „Controlling the Self-Injection Threshold in Laser Wakefield Accelerators“, PHYSICAL REVIEW LETTERS 121,15 Article Number: 154801 DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.154801 Published: OCT 8 2018

F. Karbstein, A. Blinne, H. Gies, M. Zepf, „Boosting Quantum Vacuum Signatures by Coherent Harmonic Focusing“, PHYSICAL REVIEW LETTERS 123,9 Article Number: 091802 DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.091802, Published: AUG 30 2019

Y.X. Zhang, S. Rykovanov, M.Y. Shi, C.L. Zhong, X.T. He, B. Qiao, M. Zepf, „Giant Isolated Attosecond Pulses from Two-Color Laser-Plasma Interactions“, PHYSICAL REVIEW LETTERS 124,11 Article Number: 114802, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.114802, Published: MAR 18 2020

### Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen (Prof. Stöhlker)

S. Kraft-Bermuth, D. Hengstler, P. Egelhof, C. Enss, A. Fleischmann, M. Keller, T. Stöhlker, „Microcalorimeters for X-Ray Spectroscopy of Highly Charged Ions at Storage Rings“, ATOMS 6,4 Article Number: 59, DOI: 10.3390/atoms6040059, Published: DEC 2018

I.A. Maltsev, V.M. Shabaev, R.V. Popov, Y.S. Kozhedub, G. Plunien, X. Ma, T. Stöhlker, D.A. Tumafov, „How to Observe the Vacuum Decay in Low-Energy Heavy-Ion Collisions“, PHYSICAL REVIEW LETTERS 123,11 Article Number: 113401, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.113401 Published: SEP 12 2019

S. Kühn, C. Shah, J. R. C. Lopez-Urrutia, K. Fujii, R. Steinbrügge, J. Stierhof, M. Togawa, Z. Harman, N.S. Oreshkina, C. Cheung, M.G. Kozlov, S. G.; Porsev, M.S. Safronova, J.C. Berengut, M. Rosner, M. Bissinger, R. Ballhausen, N. Hell, S. Park, M. Chung, M. Hoesch, J. Seltmann, A.S. Surzhykov, V. A. Yerokhin, J. Wilms, F.S. Porter, T. Stöhlker, C.H. Keitel, T. Pfeifer, G.V. Brown, M.A. Leutenegger, S. Bernitt, „High Resolution Photoexcitation Measurements Exacerbate the Long-Standing Fe XVII Oscillator Strength Problem“, PHYSICAL REVIEW LETTERS 124,22 Article Number: 225001, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.225001, Published: JUN 1 2020

### AG Attosekunden-Laserphysik (Dr. Pfeiffer)

C. Leithold, J. Reislöhner, J.D. Aguilon, A.N. Pfeiffer, „Characterization of over-octave-spanning laser pulses using interferometric imaging of self-diffraction“, JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B-OPTICAL PHYSICS 35,8 (1928-1938), DOI: 10.1364/JOSAB.35.001928 Published: AUG 1 2018

J. Reislöhner, C. Leithold, A.N. Pfeiffer, „Harmonic Concatenation of 1.5 fs Pulses in the Deep Ultraviolet“, ACS PHOTONICS 6,6 (1351-1355), DOI: 10.1021/acsphotonics.9b00219 Published: JUN 2019

A.N. Pfeiffer, „Iteration of semiconductor Bloch equations for ultrashort laser pulse propagation“, JOURNAL OF PHYSICS B-ATOMIC MOLECULAR AND OPTICAL PHYSICS 53, 16 Article Number: 164002, DOI: 10.1088/1361-6455/ab94cb Published: AUG 28 2020

### Lehrstuhl für Röntgenphysik (Prof. Röhlberger)

Y.Y. Kim, L. Gelisio, G. Mercurio, S. Dziarzhytski, M. Beye, L. Bocklage, A. Classen, C. David, O.Y. Gorobtsov, R. Khubbutdinov, S. Lazarev, N. Mukharamova, Y.N. Obukhov, B. Rösner, K. Schlage, I.A. Zaluzhnyy, G. Brenner, R. Röhlberger, J. von Zanthier, W. Wurth, I.A. Vartanyants, „Ghost imaging at an XUV free-electron laser“, PHYSICAL REVIEW A 101,1 Article Number: 013820, DOI: 10.1103/PhysRevA.101.013820, Published: JAN 17 2020

## Otto-Schott-Institut für Materialforschung

### Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe (Prof. Rettenmayr)

D. Jou, P.K. Galenko „Rapid solidification as non-ergodic phenomenon“ Physics Reports 818 (2019) 1-70, DOI: 10.1016/j.physrep.2019.06.002

R. Wonneberger, M. Seyring, K.E. Freiberg, A. Carlsson, J. Rensberg, B. Abendroth, H. Stöcker, M. Rettenmayr, A. Undisz „Oxidation of Stainless Steel 316L at Elevated Temperature – Oxide Grains With Pronounced Inhomogeneous Composition“ Corrosion Science 149 (2018) 178-184, DOI: 10.1016/j.corsci.2018/12.035

S. Lippmann, C. Simon, S. Bode, M. Seyring, U.S. Schubert, G. Wilde, M. Rettenmayr „Determining Solid/Liquid Interfacial Energies in Al-Cu by Curvature Controlled Melting Point Depression“ Acta Materialia 147 (2018) 113-121, DOI: 10.1016/j.actamat.2018.01.012

M. Salge, G. Wiehl, K. Hack, M. Rettenmayr, „Resolidification of a Mushy-Zone and Directional Solidification: a High-Throughput Method for Efficient Alloy Development Demonstrated Using the Example of Cu-Zn-Ga System“ Scientific Reports 10 (2020) 21705, DOI: 10.1038/s441598-020-78772-7

### Lehrstuhl für Materialwissenschaft (Prof. Jandt)

I. Firkowska-Boden, C. Helbing, T. J. Dauben, M. Pieper, K. D. Jandt “How Nanotopography-Induced Conformational Changes of Fibrinogen Affect Platelet Adhesion and Activation” Langmuir, 2020, doi:10.1021/acs.langmuir.0c02094

H. Cao, X. Liu, K. D. Jandt "The action-network of nanomaterials" in "On the issue of transparency and reproducibility in nanomedicine" Nature Nanotechnology, 2019, doi: 10.1038/s41565-019-0496-9

C. Helbing, T. Deckert-Gaudig, I. Firkowska-Boden, G. Wei, V. Deckert, K. D. Jandt "Protein Handshake on the Nanoscale: How Albumin and Hemoglobin Self-Assemble into Nanohybrid Fibers" ACS Nano, 2018, doi: 10.1021/acsnano.7b07196

#### Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien (Prof. Müller)

A.V. Boehm, S. Meininger, U. Gbureck, F.A. Müller "Self-healing capacity of fiber-reinforced calcium phosphate cements" Sci. Rep. 10 (2020) 9430, DOI: 10.1038/s41598-020-66207-2

P. Weyell, H.D. Kurland, T. Hülser, J. Grabow, F.A. Müller, D. Kralisch "Risk and Life Cycle Assessment of Nanoparticles for Medical Applications Prepared Using Safe- and Benign-by-Design Gas-Phase Syntheses" Green Chem. 22 (2020) 814-827, DOI: 10.1039/c9gc02436k

S. Gräf, C. Kunz, A. Undisz, R. Wonneberger, M. Rettenmayr, F.A. Müller "Mechano-responsive colour change of laser-induced periodic surface structures" Appl. Surf. Sci. 471 (2019) 645-651, DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.12.051

#### Professur für Computational Materials Science (Prof. Sierka)

H. W. Klemm, M. J. Prieto, F. Xiong, G. B. Hassine, M. Heyde, D. Menzel, M. Sierka, T. Schmidt, H.-J. Freund „ A Silica Bilayer Supported on Ru(0001): Following the Crystalline-to Vitreous Transformation in Real Time with Spectro-microscopy" Angew. Chem. Int. Ed. 59 (2020) 10587-10593, DOI: 10.1002/anie.202002514

#### Professur für Mechanik funktioneller Materialien (Prof. Gnecco)

A. Özogul, F. Trillitzsch, C. Neumann, A. George, A. Turchanin, E. Gnecco: "Plowing-induced nanoexfoliation of mono- and multilayer MoS<sub>2</sub> surfaces", Phys. Rev. Materials 4 (2020) 033603, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.4.033603

R. Pawlak, J. G. Vilhena, A. Hinaut, T. Meier, T. Glatzel, A. Baratoff, E. Gnecco, R. Pérez, E. Meyer: "Conformations and cryo-force spectroscopy of spray-deposited single-strand DNA on gold", Nature Communications 10 (2019) 685, DOI: 10.1038/s41467-019-08531-4

M. Vorholzer, J. G. Vilhena, R. Perez, E. Gnecco, D. Dietzel, A. Schirmeisen: "Temperature Activates Contact Aging in Silica Nanocontacts", Phys. Rev. X 9 (2019) 041045, DOI: 10.1103/PhysRevX.9.041045

## Theoretisch-Physikalisches Institut

#### Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Wipf)

D. August, B. Wellegehausen and A. Wipf „Two-dimensional N = 2 Super-Yang-Mills Theory“, EPJ Web of Conferences 175, 08021 (2018)

S. Ali, G. Bergner, H. Gerber, I. Montvay, G. Münster, S. Piemonte, P. Scior „Numerical Results for the Lightest Bound States in N=1 Supersymmetric SU(3) Yang-Mills Theory“, Phys Rev Lett. 2019 Jun 7;122(22):221601.

L. Inzunza, M. S. Plyushchay & A. Wipf „Hidden symmetry and (super)conformal mechanics in a monopole background“, Journal of High Energy Physics 28 (2020)

#### Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Gies)

M. Reichert, A. Eichhorn, H. Gies, J. M. Pawlowski, T. Plehn „Probing baryogenesis through the Higgs boson self-coupling“, Phys.Rev.D 97 (2018) 7, 075008

F. Karbstein, A. Blinne, H. Gies, M. Zepf „Boosting quantum vacuum signatures by coherent harmonic focusing“, Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 9, 091802

H. Gies, J. Ziebell „Asymptotically Safe QED“, Eur.Phys.J.C 80 (2020), 607

#### Professur für Raumzeit und Materie (Ammon)

L. Alberte, M. Ammon, A. Jimenez-Alba, M. Baggioli, O. Pujolas, „ Black hole elasticity and gapped transverse phonons in holo-graphy,“ JHEP 2018, DOI:10.1007/JHEP01(2018)129.

L. Alberte, M. Ammon, A. Jimenez-Alba, M. Baggioli, O. Pujolas, „Holographic Phonons“ Phys. Rev. Lett., 2018, DOI:10.1103/PhysRevLett.120.171602.

M. Ammon, M. Baggioli, S. Gray, S. Grieneringer, A. Jain, „On the hydrodynamic description of holographic viscoelastic models“, Phys. Lett. B. 2020, DOI:10.1016/J.PhysLetB.2020.135691.

#### Lehrstuhl für Gravitationstheorie (Brüggmann)

W. Tichy, A. Rashti, T. Dietrich, R. Dudi, B. Brüggmann „Constructing binary neutron star initial data with high spins, high compactnesses, and high mass ratios“, Phys.Rev. D100 (2019) no.12, 124046

L. Barack et al. (incl. B. Brüggmann and S. Bernuzzi) „Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap“, Class.Quant.Grav. 36 (2019) no.14, 143001



T. Dietrich, A. Samajdar, S. Khan, N. K. Johnson-McDaniel, R. Dudi, W. Tichy „Improving the NRTidal model for binary neutron star systems“, *Phys.Rev. D*100 (2019) no.4, 044003

#### Professur für Gravitationstheorie (Prof. Bernuzzi)

D. Radice, A. Perego, K. Hotokezaka, S. A. Fromm, S. Bernuzzi, L. F. Roberts, “Binary Neutron Star Mergers: Mass Ejection, Electromagnetic Counterparts, and Nucleosynthesis“, *The Astrophysical Journal*, Volume 869, Number 2

F. Zappa, S. Bernuzzi, F. Pannarale, M. Mapelli, N. Giacobbo, „Black-Hole Remnants from Black-Hole–Neutron-Star Mergers“, *Physical Review Letters*, 123: 041102. doi:10.1103/PhysRevLett.123.041102.

D. Radice, S. Bernuzzi, A. Perego „The Dynamics of Binary Neutron Star Mergers and GW170817“, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* Vol. 70:95-119 (Volume publication date October 2020)

#### Dozentur für Relativistische Astrophysik (apl. Prof. Meinel)

D. Hilditch, A. Schoepe, „Hyperbolicity of divergence cleaning and vector potential formulations of general relativistic magnetohydrodynamics“, *Phys. Rev. D* 99, 104034 (2019), DOI: 10.1103/PhysRevD.99.104034

R. Meinel, „Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie für Bachelorstudenten“ (zweite Auflage), Springer-Verlag Berlin 2019, DOI: 10.1007/978-3-662-58967-0

R. Meinel, A. Kleinwächter, „Bäcklund transforms of the extreme Kerr near-horizon geometry“, *Phys. Lett. A* 384, 126572 (2020), DOI: 10.1016/j.physleta.2020.126572

#### Lehrstuhl für Theorie korrelierter Quantensysteme (Prof. Fritzsche)

V. A. Zaytsev, A. V. Volotka, D. Yu, S. Fritzsche, X. Ma, H. Hu, and V. M. Shabaev, „Ab initio QED Treatment of the Two-Photon Annihilation of Positrons with Bound Electrons“, *Phys. Rev. Lett.* 123, 093401 – Published 26 August 2019

A. Perry-Sassmannshausen, T. Buhr, A. Borovik, Jr., M. Martins, S. Reinwardt, S. Ricz, S. O. Stock, F. Trinter, A. Müller, S. Fritzsche, and S. Schippers, „Multiple Photodetachment of Carbon Anions via Single and Double Core-Hole Creation“ *Phys. Rev. Lett.* 124, 083203 – Published 27 February 2020

T. K. Sato\*, M. Asai, A. Borschevsky, R. Beerwerth, Y. Kaneya, H. Makii, A. Mitsukai, Y. Nagame, A. Osa, A. Toyoshima, K. Tsukada, M. Sakama, S. Takeda, K. Ooe, D. Sato, Y. Shigekawa, S. Ichikawa, C. E. Düllmann, J. Grund, D. Renisch, J. V. Kratz, M. Schädel, E. Eliav, U. Kaldor, S. Fritzsche, T. Stora, „First Ionization Potentials of Fm, Md, No, and Lr: Verification of Filling-Up of 5f Electrons and Confirmation of the Actinide Series“, *J. Am. Chem. Soc.* 2018, 140, 44, 14609–14613, Publication Date: October 25, 2018

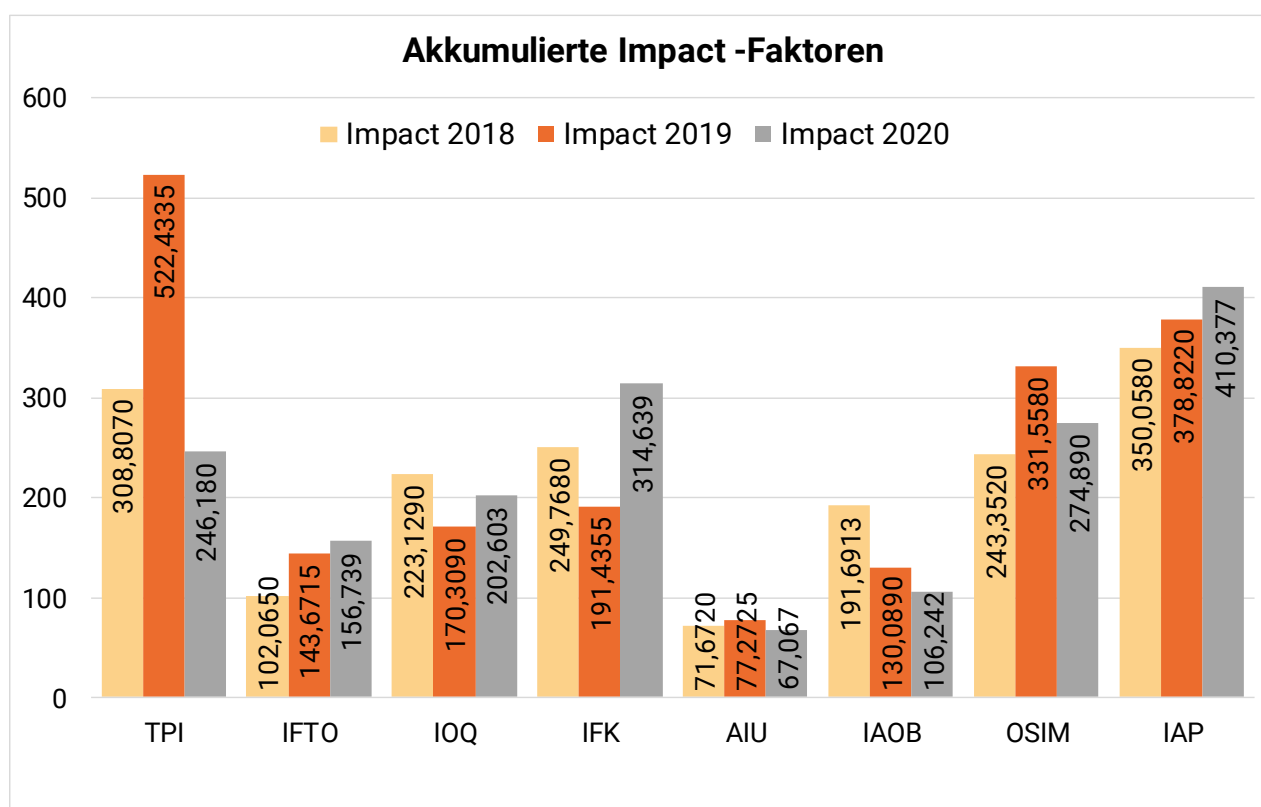
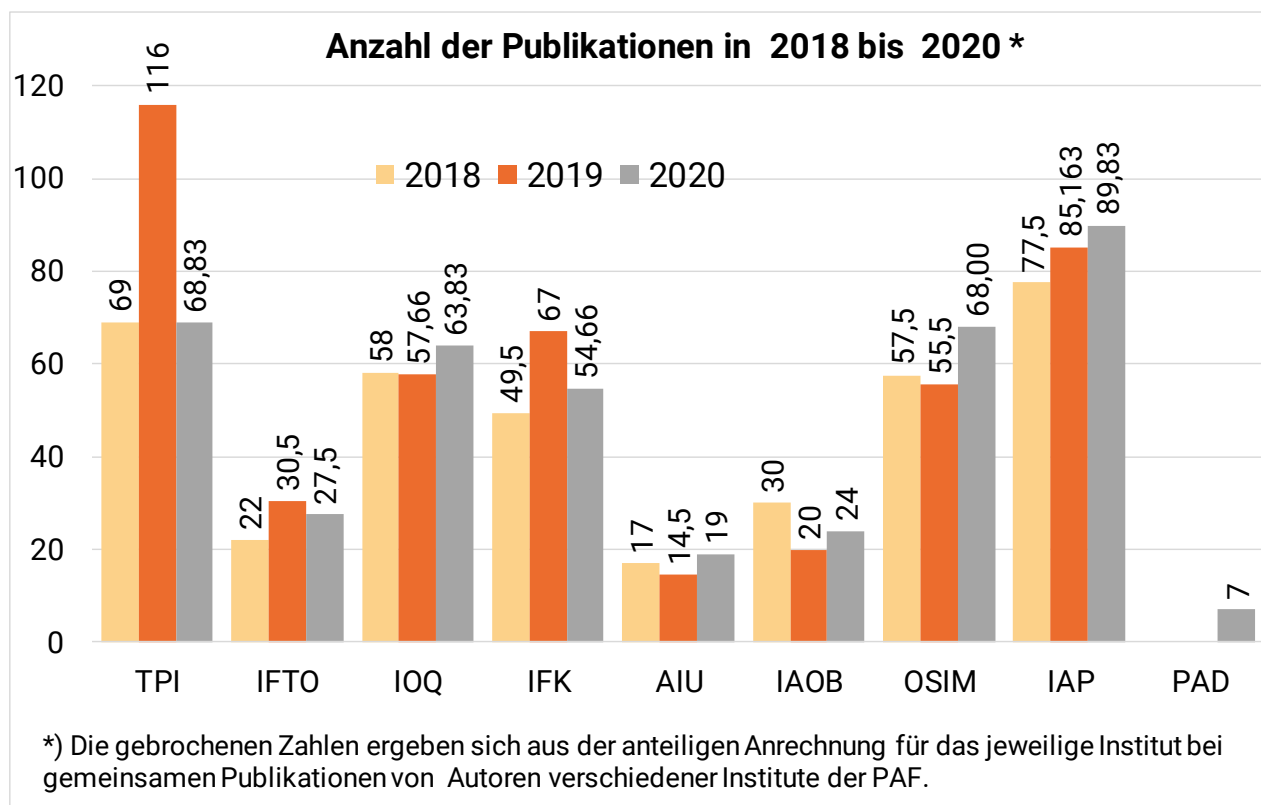
### AG Physik- und Astronomiedidaktik

K.-H. Lotze, S. Simionato, „Gravitational Lensing as Focal Point for Teaching General Relativity“ In: *Teaching Einsteinian Physics in Schools*, Routledge – Taylor and Francis Group (erscheint 2021)

J. Schneider, H. Cartarius, „Experimente und Lerneinheiten zur modernen Physik im Schülerlabor - Untersuchung der Zeitdilatation mit einer relativistischen Uhr“, In: *Frühjahrstagung Bonn 2020*, V. Nordmeier, H. Grötzebach (Eds.) *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, pp. 423-427 (2020)

P. Scheiger, R. Nawrodt, H. Cartarius, „Interaktive und aktivierende Lehrkonzepte in der Theoretischen Physik“ In: *Frühjahrstagung Bonn 2020*, V. Nordmeier, H. Grötzebach (Eds.) *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, pp. 77-83 (2020)





## Tagungen

Die nachfolgende Auflistung enthält Tagungen und Konferenzen, die in den Jahren 2018 bis 2020 von Arbeitsgruppen der PAF (mit)-organisiert und (mit)-veranstaltet wurden.

### Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

#### Lehrstuhl für Astrophysik (Prof. Neuhäuser)

Internationaler Workshop "Young Exoplanet Transit Initiative" (YETI) 18. + 19. Okt. 2018 in Jena

Focus Meeting 5 "Understanding historical observations to study transient phenomena" bei der General Assembly der International Astronomical Union, Wien, 20.-22. August 2018, SOC Co-Chair: R. Neuhäuser (U Jena)

Lorentz-Center Workshop "Historical Supernovae, Novae and Other Transient Events" SOC: J. McAllister, R. Neuhäuser, J. Vink, P. Zhou, 14.-18. Okt. 2019

#### Professur für Astronomie (Prof. Krivov)

International Workshop "Planets Days" bei der General Assembly der International Astronomical Union, Wien, 24. August 2018, SOC-Mitglied: A. Krivov

International Workshop "Planet Formation and Evolution", Rostock, 27. Februar - 1. März 2019, SOC-Mitglieder: A. Krivov und R. Neuhäuser

International Workshop "Current and future trends in debris disc science II", Budapest, Ungarn, 23.-25. September 2019 SOC-Mitglied: A. Krivov

#### Full Meetings der DFG FOR 2285:

- Braunschweig, Februar 2018;
  - Kiel, Februar 2020
  - Jena, September 2020 (hybrid),
- Organisation: A. Krivov

### Institut für Angewandte Optik und Biophysik

#### Lehrstuhl für Superaufgelöste Mikroskopie (Prof. Eggeling)

International Conference on Nanoscopy 2020 (Jena, 7-9.9.2020) – verschoben auf 6-9.9.2021, Organisator

SPIE Photonics West BIOS, Single Molecule Spectroscopy and Superresolution Imaging, USA, 1-6.02.2020, Co-Organisator

### Institut für Angewandte Physik

#### Lehrstuhl für Angewandte Physik (Prof. Tünnermann)

SPIE Photonics West, Industry Panel »Next Generation Fiber Technology: Perspective and Roadmap«, San Francisco, USA, Jan. 2018.

SID spring meeting, Kahla, Apr. 2018.

14. Jenaer Lasertagung, Nov. 2018.

ODF'18, Hiroshima, Japan, Nov. 2018.

SPIE Defence + Commercial Sensing DCS, Orlando, USA, April 2018 (S. Heist).

Photonics Days, Jena, Sept. 2019 & 2020.

LASER World of Photonics: Optical Quantum Technologies: Double Panel, München, Jun. 2019.

QUILT Project Workshop: Challenges and benefits of Quantum Technology in Imaging and Spectroscopy, Königssee, Jun. 2019.

Helmholtz Symposium "Ein Leben für den Laser", Hannover, Germany, Sept. 2019.

Öffentlicher Workshop: fo+ »freeform optics plus«, FORUM Halle B3: Laser and Optics, Jun. 2019.

Industry Panel: Diodengepumpte Festkörperlaser und Faserlaser, FORUM Halle B3: Laser and Optics, Jun. 2019.

Fraunhofer-Symposium: Digital Photonics made in Germany, Tokio, Japan, Oct. 2019.

High-Level Dialog »Quantum Technologies – Challenge and Potential for Real World Applications«, Japan, Oct. 2019.

Ultra Precision Manufacturing of Aspheres and Freeforms - Imaging and Non-imaging Applications, UPM Workshop 2019.

QuNET-Szenarioworkshop, online, Nov. 2020.

#### Professur für Festkörperlaser (Prof. Limpert)

CLEO Europe conference, München, Jun. 2018 & 19, online May 2020 (J. Rothhardt).

CLEO Europe conference, München, Jun. 2019 (C. Jáuregui Misas).

**Photonics West: Fiber Lasers conference**, San Francisco, USA, Jan. 2018/19/20 (C. Jáuregui Misas).

**SPIE Photonics West, Industry Panel »Next Generation Fiber Technology: Perspective and Roadmap«**, San Francisco, USA, Jan. 2018 (J. Limpert)

**Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)**

**SPIE Photonics West**, Jan. 2018/19/20, San Francisco.

**OSA Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides**, Jul. 2018, Zürich.

**CIRP Conference on Photonic Technologies LANE**, Sept. 2018, Fürth & Sept. 2020 online.

**Jenaer Lasertagung JLT**, Nov. 2018, Jena.

**CLEO US**, May 2020, online.

**CLEO Europe**, Jun. 2019, München.

**Lasers in Manufacturing LiM**, Jun. 2019, München.

**ICALEO**, Oct. 2020, online.

**Junior-Professur für Funktionelle Photonische Materialien (Jun.-Prof. Staude)**

**Metanano 2018 Conference**, Sochi, Russland, Sept. 2018

**SPIE Optics + Photonics**, San Diego, USA, Aug. 2018

**13<sup>th</sup> International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena**, Rom, Italien, Sept. 2019

**CLEO US**, San Jose, USA, May 2019

**Lehrstuhl für Theorie optischer Systeme (Prof. Gross)**

**SPIE Defence + Commercial Sensing DCS**, Orlando, USA, Apr. 2018.

**SPIE, Optical Systems Design**, Frankfurt a.M., May 2018.

**EOS Annual meeting TOM 3 / Freeform Optics**, Delft, Niederlande, Oct. 201.

**European Optical Society Annual Meeting**, Munic, Jun. 2019.

**European Optical Society Annual Meeting**, online, Sept. 2020.

**Apl. Professur für Mikro- und Nanostrukturtechnik (Prof. Zeitner)**

**SPIE Advanced Lithography: Optical Microlithography XXXI**, San Jose, USA, May 2018.

**Microoptics Conference, MOC2018**, Taipei, Taiwan, Oct. 2018.

**SPIE Advanced Lithography: Optical Microlithography XXXII**, San Jose, USA, Feb. 2019.

**Microoptics Conference, MOC2019**, Toyama, Japan, May 2019.

**SPIE Advanced Lithography: Optical Microlithography XXXIII**, online, Feb. 2020.

**Professur für Technische Physik (Prof. Wyrowski)**

**SPIE Optical System Design**, Frankfurt a.M., May 2018.

**SPIE Computational Optics II**, Frankfurt a.M., May 2018.

**SPIE Photonics Europe**, Strasbourg, France, Apr. 2018.

**SPIE Light Shaping Focus Session**, Strasbourg, France, Apr. 2018.

**SPIE Conference on Digital Optics for Immersive Displays**, Strasbourg, France, Apr. 2018.

**SPIE Modeling Aspects in Optical Metrology VII**, Munic, Jun. 2019.

**EOS Topical Meeting on Diffractive Optics**, Jena, Sept. 2019.

## Institut für Festkörperphysik

**Professur für Photonische Nanomaterialien (Prof. Staude)**

**SPIE-Active Photonic Platforms XI (2020)**, San Diego, USA, Program committee member

**Metamaterials conference at SPIE Photonics Europe 2020**, Strasbourg, France, Co-Chair

## Institut für Festkörpertheorie und -optik

**24<sup>th</sup> ETSF Workshop on Electronic Excitations**, 16.-20.09.2019, Jena, Programm-Komitee



Foto: Andrea Cucca, Ecole polytechnique Palaiseau, France

## Institut für Optik und Quantenelektronik

Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung  
(Prof. Zepf)

**EXHILP Conference 2019 Stanford**, Scientific Advisory Committee, 03.-06.09.2019, Stanford, USA

Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen  
(Prof. Stöhlker)

**APPA R&D Collaboration Meeting**, 11.-12.01.2018, Darmstadt

**19<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Highly Charged Ions**, 03.-07.09.2018, Lissabon, Portugal, (International Advisory Board)

**15<sup>th</sup> SPARC Topical Workshop**, 07.-11.09.2018, Lissabon, Portugal

**EMMI Rapid Reaction Task Force "1s Lamb shift in heavy H-like ions: towards an accuracy of <math><1\text{eV}</math>"**, 17.-19.09.2018, Jena

**MML Workshop at HZDR / Dresden**, 13.-15. Februar 2019, Dresden

**5<sup>th</sup> Annual MT Meeting**, 05.-07.03.2019, Jena, (C. Hahn)

**16<sup>th</sup> SPARC Topical Workshop**, 08.-13.09.2019, Jena, (T. Stöhlker, C. Hahn)

**APPA R&D Collaboration Meeting**, 16.-17.01.2020, Darmstadt

**17<sup>th</sup> SPARC Topical Workshop**, 14.-16.09.2020, Online, (T. Stöhlker, C. Hahn)

Lehrstuhl für Relativistische Laserphysik  
(Prof. Kaluza)

**High-Power, High-Energy, and High Intensity Laser Technology** (part of SPIE Optics+Optoelectronics), 01.-04.04.2019, Prag, Tschechien, (J. Hein, J. Körner)

**11. HEC-DPSSL Workshop**, 13.-16.10.2019, Daejeon, Korea, (J. Hein)

Lehrstuhl für Röntgenphysik (Prof. Röhlberger)

**German Mössbauer Workshop**, 07.-09.10.2020, Online

Lehrstuhl für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

**27<sup>th</sup> annual International Laser Physics Workshop**, 16.-20.07.2018, Nottingham, England, (M. Kübel-Schwarz)

**Multiphoton Processes Gordon Research Conference**, 24.-29.06.2018, Smithfield, RI, USA, (M. Kübel-Schwarz)

**7th International Conference ATTO**, 01.-05. July 2019, Szeged, Hungary, (M. Kübel-Schwarz)

**Quantum Battles in Attoscience 2020**, 30.06.-02.07.2020, Online, (M. Kübel-Schwarz)

## Otto-Schott-Institut für Materialforschung

Lehrstuhl für Materialwissenschaft (Prof. Jandt)

**Projektmeeting HyFly**, Jena (21.03.2018)

**9. Sitzung des DGM-Fachausschusses Biomaterialien**, Wangs (Schweiz (11.10. – 12.10.2018)

**5<sup>th</sup> Euro BioMAT 2019 - European Symposium and Exhibition on Biomaterials and Related Areas**, Weimar/Lengefeld (08.05. - 09.05.2019)

**Konferenz des DGM-Fachausschusses Biomaterialien**, Jena (07.05.2020)

**PI-Meeting DFG-RTG 2723**, Jena (17.09.2020)

## Theoretisch-Physikalisches Institut

**Frühjahrsschule Perlen der Theoretischen Physik**, Jena, 2018 und 2019

Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Gies)

**Physik-Combo, RTG Monitoring Workshop**, Web Meeting, 21 - 23 September 2020

**ECT\* colloquium: "Emergence of relativistic flatland fermions in systems without fermions"**, Online Colloquium, 30 September 2020

**FOR 2783 Retreat 2020, Annual meeting of the Research Unit on Probing the Quantum Vacuum**, Munich / online, 5-6 May 2020

**RTG 2522, Kickoff Meeting**, Bad Kösen, 25 - 26 February 2020

**SIFT 2019, Workshop on Strongly Interacting Field Theories**, FSU Jena, 7 - 9 November 2019

**DESY Theory Workshop, Quantum Field Theory meets Gravity**, Hamburg, 24 - 27 Sep 2019



**Quantum Fields, Quantum Fields - from Fundamental Concepts to Phenomenological Questions**, MITP, Mainz, September 26 - 28, 2018

Lehrstuhl für Gravitationstheorie  
(Prof. Brügmann)

**PHAROS PhD Training School "Multimessenger Physics and Astrophysics"**, Jena, 2019,  
(Brügmann, Bernuzzi)

**MICRA 2019, "Microphysics in Computational Relativistic Astrophysics"**, Jena, 2019,  
(Brügmann, Bernuzzi)

**"Machine Learning in Physics – Physics for Machine Learning"**, Jena, 2019

**"Frontiers in Numerical Relativity 2020"**, Chair of International Organizing Committee, postponed and planned online, 2021

Professur für Raumzeit und Materie  
(Prof. Ammon)

**Konferenz "Gauge/Gravity Duality"**, 2018, Würzburg

**Workshop on strongly interacting field theories 2019**

### AG Physik- und Astronomiedidaktik

**Heraeus Summer School „Astronomy from 4 perspectives"**, Jena, 02.-07. September 2019

**Bundesweite Lehrerfortbildung ASTRONOMIE**, Jena, 08.-10 Juli 2019

**Bundesweite Lehrerfortbildung ASTRONOMIE**, 02.-04. Juli 2018



Die Teilnehmer der deutsch-italienischen Heraeus-Sommerschule „Astronomy from 4 perspectives“ 2019 bei einer Exkursion zu den Dornburger Schlössern. Foto: Uwe Alberti



## Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte (AIU)



**Institutsdirektor: Prof. Dr. Ralph Neuhäuser**

**Lehrstuhl für Astrophysik**

Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

**Professur für Astronomie**

Prof. Dr. Alexander Krivov

**Adresse:** Schillergässchen 2 –3, 07745 Jena

**Homepage:** [www.astro.uni-jena.de](http://www.astro.uni-jena.de)



## Lehrstuhl für Astrophysik Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

### Forschungsschwerpunkte

- Terra-Astronomie: Verwendung historischer Beobachtungen für aktuelle astrophysikalische Fragestellungen, insbesondere Rekonstruktion der Sonnenaktivität und historische (Super-)Novae.
- Neutronensterne und Runaway-Sterne: Rückrechnung der Bewegung von Neutronensternen und Runaway-Sterne (Gaia-Daten) zur Untersuchung naher Supernovae in Doppelsternen, u.a. als Ursprung des zwei Millionen Jahre alten 60-Fe, das in der Erdkruste gefunden wurde.
- Extra-solare Planeten sowie Entstehung von Sternen, Braunen Zwergen und Planeten: Multiplizität von Planeten-Muttersternen (Gaia-Daten und Adaptive Optik) sowie Beobachtung junger Transit-Planeten
- Laborastrophysik: Staub-Opazitäten und Impakt-Experimente

### Terra-Astronomie—Rekonstruktion der Sonnenaktivität der letzten Jahrhunderte

Wegen der aktuell etwas geringeren Sonnenaktivität ist das Studium des letzten langen Grand Minimums wieder aktuell: das Maunder-Minimum (1645 bis 1715); Aktivitäts-Proxies: Sonnenflecke, Polarlichter, Radioisotope. Wir haben aus den Fleckenbeobachtungen von Gottfried Kirch (Briefe und Zeichnungen 1680-1709), die Lage von Flecken auf der Sonnenoberfläche mit Bayesischen Methoden ermittelt und somit das Schmetterlings-Diagramm ergänzt. Flecken gab es fast nur auf der Südhemisphäre (Neuhäuser, Artl, Richter, 2018, AN 339, 219-267).

ser, Artl, Richter, 2018, AN 339, 219-267).

Satellitendaten vom Aurora-Oval wurden verwendet, um eine Korrelation zwischen Sonnensturmstärke (Kp-Index) und Oval-Radius zu ermitteln (Wagner, Neuhäuser, 2019, Astron. Notes 340, 483). Zudem verwenden wir historische Polarlicht-Sichtungen, um damit das Aurora-Oval, die Stärke historischer Sonnenstürme und die Lage des Geomagnets zu bestimmen. (Wagner, 2020, Dissertation)

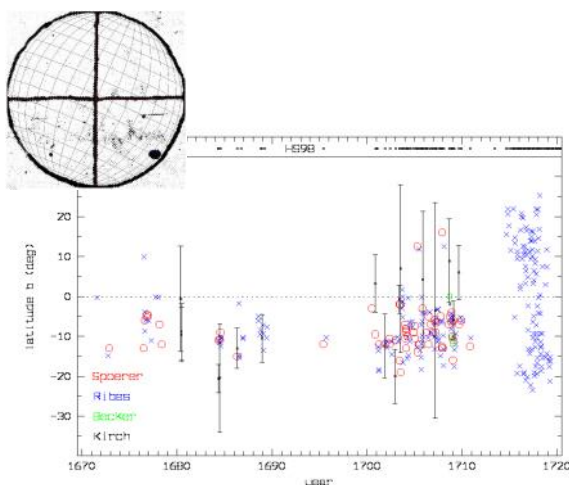


Abb. 1. Heliographische Breiten der Sonnenflecken im Maunder-Minimum: Flecken fast nur im Süden, ein Hinweis auf die Ursache des Minimums. Oben links: Fleckenzeichnung von Ihle an Kirch: Breite  $-20.5 \pm 3.5^\circ$  (Masterarbeit Susanne Richter).

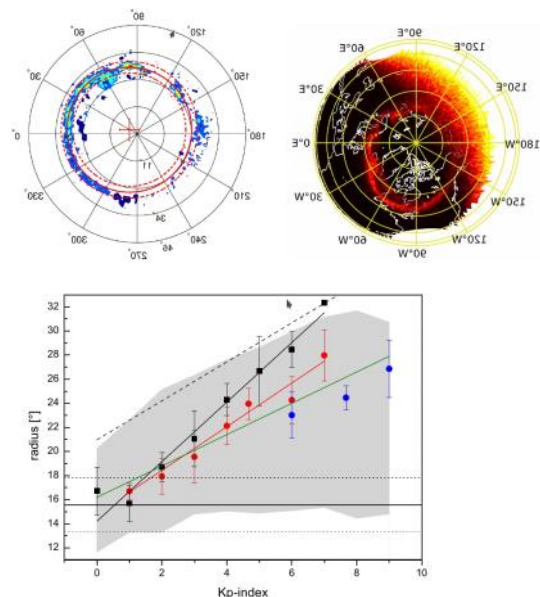


Abb. 2. Aurora-Oval (UV-Satellit DE1). Links: Korrelation zwischen Kp-Index und Radius des Aurora-Ovals. (Daniel Wagner, Dissertation 2020)

## Neutronensterne und Runaway-Sterne – nahe Supernovae als Quellen für 60-Fe auf der Erde

Wir berechnen die Flugbahnen von 400 Neutronensternen mit bekannten astrometrischen Parametern und Tausenden von Runaway-Sternen (Gaia-Daten) in drei Dimensionen im galaktischen Potential zurück, um Orte und Zeiten zu finden, in denen sie bei Supernovae in Doppelsternen ungebunden wurden (Monte-Carlo Simulationen für die unsicheren Radialgeschwindigkeiten der Neutronensterne). Als Beispiel war der O9-Runaway zeta Oph vor 1,8 Mio. Jahren am gleichen Ort wie der Pulsar PSRB1706, etwa 107pc entfernt in der jungen Upper-Centaurus-Lupus (UCL) Assoziation; bei dieser Supernova wurde 60-Fe abgegeben, das in der Erdkruste gefunden wurde. Wir bestimmten die Masse (17 Sonnenmassen) des Vorläufersterns, so dass wir demnächst Modelle zur Supernova-Nukleosynthese eichen können (Neuhäuser, Gießler, Hambaryan, 2020, MNRAS 489, 889). Eine Erdnahe Supernova vor 2 Mio. Jahren wird in Zusammenhang mit einer Klimaveränderung auf der Erde diskutiert.

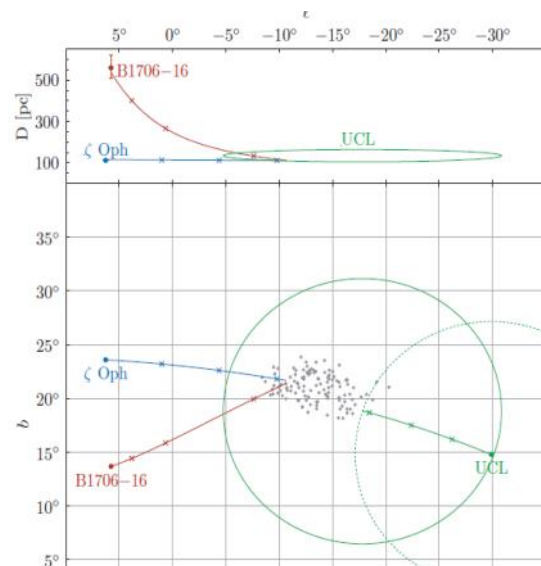


Abb. 3. Flugbahnen von zeta Oph und Pulsar, die vor 1,8 Mio Jahren im UCL-Sternhaufen waren (galaktische Koordinaten), graue Punkte zeigen die besten Lösungen.

## Extra-solare Planeten, Entstehung von Sternen, Braunen Zwergen und Planeten

Wir untersuchen die Multiplizität von Muttersternen von Exoplaneten, um Planetenentstehung und -entwicklung in Doppelsternen zu verstehen. Zuletzt haben wir mit Gaia-Daten viele mitbewegende Begleiter gefunden. Dies ist die größte und umfangreichste derartige Studie. Begleiter sind bestätigt, wenn Eigenbewegung, Entfernung und Photometrie/ Spektraltyp passen. Unter Planetenmuttersternen sind 15% multipel, aber im gleichen Periodenbereich 30% aller Sterne. Mehrere Weiße Zwerge wurden als mitbewegende Begleiter entdeckt, Planeten haben die Nachhauptreihenphase überlebt. (Mugrauer, 2019, MNRAS 490; zuletzt: Mugrauer & Michel 2020 AN 341, 996 zu TESS-Targets). Ferner werden am 90cm Teleskop des AIU in Großschwabhausen u.a. Transits junger Planeten beobachtet (Dissertation von Richard Bischoff im Rahmen eines DFG-SPPs).

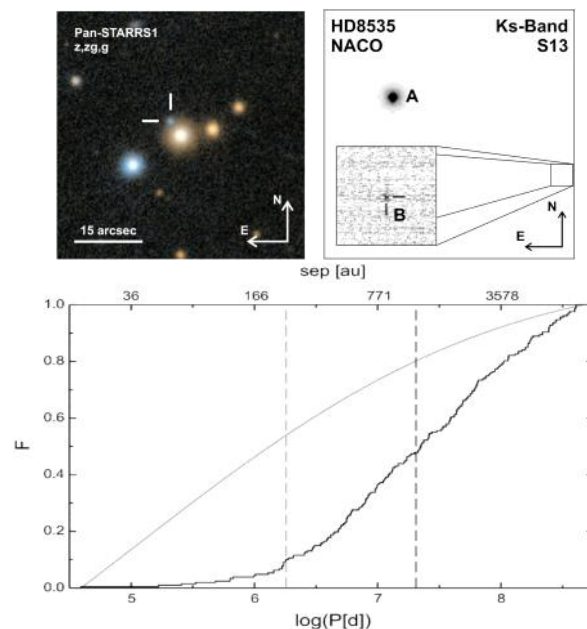


Abb. 4. Oben: Zwei Weiße Zwerge als Begleiter von Planetenmuttersternen, links Kepler-79 (Pan-STARRS1 z, zg, g, Begleiter blau), rechts: HD 8535 (eigene VLT-AO Ks Aufnahme). Unten: Kumulative Verteilung der Perioden der Doppelsterne bei Planetenmuttersternen (unten) und anderen nahen Sternen (oben), die signifikant verschieden sind.

## Labor-Astrophysik (Arbeitsgruppe Dr. Harald Mutschke)

Im Rahmen der DFG Forschungsgruppe FOR 2885 „Debris Disks“ (PI Prof. Krivov) wurde das Absorptionsvermögen von Silikatmineralen, Kohlenstoff und Wassereis für THz- und Sub-mm-Strahlung bei tiefen Temperaturen untersucht. Die Ergebnisse fließen in die Modellierung der thermischen Emission von Trümmer-Staubscheiben der Theorie-Gruppe ein. (Mutschke & Mohr, 2019, Far-infrared continuum absorption of forsterite and enstatite at low temperatures, A&A 625, 61)

## Professur für Astronomie Prof. Dr. Alexander Krivov

### Forschungsschwerpunkte

Der Schwerpunkt der Forschung unserer Arbeitsgruppe liegt auf den vielfältigen (beobachtenden, theoretischen sowie laborbasierten) Untersuchungen von sogenannten Trümmerscheiben. Trümmerscheiben sind Gürtel von Kometen, Asteroiden und ihrem Staub. Sie umgeben Hauptreihensterne wie unsere Sonne und sind eine natürliche Komponente von Planetensystemen – genau wie die Planeten selbst. Trümmerscheiben kommen ungefähr so häufig vor wie mit aktuellen Methoden detektierte Exoplaneten. Sie können die Signaturen noch unentdeckter Planeten tragen und sie sind die sichtbaren Spuren nicht direkt beobachtbarer Planetesimale. Außerdem spiegeln sie die Wachstumsgeschichte der Planetesimale und die dynamische Entwicklung des ganzen Systems wider, einschließlich der Migration und Streuung von Planeten. Deshalb bieten Trümmerscheiben ein großes Potential, Information über Planetensysteme zu gewinnen, zusätzlich zu direkten Studien von Exoplaneten.

### Beobachtungen von Trümmerscheiben und deren Interpretation

Unsere jüngsten Beobachtungen von Trümmerscheiben wurden vorwiegend mit dem Atacama Large Millimetre/Submillimetre Array (ALMA) durchgeführt. Dieses Observatorium liefert hohe Empfindlichkeit und Auflösung und ist für die vertiefte Untersuchung bereits bekannter Systeme besonders geeignet. Unsere Beobachtungen offenbaren erstaunliche Diversität von Planetensystemen. Einige, wie etwa HD 202628 (Faramaz u. a. 2019), erscheinen als schmale, exzentrische Ringe, während andere, wie HD 95086 (Booth u. a. 2019), breite, radial ausgedehnte Scheiben besitzen. Für ein System letzterer Art, HR 8799, wurde auch ein detailliertes, kollisionsbasiertes

Modell erstellt (Geiler u. a. 2019). Dieses führte uns zur Schlussfolgerung, dass solche Systeme gestreute Komponenten beinhalten, ähnlich wie der Kuipergürtel am Rande unseres Sonnensystems. Weiterhin haben wir einige ausgedehnte Scheiben mit einer Lücke entdeckt. Wir vermuten, dass solche Lücken von Planeten verursacht werden, die sich entweder innerhalb der Scheibe oder näher am Stern bewegen (Marino u. a. 2018, 2019). Außer Beobachtungen mit aktuellen Instrumenten wie ALMA, haben wir auch die Beobachtbarkeit der Scheiben mit dem 2021 startenden James Webb Space Telescope untersucht (Pawellek u. a. 2019).

Nur wenige der bisher bekannten Scheiben wurden um masseärmere Sterne gefunden. Eine von ihnen ist TWA7, die wir mit ALMA beobachten haben (Bayo u. a. 2019). Dank hoher Auflösung ist es uns gelungen, zum ersten Mal zwischen der eigenen Sub-mm-Emission der Scheibe und der einer Hintergrundgalaxie zu unterscheiden. Die allgemeine Frage, warum Scheiben um massearme Sterne so selten sind, war ebenfalls im Fokus unserer Forschung (Luppe u. a. 2020). Wir zeigten, dass die meisten Scheiben um massearme Sterne schlicht nicht ausreichend hell für eine Detektion mit den bestehenden Instrumenten sind.

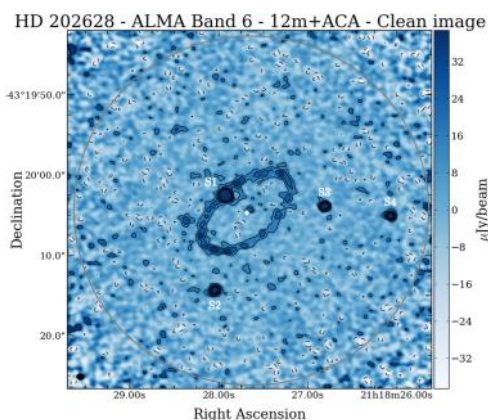


Abb. 1. Der Trümmerring um den Stern HD 202628. Der weiße Punkt zeigt das gegenüber dem Stern verschobene Zentrum des exzentrischen Ringes. Beides wird von den gravitativen Einflüssen eines vermuteten Planeten erwartet. Vier markierte Punktquellen sind Hintergrundgalaxien.

Bayo, A., ... Booth, M., ... u. a. (2019): MNRAS **486**, 5552.  
 Booth, M., ... Löhne, T., ... u. a. (2019): MNRAS **482**, 3443.  
 Faramaz, V., ... Booth, M., ... u. a. (2019): AJ **158**, 162.  
 Geiler, F., Krivov, A. V., Booth, M., Löhne, T. (2019): MNRAS **483**, 332.  
 Luppe, P., Krivov, A. V., Booth, M., Lestrade, J.-F. (2020): MNRAS **499**, 3932  
 Marino, S., ... Booth, M., ... u. a. (2018): MNRAS **479**, 5423.  
 Marino, S., Yelverton, B., Booth, M., ... u. a. (2019): MNRAS **484**, 1257.  
 Pawellek, N., ... Krivov, A. V. (2019): MNRAS **487**, 5874.



## Modellierung von Trümmerscheiben

Wir haben Möglichkeiten aufgezeigt, mithilfe von Trümmerscheiben Theorien der Planetesimalentstehung zu testen (Krivov u. a. 2018). Dabei wurde das sogenannte „Scheibenmassenproblem“ entdeckt, dessen Lösung zum besseren Verständnis der Planetesimalenakkretion beitragen könnte. Weitere Einblicke in die noch unklaren Mechanismen der Planetesimalenstehung liefert auch unsere Untersuchung von Prozessen, die Scheiben dynamisch anheizen, was die Staubproduktion auslöst und die Scheiben letztlich beobachtbar macht (Krivov & Booth 2018).

In einer numerischen Studie konnten wir zeigen, dass der Kontrast zwischen sternnaher und -ferner Seite einer exzentrischen Scheibe umso geringer wird, je geringer die Festigkeit des Staubs oder je höher seine dynamische Anregung ist (Kim u. a. 2018). Eine Erweiterung unseres Modells um die gravitative Störung durch einen Planeten ergab zudem, dass die beobachtete Staubscheibe eine weitere Asymmetrie aufweist, die von den Eigenschaften des Störers abhängt (Sende & Löhne 2019).

Für ein besseres Verständnis der Prozesse,

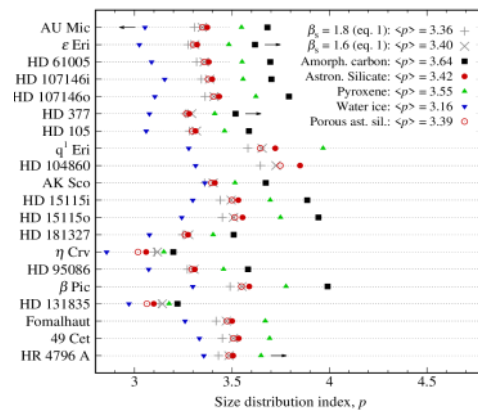


Abb. 2. Größenverteilungsindizes einiger beobachteter Staubgürtel für verschiedene Modelle und Materialien. (Quelle: Löhne 2020)

die Staub bilden und entfernen, untersuchten wir den Einfluss der Größenverteilung auf die spektrale Energieverteilung genauer. Wir konnten zeigen, dass häufig verwendete analytische Näherungen die Streuung der abgeschätzten Größenindizes und den Einfluss der Materialeigenschaften unterschätzen (Löhne 2020).

Kim, M., Wolf, S., Löhne, T., Kirchsclager, F., Krivov, A. (2018): *A&A* **618**, A38.  
Krivov, A. V., Booth, M. (2018): *MNRAS* **479**, 3300.  
Krivov, A. V., Ide, A., Löhne, T. u. a. (2018): *MNRAS* **474**, 2564.  
Löhne (2020): *A&A* **641**, A75.  
Sende, J., Löhne, T. (2019): *A&A* **631**, A141.

## Exozodiakaler Staub

Bei ca. 20 % der nahen Hauptreihensterne findet man einen Überschuss im nahen Infrarot, was als Feinstaubwolken sehr nah an den Sternen gedeutet wird („Exozodis“). Es bleibt unklar, woher dieser Staub kommt und was ihn lange genug in Sternnähe hält. In Pearce u. a. (2020) haben wir eine mögliche Lösung für dieses Rätsel vorgeschlagen: Der nach innen driftende Staub sublimiert in Sternnähe und wird zu Gas, das die weiter einströmenden Teilchen auffängt. Unser Modell ist konsistent mit Beobachtungsdaten für Exozodis um sonnenähnliche Sterne.

Darüber hinaus gelang uns um den Stern  $\kappa$  Tuc mit dem neuen Instrument MATISSE am Very Large Telescope die erste Detektion eines Exozodis im L-Band sowie die allererste begutachtete Publikation von Beobachtungsdaten von MATISSE überhaupt (Kirchsclager u. a. 2020).

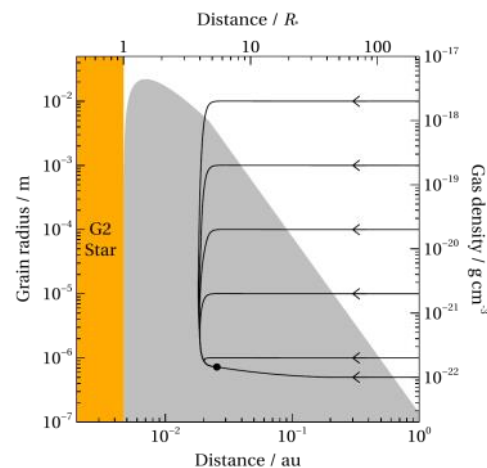


Abb. 3. Drift und Größenänderung von Staubkörnern um einen sonnenähnlichen Stern, während sie vom „Sublimationsgas“ eingefangen werden. (Quelle: Pearce u. a. 2020)

Kirchsclager, F., ... Krivov, A.V. (2020): *MNRAS* **499**, L47.  
Pearce, T., Krivov, A. V., Booth, M. (2020): *MNRAS* **498**, 2798.

### DFG-Forscherguppe „Trümmerscheiben in Planetensystemen“

Einen großen Teil unserer Arbeit führten wir im Rahmen der DFG-Forscherguppe FOR 2285 („Trümmerscheiben in Planetensystemen“) durch (Sprecher: Prof. Krivov, erste Phase: 2015–2019,

zweite Phase: 2019–2023, Gesamtvolumen: ca. 4,3 M€). An diesem Großprojekt nehmen 10 Projektleiter(innen) teil (darunter drei vom AIU). Involviert sind vier Institute zweier Fakultäten an der FSU Jena

und weitere aus Braunschweig, Hamburg und Kiel. Zusammengearbeitet wurde auch mit weiteren Gruppen in Deutschland, anderen europäischen Ländern, USA, Kanada und Chile.

## Institut für Angewandte Optik und Biophysik (IAOB)





**Institutsdirektor:**

**Prof. Dr. Christian Eggeling**

**Lehrstuhl für Superaufgelöste Mikroskopie**

Prof. Dr. Christian Eggeling

**Juniorprofessur mit tenure track für digitalisierte experimentelle  
Mikroskopie (seit 11/2020)**

Jun.-Prof. Dr. Christian Franke

**Lehrstuhl für Experimentalphysik/Kohärenzoptik**

Prof. Dr. Richard Kowarschik (Seniorprofessor)

**Lehrstuhl für Wellenleiteroptik/Faseroptik**

Prof. Dr. Tomáš Čižmár (IPHT, siehe S. 134)

**Adresse:** Helmholtzweg 4, 07743Jena

**Homepage:**

<https://www.physik.uni-jena.de/institute/institut+für+angewandte+optik+und+biophysik>

## Professur für Superaufgelöste Mikroskopie

### Prof. Dr. Christian Eggeling

#### Forschungsschwerpunkte

- Schwerpunkt 1: Untersuchung der Anwendbarkeit verschiedenster Fluoreszenz-Mikroskopie- und Spektroskopie-Verfahren in der Zellbiologie und ihre methodischen Verbesserungen. Beispiele beinhalten supraaufgelöste und einzelmolekülbasierte Verfahren sowie ihre Verknüpfungen auch mit anderen Beobachtungsverfahren und passender Datenanalyse zur Verbesserung von zeitlicher und räumlicher Auflösung, von Gewebeaufnahmen und vom Informationsgehalt.
- Schwerpunkt 2: Biophysik der Zellmembran—Untersuchung von Diffusions-/Interaktions-Dynamiken und heterogenen Organisationen von Lipiden und Proteinen/Rezeptoren und deren biologischer Relevanz.
- Schwerpunkt 3: Anwendung der Mikroskopieverfahren in der Infektionsforschung—Molekulare Dynamiken und Reorganisationen in Immunzellen und bei Virusinfektionen (HIV, SARS), Untersuchung des Einflusses des Mikrobioms auf Infektionen (Jena Exzellenzcluster „Balance of the Microverse“, Leibniz ScienceCampus InfectoOptics) und Optimierung zellulärer Nanopartikel-aufnahme zur Wirkstoffbereitstellung (SFB 1278 „Polytarget“).

#### Forschungsprojekt: Optimierte Anwendung von Fluoreszenzmikroskopieverfahren

Für ein besseres Verständnis lebender Materie und um bessere Behandlungsmöglichkeiten für Krankheiten zu entwickeln, müssen Interaktionen von Molekülen und Zellen aufgedeckt werden. Die zentrale Forschung der Gruppe von Prof. Dr. Eggeling befasst sich mit der Entwicklung und Anwendung modernster optischer Mikroskopie zur Beobachtung dieser Interaktion (vor allem auf Membranen) und der verschiedenen biophysikalischen Charakteristika von Zellen (Membran-Fluidität, Steifigkeit des Zytoskeletts oder mechanische Kräfte). Ziel ist es, deren Funktion bei Rezeptoren, nach Infektionen oder bei Immun-Reaktionen zu entschlüsseln und für potentielle Therapiemethoden zu nutzen.

Dafür werden in enger Zusammenarbeit mit interdisziplinären Partnern in Jena und dem wei-

teren Forschungsstandort der Gruppe am Leibniz Institut für Photonische Technologien e.V. in Jena neueste supraauflösende Mikroskopiemethoden entwickelt. Diese beinhalten die STED und MINIFLUX Mikroskopie als auch ihre Verknüpfungen mit Einzelmolekülverfahren wie der von der Arbeitsgruppe entwickelte supraaufgelösten Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie (STED-FCS) und Einzelmolekül-Tracking.

Diese Forschung nimmt eine zentrale Rolle in institutsübergreifenden biomedizinischen Forschungsfeldern und Verbundprojekten wie dem Jena Exzellenzcluster „Balance of the Microverse“, dem Leibniz ScienceCampus InfectoOptics und dem SFB 1278 „Polytarget“ ein. Dafür ist die Arbeitsgruppe auch mit eigenen Laboren am Leibniz Institut für Photonische Technologien e.V. Jena aktiv, eng mit dem Universitäts-Klinikum durch Kollaborationen und dem Aufbau neuer optischer Labore eng assoziiert und maßgeblich für den Aufbau der Microverse Mikroskopie-Facility des Jena Exzellenzclusters verantwortlich.

Sezgin E., Schneider F., Galiani S., Urbancic I., Waithe D., Lagerholm B. C., Eggeling C. (2019): Measuring nanoscale diffusion dynamics in cellular membranes with super-resolution STED-FCS, *Nat Protoc*, DOI: 10.1038/s41596-019-0127-9

Schermelleh L., Ferrand A., Huser, T., Eggeling, C., Sauer, M., Biehlmaier O., Drummen G. P. C. (2019): Super-resolution microscopy demystified, *Nat Cell Biol*, DOI:10.1038/s41556-018-0251-8

Sezgin E., Levental I., Mayor S., Eggeling C. (2017): The mystery of membrane organization: composition, regulation and roles of lipid rafts, *Nat Rev Mol Cell Biol*, DOI: 10.1038/nrm.2017.16



Abb. 1. Die AG Eggeling vor der in Stein gemeißelten Abbeschen Beugungsgrenze.

### Forschungsprojekt Optimierte Bildgebung in Zellschichten und Geweben

Hauptziel dieses Projekts ist es, die erwähnten mikroskopischen Lösungen für Beobachtungen in natürlichen Umgebungsfelder wie Zellschichten, Geweben oder ganzen Organismen anwendbarer zu machen, welches die Entschlüsselung zellulärer und molekularer Funktionen vor allem im Krankheitsfall unter realistischeren Bedingungen erlaubt.

Hierfür müssen die optischen Beobachtungsmethoden angepasst werden, da die lichtgetriebene Bildgebung durch die resultierende große Probendicke über Aberrationen stark beeinträchtigt wird. Zur Korrektur solcher Aberrationen werden in diesem Projekt adaptive Optiken eingesetzt, die eine dynamische Anpassung der Abbildung auf verschiedenste Probencharakteristika und –Dicken erlauben. Dies beinhaltet nicht nur den Einsatz neuester technologischer Ansätze wie Piezoelemente sondern auch die Verwendung modernster und schneller Datenanalyseverfahren zur Ansteuerung (unter anderem unter Verwendung von neuronalen Algorithmen).

Anwendung finden diese Verfahren zum Bei-

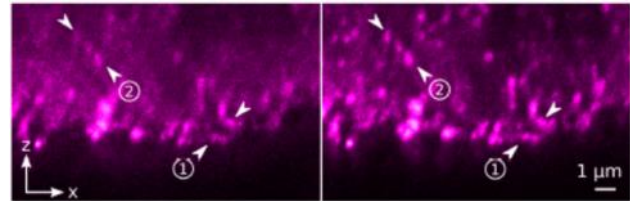


Abb. 2. 3D supraaufgelöste Fluoreszenzmikroskopie Bildaufnahmen von Hirnschnitten ohne (links) und mit (rechts) adaptiver Optik. Foto: Aurelien Barbotin.

spiel bei der Untersuchung des Einflusses des Mikrobioms (d.h. unseres Bakterienhaushalts) auf Infektionen wie Pilzen im Darm, welches den Einsatz von Zellschichtsystemen wie Organmodellen bedingt.

Troger J., Hoischen C., Perner B., Monajembashi S., Barbotin A., Loschberger A., Eggeling C., Kessels M. M., Qualmann B., Hemmerich P. (2020): Comparison of Multiscale Imaging Methods for Brain Research, *Cells*, DOI: 10.3390/cells9061377.

Barbotin A., Urbancic I., Galiani S., Eggeling C., Booth M. (2020): Background Reduction in STED-FCS Using a Bivortex Phase Mask, *ACS Photonics*, DOI: 10.1021/acsp Photonics.0c00388.

Barbotin A., Galiani S., Urbancic I., Eggeling C., Booth, M. J. (2019): Adaptive optics allows STED-FCS measurements in the cytoplasm of living cells, *Opt Expr*, DOI: 10.1364/OE.27.023378.

### Forschungsprojekt Mikroskopieuntersuchungen von viralen Ausbreitungsprozessen

Viren sind üblicherweise < 200 nm große Partikel, deren Ausbreitungsprozesse sich am besten in lebenden Zellen untersuchen lassen, wofür supraaufgelösten optische Mikroskopieverfahren ideal geeignet sind, da sie minimalinvasiv sind und im Gegensatz zu herkömmlicher Mikroskopie die erforderliche räumliche Auflösung liefern. Die Arbeitsgruppe erarbeitet Ansätze, um verschiedenste Prozesse bei der viralen Ausbreitung aufzulösen, wie die Verteilung und Dynamiken von viralen Oberflächenproteinen, Andockprozesse an Zellen und den Neuaufbau und das Herausstülpen der neu produzierten Viren aus der infizierten Zelle. Dadurch lassen sich neue Einsichten für eine optimierte Wirkstoffsuche ermitteln, wie zum Beispiel für HIV Viren aufgezeigt wurde und derzeit für SARS-CoV-2 Viren entwickelt wird.

Favard C., Chojnacki J., Merida P., Yandrapalli N., Mak J., Eggeling C., Mureauux D. (2019): HIV-1 Gag specifically restricts PI(4,5)P2 and cholesterol mobility in living cells creating a nanodomain platform for virus assembly, *Science Adv*, DOI: 10.1126/sciadv.aaw8651

Carravilla P., Chojnacki J., Rujas E., Insausti S., Largo E., Waithe D., Apellaniz B., Sicard T., Julien J. P., Eggeling C., Nieva, J. L. (2019): Molecular recognition of the native HIV-1 MPER revealed by STED microscopy of single virions, *Nat Commun*, DOI: 10.1038/s41467-018-07962-9.

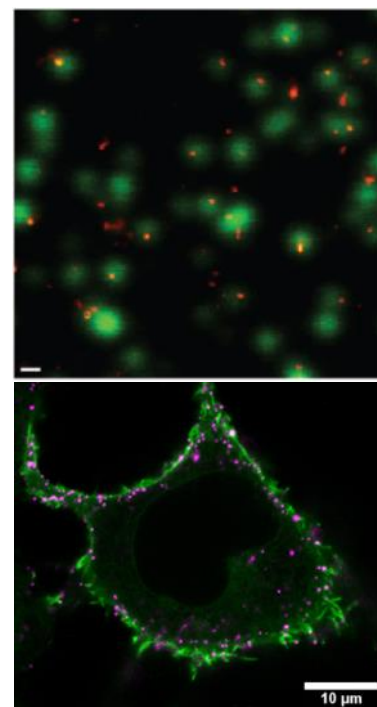


Abb. 3. Superaufgelöste Mikroskopie von (oben) Oberflächenproteinen auf einzelnen HIV Viren (Skalierung: 200 nm) und (unten) SARS-CoV-2 Pseudoviren in lebenden Zellen. Foto: P. Carravilla.



## Lehrstuhl für Experimentalphysik/Kohärenzoptik (Seniorprofessur) Prof. Dr. Richard Kowarschik

### Forschungsschwerpunkte

Schwerpunkt 1: Entwicklung von Verfahren zur stereophotogrammetrischen 3D-Formvermessung mittels Projektion von Musterstrukturen (statistische kohärente oder inkohärente Muster)

Schwerpunkt 2: 3D-Messung mit nur einer Kamera und Array-Projektoren (Kooperation mit Fraunhofer IOF) bzw. mit Mehr-Quellen-Projektoren

### Forschungsprojekt 1: UVLAS– Laserbasierte Stereophotogrammetrie zur Vermessung spiegelnder Metalloberflächen mit Speckles im UV-Bereich

Die 3D-Vermessung von Objektoberflächen mit optischen Messsystemen ist maßgeblich nicht nur von der Form, sondern auch von den Materialeigenschaften des Objektes abhängig. Je nachdem, ob das Objekt transparent, streuend oder reflektierend wirkt, muss ein anderes Verfahren gewählt werden. Viele industrielle Produkte bestehen allerdings aus verschiedenen Komponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften oder sind so geformt, dass herkömmliche 3D-Messverfahren nicht mehr mit der erforderlichen Genauigkeit arbeiten.

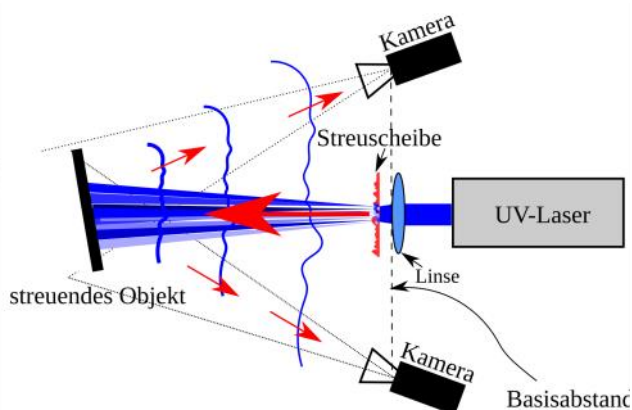


Abb. 1. Schematischer Versuchsaufbau. Zwei Kameras beobachten ein aktiv mit Speckles beleuchtetes Objekt. Die entstehenden Bilder werden zur 3D-Rekonstruktion verwendet.

Im Projekt „UVLAS“ wurde die bisher nur im sichtbaren Bereich des Lichtes eingesetzte 3D-Messmethode der auf Speckles basierenden Stereophotogrammetrie in den UV-Bereich übertragen und Objekte aus reflektierendem Edelstahl vermessen.

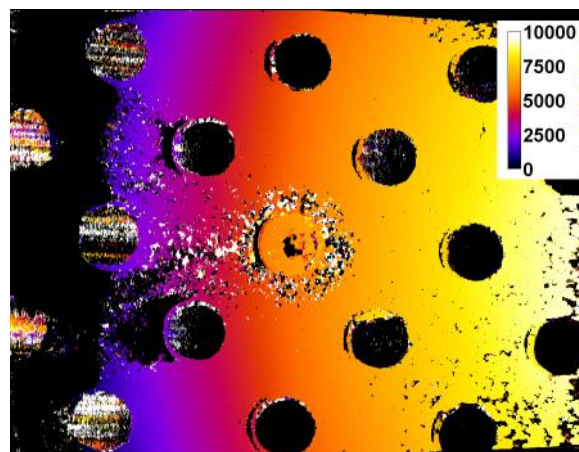


Abb. 2. Bild der 3D-Rekonstruktion eines mit UV-Speckles beleuchteten Objektes aus reflektierendem Edelstahl (Angaben in µm).

## Forschungsprojekt 2: 3D-Formvermessung mit Multiapertur-Array-Projektoren

Die hochgenaue dreidimensionale Aufnahme von Objekten und Szenen gewinnt in zahlreichen Anwendungsfeldern immer größere Bedeutung, beginnend bei der Qualitätssicherung, über medizinische und Life-Science Applikationen und Einsatzgebiete in Kunst und Kultur, bis hin zu kriminalistischen Anwendungen. Hierbei kommt mikrooptischen Multi-Apertur-Arrayprojektoren eine besondere Bedeutung zu, da sie ein einzigartiges, gegenüber dem bisherigen Stand der Technik um eine Größenordnung höheres Geschwindigkeitspotenzial besitzen.

Ziele des Vorhabens „geMAAP3D\_2“ waren die Entwicklung und Erprobung von Möglichkeiten und Prozessen zur Automatisierung der Kalibrierung von Multi-Apertur-Array-Projektoren sowie ihrer späteren Validierung beim Einsatz des Systems unter konkreten Messbedingungen einschließlich einer partiellen Korrekturmöglichkeit, um eine vollständige Neukalibrierung zu vermeiden. Weiterhin wurde die Leistung des Systems für verschiedene Szenarien getestet und optimiert.

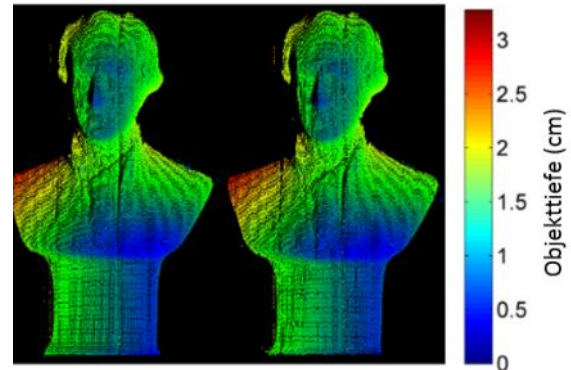


Abb. 3. Abbildung zweier 3D-Punktwolken einer Büste J. W. von Goethes. Links: erzeugt mit realen Kalibrierbildern. Rechts: 3D-Punktwolke erzeugt mit synthetischen Kalibrierbildern.

E. Wong, S. Heist, C. Bräuer-Burchardt, A. Stark, H. Babovsky, and R. Kowarschik "Optimization-based extrinsic calibration of a three-dimensional sensor composed of an array projector and a single camera", *Opt. Eng.* 58(10), 104109 (2019).

E. Wong, A. Stark, H. Babovsky, and R. Kowarschik "High-density three-dimensional measurements through multilayer perceptron calibration and statistical band-limited patterns", *Opt. Eng.* 57(7), 070501 (2018)

## Forschungsprojekt 3: Miniaturisierung von 3D-Messsystemen mit aktiver Beleuchtung und nur einer Kamera

Die Anwendungsfelder der optischen 3D-Messung sind, wie bereits in FP 1 und FP2 beschrieben, zahlreich. Oftmals sind die zu vermessenden Objekte jedoch nur schlecht oder schwer zugänglich, befinden sich im Inneren von Industriegütern, sind mitten in einem Gerät verbaut oder sind anderweitig nicht ohne Umbaumaßnahmen zugänglich. Gegenwärtig sind die meisten 3D-Messsysteme von ihrer Baugröße her nicht geeignet, auch diese Objekte direkt zu vermessen. Das Ziel des Projektes „EndoS3D“ war deshalb die Entwicklung eines endoskopischen 3D-Messsystems, das mit einem Messkopfdurchmesser von etwa 2,5 cm an eben diesen schwer zugänglichen Orten eingesetzt werden kann. Dabei wurden die Erkenntnisse aus vorherigen Projekten (u. a. „geMAAP3D“ und „Chaspro“) genutzt und ein fasergekoppelter Laser über einen optischen Schalter mit einem Messkopf verbunden, in dem eine Kamera befestigt war (Abb. 4 links). Jede Faser erzeugte ein eigenes, wiederholbares Muster und war fest mit dem Gehäuse und damit der Kamera verbunden. Durch die strenge Wiederholbarkeit der projizierten Muster konnten die 3D-Koordinaten der in Abb. 3 gezeigten Büste gewonnen werden (Abb. 4 rechts).

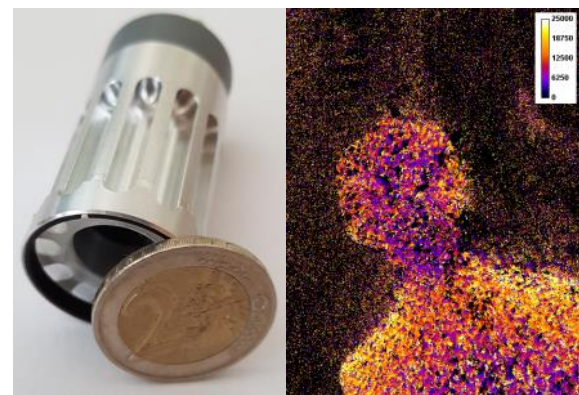


Abb. 4. Links: Foto des endoskopischen Messkopfes ohne Fasern mit einer 2-EURO-Münze zum Größenvergleich. Rechts: Höhenkarte der 3D-Rekonstruktion der Büste J.W. von Goethes.

D. Weigel, E. Wong, A. Stark, R. Kowarschik, H. Babovsky, "Verfahren zur strukturierten Beleuchtung", Patent-Nr. DE102018004078A1 vom 22.05.2018, Deutsches Patent- und Markenamt.



## Institut für Angewandte Physik (IAP)



**Institutsdirektor: Prof. Dr. Andreas Tünnermann**

**Lehrstuhl für Angewandte Physik**

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

**Lehrstuhl für Theorie optischer Systeme**

Prof. Dr. Herbert Gross

**Professur für Experimentalphysik/Laserphysik**

Prof. Dr. Stefan Nolte

**Professur für Angewandte Physik/Nanooptik**

Prof. Dr. Thomas Pertsch

**Professur für Technische Physik**

Prof. Dr. Frank Wyrowski

**Professur für Experimentalphysik/Festkörperlaser**

Prof. Dr. Jens Limpert

**Außerplanmäßige Professur für Experimentalphysik/ Mikro- und Nanostrukturtechnik**

apl. Prof. Dr. Uwe Zeitner

**Professur für Theoretische Chemie**

Prof. Dr. Stefanie Gräfe (Zweitmitgliedschaft in Physikalisch-Astronomischer Fakultät)

**Adresse:** Albert-Einstein-Str. 15, 07745 Jena

**Homepage:** [www.iap.uni-jena.de](http://www.iap.uni-jena.de)

## Professur für Angewandte Physik Prof. Dr. Andreas Tünnermann

### Forschungsschwerpunkte

- Entwicklung der Grundlagen für Faserlaser
- Ultrakurzpulsquellen
- Nichtlineare Optik
- Lasermaterialbearbeitung und generative Fertigung
- holistisches Systemdesign
- Mikro- und Nanooptik
- Freiformoptik

### ERC-Grant: MIMAS—Multi-dimensional interferometric amplification of ultrashort laser pulses

Im Rahmen des ERC Advanced Grant „MIMAS“ wurde eine neuartige Technologie [1, 2] entwickelt, mit Hilfe derer anstatt eines einzelnen Pulses gleich eine Vielzahl aufeinanderfolgender, zeitlich separierter Laserpulse durch jeden einzelnen Laserverstärker geschickt und im Anschluss daran zu einem einzelnen, hochintensiven Puls rekombiniert werden kann. Die Funktionswei-

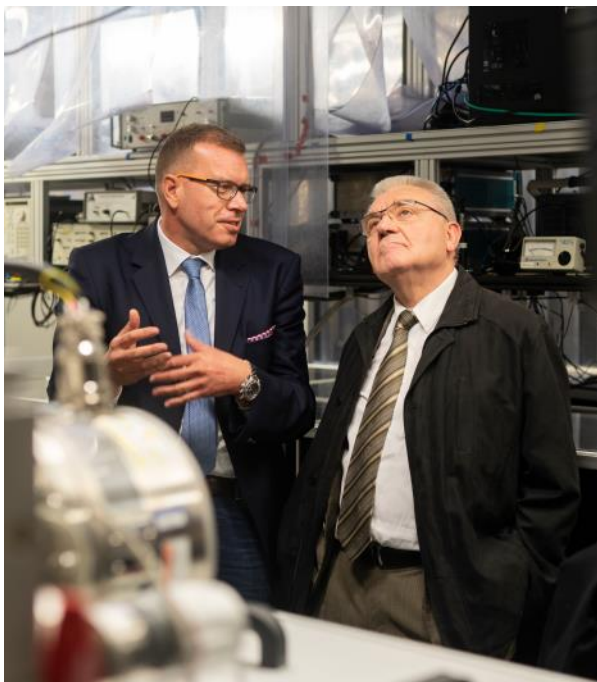


Abb. 1. A. Tünnermann erläutert den Projektstand bei einem Besuch des ERC-Präsidenten J.P. Bourguignon (2018). [FSU, J. Kasper]

se lässt sich hervorragend mit der im Jahr 2018 mit dem Physiknobelpreis prämierten Technologie, der „Verstärkung gechirpter Pulse“ [3], kombinieren und kann deren Leistungsfähigkeit um Größenordnungen erweitern. Dadurch wird eine weitere direkte Skalierung der mit Faserlasern generierbaren Pulsenergie auf zuvor unerreichbare Werte ermöglicht.

Auch bereits vorhandene Lasersysteme, welche auf dem Prinzip der kohärenten Kombination beruhen, lassen sich durch geringfügige Eingriffe um diese Technologie erweitern. Dies wurde experimentell an einem der leistungsstärksten Ultrakurzpuls laser der Welt, befindlich am IAP, unter Beweis gestellt. Bereits im ersten Anlauf des Experiments wurden sämtliche zuvor erreichten Leistungsparameter deutlich übertroffen – ein Durchbruch für die Ultrakurzpuls-Faserlaserwelt.

[1] Stark H., Müller M., Kienel M., Klenke A., Limpert J., Tünnermann A. (2017): Electro-optical controlled divided-pulse amplification. *Optics Express*, DOI 10.1364/OE.25.013494

[2] Stark H., Buldt J., Müller M., Klenke A., Tünnermann A., Limpert J. (2019): 23 mJ high-power fiber CPA system using electro-optically controlled divided-pulse amplification. *Opt. Lett.*, DOI 10.1364/OL.44.005529

[3] Strickland D., Mourou G. (1985): Compression of amplified chirped optical pulses. *Opt. Commun.* 56, 219–221



## Technologien für die Angewandte Quantenoptik

Die Arbeitsgruppen von A. Tünnermann haben in den letzten Jahren maßgeblich dazu beigetragen, die angewandte Quantenphotonik als Schwerpunkt und Impulsgeber in Entwicklung, Forschung und Lehre in Jena zu etablieren. Diese Arbeiten sind im Kontext der zweiten Quantenrevolution zu sehen und können bereits auf wichtige wissenschaftliche und technologische Beiträge zurückblicken, insbesondere in den Bereichen Quantenkommunikation und Quantenbildung [4]. Das Verständnis der photonischen Technologien als Enabler für exzellente Grundlagenforschung und als Treiber für bahnbrechende Innovationen ist das Fundament dieser wichtigen strategischen Ausrichtung.

Jüngste Forschungshighlights sind die Entwicklung weltraumtauglicher Quellen für verschränkte Photonen [5], die Integration quantenoptischer Funktionalitäten in Wellenleiter und Nano-Optik [6, 7], die Entwicklung neuartiger Abbildungsmodalitäten mit exotischen Lichtzuständen [4], sowie die Realisierung einer Plattform für die Integration von Quantenmaterialien mit optischen Fasern [8]. Diese Ergebnisse konnten

durch Arbeiten in verschiedenen Forschungsprojekten realisiert werden. Dazu gehören das Projekt QuNET [9], das eine Live-Demonstration einer quantenverschlüsselten Verbindung realisierte, und die durch das BMBF geförderten Nachwuchsgruppen QuantIm4Life und NanoScopeFutur-2D, welche Quantenbildungsverfahren bzw. Quantenmaterialien entwickeln.

- [4] Vega A., Saravi S., Pertsch T., Setzpfandt F. (2020): Pinhole quantum ghost imaging. Appl. Phys. Lett., DOI 10.1063/5.0012477
- [5] Beckert E., et al. (2019): A space-suitable, high brilliant entangled photon source for satellite based quantum key distribution. SPIE Free-Space Laser Commun. XXXI, 10910
- [6] Saravi, T. Pertsch, F. Setzpfandt (2019): Photonic crystal waveguides as sources of counterpropagating factorizable biphoton states. Opt. Lett., DOI 10.1364/OL.44.000069
- [7] Kumar P., et al. (2020): Integrated induced-coherence spectroscopy in a single nonlinear waveguide. Phys. Rev. A, DOI 10.1103/PhysRevA.101.053860
- [8] Ngo G., et al. (2020): Scalable Functionalization of Optical Fibers Using Atomically Thin Semiconductors, Adv. Mat., DOI 10.1002/adma.202003826
- [9] BMBF, QuNET-ALPHA, [www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/PROJEKTE/QUUNET-ALPHA](http://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/PROJEKTE/QUUNET-ALPHA)

### Max Planck School of Photonics (MPSP)

Die 2019 gegründete MPSP ist eine überregionale Graduiertenschule der Spitzenklasse. Sie bietet exzellenten Graduierten aus aller Welt die Möglichkeit einer Promotion im Bereich der Photonik nach amerikanischem bzw. englischem Vorbild. Die Promovierenden können mit einem Bachelor-Abschluss in das Programm einsteigen. Sie studieren in einem Masterprogramm an einer der drei kooperierenden Universitäten und erhalten den Mastertitel als Zwischenqualifikation – z.B. an der ASP in Jena den Abschluss M.Sc. Photonics.

Danach können die Promovierenden ihre Forschungsphase an einer von 16 Partnerinstitutionen an 8 Standorten in Deutschland beginnen. Die Partner umfassen deutsche Spitzenuniversitäten und Institute großer renommierter Forschungseinrichtungen. So vernetzt die MPSP in ihrem Netzwerk die besten Wissenschaftler\*innen auf dem Gebiet der Photonik in ganz Deutschland und bietet

den Promovierenden nicht nur eine exzellente Betreuung, sondern auch wertvolle Kontakte und Forschungsunterstützung.

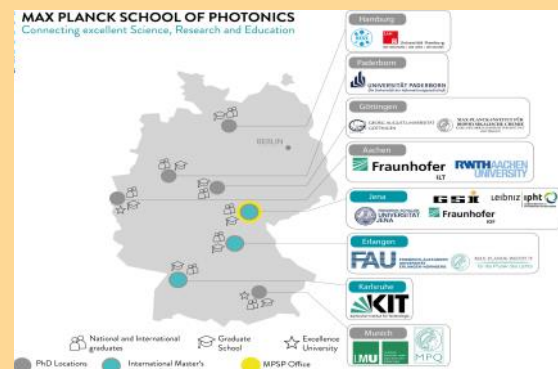


Abb. 2. Netzwerk MPSP [Quelle: MPSP]

## Lehrstuhl für Optisches Systemdesign

### Prof. Dr. Herbert Gross

#### Forschungsschwerpunkte

- Methodik im optischen Systemdesign: für die Konzeption, Auslegung und Optimierung optischer Systeme werden Modelle, Algorithmen und Methoden entwickelt, die eine praxisorientierte Möglichkeit schaffen, entsprechende Instrumente zu entwickeln.
- Freiformflächensysteme: symmetriefreie Oberflächen können seit kurzem technologisch beherrschbar gefertigt und in optischen Systemen eingesetzt werden, es müssen aber in fast allen Stufen der optischen Systementwicklung diese neuartigen Möglichkeiten durch entsprechende Verallgemeinerungen der Beschreibungen, Simulationsalgorithmen und Qualitätsbewertung erst unterstützt werden. Insbesondere muss die traditionelle Bildfehlertheorie erweitert werden, um entsprechende Systeme ohne Symmetrie richtig zu erfassen.
- Physikalisch-optische Simulationen: viele neuartige optische Systeme basieren auf physikalischen Wirkprinzipien, die man durch die traditionellen Verfahren der Geräteentwicklung nicht erfassen kann. Daher besteht an vielen Stellen die Notwendigkeit, physikalisch basierte Methoden in die Geräteentwicklung und die entsprechenden Modellierungen zu integrieren. Dies betrifft beispielsweise Beugung, Streuung, Polarisation, Kohärenzeffekte, Kurzpulseffekte oder Thermik.

#### Forschungsprojekt Wachstumskern Freiformoptik plus

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeit liegt im Optikdesign symmetriefreier Systeme unter Verwendung von Freiformflächen. Für diese modernen Ansätze sind nahezu alle klassischen Bildfehlertheorien, Korrektionsmethoden, Flächenbeschreibungen und Bewertungskriterien zu erweitern und zu verallgemeinern. Die sich in der Herstellung ergebenden Randbedingungen erfordern eine sehr enge Abstimmung und Zusammenarbeit mit den Technologen. Daher wird mit verschiedenen Firmen die gesamte Entwicklungsprozesskette auf diese neuen Herausforderungen umgestellt, verallgemeinerte Methoden entwickelt und grundlegende Fragen beantwortet.

Im optischen Systemdesign sind neuartige Aberrationsbeschreibungen entwickelt worden, insbesondere ist es außerordentlich hilfreich, eine tiefere Analyse der Systeme zu ermög-

lichen, die das Grundverständnis verbessert, die Entwicklungsprozesse beschleunigt und die Limitierungen transparenter macht. Es wurden Methoden und Tools zur Qualitätsbewertung erstellt (Abb. 1), in zahlreichen Fallstudien und Projektbeispielen getestet und weiterentwickelt. Eine besondere Bedeutung kommt hier den Konzepten, den Startsystemen, der Korrektionsstrategie und den Optimierungsalgorithmen zu. Spezielle Aspekte realer Anwendungen wie die Bewertung und das Verhalten chromatischer Effekte in refraktiven Systemen, eine automatische Behebung von Beschnitteleffekten in Spiegelsystemen, eine schnelle Streulichtberechnung, eine effiziente Flächenbeschreibung und eine Detailanalyse der Bildfehlerbeiträge aller Einzelflächen wurden in der Gruppe erstmals entwickelt und vorgeschlagen (Abb. 2). Außerdem ist eine praxisorientierte Tolerierung entwickelt worden, die es im Designstadium erlaubt, die Fer-

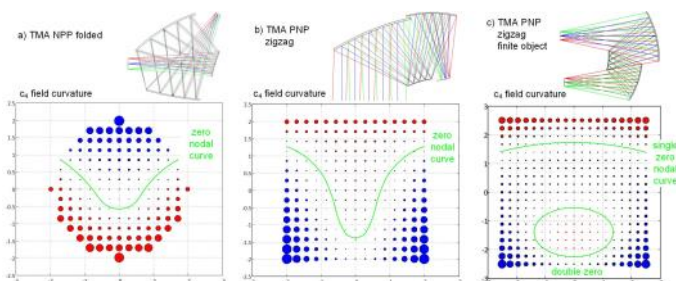


Abb. 1. Vergleich der Bildfeldebnung in verschiedenen Freiform-Drei-Spiegelsystemen.

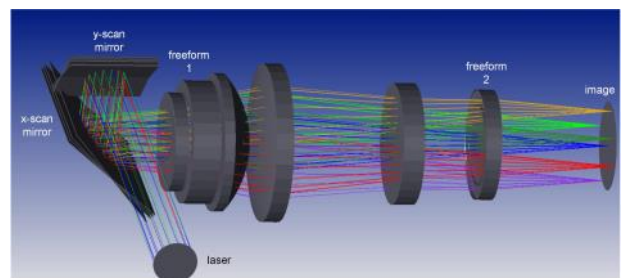


Abb. 2. Anamorphotische Pupillenabbildung mittels Freiformflächen in einem telezentrischen Scanobjektiv.

tigbarkeit der Freiformflächen zu evaluieren und Messdaten gefertigter und vermessener Flächen zurück in die Simulation zu überführen und damit eine realistische Performance zu ermitteln. Bzgl. der Anwendungen wurden insbesondere Spektrometer untersucht, refraktiv und Gitter-basierte Systeme, insbesondere auch speziell kompakte Aufbauten für Mini-Satelliten (Abb. 3). Außerdem wurde die Anwendbarkeit von Freiformsystemen auf abbildende Systeme sehr kurzer Wellenlängen unter anderem auch für Gracing-Inzidenzsysteme untersucht.

Im Bereich Beleuchtung und Strahlformung wurden neuartige Algorithmen entwickelt und getestet, mit deren Hilfe nahezu beliebige Intensitätsverteilungen erzeugt werden können. Die Übertragung dieser Ansätze für ausgedehnte Lichtquellen und unter Berücksichtigung von Kohärenzeffekten ist derzeit noch in einem frühen Forschungsstadium.

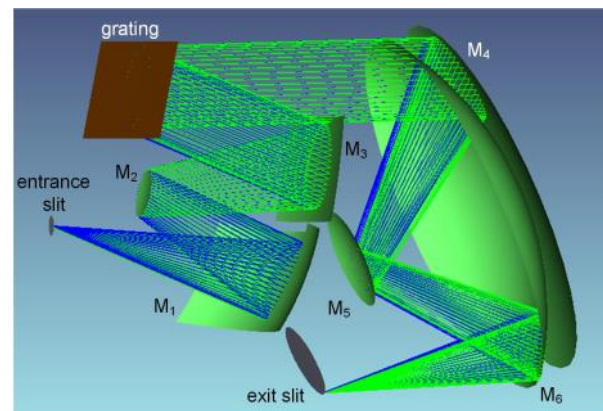


Abb. 3. High-Performance Spektrometer mit zwei 3-Spiegel-Freiform-Teleskopen.

Lu X., Gross H. (2020): Efficient simulation of surface scattering in symmetry-free optical systems. *Opt. Express*, DOI 10.1364/OE.411028

Zhang Y., Gross H. (2019): Systematic Design of Microscopic lenses I, II, III. *Adv. Opt. Techn.*, DOI 10.1515/aot-2019-0002

Liu C., Gross, H. (2018): Numerical optimization strategy for multi-lens imaging systems containing freeform surfaces. *Appl. Opt.*, DOI 10.1364/AO.57.005758

## Zusammenfassung der Arbeiten und Ergebnis weiterer Projekte und Kooperationen

Im Rahmen kleinerer Teilprojekte sowie Kooperationen mit Industrieunternehmen wurden zahlreiche weitere wichtige Forschungsarbeiten im Themenbereich optisches Systemdesign angesiedelt und mit wichtigen Ergebnissen erfolgreich bearbeitet. Zum einen wurden ganz klassische Designfragestellungen untersucht, insbesondere sei eine Arbeit erwähnt, in der die systematische Korrektur von Mikroskopobjektiven auf Basis von ca. 500 analysierten Patentsystemen untersucht wurde. Damit ist dieses Gebiet erstmals in strukturierter Weise analysiert, aufgearbeitet und publiziert worden.

Ein weiteres interessantes Gebiet ist die Simulation von Beugungseffekten in kaskadierten Systemen. Es wurden zudem in der Fachwelt bisher wenig be-

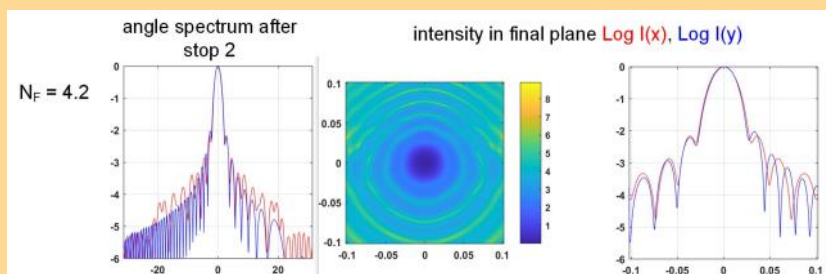


Abb. 4. Kaskadierte 3D-Beugungseffekte in einem Objektiv mit asymmetrischer Punktbildverteilung.

achteten Feld ein Modell sowie ein Berechnungstool entwickelt und erstmals eine quantitative Abschätzung der üblichen Näherungen möglich (Abb. 4).

Im Bereich der Simulation von Kurzpulssystemen wurde eine neuartige Berechnungsalgorithmik entwickelt, die den konventionellen Fourier-basierten Ansätzen in den meisten Fällen hinsichtlich Geschwindigkeit und Genauigkeit deutlich überlegen ist und auch auf reale Optiksyste-

me mit Aberrationen angewendet werden kann.

Eine stärker physikalisch geprägte Arbeit ist eine alternative Bestimmung von Laserstrahlqualität mittels des bekannten M2-Kriteriums, welches aus einer relativ einfachen Kaustikmessung in Zusammenhang mit einer ausgefeilten Phase-Retrieval-Berechnung eine hochgenaue Ermittlung von Phasen- und Amplitudenverteilung ermöglicht.

## Professur für Experimentalphysik/Laserphysik

### Prof. Dr. Stefan Nolte

#### Forschungsschwerpunkte

- Lineare und nichtlineare Laser-Materie-Wechselwirkung: ein fundamentales Verständnis der Wechselwirkung zwischen ultrakurzen Laserpulsen und Festkörpern sowie Nanostrukturen mit detaillierter Analyse von Propagations- und Absorptionseffekten sowie nachfolgende Relaxationsprozessen
- Mikro- und Nanostrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen: hochpräzise Strukturierung auf der Mikro- bis Nanometerskala mittels ultrakurzer Laserpulse - von additiver Fertigung über Abtragsprozesse bis zu definierter Manipulation von Materialeigenschaften
- Volumenmodifikationen in Gläsern: nichtlineare Absorption im Innern von transparenten Materialien erlaubt die Modifikation der Ausbreitungseigenschaften von Licht, Anwendungsbeispiele umfassen Faser- und Volumen-Bragg-Gitter, Wellenleitersysteme und künstlich doppelbrechende Strukturen
- Spektroskopische Methoden für Gasanalyse: Nichtlineare Spektroskopiemethoden werden zur Analyse von Gasen unter extremen Bedingungen entwickelt

#### Lasergeschriebene integrierte Optiken in Silizium

Die Integration von Photonik und Mikroelektronik auf einem Chip ist eines der wichtigsten Ziele der heutigen Kommunikationsindustrie. Die größten Vorteile liegen in der deutlich erhöhten Verarbeitungsgeschwindigkeit und Bandbreite. 2018 demonstrierten wir die In-Volumenmodifikation von einkristallinem Silizium ohne Beschädigung der Oberfläche durch Verwendung von ps Laserpulsen bei 1552 nm Wellenlänge. Im Gegensatz zur Bearbeitung von Glas ist hier die Verwendung von Mehrfachpulsen bei Pulsenergien weniger Nanojoule der Schlüssel. Dies erlaubte uns erstmals die Erzeugung stark lokalisierter Modifikationen in einkristallinem Silizium [1].

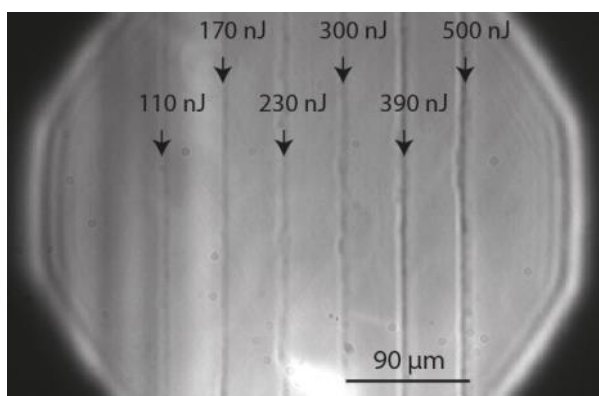


Abb. 1. Induzierte Modifikationen bei verschiedenen Pulsenergien.

Durch Verwendung angepasster Schreibparameter konnten Wellenleiterstrukturen mit 800 fs Pulsen bei Repetitionsraten im Bereich von 30 – 400 kHz eingeschrieben werden (Abb. 1 [2]). Die zugehörigen Nahfeldmessungen zeigen stark lokalisierte grundmodige Wellenleiter. Abhängig von der Pulsenergie konnten Modenfelddurchmesser von 3 – 5  $\mu\text{m}$  beobachtet werden, sowie Verluste von 8,7 dB/cm. Zur Verdeutlichung des 3D Potenzials wurde ein vergrabener Y-Splitter hergestellt, welcher eine Teilerate von genau 50:50 aufwies. Berechnungen der dauerhaft induzierten Brechzahländerung liefern einen Bereich von  $10^{-4}$  –  $10^{-3}$ . Die Ursache für diese Brechzahländerung könnte die Umwandlung von einkristallinem Silizium in die polykristalline Phase oder dauerhaft induzierte Spannungsfelder sein.

- [1] Kämmer H., Matthäus G., Nolte S., Chanal M., Utéza O., Grojo D. (2018): In-volume structuring of silicon using picosecond laser pulses. *Appl. Phys.*, DOI 10.1007/s00339-018-1715-1
- [2] Matthäus G., Kämmer H., Lammers K., Vetter C., Watanabe W., Nolte S. (2018): Inscription of silicon waveguides using picosecond pulses. *Opt. Express*, DOI 10.1364/OE.26.024089
- [3] Alberucci A., Alasgarzade N., Chambonneau M., Blothe M., Kämmer H., Matthäus G., Jisha C. P., Nolte S. (2020): In Depth Optical Characterization of Femtosecond-Written Waveguides in Silicon. *Phys. Rev. Applied*, DOI 10.1103/PhysRevApplied.14.024078



## Selektive spektrale Filterung durch komplexe Gitter in Fasern

Faser-Bragg-Gitter (FBG) eignen sich als faser-integrierte Spektralfilter mit Bandbreiten von 0,1 nm bis zu etlichen 10 nm. Die Filterstärke lässt sich flexibel anpassen und ermöglicht das Herausfiltern von Licht über mehrere Größenordnungen an Intensität (mehr als 40 dB). Ultrakurze Laserpulse erlauben es, verschiedenste Kernmaterialien zu strukturieren [4].

Typischerweise besitzt ein FBG eine einzelne Gitterperiode, so dass genau eine Wellenlänge spektral gefiltert werden kann. Beispielsweise in der Astronomie besteht jedoch auch Bedarf, eine Vielzahl von Wellenlängen zu unterdrücken. Ein Aneinanderreihen von FBGs führt zu sehr langen Filterstrukturen, die anfällig in Bezug auf Temperatur, Spannung und Breitbandverluste sind. Komplexe Gitterstrukturen [5] können diese Nachteile ausgleichen. In einem ersten Design wurden 10 Wellenlängen unterdrückt, bei einer Begrenzung der Gitterlänge auf 5 cm. Die spektrale Transmissionsmessung ist in Abb. 2 gezeigt. Die adressierten Wellenlängen, die mittels gestrichelten Linien dargestellt sind, konnten auf 0,034 nm (Abweichung 0,0023 %) genau getroffen werden.

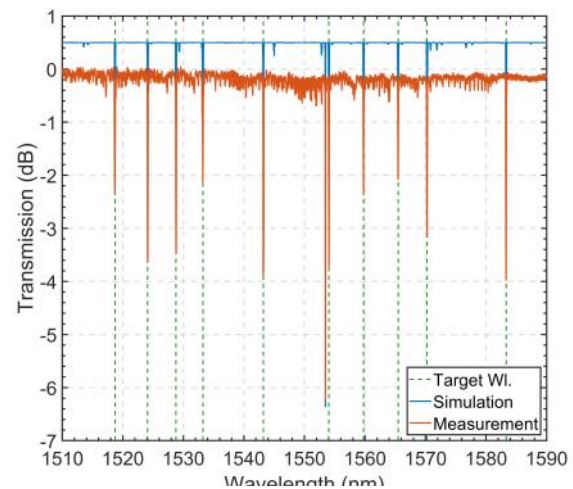


Abb. 2. Spektrale Transmissionsmessung eines komplexen FBG [5].

- [4] Thomas J., Voigtländer C., Becker R., Richter D., Tünnermann A., Nolte S. (2012): Femtosecond pulse written fiber gratings: A new avenue to integrated fiber technology. *Laser Photonics Rev.*, DOI 10.1002/lpor.201100033
- [5] Goebel T., Bharathan G., Ams M., Heck M., Krämer R., Matzdorf C., Richter D., Siems M., Fuerbach A., Nolte S. (2018): Realization of aperiodic fiber Bragg gratings with ultrashort laser pulses and the line-by-line technique. *Opt. Lett.*, DOI 10.1364/OL.43.003794

## Nanogitter als integriert-optische Quantengatter

Für optische Quantencomputer bieten integrierte optische Schaltkreise viele Vorteile gegenüber Freistrahl-Optiken. Zur Herstellung dieser Schaltkreise kann das Laser-Direktschreiben verwendet werden. Durch die hohen Intensitäten im Fokus kommt es zu nichtlinearer Absorption, was lokale Modifizierungen des Materials ermöglicht. In Abhängigkeit von der Pulsenergie kommt es in Quarzglas zu einer lokalen Erhöhung des Brechungsindex oder der Ausbildung künstlich doppelbrechender Strukturen, sog. Nanogitter. So können Wellenleiter und integrierte Wellenplatten hergestellt werden.

In Freistrahl-Experimenten werden Wellenplatten als Einzelqubit-Quantengatter für polarisationscodierte Photonen verwendet. Um dies auf laser-geschriebene Schaltkreise zu übertragen, müssen die Wellenleiter den Polarisationszustand der Photonen erhalten, was durch stark astigmatische Strahlformung des Einschreibelasers er-

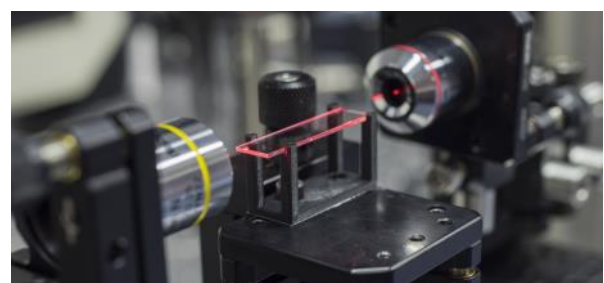


Abb. 3. Charakterisierung von lasergeschriebenen Strukturen mittels kontinuierlichem Laserlicht.

reicht wird. Auch müssen Orientierung und Phasenverschiebung der Nanogitter-Doppelbrechung zur gewünschten Funktion passen. Diese Eigenschaften werden durch die Einschreibeparameter bestimmt. Die Kontrolle der gewünschten Eigenschaften erfolgt durch Einzelphotonentests [6].

- [6] Lammers K., Eherhardt M., Molendeych T., Xu X., Vetter C., Alberucci A., Szameit A., Nolte S. (2019): Embedded nanograting-based waveplates for polarization control in integrated photonic circuits. *Opt. Mater. Express*, DOI 10.1364/OME.9.002560

## Professur für Angewandte Physik/Nanooptik Prof. Dr. Thomas Pertsch

### Forschungsschwerpunkte

- ultraschnelle Licht-Materie-Wechselwirkungen und optische Quantenphänomene in nanostrukturierter Materie, wie z. B. photonische Nanomaterialien, Metamaterialien, photonische Kristalle und 2D-Materialien (TMDCs)
- nichtlineare raum-zeitliche Dynamik, Plasmonik, Nahfeldoptik, hochqualitative nichtlineare optische Mikroresonatoren, opto-optische Prozesse in der integrierten Optik & opto-optische Signalverarbeitung sowie optische Mehrspitzen-Rasternahfeldmikroskopie (SNOM) und Photoemissions-Elektronenmikroskopie (PEEM)
- integrierte Quantenoptik, Quantenabbildung und Quantensensorik
- Anwendung von photonischen Nanomaterialien für multifunktionale diffraktive optische Elemente, zur Effizienzsteigerung von photovoltaischen Elementen und für astronomische Instrumente

### Forschung an der Schnittstelle von Nanooptik und Quantenoptik

Wir untersuchen die nichtlineare Wechselwirkung von Licht mit nanostrukturierter Materie. Unsere Forschung reicht von Einzelphotonen-Phänomenen bis zu ultrahohen Intensitäten, vom XUV bis zum MIR, von ultraschmalen Linienbreiten bis zu fs-Pulsen mit wenigen Zyklen. Trotz dieser Vielfalt ist unserer Forschung gemeinsam, dass die Modifizierung der Geometrie der Materie auf der Nanoskala es erlaubt, fundamentale Wechselwirkungen zu kontrollieren, was zu neuen Phänomenen für extreme Anregungsparameter führt. Unser Forschungsansatz beinhaltet ein umfassendes Spektrum an Methoden, von der Theorie über numerische Modellierung und Nanotechnologien bis hin zur experimentellen Charakterisierung.

Zusammen mit nationalen und internationalen Partnern konnten wir in den letzten Jahren das Potential wissenschaftlicher Zusammenarbeit demonstrieren, um Durchbrüche in der Grundlagenwissenschaft zu erzielen, z.B.: störungsinduzierte Phasenübergänge dielektrischer Metaoberflächen, hybride dielektrische Metaoberflächen zur Erzeugung der zweiten Harmonischen in chemisch aufgedampften MoS<sub>2</sub>-Monolagen, Pinhole-Quantum-Ghost-Imaging oder ultraschnelles opto-optisches Tuning von Halbleiter-Metaoberflächen. Unsere grundlegende Expertise zu optischen Eigenschaften von Nanostrukturen erlaubt uns auch, anwendungsorientierte Forschung mit mehreren internationa-



Abb. 1. Die Erforschung nichtlinearer Licht-Materie-Wechselwirkungen auf der Nanoskala, um die Quanteneigenschaften des Lichts maßzuschneidern, erfordert auch die Erforschung neuartiger experimenteller Methoden, wie die superfokussierende optische Rasternahfeldmikroskopie. [FSU, J. Meyer]

len Industriepartnern auf der Basis gemeinsamer Promotionsprojekte zu betreiben. Jüngste Ergebnisse dieser Kooperationen sind u.a.: hybride refraktive holographische Einstärken-Brillengläser, dispersionsangepasste Nanokomposite für achromatische diffraktive optische Elemente, Submikrometer-Nanostruktur-basierte RGB-Filter für CMOS-Bildsensoren oder flache Optiken in breitbandigen Bildgebungssystemen mit hoher numerischer Apertur.

## Quantenspektroskopie und Quantensensorik in Wellenleitern

Verschränkte Photonenpaare sind Grundlage für Quantentechnologien. Sie können durch spontane nichtlineare Konversion effizient in nichtlinearen Wellenleitern erzeugt werden, wobei ein kurzwelliges Pumpphoton in zwei Photonen mit längerer Wellenlänge zerfällt: Signal und Idler. Viele Anwendungen der Quantentechnologien basieren auf der Interaktion solcher Photonenpaare mit zu untersuchender Materie. Wellenleiter sind eine geeignete Plattform, da sie eine große Wechselwirkungslänge zwischen Licht und dem Untersuchungsmedium erlauben.

Für die quantenoptische Spektroskopie im mittleren Infrarot (MIR) wurde ein neues Konzept entwickelt (Abb. 1, [1]). Dabei wird ein nicht-linearer Wellenleiter zur Erzeugung von Signal- und Idlerphotonen ungleicher Wellenlänge von den zu untersuchenden Medien, z.B. Gasen, eingehüllt. Erzeugte Idlerphotonen im MIR können wegen ihrer langen Wellenlänge mit diesen Analyten interagieren. Die kürzerwelligen Signal- und Pumpphotonen sind im Wellenleiter lokalisiert und werden durch das Analyt nicht beeinflusst. Trotzdem können durch Vermessung des Signalphotonenspektrums die spektralen Eigenschaften des Umgebungsme-

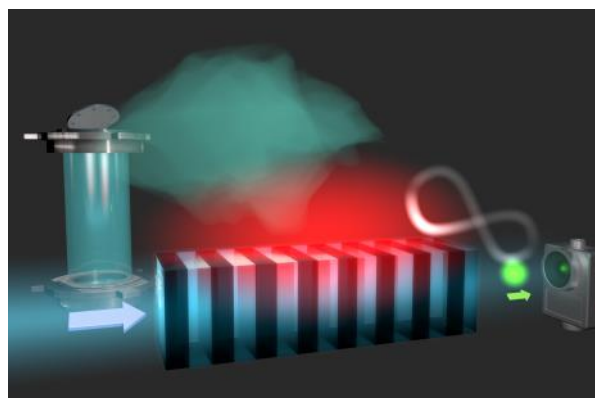


Abb. 2. Schematische Darstellung des Konzepts der integrierten Quantenspektroskopie mit nichtlinearen Wellenleitern.

diums im MIR Spektralbereich der Idlerphotonen deduziert werden.

Der Messansatz kann durch Verwendung periodisch strukturierter Wellenleiter wesentlich sensitiver gemacht werden. Dies ist für ultrasensitive Spektroskopie, aber auch für die Kopplung von Photonen an Quantenspeicher für Quantenkommunikationssysteme interessant.

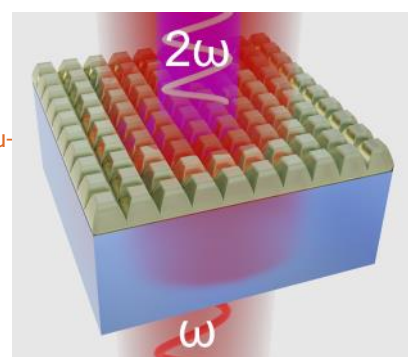
[1] Solntsev A., et al. (2018): LiNbO<sub>3</sub> waveguides for integrated quantum spectroscopy. APL Photonics DOI 10.1063/1.5009766

## Nichtlineare Nanophotonik in Lithium-Niobat-Metaoberflächen

Lithiumniobat (LN) ist ein Material mit einzigartigen Eigenschaften. U.a. weist es einen sehr breiten Transparenzbereich und eine sehr hohe Nichtlinearität 2. Ordnung auf. Dies macht LN sehr geeignet für die nichtlinear-optische Frequenzkonversion, z.B. durch die Erzeugung der zweiten Harmonischen. Die Nanostrukturierung von LN war bisher nur schwer möglich [2], jedoch wünschenswert, um dessen Materialeigenschaften mit Eigenschaften des Lichts zu kombinieren und damit Bauelemente zu miniaturisieren, sowie nanoskopische optische Elemente mit neuartiger Funktionalität zu entwickeln.

Es ist gelungen, LN-Metaoberflächen (periodische Nanoresonatorarrays) herzustellen. Diese Flächen sind resonant für Licht bei der Fundamentallwellenlänge und führen zur Feldverstärkung. Das ermöglicht eine Erhöhung der Konversions-effizienz der nichtlinearen Erzeugung der zweiten Harmonischen. Auch ermöglichen unterschiedli-

Abb. 3. Schema zur Erzeugung der zweiten Harmonischen in einer LN-Metaoberfläche.



che Resonanzen die Kontrolle der Polarisations-eigenschaften der zweiten Harmonischen. Bestimmt durch die Form der Nichtlinearität in LN wird die zweite Harmonische senkrecht zur Metaoberfläche abgestrahlt, so dass sie effizient detektiert werden kann. Diese Metaoberflächen könnten auch zur Erzeugung von quantisiertem Licht eingesetzt werden.

[2] Fedotova A., et al. (2020): Second-harmonic generation in resonant nonlinear metasurfaces based on lithium niobate. Nano Lett. DOI 10.1021/acs.nanolett.0c03290

## Professur für Technische Physik

### Prof. Dr. Frank Wyrowski

#### Forschungsschwerpunkte

- Effiziente Fourier Transformationen für die physikalische Optik: Fourier Transformationen sind ein wesentliches Werkzeug in der physikalischen Optik. Wir reduzieren den numerischen Aufwand durch besondere Behandlung der Wellenfronten.
- Nichtsequentielle Kopplung von Maxwell Solvern: Die Lösung der Maxwellgleichungen mit einer universellen Methode, z.B. FEM, ist für makroskopische optische Systeme numerisch nicht praktikabel. Durch die nichtsequentielle Kopplung von schnellen Spezialmethoden kann dieses Problem oft gelöst werden.
- Modellierung von Kristallen: Die Propagation elektromagnetischer Felder durch Kristalle verlangt die Einbeziehung der dielektrischen Funktion als Tensor und die entsprechende Lösung der Maxwellgleichungen.
- Wellenleiter für Virtual und Mixed Reality: Die Zuführung virtueller Bildinformation ins menschliche Auge durch die Kombination von Wellenleiterplatten mit spezifischem Gitterlayout hat große Bedeutung in der Entwicklung von VR und AR Techniken gewonnen. Das optische Design muss auf physikalischer Optik basiert werden.

#### Thermomechanische optische Simulation einer Faserkopplungslinse

Wenn ein Lichtfeld hohe Energie trägt, sind die daraus folgenden thermomechanischen Effekte nicht unbedeutend. Das in die Komponente einfallende elektromagnetische Feld generiert eine Verteilung des Heizflusses  $\Phi_q(\mathbf{r})$ , die abhängig vom Positionsvektor  $\mathbf{r}$  zu einer inhomogenen Temperaturverteilung  $T(\mathbf{r})$  führt. Außerdem hat die Inhomogenität der relativen Permittivität  $\epsilon(\mathbf{r})$ , definiert als Quadrat des Brechungsindex, die Deformation der optischen Oberfläche zur Folge. In diesem Bericht stellen wir die thermomechanische optische Simulation einer Faserkopplungslinse dar [1].

Die Aufgabenbeschreibung wird in Abb. 1 illustriert. Die von Edmund produzierte 65254-Linse [2] wurde verwendet, um eine gaußförmige Grundmode in einer Einmoden-Faser einzukoppeln, mit dem Arbeitsabstand zwischen Linse und Faser-

Ende. Die Energiedichte wurde am Faser-Ende unter der Annahme, dass keine thermomechanischen Effekte entstehen, berechnet und mit der realistischeren Situation mit thermomechanischen Effekten.

Die thermomechanische Studie wurde mit der Software ANSYS [3] ausgeführt. Die CAD-Datei der Linse und die relevanten Parameter des Materials, aus welchem die Linse besteht, sind online verfügbar [2, 4]. Der Heizfluss durch die Linsenoberfläche ist der Energiedichte der einfallenden Gauß-Mode ähnlich. Die in ANSYS implementierte Finite-Elemente-Methode wurde benutzt, um die Temperaturverteilung in der Linse  $T(\mathbf{r})$  festzustellen, wie gezeigt in Abb. 2(a), wo  $i$  die Netzknoten durchzählt. Von  $T(\mathbf{r})$  kann man die Deformation der Linsenoberfläche  $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$  pro Netzknotenpunkt  $j$  berechnen, siehe Abb. 2 (c).

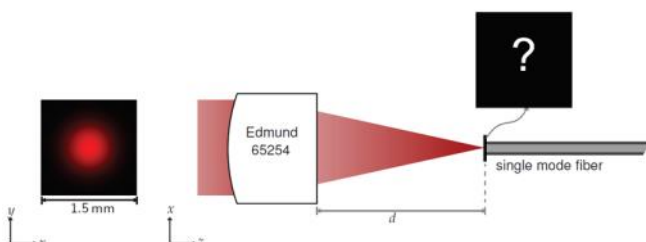


Abb. 1. Grafische Darstellung der Aufgabe. Die Edmund 65254 Linse wurde verwendet, um eine gaußförmige Grundmode in einer Einmoden-Faser einzukoppeln.

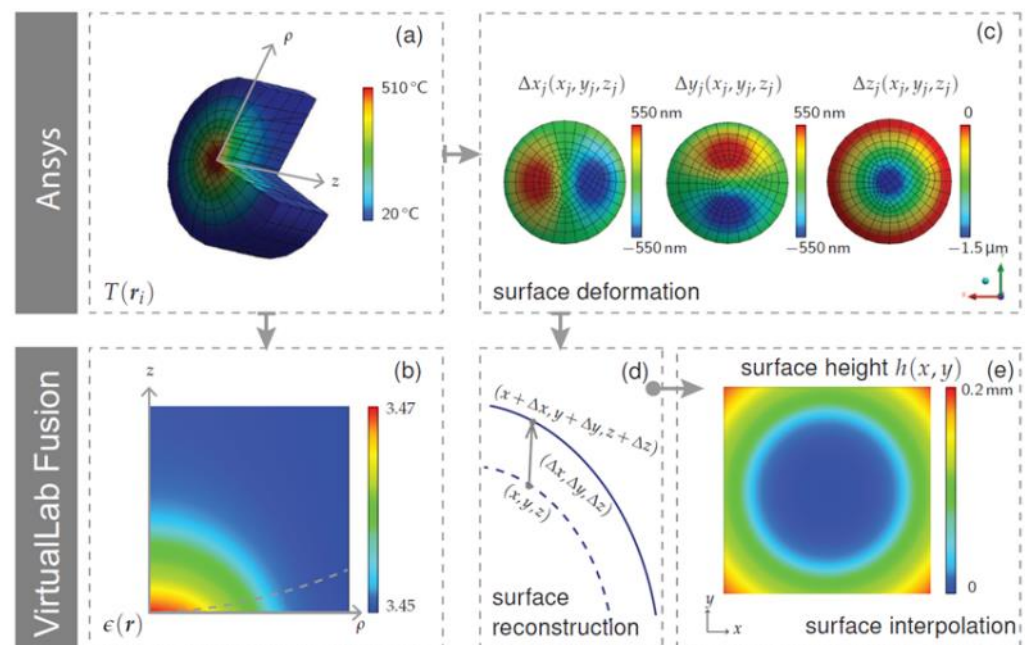


Für die Ermittlung der *optischen Eigenschaften* wurde die Software VirtualLab Fusion [5] benutzt.  $T(\mathbf{r})$  und  $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$  wurden zu den optischen Eigenschaften Permittivität  $\epsilon(\mathbf{r})$  und Oberflächenhöhenprofil  $h(x,y)$  mit der Hilfe von mathematischen Werkzeugen (wie z.B. Interpolation) verwandelt. Um  $\epsilon(\mathbf{r})$  zu ermitteln haben wir die folgende Formel verwendet:

$$\epsilon(\mathbf{r}) = \epsilon(\lambda, T_0) + \frac{d\epsilon}{dT}(\lambda, T)[T(\mathbf{r}) - T_0]$$

wobei  $\frac{d\epsilon}{dT}$  mit Parametern aus den Referenzen [4, 6] berechnet wurde. Die Oberflächenrekonstruktion erfolgt durch Spline-Interpolation.

Abb. 2. Thermomechanisches Modell. Die thermomechanische Analyse wurde mit der Software ANSYS durchgeführt. In der Software VirtualLab Fusion wurden die Temperatur und die deformierte Oberfläche interpoliert und die Permittivität ermittelt. (a) Temperatur, (b) Permittivität, (c) Deformation der Oberfläche an den Netzknoten, (d) rekonstruierte Oberfläche, (e) interpolierte Oberfläche.



**Die optische Simulation der Faserkopplungslinse** wurde durchgeführt und die Ergebnisse in Abb. 3 vorgestellt. Die ursprüngliche Kopplungseffizienz, die ohne thermale Effekte ermittelt wurde, ist 88,4% bei einem Arbeitsabstand zwischen Linse und Faser-Ende von  $d = 1.585 \text{ mm}$ . Wenn man die thermalen Effekte mit einkalkuliert, ist die Faserkopplungseffizienz nur 31% bei gleichem Arbeitsabstand. Die Effizienz steigt aber bis zu 96,6% , wenn  $d = 1.549 \text{ mm}$  gesetzt wird. Die Abweichung der Permittivität  $\epsilon(\mathbf{r})$  bleibt unter 0,02. Aus den oben gegebenen Befunden kann man schließen, dass die wichtigsten Effekte von der Oberflächendeformation verursacht wurden.

[1] Bonhoff T., Büsing L., Stollenwerk J., Loosen P.(2018): Multiphysical modeling of thermal and dispersive effects in optical systems for high power ultra-short laser pulses. High-Power Laser Materials Processing. Vol. 10525. SPIE  
 [2] Edmund Plano-Convex Lenses Edmund lens. 2020

[3] Ansys Inc., 2020  
 [4] Data Sheets Optical Glasses from SHOTT N-LASF9. 2014  
 [5] Physical optics simulation and design software "Wyrowski VirtualLab Fusion", developed by Wyrowski Photonics UG, distributed by LightTrans GmbH, Jena, Germany  
 [6] SHOTT Technical Information TIE-19: Temperature coefficient of refractive index

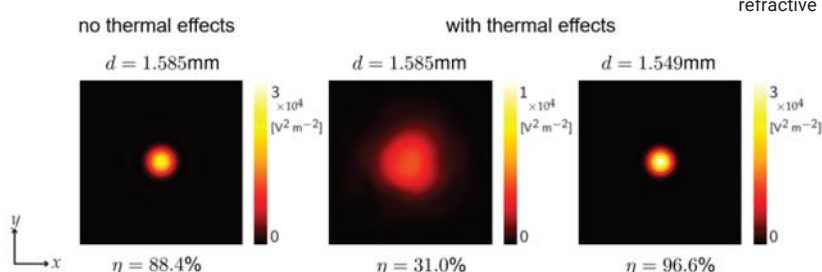


Abb. 3. Energiedichte und Kopplungseffizienz in verschiedenen Situationen.

## Professur für Festkörperlaser Prof. Dr. Jens Limpert

### Forschungsschwerpunkte

- Faserbasierte Ultrakurzpulslasersysteme höchster Performance
- Neuartige Faserdesigns & Simulation von komplexen Lasersystemen
- Untersuchung von thermisch induziertem Modentransfer in Hochleistungsfaserlasern
- Kompakte kohärente Quellen im mittleren Infrarot
- Leistungsstarke kurzwellige Strahlung mittels High Harmonic Generation
- Spektroskopie und Mikroskopie mit weichen Röntgenstrahlen
- Faseroptische parametrische Frequenzkonversion

### Kohärent kombinierte Lasersysteme basierend auf

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von UKP-Faserlasern ermöglicht immer mehr Anwendungen. Durch die kohärente Kombination von mehreren Laserverstärkern wurden vorhandene physikalische Limitierungen überwunden. Allerdings geht mit der Parallelisierung der Verstärkerarchitektur auch eine Erhöhung der Komplexität und Kosten entsprechender Systeme einher, die wiederum eine effektive Grenze der maximalen Leistungsfähigkeit setzt.

Daher ist eine neue, integrierte Verstärkerarchitektur erforderlich [1], die auf Multikernfasern basiert und viele Verstärkungskanäle in einem einzelnen Element vereinigt. Damit ist die Verwendung einer einzelnen Laserdiode zur Erzeugung der optischen Besetzungsinversion möglich. Die Strahlauftteilung und -kombination sowie die Phasenstabilisierung werden aus kompakten, vorzugsweise monolithischen Bauteilen gebildet.

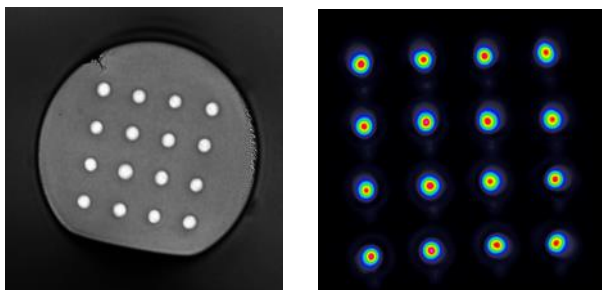


Abb. 1. links: Multikernfaser mit 16 Stufenindexkernen für die Verstärkung; rechts: Ausgangsstrahlung aus der Faser nach dem Verstärkungsprozess

Zusätzlich wird ein neuartiger Phasenstabilisierungsalgorithmus [2] verwendet, der Phasenabweichungen zwischen den einzelnen Strahlen auch bei einer entsprechend hohen Kanalzahl bestimmen und minimieren kann. Die Anzahl der diskreten Komponenten ist damit grundsätzlich unabhängig von der Anzahl der parallelen Verstärkungskanäle und eröffnet ein hohes Skalierungspotential.

Es wurde ein erster Prototyp eines Laserverstärkers basierend auf einer selbst designten Stufenindexfaser mit 4x4 Verstärkerkanälen in rechteckiger Anordnung realisiert. Die Kombination von Picosekunden- und von Femtosekundenpulsen konnte bei hohen Durchschnittsleistungen mit einer Kombinationseffizienz von jeweils 80% realisiert werden und bestätigte damit die Umsetzbarkeit dieser Technologie.

Durch Weiterentwicklung dieser Faserlasertechnologie wird sich der Bereich der Hochenergielasersysteme erschließen, ohne die Vorteile der optischen Fasern aufzugeben. Neben der Energieskalierung wird auch eine Erhöhung der Durchschnittsleistung in den multi-kW Bereich möglich sein [3].

[1] Klenke A., et al. (2018): Coherently combined 16-channel multi-core fiber laser system. *Opt. Lett.*, DOI 10.1364/OL.43.001519

[2] Klenke A., et al. (2018): Sequential phase locking scheme for a filled aperture intensity coherent combination of beam arrays. *Opt. Express*, DOI 10.1364/OE.26.012072

[3] Steinkopff A., et al. (2020): The impact of thermo-optical effects in coherently-combined multicore fiber amplifiers. *Opt. Express*, DOI 10.1364/OE.410614

## >1 kW Ultrakurzpuls laser basierend auf Tm-dotierten Fasern

Skalierbare Laserquellen im fs-Bereich sind für zahlreiche Anwendungen unentbehrlich. Zunehmend spielen auch Laserwellenlängen  $>1 \mu\text{m}$  eine Rolle, z.B. in der Mikromaterialbearbeitung technisch relevanter Stoffe wie Silizium [3], sowie zu Frequenzkonversion in den THz-, fernem Infrarot- oder den weichen Röntgenbereich.

Thulium(Tm)-dotierte Glasfasern unterstützen eine sehr breitbandige Laseremission und eignen sich zur Verstärkung ultrakurzer Pulse im Wellenlängenbereich um  $2 \mu\text{m}$ . Durch die hervorragende Transmission spezieller Gläser kann auf die hochentwickelte Glasfasertechnologie von Ytterbium-basierten Lasersystemen aufgebaut werden. Entscheidend ist jedoch der in Tm Systemen deutlich höhere Quantendefekt.

Daraus resultieren Herausforderungen für die Durchschnittsleistungsskalierung, insbesondere die auf den ersten Blick relativ geringe Effizienz und eine entsprechend hohe Wärmelast. Die besondere Symmetrie des Termschemas von Tm-dotiertem Quarzglas lässt spezielle Wechselwirkungen zwischen benachbarten Tm Ionen zu [4].

So können zwei angeregte aktive Ionen mit nur einem absorbierten Pumpphoton erreicht werden, was die Leistungsskalierung unterstützt, aber auch besondere Anforderungen u.a. an die chemische Zusammensetzung der Fasern stellt.

Experimentell [5] wurden die Verstärkereigenschaften einer Tm-dotierten photonischen Kristallfaser untersucht (spektrale Bandbreite für 260 fs Pulsdauer). Es konnte bei 1,9 kW Pumpleistung  $>1,1 \text{ kW}$  Signalleistung erreicht werden. Dies entspricht einer Effizienz von  $>60\%$  und ist die höchste Leistung, welche jemals von einem Tm-dotierten Faserlaser erreicht wurde.

- [3] Chanal, M., et al. (2017): Crossing the threshold of ultrafast laser writing in bulk silicon. *Nat. Commun.*, DOI 10.1038/s41467-017-00907-8
- [4] Jackson, S., King, T. (1999): Theoretical Modeling of Tm-Doped Silica Fiber Lasers. *Journal of Lightwave Technology*, 17(5), 948–956.
- [5] Gaida C., et al. (2018). Ultrafast thulium fiber laser system emitting more than 1 kW of average power. *Opt. Letters*, DOI 10.1364/OL.43.005853

## Faserbasierte, weiche Röntgenquelle

Kohärente Quellen, welche hohen Photonenfluss im weichen Röntgenbereich liefern, sind für die Grundlagenforschung hochinteressant. Allerdings sind derartige Quellen derzeit nur an Großforschungseinrichtungen oder durch aufwendige Lasertechnologie zugänglich [6].

Als Alternative wurde eine kohärente, weiche Röntgenquelle entwickelt, die zeitliche Selbstkompression der treibenden Laserpulse und Erzeugung hoher Harmonischer in ein und derselben Hohlkernfaser kombiniert, was einen kompakten, faserintegrierten Aufbau und annehmbare Anforderungen an die Lasertechnologie ermöglicht. Unter [7] werden die technischen Details dargestellt.

Aufgrund der Erhöhung der Laserintensität innerhalb der Hohlkernfaser ist das vorgestellte Konzept besonders interessant für die Skalierung der Repetitionsraten von kompakten, kohärenten Röntgenquellen (hier 100 kHz).

Die Ergebnisse repräsentieren den höchsten Photonenfluss im „Wasserfenster“ (bei ca. 300 eV Photonenenergie) mit  $>1 \text{ kHz}$  Repetitionsrate.

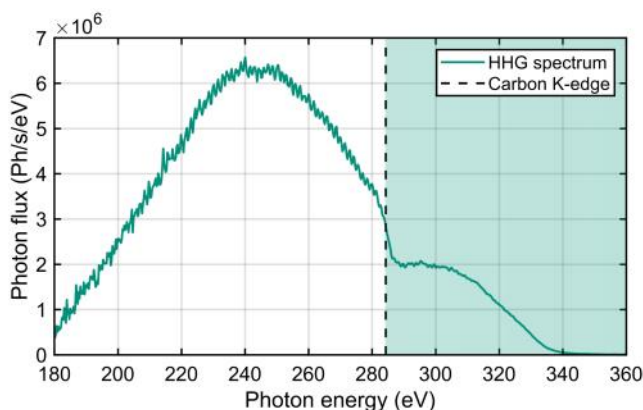


Abb. 2. Spektrum der Ausgangsstrahlung, welche mit der faserbasierten, weichen Röntgenquelle erzeugt wird.

[6] Young L., et al. (2018): Roadmap of ultrafast x-ray atomic and molecular physics. *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, DOI 10.1088/1361-6455/aa9735

[7] Gebhardt M., et al. (2021) Bright, high-repetition-rate water window soft X-ray source enabled by nonlinear pulse self-compression in an antiresonant hollow-core fibre. Accepted for publication in *Light Sci. Appl.*

## Professur für Mikro- und Nanostrukturtechnik

### apl. Prof. Dr. Uwe D. Zeitner

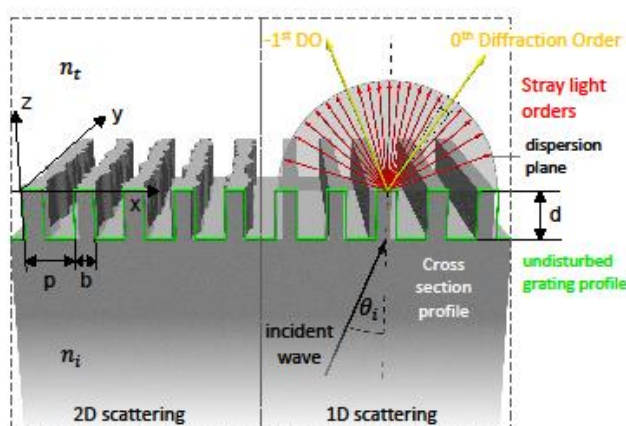
#### Forschungsschwerpunkte

- Entwicklung neuer Verfahren für Realisierung optischer Nanostrukturen, basierend auf verschiedenen lithographischen und Raster-Sonden-Techniken, sowie Atomic-Layer Deposition
- Realisierung neuartiger optischer Funktionen auf der Basis von Mikro- und Nanostrukturen, u.a. Hochleistungsgitter für Laser- und Spektroskopieanwendungen, UV-Polarisationsoptiken, röntgenoptische Komponenten etc.
- Entwicklung nichtlinear-optischer Komponenten in Diamant und LiNbO<sub>3</sub> für die Quanten-technologie
- Funktionalisierung optoelektronischer Komponenten (z.B. Light Trapping auf der Basis von Black-Silicon oder Black-Germanium)

#### Simulation von Streulicht in Beugungsgittern

Insbesondere in spektrometrischen Instrumenten für die Astronomie und Erdbeobachtung (z.B. GAIA, FLEX, Sentinel 4/5) müssen Beugungsgitter als Schlüsselkomponente strenge Spezifikationen – vor allem bzgl. ihres Streulichtverhaltens – erfüllen, da dieses die radiometrische Genauigkeit der spektrometrischen Messung stark beeinflusst. Die Ursache liegt in stochastischen Störungen der Gittergeometrie, wobei eine der bekanntesten Streulichtquellen die Kantenrauheit (LER) der Gitterstege darstellt (Fig. 1). Es ist daher von besonderem Interesse, die Auswirkungen stochastischer Störungen auf das Streulichtverhalten des Gitters vorherzusagen.

Die direkte Methode zur Berechnung der winkelaufgelösten Streulichtverteilung (ARS), basiert auf 2D optischen Simulationstechniken. Allerdings ist dieser 2D-Ansatz aufgrund des enormen numerischen Aufwands nicht praktikabel. Diese Einschränkung kann umgangen werden, wenn nur das Querschnittsprofil innerhalb einer 1D-RCWA-Simulation berücksichtigt wird (ARS1D). Im Rahmen einer Bornschen Näherung konnte gezeigt werden, dass die Zweidimensionalität des Problems durch eine simple Multiplikation der 1D-ARS mit der (die Störung beschreibenden) spektralen Leistungsdichte (PSD) der Rauheit berücksichtigt werden kann [1].



$$ARS_{2D} = \frac{n_t}{\lambda} \frac{PSD(k_{s,y} - k_{i,y})}{\sigma^2} ARS_{1D}$$

Diese Beziehung erlaubt eine enorme Reduktion des numerischen Aufwands. Die Methode kann dazu benutzt werden, das Streulichtverhalten unterschiedlicher 1D-Gitterstrukturen zu untersuchen. Damit können selbst großperiodische Gitter im Rahmen rigoroser Simulationsrechnungen behandelt werden.

Abb. 1. Illustration einer durch Kantenrauheit gestörten Gitterstruktur und ihr Querschnittsprofil, welches für zwei- bzw. eindimensionale Streulichtsimulationen verwendet wird.

[1] Heusinger M., Michaelis D., Flügel-Paul T., Zeitner U. (2018): Diffuse scattering due to stochastic disturbances of 1D-gratings on the example of line edge roughness. *Opt. Express*, DOI 10.1364/OE.26.028104



## Resonante Subwellenlängenstrukturen für hochreflektive Spiegel

Hochreflektive Oberflächen sind Schlüsselkomponenten verschiedener Anwendungen. Insbesondere in Resonatoren und Kavitäten werden Reflektivitäten von bis zu 99,999% benötigt. Sogenannte resonante Gitterreflektoren stellen eine Alternative dar mit dem Vorteil von reduziertem thermischen Rauschen. Dies macht Gitterreflektoren u.a. für Gravitationswellendetektoren und hochsensitive, monolithische Accelerometer interessant.

Ein Gitterreflektor basiert auf einem periodisch gestörten Schichtwellenleiter. Diese Störung im Subwellenlängenbereich erlaubt es, bei senkrechtem Lichteinfall Wellenleitermoden anzuregen, welche lateral propagieren und dabei wieder auskoppeln. Die ausgekoppelte Strahlung kann nun konstruktiv mit dem direkt reflektierten Licht interferieren, was bei geeigneter Phasenverschiebung zu Reflektivitäten von 100% führt.

Aus diesem Prinzip lässt sich eine monolithische T-förmige Gittergeometrie ableiten. Abb. 2 zeigt so eine Struktur (REM-Ausnahme) im Querschnitt. Der Verlust in der Reflektivität von etwa 0,5% ist weniger auf den unvermeidbaren Versatz der zwei Belichtungsebenen, sondern auf Restabsorption der oberen amorphen Si-Schicht zurückzuführen.

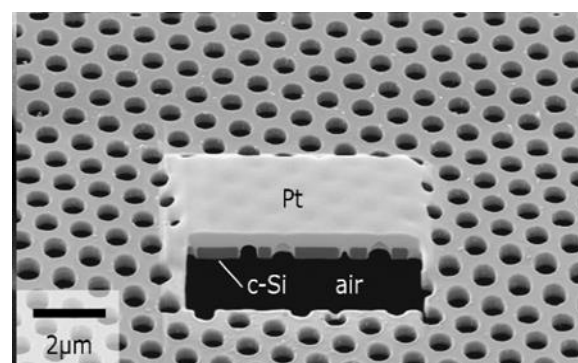
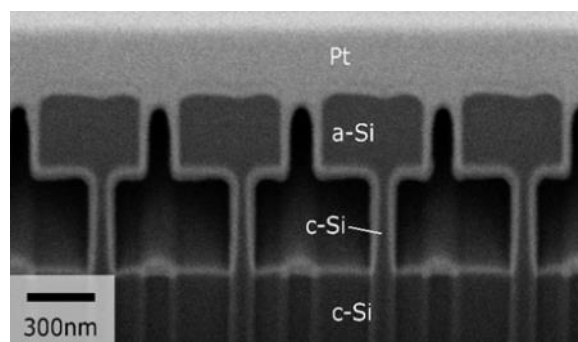


Abb. 2. REM-Aufnahme des T-förmigen Gitterreflektors (oben) bzw. der kristallinen Siliziummembran (unten) mit Reflektivitäten von mehr als 99,5%.

## Konforme Beschichtung für hocheffiziente Spektrometergitter

Die Realisierung hocheffizienter Beugungsgitter, die als dispersive Kernkomponenten in Erdbeobachtungsspektrometern mit NIR/SWIR Kanälen zum Einsatz kommen, stellt höchste Anforderungen an den Herstellungsprozess. Eine hohe, nahezu polarisationsunabhängige Beugungseffizienz wird durch die Einbettung eines Quarzglas-Grundgitters in ein hochbrechendes Material ( $\text{TiO}_2$ ) und einer abschließenden  $\text{SiO}_2$ -Schicht mit entspiegelnder Wirkung erzielt.

Voraussetzung für eine hohe Effizienz sind hochwertige, homogene, hohlraumfreie Beschichtungen. Die Einbettung erfolgt mittels Atomlagenabscheidung (ALD), durch die tiefe Gittergräben strukturtreu beschichtet werden. Eine Herausforderung ist das kontinuierlich steigende Aspektverhältnis während der Einbettung, die eine gezielte Prozessoptimierung erfordert. Darüber hinaus ist es essenziell, die Brechzahl und Dicken der Schichten genau zu kontrollieren.

Plasmagestützte ALD-Prozesse (PEALD) ermöglichen besonders hochbrechende  $\text{TiO}_2$ -

Schichten. Diese weisen jedoch bei der Verfüllung notwendiger Schichtdicken von über 300 nm eine hohe Rauheit auf. Mittels  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Nanolaminaten werden sehr glatte Schichten (AFM-Rauheit, rms < 1 nm) erzeugt [2]. Zudem lässt sich durch die gezielte Einbindung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  die Brechzahl an das optimale Gitterdesign anpassen. Die Kontrolle der Schichtdickenverhältnisse der Nanolaminat-Komponenten und der Plasma-Bedingungen ermöglichen einen hohen effektiven Brechungsindex von  $2,32 \pm 0,01$  @  $2\mu\text{m}$  Wellenlänge. Somit wurden Transmissionsgitter mit einer gemittelten Beugungseffizienz von  $\geq 90\%$  bei einer Polarisations sensitivität  $\leq 4\%$  für den gesamten SWIR2 Kanal realisiert.

[2] Ghazaryan L., Handa S., Schmitt P., Beladiya V., Roddatis V., Tünnermann A., Szeghalmi A. (accepted): Structural, optical, and mechanical properties of  $\text{TiO}_2$  nanolaminates. Nanotechnology.

## Professur für Theoretische Chemie (Zweitmitgliedschaft) Prof. Dr. Stefanie Gräfe

### Forschungsschwerpunkte

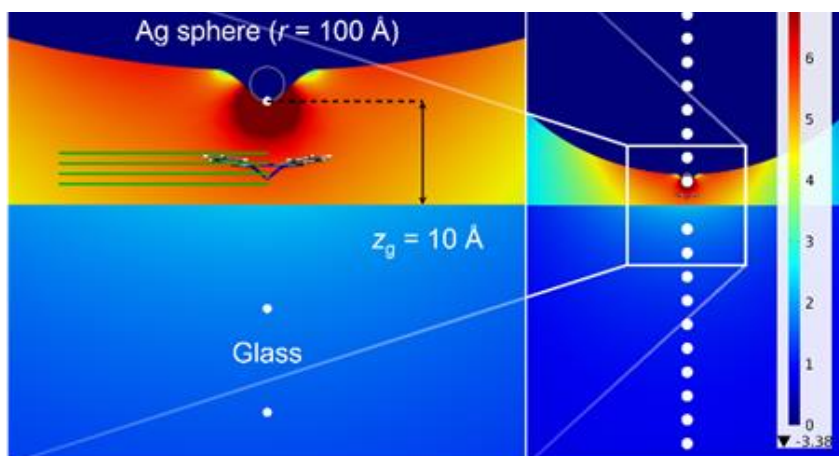
- Modellierung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie mit Hilfe quantenchemischer und dynamischer Methoden
- Atom- und Molekülphysik in starken Laserfeldern
- Attosekundenphysik und Elektronendynamik
- Elektronische und spektroskopische Eigenschaften molekularer Systeme
- Photophysik und Photochemie von Elektronen-Transfersystemen
- Zeitaufgelöste Spektroskopie – Femtosekundenchemie

### Forschungsprojekt 1: Nano-Plasmonisch– Molekulare Hybridsysteme in externen Lichtfeldern

Welches ist die ultimative räumliche Auflösung, die mit Nahfeld-Methoden erreicht werden kann? In aktuellen Experimenten, beispielsweise basierend auf der spitzenverstärkten Raman-Streuung (engl. Tip-enhanced Raman spectroscopy, TERS) häufen sich die Hinweise auf eine extrem hohe räumliche Auflösung auf der Nanometer- oder sogar Subnanometerskala. Zur theoretischen Modellierung derartiger plasmonischer Hybridsysteme in externen Lichtfeldern ist es notwendig, sowohl die elektromagnetischen als auch die eher chemischen Beiträge gleichermaßen zu beschreiben.

In unserer Arbeitsgruppe entwickeln wir für

derartige plasmonisch-molekulare Hybridsysteme im Rahmen des ERC Consolidator-Grants „QUEM-CHEM“ neuartige Methoden. Diese wenden wir in enger Zusammenarbeit mit lokalen und anderen international führenden Arbeitsgruppen an, um beispielweise die anfangs erwähnte Auflösungsfrage zu klären. Unsere Rechnungen unterstützen eine Auflösung im Nanometer und sogar sub-Nanometer-Bereich. Lokale Kollaborationen bestehen u.a. im Rahmen des SFB NOA mit den Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Jürgen Popp und international mit Prof. Dr. Ara Apkarian (UC Irvine), Prof. Javier Aizpurua (San Sebastian), Prof. Dr. Raul Rodriguez Tomsk).



[1] L. Ouyang, T. Meyer, K-M. See, W.-L. Chen, F.-C. Lin, D. Akimov, S. Ehtesabi, M. Schmitt, Y.-M. Chang, S. Gräfe, J. Popp, J.-S. Huang, „Spatially resolving the enhancement effect in surface-enhanced coherent anti-Stokes Raman scattering by plasmonic doppler gratings“, ACS Nano, in print, <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c07198>.

[2] K. Fiederling, M. Abasifard, M. Richter, V. Deckert, S. Gräfe, S. Kupfer, „A Full Quantum Mechanical Approach Assessing the Chemical and Electromagnetic Effect in TERS“, Nanoscale, 2020, 12, 6346-6359.

[3] F. Latorre, S. Kupfer, T. Bocklitz, D. Kinzel, S. Trautmann, S. Gräfe, V. Deckert, „Spatial resolution of tip-enhanced Raman spectroscopy – DFT assessment of the chemical effect“, Nanoscale 2016, 8, 10229 – 10239.

Abb. 1. Nahfeld in der Nähe einer 10 nm Silberkugel mit simulierter „atomarer Rauigkeit“. In kleinem Abstand liegt ein Molekül auf einer Glasoberfläche, welches mit diesem räumlich und zeitlich inhomogenen Feld wechselwirkt.

## Forschungsprojekt 2: Starkfeld-Molekülphysik

Während die Starkfeldphysik in den letzten Jahrzehnten vor allem auf Atome und kleine zweiatomige Moleküle fokussiert war, werden nun verstärkt auch größere und chemisch interessantere Moleküle untersucht. In diesen starken Laserfeldern spielt neben der Rotationsdynamik auch Ionisations- und Fragmentationsdynamik eine bedeutende Rolle. Es ist für die theoretische Modellierung eine große Herausforderung, die Wechselwirkung von polyatomaren Molekülen mit intensivem Laser Felder vollständig numerisch zu beschreiben, da zu viele Freiheitsgrade auf vielen verschiedenen Zeitskalen beteiligt sind.

Wir verfolgen in der theoretischen Beschreibung verschiedene Ansätze, von Multi-Physik-Ansätzen zu (semi-)klassischer Dynamik. Damit können wir beispielsweise die Ionisation von triatomaren und pro-chiralen molekularen Systeme

beschreiben [4,5], die komplexe Starkfeld-Dynamik von  $\text{HeH}^+$  [6], oder aber die Symmetriebrechung (Renner-Teller-Effekt) von  $\text{CS}_2$  in starken Feldern [7]. Dabei arbeitet unsere Arbeitsgruppe oft eng mit experimentell arbeitenden Gruppen zusammen. Lokal arbeiten wir u.a. mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Gerhard Paulus (Physikalisch-Astronomische Fakultät) zusammen.

[4] M. Paul, L. Yue, S. Gräfe, „Imprints of the molecular electronic structure in the photoelectron spectra of strong-field ionized asymmetric triatomic model molecules“, (2018) Phys. Rev. Lett. 120, 233202.

[5] M. Paul, S. Gräfe, „Strong-field ionization dynamics of asymmetric equilateral triatomic model molecules in circularly polarized laser fields“, (2019) Phys. Rev. A 99, 053414-1 – 053414-22.

[6] P. Wustelt, F. Oppermann, L. Yue, M. Möller, T. Stöhlker, M. Lein, S. Gräfe, G. G. Paulus, A. M. Saylor, „Heteronuclear limit of strong-field ionization: Fragmentation of  $\text{HeH}^+$  by intense ultrashort laser pulses“, (2018) Phys. Rev. Lett. 121, 073203-1 – 073203-5.

[7] K. Amini, et al., „Imaging the Renner-Teller effect using laser-induced electron diffraction“, (2019) Proc. Natl. Acad. Sci. 116, 8173 – 8177.

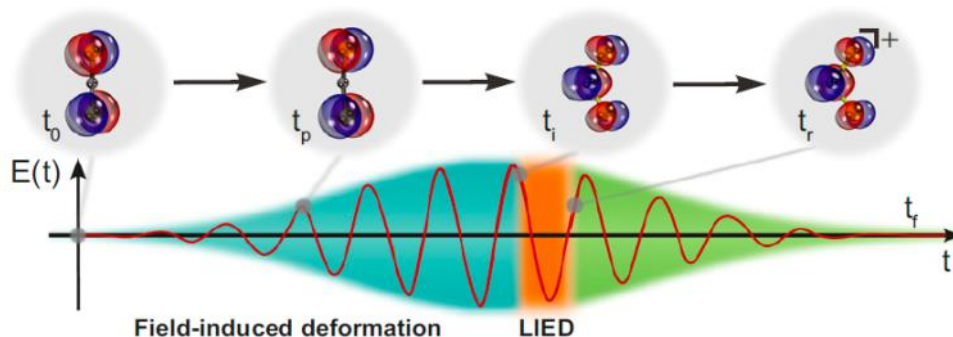


Abb. 2. Starkfeld-getriebene Symmetriebrechungsdynamik (Renner-Teller-Effekt) in  $\text{CS}_2$ . Das Schema zeigt die Molekülstruktur und beteiligte Molekülorbitale im elektrischen Feld. Nach Ionisation werden die Elektronen des Moleküls genutzt, um die Struktur des Moleküls abzubilden, ähnlich wie bei einem „Selfie“ (LIED: laser-induced electron diffraction). Aus Ref [7].

### Neuer SFB: NOA – Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen

(Sprecherteam: Prof. Ulf Peschel, Physik, und Prof. Stefanie Gräfe)



Der Sonderforschungsbereich SFB 1375 "NOA - Nichtlineare Optik bis in den Atombereich" wurde im Juli 2019 an der Friedrich-Schiller-Universität eingerichtet. Das Forschungsprogramm konzentriert sich auf die Erforschung grundlegender nichtlinearer Prozesse der Licht-Materie-Wechselwirkung in niedrigdimensionalen Nanostrukturen, wie atomar dünne

Schichten, Nanopartikel und -drähte, nanostrukturierte Oberflächen und molekulare Baugruppen. NOA wird Quantenphänomene wie das lichtinduzierte Tunneln von Elektronen durch metallische Nanospalten und die feldgetriebene Trägerbeschleunigung in plasmatischen Nanostrukturen, Atomgittern und 2D-Materialien untersuchen.

Dazu gehört die Untersuchung der resultierenden Rückwirkung auf das elektromagnetische Feld, die zur Erzeugung höherer Oberwellen und Informationen über die an der Wechselwirkung beteiligten elektronischen Wellenfunktionen führt.



## Institut für Festkörperphysik (IFK)





**Institutsdirektor: Prof. Dr. Torsten Fritz**

**Lehrstuhl für Angewandte Physik/Festkörperphysik**

Prof. Dr. Torsten Fritz

**Lehrstuhl für Experimentalphysik/Festkörperphysik**

Prof. Dr. Carsten Ronning

**Professur für Tieftemperaturphysik**

(ab Oktober 2019 Seniorprofessor)

Prof. Dr. Paul Seidel

**Professur für Photonische Nanomaterialien**

Prof. Dr. Isabelle Staude

**Juniorprofessur für Optik zweidimensionaler Festkörper**

Jun.- Prof. Dr. Giancarlo Soavi

**Außerplanmäßige Professur für dünne Schichten**

apl. Prof. Dr. Frank Schmidl

**Außerplanmäßige Professur für Ionenstrahlphysik**

apl. Prof. Dr. Elke Wendler

**Max-Planck-Arbeitsgruppe Laborastrophysik**

PD Dr. Cornelia Jäger

**Adresse:** Helmholtzweg 3 und 5, 07743 Jena

**Homepage:** [www.ifk.uni-jena.de](http://www.ifk.uni-jena.de)

## Lehrstuhl für Angewandte Physik / Festkörperphysik Prof. Dr. Torsten Fritz

### Forschungsschwerpunkte

- Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in organischen epitaktischen Adsorbatschichten: Organische Dünnschichten mit Schichtdicken im Monolagenbereich weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit ihrer optischen und elektronischen Eigenschaften von der Schichtstruktur auf. Das Hauptziel unserer Forschung ist die Entwicklung von Grundlagen für den Einsatz von organischen Nanomaterialien in zukünftigen Geräten.
- Organische Supraleiter: Eine recht neue Klasse von organischen Supraleitern stellen K-dotierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe da, die von uns umfassend untersucht werden
- 2D-Materialien: Epitaktisches Graphen, hexagonales Bornitrid (h-BN), Übergangsmetall-dichalco-genide
- Optische *in situ* Spektroskopie: Die von uns angewandte Differentielle Reflexionsspektroskopie (DRS) erlaubt es uns, die Lichtabsorptionseigenschaften von Dünnschichten (Empfindlichkeit besser als 0,1 ML, also effektiv 0,03 nm) und Grenzflächen genau zu bestimmen.

### Forschungsprojekt 1: Rolle der Anfangs- und Endzustände bei verschiedenen Molekülspektroskopien

Elektronische Bauelemente auf der Basis organischer Halbleiter sind eine schnell wachsende Technologie. Ein detailliertes Verständnis des Wechselspiels zwischen den optischen und elektronischen Eigenschaften sowie der physikalischen Struktur von organischen Molekülschichten ist erforderlich für die Optimierung solcher Bauelemente. Dies erfordert Untersuchungen mittels verschiedener, aber komplementärer spektroskopischer Techniken, bei denen die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Datensätzen verwirrend sein kann. Folglich ist das Hauptziel unserer Arbeit die konsequente Vereinheitlichung der Interpretation spektroskopischer Daten, unter Anwendung der komplementären Modelle von molekularen Zuständen und Ener-

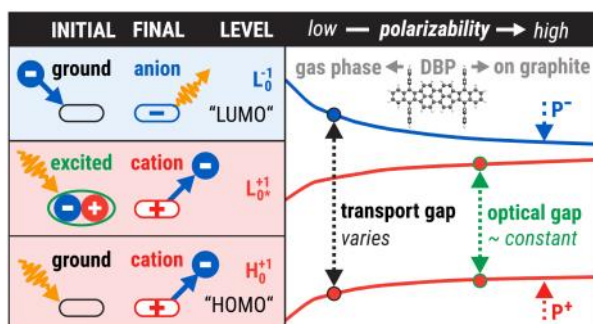


Abb. 1. Unterschiedliche Spektroskopieprozesse führen zur Beobachtung unterschiedlicher molekularer Zustände (links: IPES, 2PPE, UPS). Rechts: Schichtdickenabhängigkeit von Transport-Gap und optischem Gap von DBP. Aus [2].

gieniveaus [1]. Die Notwendigkeit der vereinheitlichten Interpretation wird z.B. deutlich bei der Untersuchung von epitaktischen Filmen von Tetraphenyldibenzoperiflanthen (DBP) auf Graphit (0001)-Oberflächen [2].

Auf den ersten Blick unverständlich ist z.B. die Vergrößerung des Transport-Gaps um etwa 0,6 eV mit zunehmender Schichtdicke, während die optische Bandlücke nahezu konstant bleibt. Darüber hinaus liefert die Zwei-Photonen-Photoemissionsspektroskopie (2PPE) mehrere Peaks, die alle zu demselben unbesetzten Orbital gehören, und es ist nicht trivial, dies mit den Ergebnissen anderer Spektroskopien zu korrelieren. Diese Fragen können gelöst werden, wenn alle spektroskopischen Daten konsistent mit einem theoretischen Modell interpretiert werden, das von uns vor kurzem unter Berücksichtigung der Anfangs- und Endzustände der zugrunde liegenden Messprozesse (Abb. 2) eingeführt wurde [1]. Bei Anwendung dieses Modells können alle Peakverschiebungen konsequent anhand von Polarisations- und Aufladungsenergien sowie der mikroskopischen Struktur der DBP-Dünnschichten erklärt werden [2].

[1] T. Kirchhübel, O. L. A. Monti, T. Munakata, S. Kera, R. Forker und T. Fritz: The role of initial and final states in molecular spectroscopies (invited perspective). *Phys. Chem. Chem. Phys.* 21, 12730-12747 (2019), DOI: [10.1039/c8cp07318j](https://doi.org/10.1039/c8cp07318j).

[2] T. Kirchhübel, S. Kera, T. Munakata, N. Ueno, R. Shiraishi, T. Yamaguchi, K. Yonezawa, T. Ueba, F. Bussolotti, J. Yang, T. Yamada, R. Mori, S. Kunieda, T. Huempfer, M. Gruenewald, R. Forker und T. Fritz: The Role of Initial and Final States in Molecular Spectroscopies – the Example of Tetraphenyldibenzoperiflanthen (DBP) on Graphite. *J. Phys. Chem. C* 124, 19622–19638 (2020), DOI: [10.1021/acs.jpcc.0c05448](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c05448).

## Forschungsprojekt 2: Hohe Kaliumkonzentrationen in epitaktischen Monoschichten eines flexiblen Lander-Typ-Moleküls auf Ag(111)

Die strukturellen, elektronischen und optischen Eigenschaften von organischen Adlayern lassen sich durch den Einbau von Metallatomen deutlich verändern. Wir haben Rastertunnelmikroskopie und niederenergetische Elektronenbeugung eingesetzt, um epitaktische Monolagen von Tetraphenyldibenzoperiflanthen (DBP) auf Ag(111) zu untersuchen, die mit Kalium interkaliert wurden [3]. Dieses Molekül vom Lander-Typ enthält vier Phenylsubstituenten, die nahezu senkrecht zum aromatischen Rückgrat stehen, und seine Flexibilität ermöglicht komplexe Adlayer-Strukturen. Es ist uns gelungen, hochgeordnete Monolagen mit bis zu sechs Kaliumatomen pro DBP herzustellen. Bei steigenden K-Konzentrationen verändert DBP seine Form von einer beträchtlich gekrümmten Geometrie (DBP- und  $K_2$ DBP-Phasen) zu einem planaren Molekül ( $K_6$ DBP-Phase). Mit Hilfe von DFT-Berechnungen wurde aufgeklärt, dass die hinzugefügten K-Atome unterhalb des Moleküls adsorbieren und dadurch die direkten Bindungskanäle zwischen

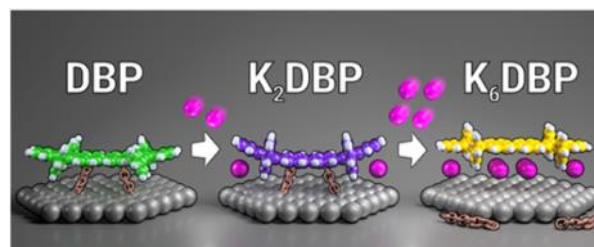


Abb. 2. Symbolisierung des Einflusses unterschiedlicher K-Konzentrationen auf das System DBP/Ag(111). Aus [3]

DBP und Ag schwächen, während neue Bindungskanäle über die K-Atome hinzugefügt werden (Abb. 2). Die Kombination von Strukturdaten, Ergebnissen verschiedener Spektroskopiemethoden und DFT-Berechnungen führte zu einer umfassenden Sicht auf dieses recht komplexe Wirtsmolekül-Gastatom-Substrat-System.

[3] F. Otto, T. Kirchhübel, A. Baby, F. Sojka, G. Fratesi, T. Fritz, und R. Forker: High Potassium Concentrations Nested in Epitaxial Monolayers of a Flexible Lander-Type Molecule on Ag(111), *J. Phys. Chem. C* 124, 4114-4127 (2020). DOI: [10.1021/acs.jpcc.9b10560](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b10560).

## Forschungsprojekt 3: Hybridisierung vs. Entkopplung: Einfluss einer h-BN-Zwischenschicht

2D-Materialien wie hexagonales Bornitrid (h-BN) werden häufig verwendet, um organische Moleküle von Metallsubstraten zu entkoppeln. Wir haben die elektronischen und optischen Eigenschaften sowie die laterale Struktur von Tetraphenyldibenzoperiflanthen (DBP) auf Ni(111) mit und ohne atomar dünne h-BN-Zwischenschicht charakterisiert, um einen möglichen Entkopplungseffekt zu untersuchen. Zu diesem Zweck verwendeten wir in-situ-Differentialreflexionsspektroskopie als etablierte Methode zur Unterscheidung zwischen hybridisierten und entkoppelten Molekülen. Durch Einfügen einer h-BN-Zwischenschicht haben wir eine vergrabene Grenzfläche hergestellt und zeigten, dass die DBP-Moleküle gut von der Ni(111)-Oberfläche entkoppelt sind [4]. Darüber hinaus wird eine hochgeordnete DBP-Monoschicht auf h-BN/Ni(111) nur durch Abscheidung der Moleküle bei einer erhöhten Substrattemperatur von 170 °C erhalten (Abb. 3).

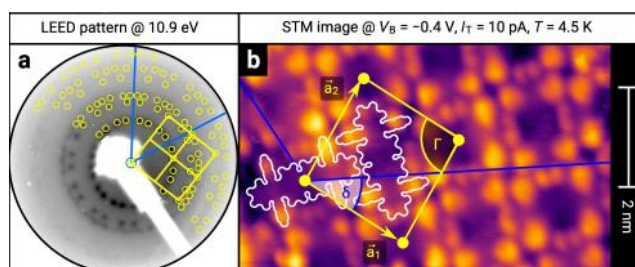


Abb. 3. (a) LEED-Bild (Kontrast invertiert) einer hochgeordneten DBP-Schicht auf h-BN/Ni(111) inklusive LEED-Simulation. Gelbe Punkte und Linien entsprechen dem reziproken Gitter von der DBP-Struktur einschließlich Symmetrieäquivalenten (Rotations- und Spiegeldomänen). Blaue Linien zeigen zwei primitive reziproke Gitterrichtungen des Substrats. (b) LT-STM-Bild der gleichen Probe, überlagert von der Realraumstruktur des Molekulargitters (gelb markiert) sowie der Konturen der beiden Moleküle in der Einheitszelle. Blaue Linien zeigen die Richtung der primitiven Gittervektoren des Substrats an. Aus [4].

[4] M. Schaal, T. Aihara, M. Gruenewald, F. Otto, J. Domke, R. Forker, H. Yoshida, and T. Fritz: Hybridization vs decoupling: influence of an h-BN interlayer on the physical properties of a lander-type molecule on Ni(111), *Beilstein J. Nanotechnol.* 11, 1168–1177 (2020). DOI: [10.3762/bjnano.11.101](https://doi.org/10.3762/bjnano.11.101).

## Lehrstuhl für experimentelle Physik / Festkörperphysik

### Prof. Dr. Carsten Ronning

#### Forschungsschwerpunkte

- *Halbleiternanodrähte*: Synthese durch chemische Gasphasenabscheidung (VLS-Mechanismus), Funktionalisierung durch Ionenimplantation, Lasing-Eigenschaften einzelner Nanodrähte sowie deren Dynamiken und Ausstrahlcharakteristiken
- *Photovoltaik*: Umfassende Charakterisierung von Solarzellen, insbesondere mit Synchrotron- und Elektronstrahlbasierten Methoden zur Strukturaufklärung, Dünnschichtsolarzellen basierend auf Cu (In,Ga)(Se,S)- und Kersterit-Absorbern
- *Ionen-Festkörper-Wechselwirkungen*: Ionenstrahlsynthese und -modifikation von Materialien, Nanostruktur-Effekte, Monte-Carlo-Simulationen
- *Metaoberflächen*: Synthese durch maskierte Ionenbestrahlung oder einem fokussierten Ionenstrahl, Phasenwechsel- und Phasenübergangs-Materialien, Silizium

#### Halbleiternanodrähte für photonische Anwendungen

Wir synthetisieren lichtleitende Drähte aus Halbleitermaterialien und untersuchen deren optische Eigenschaften – dies sind winzige Drähte mit nur etwa zehn bis fünfhundert Nanometern Durchmesser. So dünn, dass die Wellenlängen des sichtbaren Lichts optimal in sie ‚hineinpassen‘. Perfekte Lichtleiter also. Drei weitere Eigenschaften machen die Drähte darüber hinaus bemerkenswert: sie sind ein »aktives Medium«, das Photonen aussenden kann, sie lassen sich durch Energie anregen und reflektieren an ihren Enden das Licht, wodurch sie als »Resonator« wirken – durch diese Eigenschaften werden sie zu winzig kleinen Lasern.

Um die Drähte herzustellen nutzen wir ein eta-

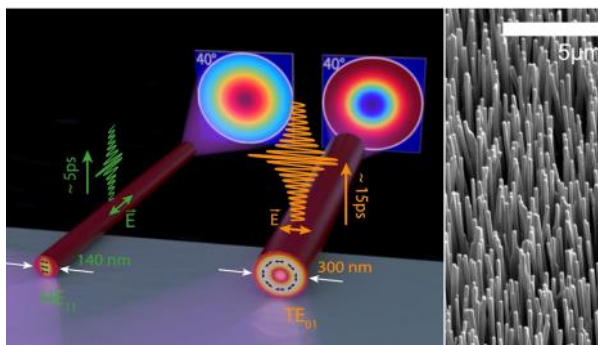


Abb. 1. (links) Dynamiken von zwei ZnO-Nanodrahtlasern mit unterschiedlichen Durchmessern. (rechts) SEM-Aufnahme eines Nanodrahtensembles.

biertes Verfahren: wir bringen feine Partikel – meist Goldnanopartikel – auf ein Substrat auf und bedampfen die Oberfläche dann mit den Substanzen, aus denen die Drähte entstehen sollen: Galliumnitrit, Zinkoxid oder Galliumarsenid. An den Nanopartikeln lagern sich diese an und die winzigen Drähte wachsen in die Höhe.

Um das volle Potential der kleinen Laser auszuschöpfen, ist es besonders wichtig, herauszufinden, in welcher Weise und wie schnell diese Licht ausstrahlen. Beides ist nun gelungen, wie die Abbildung 1 schematisch demonstriert: bei sehr dünnen Drähten wird das Licht gaußförmig abgestrahlt. Dies führt auch zu schnellen Emissionen im Bereich von wenigen ps. Sind die Drähte jedoch dicker, verändert sich dies ganz erheblich: Dann strahlen die Drähte an den Rändern stärker und in ihrer Mitte weniger, und sind auch deutlich langsamer.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereich „NOA“ untersuchen wir heute, wie die Kombination mit metallischen, plasmonischen Strukturen diese optischen Eigenschaften der Nanodrähte beeinflusst.

R. Röder, et al. „Mode switching and filtering in nanowire lasers“, [Nano Letters 16, 2878 \(2016\)](#)

M. Zapf, et al. „Hot electrons in a nanowire hard X-ray detector“, [Nature Communications 11, 4729 \(2020\)](#)

T.P.H. Sidiropoulos, et al. „Ultrafast plasmonic nanowire lasers near the surface plasmon frequency“, [Nature Physics 10, 870 \(2014\)](#)



## Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Dünnschichtsolarzellen

Im Rahmen eines Verbundprojektes mit der deutschen Industrie entwickeln wir robuste, vor allem wettbewerbsfähige und effizientere Herstellungsprozesse. Es besteht eine besondere Aufgabe, die Erhöhung der Depositionsgeschwindigkeit, die möglicherweise mit einer Erniedrigung des Wirkungsgrades einhergeht, mit der Optimierung der Alkali-Dotierung so zu kompensieren, dass ein optimales Prozessfenster entsteht.

Unser Beitrag liegt in der umfassenden und grundlegenden Charakterisierung von CIGS-Laborzellen und Teilschichten mit Synchrotron- und Elektronstrahl-basierten Methoden. Weiterhin wird die Dotierung von Teilschichten durch (Niederenergie-) Ionenimplantation untersucht. Diese Arbeiten haben das Ziel, ein tieferes Verständnis der Diffusions- und Wachstumsprozesse unter diesen speziellen Prozessbedingungen zu erreichen.

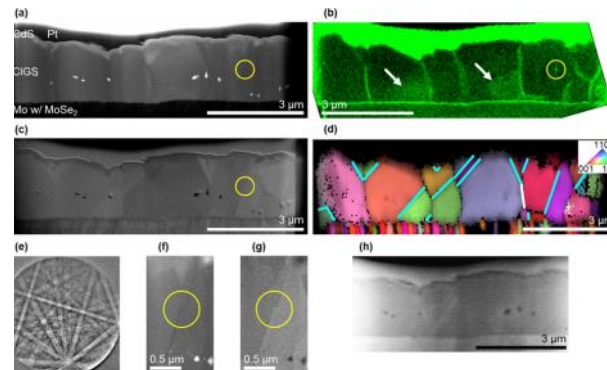


Abb. 2. Kombinatorische Synchrotron- und Elektronstrahl-Untersuchung einer CIGS-Solarzelle, die mit Rb nachbehandelt worden ist.

P. Schöppe, et al. „Revealing the Origin of the Beneficial Effect of Cesium in Highly Efficient Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells“, [Nano Energy 71, 104622 \(2020\)](#)

P. Schönherr, et al. „Observation and manipulation of CIGSe phase formation in a two stage sequential process“, [Appl. Phys. Lett. 115, 143901 \(2019\)](#)

M. Ritzer, et al. „On the Germanium Incorporation in Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> Kesterite Solar Cells Boosting their Efficiency“, [ACS Applied Energy Materials 3, 558 \(2020\)](#)

## Metaoberflächen realisiert durch Ionenbestrahlung

Metaoberflächen sind künstlich strukturierte und optische dünne Schichten, die präzise konstruiert werden können, um die Amplitude, Polarisation oder Phase von Lichtstrahlen zu manipulieren. Metaoberflächen ermöglichen somit flache Optiken und werden die Photonik revolutionieren, da konventionelle Lithographie und Abscheidungsverfahren zur Herstellung von komplexen optischen Bauelementen eingesetzt werden können.

In diesem Projekt realisieren wir Metaoberflächen für einen breiten und abstimmbaren Spektralbereich, in dem wir entweder durch Masken selektiv dotieren bzw. Defekte einbringen oder wir nutzen einen fokussierten Ionenstrahl und können die Metaoberflächen „direkt schreiben“. Am Ende des Projektes werden wir uns einer Vision in der Optik widmen und dreidimensionale optische Systeme schichtweise aufbauen, da die selektive Ionenbestrahlung inhärent flache Oberflächen ermöglicht.

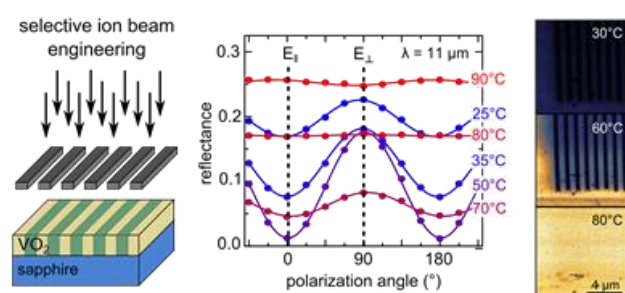


Abb. 3. (a) Maskierte Bestrahlung von VO<sub>2</sub> mit energetischen Ionen. (b) Winkelabhängige Reflexion der bestrahlten VO<sub>2</sub>-Probe als Funktion der Temperatur. (c) Entsprechende optische Nahfeld Aufnahmen.

M. Hafermann, et al. „Grayscale Nanopatterning of Phase-Change Materials for Subwavelength-Scaled, Inherently Planar, Nonvolatile, and Reconfigurable Optical Devices“, [ACS Applied Nano Materials 3, 4486 \(2020\)](#)

J. Salman, et al. „Flat optical and plasmonic devices using area-selective ion-beam doping of silicon“, [Advanced Optical Materials 6, 1701027 \(2018\)](#)

## Professur für Angewandte Physik / Tieftemperaturphysik

### Prof. Dr. Paul Seidel ( ab 01.10.2018 Senior Professor)

#### - PG Physik Dünner Schichten / Supraleitung (apl. Prof. F. Schmidl)

#### Forschungsschwerpunkte

- Dünne Schichten: Abscheidung, Charakterisierung und Anwendung dünner, vorwiegend kristalliner Schichten und Schichtsysteme mit PVD Verfahren. Hauptaugenmerk liegt auf der Herstellung von Materialsystemen mit komplexer Stöchiometrie mit lasergestützter Abscheidung (PLD).
- Nanopartikel: Herstellung und Charakterisierung von Nanopartikeln (Reinmetalle und Legierungen), Einsatz von Nanopartikeln zur gezielten Schichtmodifikation.
- Supraleitende Sensorsysteme: Entwicklung, Charakterisierung und Anwendung supraleitender Sensorsysteme, insbesondere Magnetfeldsensoren, für die Strahlstromanalyse in Großbeschleunigeranlagen (CERN, GSI).
- Kryotechnische Anwendungen: Entwicklung und Einsatz von Kühltechniken zur Herstellung und zur Charakterisierung unterschiedlichster Materialien in weiten Temperaturbereichen (von Raumtemperatur bis in den mK Bereich).
- Kombination von hochsensiblen elektrischen und nanoskopischen Methoden für biomedizinische Analysen

#### Forschungsprojekt 1: Cryo-Current-Comparator (CCC)

Die zerstörungsfreie Messung von Strahlströmen im Bereich von nA an Partikelbeschleunigern mit Hilfe von supraleitenden Kryo-Stromkomparatoren (CCC) aus Jena konnte in den



Abb. 1. CCC-Kryostat für das FAIR-Projekt vor Integration des CCCs in die beam line.

Foto: privat 2020 V. Tympel

letzten Jahren erfolgreich fortgesetzt werden.

Ein solches Messsystem ist bereits seit mehreren Jahren ein fester Bestandteil der Strahlüberwachung am CERN-AD (Antiproton Decelerator).

Im BMBF-Projektverbund von HI-Jena, GSI Darmstadt, IPHT Jena, TU Darmstadt und der FSU wurden weitere Kryo-Stromkomparatoren entwickelt, welche für die größer dimensionierten Strahlrohre des sich derzeit im Bau befindlichen FAIR-Projektes konzipiert wurden.

Während eines dieser Messgeräte samt eigens entwickeltem Kryostaten bereits kurz vor der Integration steht, werden an zwei weiteren CCCs diverse Modifikation und innovative Weiterentwicklungen des klassischen CCC-Konzeptes erprobt. Wichtige Erkenntnisse zu den Rauschbeiträgen der einzelnen CCC-Komponenten, den Einkoppelprozessen von mechanischen Vibrationen, und der Temperaturabhängigkeit konnten mit Hilfe dieser Untersuchungen erlangt werden.

V. Tympel et al.: The Next Generation of Cryogenic Current Comparators for Beam Monitoring, IBIC, 2017, 10.18429/JACoW-IBIC2016-TUPG43

V. Zakosarenko et al.: Coreless SQUID-based cryogenic current comparator for non-destructive intensity diagnostics of charged particle beams, in Supercond. Sci. Technol. 32, 2019, 014002, doi: 10.1088/1361-6668/aaf206

## Forschungsprojekt 2: Ökologische Hochleistungs-Abrasionsreinigung mittels Eisstrahlen

Die Entschichtung von Oberflächen zur Vorbereitung für weiterführende Veredelungsprozesse ist eine ständig wiederkehrende Aufgabe. Herkömmliche Verfahren wie das Sandstrahlen sind eine starke Belastung für Umwelt und Gesundheit und darum für viele Anwendungsbereiche mittlerweile nicht mehr zulässig, so dass die Branche händeringend nach ökologischen und nachhaltigen Alternativen sucht. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU fördert daher ein Kooperationsprojekt (AZ 34927) zwischen Universität und den Firmen RS-Korrosionsschutz GmbH, sowie Jenpneumatik und Schlauchtechnik GmbH zur Entwicklung eines neuartigen Entschichtungsverfahrens auf Basis kryogener Wassereispartikel.

Im Rahmen dessen wurde eine einsatzfähige Laboranlage zum Eisstrahlen konstruiert und aufgebaut. Des Weiteren wurden neue Verfahren zur Charakterisierung verschiedener mechanischer Eigenschaften wie Härte und Bruchlast bei tiefen Temperaturen entwickelt.



Abb. 2. Eispartikelstrahlen zum Entrosten und Reinigen von Stahlbauteilen. Foto: Jan-Peter Kasper.

F. Ritschel, H. Nowak und M. Thürk, (2018): „Kryogene Entschichtung - eine Verfahrensanalyse“. Deutsche Kälte- und Klimatagung, Aachen.

F. Ritschel, H. Nowak und M. Thürk, (2019): „Wassereispartikel zur kryogenen Oberflächenbearbeitung - Erzeugung und Eigenschaften“. Deutsche Kälte- und Klimatagung, Ulm.

## Forschungsprojekt 3: Modifikation von Hochtemperatursupraleitern mittels Gold-Nanopartikel

Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) und deren Optimierung auf spezifische Anwendungsparameter (kritische Stromdichte, Magnetfeldstärke und Temperatur) gehören zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts.

Mit Hilfe von Gold-Nanopartikeln sind wesentliche Materialeigenschaften wie die kritische Stromdichte von  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ , ein vielfach untersuchtes HTSL-Material, orts aufgelöst steigerbar und auf den für technische Anwendungen relevanten Temperaturbereich von 77 K hin optimierbar.

Bei der Herstellung dieser Materialkombination liegt besonderes Augenmerk auf den Mechanismen der Schichtbildung, um die Struktur der sich ausbildenden Verteilung der Nanopartikel kontrollier- und vorhersagbar zu gestalten.

Die stetige Verbesserung der Analysemethoden ermöglicht dabei eine Brücke zwischen den makroskopisch wirksamen supraleitenden Eigenschaften und der Struktur, der sich im Herstellungsprozess selbstorganisiert ausbildenden Nanopartikel, zu schlagen.

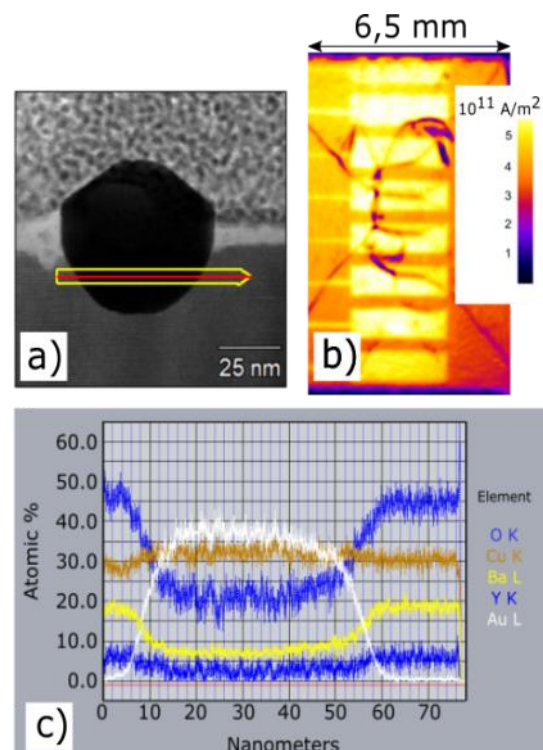


Abb. 3. a) HRTEM-Aufnahme eines Nanopartikel, b) magneto-optische Aufnahme: Bereiche mit Nanopartikeln, zeigen deutlich erhöhte Stromdichte, c) Elementverteilung zu markiertem Bereich in a).



## Professur für Photonische Nanomaterialien

### Prof. Dr. Isabelle Staude

#### Forschungsschwerpunkte

- Nanophotonik, Nanoplasmonik und Nanoantennen
- Metamaterialien and Metafilme
- Hochbrechende dielektrische Nanopartikel
- Hybride Quantensysteme und Quantenemitter
- Nanofabrikation
- Optische Effekte auf Subwellenlängenskala

#### Lichtemittierende dielektrische Meta-Filme

Die elastische Streuung von Licht an kleinen Partikeln, deren Durchmesser in etwa der Lichtwellenlänge entspricht, wird als Mie-Streuung bezeichnet - die Form der Lichtstreuung, welche z.B. auch Milch und Nebel die charakteristische weiße Farbe verleiht. Weniger bekannt ist, dass maßgeschneiderte Mie-Resonanzen dielektrischer Designer-Nanopartikel für die gezielte und effiziente Manipulation von Lichtfeldern eingesetzt werden können. Insbesondere lassen sich aus Millionen von Mie-resonanten dielektrischen Nanopartikeln, die in einer Ebene angeordnet

werden, sogenannte Meta-Filme mit Dicken im Nanometerbereich konstruieren. Diese können nicht nur die Aufgaben bestimmter konventioneller optischer Komponenten übernehmen, sondern bieten darüber hinaus viele interessante neue Möglichkeiten für aktive photonische Systeme. Insbesondere können sie durch die Integration nanoskaliger Emitter als Quellen komplexer Lichtfelder dienen [1,2]. Beispielsweise konnten wir zeigen, dass sich die Lichtemission von molekularen Monolagen des Halbleitermaterials Molybdändisulfid durch Kopplung an einen resonanten Silizium Meta-Film gezielt in der Abstrahlcharakteristik manipulieren lässt [3] (s. Abb. 1).

[1] Vaskin et al., "Light-Emitting Metasurfaces", *Nanophotonics*, 8, 1151-1198 (2019).

[2] A. Vaskin et al., "Manipulation of magnetic dipole emission from Eu<sup>3+</sup> with Mie-resonant dielectric metasurfaces", *Nano Lett.* 19 1015-1022 (2019).

[3] T. Bucher et al., "Tailoring photoluminescence from MoS<sub>2</sub> monolayers by Mie-resonant metasurfaces", *ACS Photonics* 6, 1002-1009 (2019).

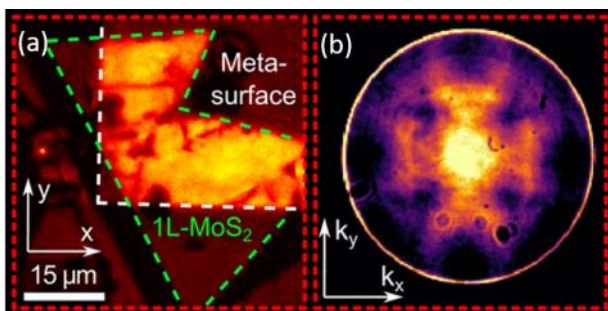


Abb. 1. (a) Räumlich aufgelöste Emission einer Monolage Molybdändisulfid, welche an einen resonanten Silizium Meta-Film gekoppelt ist. (b) Das räumliche Spektrum zeigt klar die directionale Abstrahlcharakteristik des gekoppelten Systems [3].



### Schaltbare photonische Meta-Filme

Existierende optische Systeme zur dynamischen Modulation von Lichtfeldern sind fast ausnahmslos technisch aufwändig, teuer und unhandlich. Die im ersten Abschnitt eingeführten Meta-Filme bieten wichtige neue Chancen zur Realisierung solcher Systeme mit sehr geringer Dicke. Dies kann durch Hybridisierung der Meta-Filme mit responsiven Materialien erreicht werden, die auf extern einstellbare Parameter, wie z.B. angelegte Spannung, Temperatur, oder ein externes Lichtfeld mit einer Änderung ihrer optischen Materialeigenschaften reagieren [4]. Als besonders erfolgreiche Strategie hat sich hier in den letzten Jahren die Integration von Meta-Filmen in Flüssigkristallzellen etabliert [5]. Als beispielhafte Anwendung konnten wir ein völlig neues Display-Konzept demonstrieren, indem wir Silizium Meta-Filme in nematische Flüssigkristallzellen integriert haben [6] (s. Abb. 2). Durch Anlegen einer Spannung zwischen dem Nanofilm-Substrat und dem oberen Fenster der Zelle lassen sich die Flüssigkristallmoleküle von einer vornehmlich horizontalen in eine vornehmlich vertikale Orientierung drehen, was zu einer Änderung der Reso-

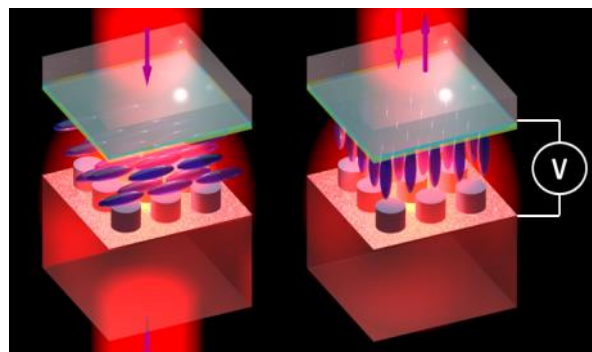


Abb. 2. Durch Integration von Silizium-Meta-Filmen in nematische Flüssigkristallzellen lässt sich deren Transmission durch Anlegen einer externen Spannung dynamisch schalten.

nanzbedingung des Meta-Films führt. Auf diese Weise konnten wir die Transmission des Nanofilms für rotes Licht in ausgewählten räumlichen Bereichen dynamisch variieren.

[4] C. Zou et al., „Resonant Dielectric Metasurfaces – Active Tuning and Nonlinear Effects“, J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 373002 (2019).

[5] J. Bohn et al., „Active tuning of spontaneous emission by Mie-resonant dielectric metasurfaces“, Nano Lett. 18, 3461-3465 (2018).

[6] C. Zou et al. „Electrically tunable transparent displays for visible light based on dielectric metasurfaces“, ACS Photonics 6, 1533 (2019).

### Photonische Meta-Filme mit Drehsinn

Photonische Nanostrukturen, die nicht durch Verschiebungen oder Rotationen mit ihrem Spiegelbild in Übereinstimmung gebracht werden können, werden als „chiral“ bezeichnet. Solche chiralen Strukturen können selektiv mit zirkular polarisiertem Licht unterschiedlicher Händigkeit wechselwirken und bieten damit interessante Perspektiven für neuartige optische Dünnpolarisatoren und für die Detektion der Händigkeit von Molekülen, was z.B. für die Pharmazie wichtig ist. Die Schwierigkeit in der Herstellung von chiralen Nanostrukturen besteht darin, dass eine einzelne nanostrukturierte Lage zu deren Realisierung nicht ausreicht. Wir haben daher sowohl metallische [7] als auch dielektrische [8] chirale Meta-Filme realisiert, die aus zwei präzise zueinander ausgerichteten nanostrukturierten Lagen bestehen. Für die dielektrischen Meta-Filme konnten wir einen zirkularen Dichroismus, also eine unterschiedlich starke Absorption von zirkular polarisiertem Licht unterschiedlicher Händigkeit, in Rekordhöhe nachweisen.

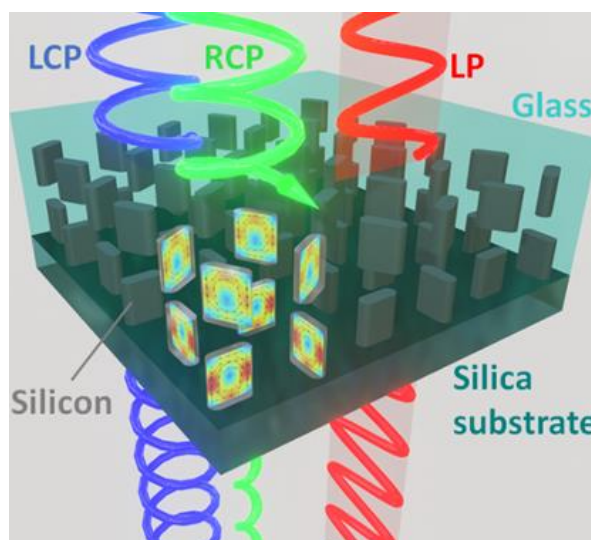


Abb. 3. Schema eines chiralen dielektrischen Meta-Films, der nur für Licht einer zirkularen Polarisation durchlässig ist.

[7] S. Fasold et al., „Disorder-enabled pure chirality in bilayer plasmonic metasurfaces“, ACS Photonics 5, 1773–1778 (2018).

[8] K. Tanaka et al., „Chiral Bilayer All-Dielectric Metasurfaces“, ACS Nano, 14, 15926–15935 (2020).

## Juniorprofessur für Optik zweidimensionaler Festkörper Jun.-Prof. Dr. Giancarlo Soavi

### Forschungsschwerpunkte

- Herstellung von 2D Materialien wie Graphen, Übergangsmetall-Dichalkogeniden (TMD's), hexagonalem Bornitrid (h-BN), 2D Heterostrukturen sowie optoelektronischer Komponenten
- Nichtlineare Optik und Multiphotonenmikroskopie
- Zeitaufgelöste Laserspektroskopie und ultraschnelle Dynamiken
- Raman- und Photolumineszenzspektroskopie

### Optoelektronik mit 2D Materialien und deren Heterostrukturen

Dieses Forschungsprojekt befasst sich mit der Herstellung und Erforschung zweidimensionaler optoelektronischer Komponenten mit Halbleitern (TMD's), Isolatoren (h-BN) sowie dem „Semimetall“ Graphen. Ein Augenmerk liegt dabei auf dem breiten, visuellen Lichtspektrum, das von angeregten Elektronen in Graphen emittiert werden kann. Dies resultiert aus einer thermischen Elektronenverteilung im Valenzband, welche sich einerseits durch optische [1] aber auch elektrische Anregung (Joulesche Wärme) realisieren lässt (s. Abb. 1. a-c). Hier wird die Erzeugung sogenannter „hot electrons“ und deren Lichtemission durch elektrische Anregung

erforscht und mit anderen 2D Materialien kombiniert. Die Herstellung der Materialien erfolgt mechanisch oder mittels chemischer Gasphasenabscheidung (CVD), welche durch ein Transfersystem mikrometerngenau platziert werden können. Mittels Ramanspektroskopie wird u. a. sichergestellt, dass es sich um Graphen-Monolagen handelt (s. Abb.1. d).

[1] L. Ghirardini, E. A. A. Pogna, G. Soavi, A. Tomadin, P. Biagioni, S. Dal Conte, D. De Fazio, T. Taniguchi, K. Watanabe, L. Duò, M. Finazzi, M. Polini, A. C. Ferrari, G. Cerullo, M. Celebrano (2020): Tunable broadband light emission from graphene. arXiv:2012.01779.

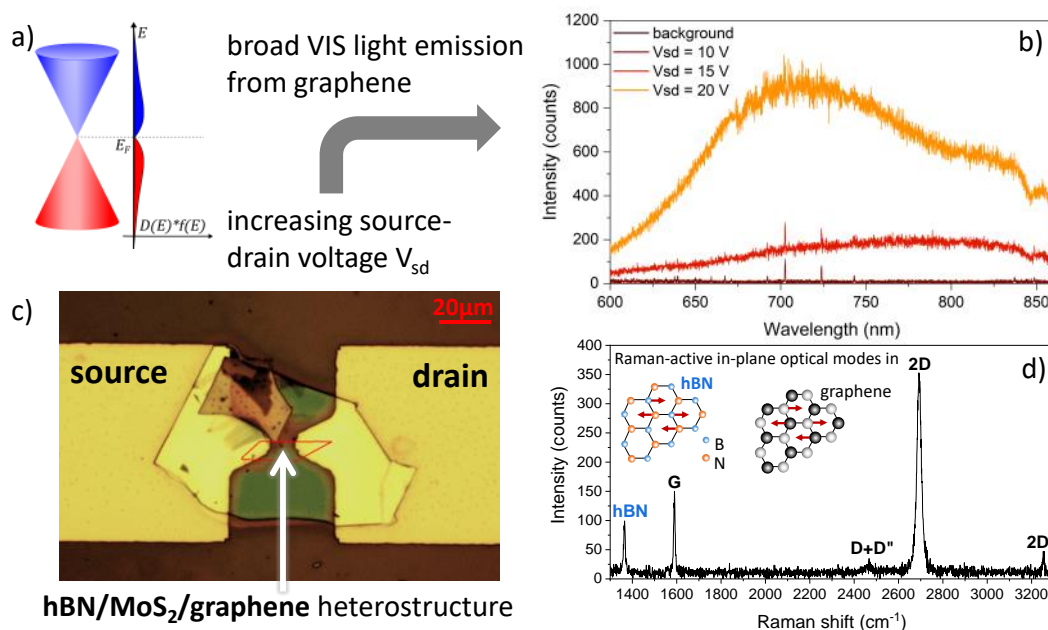


Abb. 1. a) Graphen: lineare Dispersionsrelation („Dirac-Kegel“) und thermische Verteilung der Ladungsträger; b) Breites visuelles Lichtspektrum unter verschiedenen Spannungen zwischen den Elektroden; c) MoS<sub>2</sub>/Graphen Heterostruktur auf Elektroden und von oben eingekapselt von h-BN; d) Ramanspektrum von Graphen und h-BN.

## Nichtlineare Optik mit 2D Materialien

Ziel dieses Projekts ist die Erforschung der nichtlinearen optischen Eigenschaften von zweidimensionalen Materialien. Diese Materialien zeichnen sich durch hohe nichtlineare Suszeptibilitäten aus. Beispielsweise kann die dritte Harmonische von Graphen durch ein externes elektrisches Feld beeinflusst werden [2]. Weiterhin lassen sich durch Messung der zweiten Harmonischen von Übergangsmetall-Dichalkogeniden Aussagen über die Kristallorientierung, Anzahl der Monolagen sowie die Dehnung im Kristall treffen. So kann man bspw. im Polarplot in Abb. 2. deutlich die Ausrichtung eines mit dem CVD Verfahren hergestellten  $\text{MoS}_2$  Kristalls erkennen. Zusätzlich bestätigt Abb. 2. durch die gleichmäßige Intensitätsverteilung eine geringe Dehnung in der Probe.

[2] G. Soavi, G. Wang, H. Rostami, D. G. Purdie, D. De Fazio, T. Ma, B. Luo, J. Wang, A. K. Ott, D. Y., Sean A. Bourelle., J. E. Muench, I. Goykhman, S. Dal Conte, M. Celebrano, A. Tomadin, M. Polini, G. Cerullo and A. C. Ferrari (2018): Broadband, electrically tunable third-harmonic generation in graphene. *Nat. Nanotechnol.*, <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0145-8>.

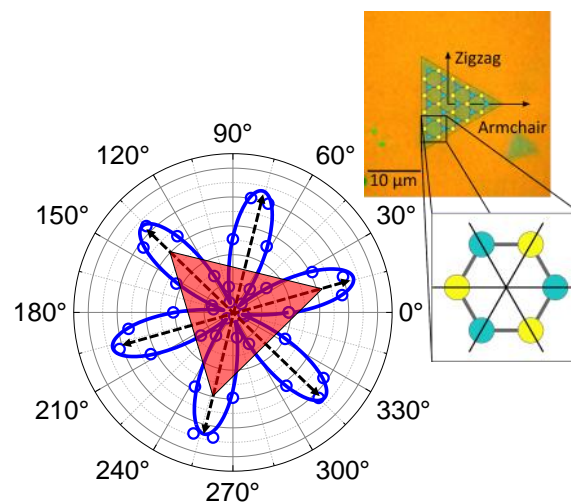


Abb. 2. Polarplot der Intensität der zweiten Harmonischen einer  $\text{MoS}_2$  Monolage als Funktion des Azimutwinkels. Die parallel zur Polarisation der Fundamentalen emittierte Strahlung ist in blau dargestellt. Der Winkel von  $0^\circ$  entspricht einer Orientierung bei welcher der Pumpstrahl in der Tischebene polarisiert ist.

## Ultraschnelle zeitaufgelöste Laserspektroskopie

Um effiziente optoelektronische Komponenten auf Basis zweidimensionaler Materialien zu entwickeln, ist ein genaues Verständnis der Ladungsträgerdynamiken von grundlegender Bedeutung. In diesem Forschungsprojekt werden Relaxationsdynamiken in Proben untersucht, die durch ultrakurze ( $\sim 100$  fs) optische Pulse angeregt werden. Wir haben ein Breitband-Pump-Probe-System (s. Abb. 3.) mit einer hohen Repeti-

tionsrate, einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis und einer hohen zeitlichen Auflösung entwickelt. Darüber hinaus können bei diesem Aufbau ultraschnelle Pump-Probe-Experimente mit kryogenen und elektrischen Messungen kombiniert werden.

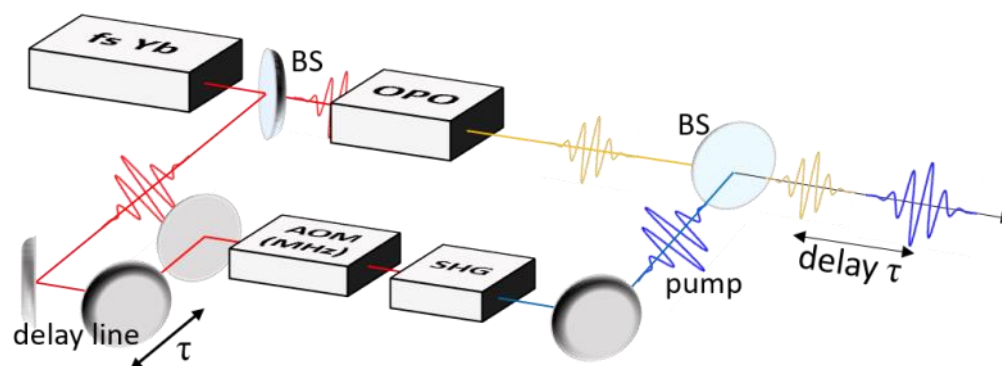


Abb. 3. Lasersystem zur zeitaufgelösten Spektroskopie von „Quantum-Confinement“ Systemen.

## Laborastrophysik und Clusterphysik

### PD Dr. Cornelia Jäger

#### Forschungsschwerpunkte

- Kosmischer Staub: Kondensation unter extremen Bedingungen, chemisch-strukturelle Veränderungen durch energiereiche Photonen (XUV, FUV, Ionen) und Annealing, Erosion an Grenzflächen Eis/Staub, katalytische und spektrale Eigenschaften
- Simulation astrochemischer Prozesse in molekularem Eisschichten auf kosmischen Staubkörnern unter interstellaren und planetaren Bedingungen, Bildung komplexer organischer Moleküle und deren Charakterisierung mittels IR und Massenspektrometrie
- Simulation astrochemischer Reaktionen in Helium Cluster bei Temperaturen von 0.37 K, Bildungswege komplexer organischer und prebiotischer Moleküle, Bestimmung von Reaktionsgeschwindigkeiten
- Ursprung des Lebens: Prebiotische Moleküle unter interstellaren und planetaren Bedingungen

#### Astrochemie in Heliumclustern

Supraflüssige He-Cluster mit einer Temperatur von 0.37 K liefern eine ideale Umgebung zur Untersuchung von Gleichgewichtsreaktionen zwischen Molekülen und Atomen und sogar zur Kondensation von Nanopartikeln. Die He-Tröpfchen werden durch Überschallexpansion von He durch eine mit flüssigem He gekühlte Gasdüse erzeugt. Die He-Cluster können beim Durchlaufen der Pickup-Kammern (R1,R2) mit Atomen oder Molekülen dotiert werden. Kommt es zu Reaktionen zwischen diesen, kann das He die Energie assoziativer Reaktionen absorbieren. Die Methode ermöglicht deshalb die Modellierung von Reaktionen auf der Oberfläche von Staubpartikeln. Außerdem ist ein He-Tröpfchen ein ideales Nanokalorimeter, dass auch sehr geringe Reaktionswärmen messen kann. Die freigesetzte Reaktionswärme wird auf die He-Atome übertragen und verursacht die

ren Verdampfung. Die Verdampfung eines He-Atoms entspricht einer Äquivalenzenergie von  $\sim 5 \text{ cm}^{-1}$  und die Änderung der Tröpfchengröße nach der Reaktion liefert einen Wert für die freigesetzten Energiemenge. Dieses Ergebnis kann direkt mit quantenchemischen Berechnungen verglichen werden, die eindeutige Schlussfolgerungen bezüglich der Reaktionswege und Präsenz von Energiebarrieren zulassen. Die Methode wurde bereits zur Untersuchung astrophysikalisch wichtiger Reaktionen von C-Atomen mit  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{C}_2\text{H}_2$  benutzt [2].

[1] S.A. Krasnokutski, C. Jäger, T. Henning (2020): Condensation of Atomic Carbon: Possible Routes toward Glycine, *Astrophys. J.* 889, 67, 10.3847/1538-4357/ab60a1.

[2] S. A. Krasnokutski, O. Tkachenko, C. Jäger, and T. Henning (2019): Formation of a long-lived cyclic isomer of ethylenedione, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 21, 10.1039/c9cp01616c 12986-12990.

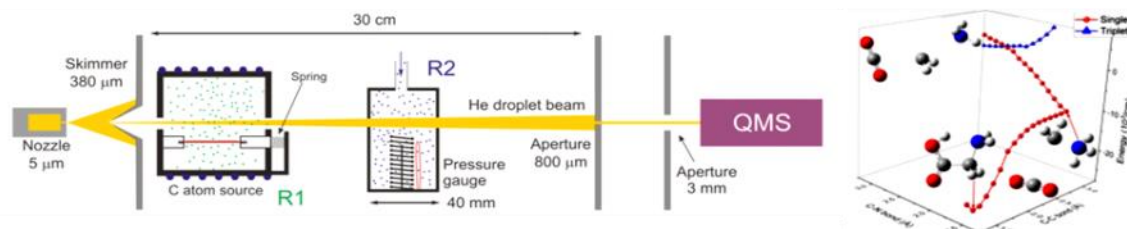


Abb. 1. Links: Schema der He-Cluster-Anlage. Im Innern der He-Cluster finden chemische Reaktionen zwischen Atomen und Molekülen statt. Die Analyse der Reaktionsprodukte erfolgt im Quadrupole-Massenspektrometer. Rechts: Möglicher Tieftemperatur-Reaktionsweg ( $<10 \text{ K}$ ) zur Bildung der Aminosäure Glycin aus  $\text{CO}_2 + \text{CH}_2 + \text{NH}_3$  ohne Aktivierungsenergie [1].



## Kosmische Staubkondensation und spektrale Eigenschaften

Nanometer- und mikrometergroße Staub/Eis- und Staubpartikel sind wichtig für die Entwicklung von Sternen, interstellarer Materie und die Bildung von Planetensystemen. Ihre optischen und morphologischen Eigenschaften, die durch Bildungsprozesse und strahlungsinduzierte Veränderungen bestimmt werden, regeln die Interaktion mit Photonen. Die Kondensation kosmischen Staubs erfolgt in Hüllen um alte und junge Sterne bei sehr hohen Temperaturen oder im interstellaren Medium bei sehr tiefen Temperaturen ( $10\text{ K}$ ,  $p \sim 10^{-12}\text{ mbar}$ ). Diese Bildungsprozesse können in unserem Labor mit Methoden, wie z.B. Laserverdampfung von Festkörpern in Kühlgasatmosphären und Kondensation von Staub in Eismatrizen über einen weiten Temperaturbereich ( $\sim 3500\text{ K}$  bis  $6\text{ K}$ ) simuliert werden [1,2] und erlauben damit ein besseres Verständnis des kosmischen Staubs bzw. der Staub/Eis-Gemische. So konnte z.B. gezeigt werden, dass die realen optischen Eigenschaften solcher Gemische von den berechneten abweichen. Vergleiche der Labordaten mit Beobachtungen im IR erlauben eine bessere Interpretation der Daten. Die Existenz von Wassereis im diffusen interstellaren Medium (DISM) konnte nachgewiesen werden.

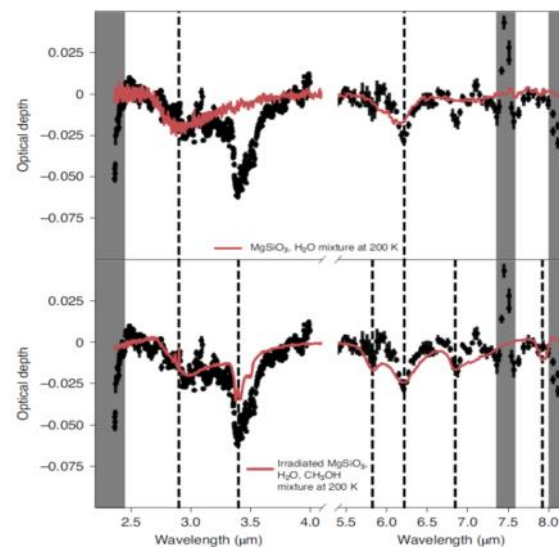


Abb. 2. Vergleich der Labordaten der Staub/Eis-Partikel mit Beobachtungsdaten von Cyg OB2 12 (DISM) [1].

[1] A. Potapov, J. Bouwman, C. Jäger, T. Henning (2021): Dust/ice mixing in cold regions and solid-state water in the diffuse interstellar medium, *Nature Astronomy* 5, 78–85, 10.1038/s41550-020-01214-x

[2] G. Rouillé, C. Jäger, T. Henning (2020): Separate silicate and carbonaceous solids formed from mixed atomic and molecular species diffusing in neon, *Astrophys. J.* 892, 96, 10.3847/1538-4357/ab7a11

## Interstellare Astrochemie in Eisschichten auf kosmischen Staubkörnern

Im interstellaren Medium (ISM) sind sehr kalte Staubkörner mit Eisschichten ummantelt. Diese Eisschichten bestehen aus Komponenten, wie  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  und  $\text{O}_2$ . In diesen Eisschichten entstehen, getriggert durch energiereiche Bestrahlung oder Temperatur, komplexe organische und prebiotische Moleküle. In unserem Labor wurde ein UHV System entwickelt, in dem wir Reaktionen im Eis auf Stauboberflächen simulieren können. In der UHV-Anlage können wir die physikalisch-chemischen Bedingungen ( $T=6\text{--}200\text{ K}$ ,  $p \sim 10^{-11}\text{ mbar}$ ), die im ISM und in protoplanetaren Scheiben vorherrschen, realisieren. Sie besteht aus einer UHV-Kammer ausgerüstet mit einem Kryostaten und einem Gaseinlass-System, das die Abscheidung von Eismischungen verschiedener Zusammensetzung ermöglicht. Reaktionen zwischen molekularen Komponenten im Eis und an der Phasengrenze Staub/Eis werden mittels in situ IR-Spektroskopie, temperaturgesteuerter Desorption und Massenspektrometrie verfolgt und Reaktionsprodukte identifiziert. Die Stauboberflächen haben einen großen Einfluss auf die Kinetik von Reaktionen und können katalytisch wirken.

A. Potapov, C. Jäger, T. Henning (2020): On the ice coverage of dust grains in cold astrophysical environment, *Phys. Rev. Lett.* 124, 221103, 10.1103/PhysRevLett.124.221103

A. Potapov, P. Theulé, C. Jäger, T. Henning (2019): Evidence of surface catalytic effect on cosmic dust grain analogs: The ammonia and carbon dioxide surface reaction, *Astrophys. J. Lett.* 878, L20/1, 10.3847/2041-8213/ab2538

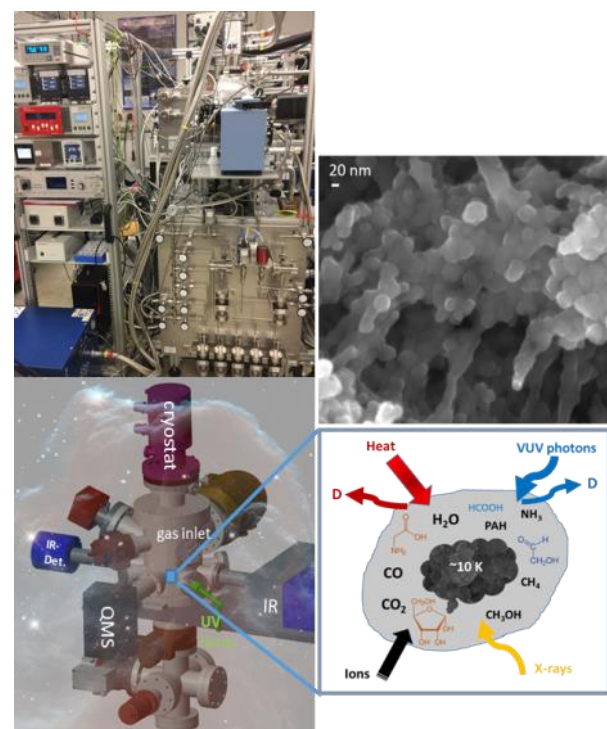


Abb. 3. Links: UHV Experiment zur Untersuchung von Reaktionen in molekularem Eis, ausgefroren auf Staubpartikeln. Rechts: Elektronenmikroskopisches Bild eines porösen Staubkorns und Modell eines typischen Partikels im ISM. Organische und prebiotische Moleküle wie Glycin oder Zucker können entstehen und ggf. wieder desorbieren (D).

## Institut für Festkörpertheorie und -optik (IFTO)



**Institutsdirektor: Prof. Dr. Ulf Peschel**

**Lehrstuhl für Theoretische Physik/Festkörperphysik**

Prof. Dr. Silvana Botti

**Lehrstuhl für Theoretische Physik/Festkörperoptik**

Prof. Dr. Ulf Peschel

**Adresse:** Fröbelstieg 1 (Abbeanum), 07743 Jena

**Homepage:** [www.ifto.uni-jena.de](http://www.ifto.uni-jena.de)

## Lehrstuhl für Theoretische Physik / Festkörperphysik

### Prof. Dr. Silvana Botti

#### Forschungsschwerpunkte

- Vielteilchen-Theorie der kondensierten Materie: Entwicklung von Näherungsmethoden und Computer-Codes zur Beschreibung elektronischer Anregungen in Festkörpern
- theoretische Spektroskopie: Berechnung der elektronischen und optischen Eigenschaften von komplexen Materialien, Nanostrukturen und Grenzflächen zum besseren Verständnis von Experimenten
- computergestütztes Material-Design durch Kombination von Hochdurchsatz-Ab-Initio-Rechnungen mit Methoden zur Kristallstrukturvorhersage
- Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens zur Vorhersage der thermodynamischen Stabilität neuartiger Materialien
- Suche nach geeigneteren Materialien für Anwendungen in den Bereichen Energieproduktion, Energiespeicherung

Die Festkörpertheorie-Gruppe von Prof. Silvana Botti trägt zur Weiterentwicklung des aufstrebenden multidisziplinären Feldes des computergestützten Materialdesigns bei, das gerade eine Revolution in der Materialwissenschaft auslöst. Insbesondere haben wir, geleitet von der Quanten-Vielteilchen-Störungstheorie und Ab-initio-Rechnungen, am Design und der Entdeckung neuer Materialien gearbeitet. Viele Projekte haben eine starke Anwendungskomponente und wurden in enger Zusammenarbeit mit Experimentatoren durchgeführt. Wir haben aber auch die Entwicklung von Theorien, verbesserten Methoden und wissenschaftlicher Hochleistungssoftware vorangetrieben.

#### Entwicklung von effizienten und genauen Funktionalen im Rahmen der Dichtefunktionaltheorie (DFT) für elektronische Zustände, Transport und optische Eigenschaften von Grenzflächen

Um zuverlässige theoretische Vorhersagen der physikalischen Eigenschaften von Grenzflächen zu treffen und die Suche von Kandidaten für funktionale Grenzflächen aus dem Labor auf Supercomputer zu verlagern, haben wir Dichtefunktionale entwickelt, die speziell für die elektronischen Eigenschaften von Grenzflächen und zweidimensionalen Materialien optimiert sind: ein lokales Hybrid-Dichtefunktional und ein lokales Meta-GGA-Dichtefunktional. Unsere Funktionalen können die Genauigkeit der Theorie der Green'schen Funktionstheorie für die Berechnung von elektronischen Bandstrukturen erreichen, aber sie bewahren die Effizienz von Standard-Dichtefunktionaltheorie-Rechnungen. Wir beschäftigen uns auch mit einem groß angelegten Benchmarking von Dichtefunktionalen für die Berechnung von Bandstrukturen und mit der Verwendung von maschinellem Lernen zur Korrektur von Dichtefunktionaltheorie-Rechnungen und zur Erhöhung der Zuverlässigkeit theoretischer Vorhersagen.

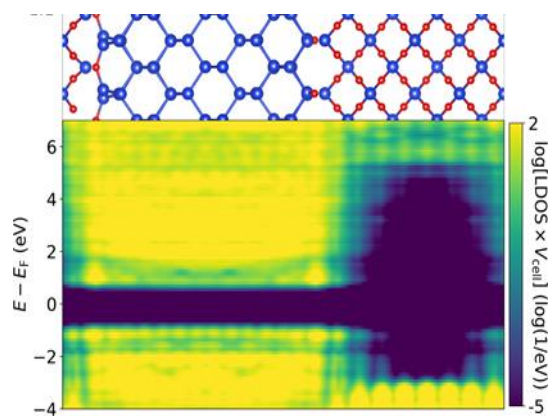


Abb. 1. Abbildung der lokalen Zustandsdichte, gemittelt in der  $xy$ -Ebene und aufgetragen entlang der  $z$ -Achse senkrecht zur Grenzfläche zwischen Si and  $\text{SiO}_2$ . Aus Rauch et al. *J. Chem. Theory Comput.* 16, 2654 (2020).



## Beschleunigtes computergestütztes Ab-Initio-Materialdesign

Wir haben die fortschrittlichsten Techniken der rechnergestützten Materialmodellierung angewandt, um nach verbesserten elektronischen und Quantenmaterialien zu suchen. Aufbauend auf unserer Arbeit an effizienten Algorithmen zur Strukturvorhersage von Kristallen haben wir eingeschränkte Methoden zur Strukturvorhersage entwickelt und angewendet, um nanostrukturierte Materialien und Grenzflächen zu untersuchen. Wir haben auch die Rolle von strukturellen Defekten auf die elektronischen Eigenschaften untersucht und Hochdurchsatzstudien zur Identifizierung von Dotierungsstrategien durchgeführt.

Refs: Sun *et al.* accepted in Nature Comm. 2021, Chem. Mater. 31, 19, 7877 (2019); Phys. Chem. Chem. Phys. 21, 18839 (2019); J. Mater. Chem. A 7, 14705 (2019); J. Mater. Chem. A 6, 6463 (2018).

## Maschinelles Lernen für Materialvorhersagen

Wir haben Pionierarbeit bei der Anwendung von Techniken des maschinellen Lernens in Kombination mit der Dichtefunktionaltheorie geleistet, um die Entdeckung neuer stabiler Materialien zu beschleunigen und Materialien mit besseren elektronischen Eigenschaften vorherzusagen. Unser Reviewartikel, der 2019 in npj Computational Materials veröffentlicht wurde, wurde in einem Jahr 200 Mal zitiert.

Wang *et al.* Accepted in npj Comput. Mater. (2021); npj Comput. Mater. 6, 96 (2020); npj Comput. Mater. 5, 83 (2019); Chem. Phys. 148, 241728 (2018).

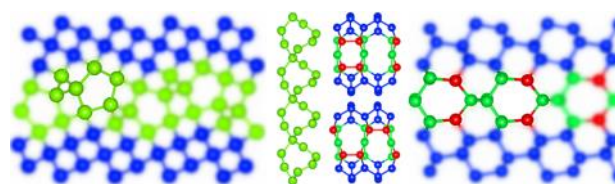


Abb. 2. Rekonstruierte  $\Sigma 5(031)$  (links) und  $\Sigma 11(113)$  (rechts) Silizium-Korngrenzen. Die rekonstruierten Muster sind hervorgehoben. Aus Sun *et al.* Nature Comm. (2021).

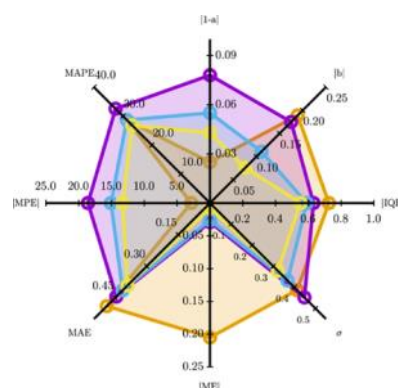


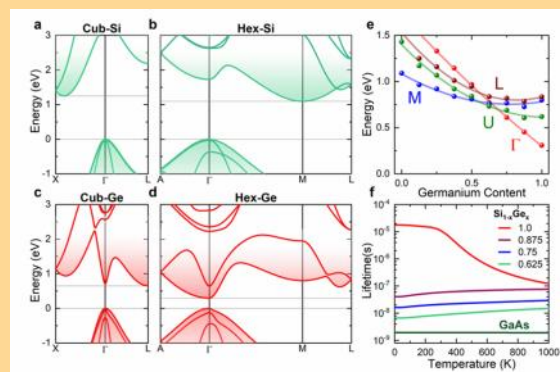
Abb. 3. Netzdiagramm der Fehler für verbesserte maschinelle Lernmodelle zur Berechnung von Bandlücken. Aus Schmidt *et al.* npj Comput. Mater. 6, 96 (2020).

## Lichtemittierende hexagonale Si-Ge-Legierungen für die Silizium-Photonik

Silizium mit direkter Bandlücke gilt wegen der möglichen Integration sowohl elektronischer als auch optischer Funktionalitäten auf einer Silizium-Plattform als Heiliger Gral der Halbleiterindustrie. Potentielle Anwendungen sind Si-basierte optische On-Chip-Verbindungen und eine Si-kompatible Quantenlichtquelle. Trotz erheblicher Anstrengungen konnten bis vor kurzem keine Lichtemitter aus Gruppe-IV-Halbleitern hergestellt werden.

In einer Arbeit, die 2020 in Nature [Fadaly *et al.*, Nature 580, 205 (2020)] veröffentlicht und von Physics World als Durchbruch des Jahres 2020 ausgezeichnet wurde, präsentierten wir Ab-initio-Berechnungen, die zeigen, dass Ge-reiche hexagonale Kristallphasen von SiGe eine direkte Bandlücke aufweisen, die in einem Frequenzbereich durchstimmbare ist, der mit dem verlustarmen Fenster für die optische Faserkommunikation zusammenfällt. Gleichzeitig wurden von unseren experimentellen Partnern defektfreie SiGe-Proben gezüchtet und charakterisiert. Durch die Kombination von Theorie und Experiment konnte erstmals eine effiziente Lichtemission aus SiGe mit direkter Bandlücke

nachgewiesen werden. Diese wichtigen Entwicklungen wurden im Rahmen des Projekts "Silicon Laser" (SiLAS) realisiert, das von der H2020 FET-Open Research and Innovation action (2017-2020) gefördert wird. Das Forschungskonsortium von SiLAS versammelt prominente Gruppen an den Universitäten Eindhoven, Oxford, Linz, Jena und München sowie bei IBM in Zürich.



Elektronische Bandstruktur der kubischen (a,c) und hexagonalen (b,d) Phasen von Silizium und Germanium, Abhängigkeit der Bandlücke an den Hochsymmetriepunkten von der Zusammensetzung (e) und strahlende Lebensdauer als Funktion der Temperatur (f). Aus Fadaly *et al.* Nature 580, 205 (2020).

## Lehrstuhl für Theoretische Physik / Festkörperoptik Prof. Dr. Ulf Peschel

### Forschungsschwerpunkte

- Theoretische Analyse und numerische Simulation der Ausbreitung von Licht und Wechselwirkung mit Materialien, besonders im Rahmen des SFB 1375 Nonlinear Optics down to Atomic Scales (NOA), dessen Sprecher Prof. Ulf Peschel ist.
- Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation von Licht in optischen Systemen: Modulationsinstabilitäten und Musterbildung; Anregung und Ausbreitung von optischen Solitonen; nichtlineare Lokalisierung, Bildung, Dynamik und Wechselwirkung von Exziton-Polariton-Quasiteilchen in hochresonanten Strukturen wie Gittern und Resonatoren
- Licht-Materie-Wechselwirkung in angeregten Dielektrika: Simultane numerische Beschreibung der Feldausbreitung (Finite Difference Time Domain- FDTD) und des resonant angeregten Halbleitermaterials (Halbleiter-Maxwell-Bloch-Gleichungen); Berechnung effektiver optischer Nichtlinearitäten und der Generation hoher Harmonischer
- Optik räumlich und zeitlich diskreter Systeme: Photonische Gitter; Wellenleiterarrays; Bandstrukturen; Einfluss von Symmetrien und Topologie; Parity-Time (PT) symmetrische Systeme; diskrete Solitonen

### Lineare und Nichtlineare Dynamik in diskreten Fasernetzwerken

Random Walks beschreiben Diffusionsprozesse von klassischen Partikeln. Bei quantenmechanischen Teilchen wie Photonen tritt noch zusätzlich Interferenz auf, was zu einer völlig neuen und wesentlich facettenreicheren Dynamik führt, die man erst in neuester Zeit angefangen hat zu untersuchen.

In unserer Gruppe studieren wir theoretisch und experimentell Zufallsbewegungen von kohärenten Lichtpulsen in ausgedehnten Fasernetzwerken. Hierfür verwenden wir einen Versuchsaufbau, der aus mehreren gekoppelten Faserschleifen besteht (Abb. 1) und in dem kleine Längenunterschiede der Schleifen zu einer effektiven Diskretisierung der Ankunftszeit der Pulse führen. Nach einer festen Zahl von Umläufen (Schritt  $m$ ) hängt die Ankunftszeit des Pulses von der Zahl der Durchgänge durch die unterschiedlich langen Schleifen ab. Je nach Zahl der Schleifenpaare werden so ein- und zweidimensionale effektive Gitter realisiert. Wegen seines einfachen Aufbaus erlaubt unser System die experimentelle Verifikation fundamentaler Voraussagen zur Evolution kohärenter und nichtklassischer Lichtpulse auf regulären Gittern, auch unter dem Einfluss von Gewinn und Verlust oder optischer Nichtlinearitäten (Abb. 1).

A. L. M. Muniz, M. Wimmer, A. Bisianov, U. Peschel, R. Morandotti, P. S. Jung, and D. S. N. Christodoulides, "2D Solitons in PT-Symmetric Photonic Lattices," Phys. Rev. Lett. 123, 253903 (2019).

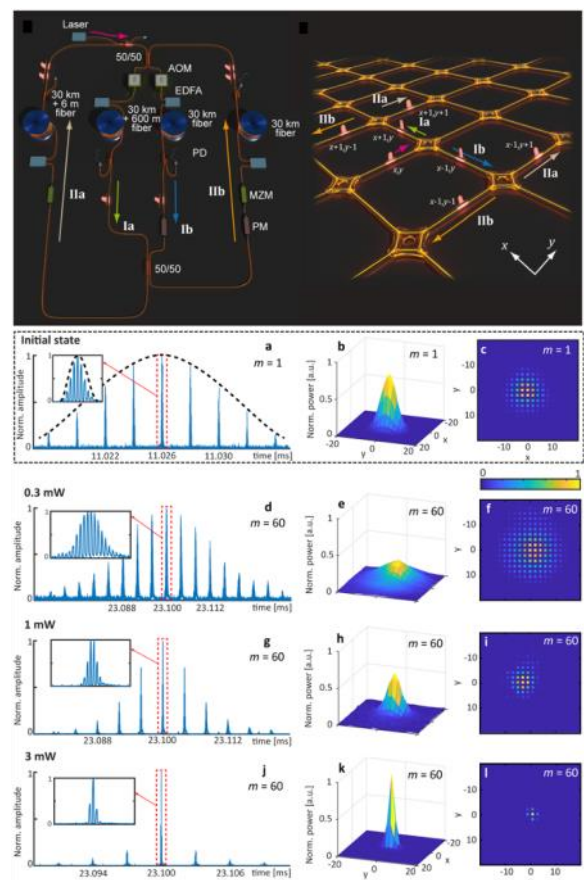


Abb. 1. *oben*: Experimentelle Realisierung eines Photon-Random-Walks auf einem zweidimensionalen Gitter durch 4 gekoppelte Faserschleifen unterschiedlicher Länge (EDFA: Erbiumverstärker, AOM: Akusto-optischer Modulator, PD: Fotodiode). *unten*: Eine initiale Pulsverteilung (a, b) zeigt im Zeitbereich (linke Spalte) und projiziert auf ein 2D-Gitter (mittlere und rechte Spalte) für geringe Leistungen (d, e) Beugung, für mittlere die Bildung eines Solitons (g, h) und für maximale Leistung einen Kollaps (j, k).

## Starke Kopplung zwischen Exzitonen und Polaritonen in resonanten optischen Strukturen

In Zusammenarbeit mit experimentellen Gruppen der Universitäten Würzburg, Oldenburg und Canberra führen wir theoretische und numerische Analysen der Exziton-Polaritonen Dynamik in resonant angeregten optischen Strukturen durch.

Werden zwischen zwei Spiegeln Halbleiterschichten, Polymere oder zweidimensionale Materialien, deren Exzitonenlinie mit der Resonanz der Kavität übereinstimmt, eingebettet (siehe Abb.2), kommt es zur starken Kopplung zwischen Photonen und Exzitonen und zur Bildung von neuen kollektiven Zuständen - sogenannten Exziton-Polaritonen. Diese Quasiteilchen besitzen eine modifizierte Dispersionsrelation und eine starke interne Wechselwirkung, weshalb schon bei sehr schwacher Anregung Kondensation und kohärente Emission auftreten. Das entstehende Kondensat kann durch in die Kavität integrierte Wellenleiter geführt und zur Realisierung von rein optischen Schaltoperationen benutzt werden.

Wir untersuchen besonders den Einfluss der Topologie solcher Wellenleiter- und Gitterstrukturen, aber auch den Effekt einer strukturierten Beleuchtung oder raumabhängiger Verluste auf das Ausbreitungsverhalten der Quasiteilchen.

M. Dusel, S. Betzold, O.A.Egorov, S. Klemmt, J.Ohmer, U. Fischer, S. Hofling, and C. Schneider, „Room temperature organic exciton-polariton condensate in a lattice,“ Nature Communications 11 (2020) DOI: 10.1038/s41467-020-16656-0

O. A. Egorov, C. Etrich, R. Buschlinger, and U. Peschel, „Exciton-Polariton Wave-Packets in Semiconductor Microwires,“ Phys. Status Solidi B 2019, 1800729 (2019). DOI: 10.1002/pssb.201800729

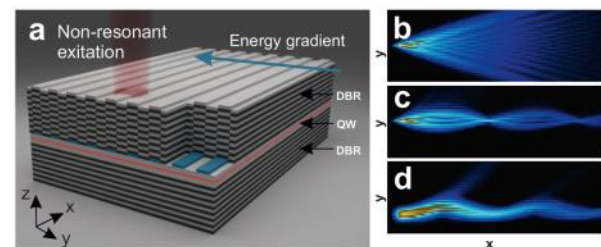


Abb. 2 Typische Resonatorstruktur mit eingebetteten Wellenleitern (a) zur Demonstration von diskreter Beugung (b) im Fall eines homogenen Wellenleiterarrays oder optischer Bloch-Oszillationen bei Präsenz eines transversalen Gradienten und für die Anregung eines (c) oder mehrerer (d) Wellenleiter durch ein Exziton-Polariton-Kondensat.

## Elektromagnetische Modellierung Nanophotonischer Strukturen

Die numerische Modellierung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in nanophotonischen und plasmonischen Komponenten spielt am Lehrstuhl eine wichtige Rolle. Wir simulieren z.B. die Führung von Licht in Wellenleitern, seine Wechselwirkung mit photonischen Kristallen oder seine Konzentration in der Umgebung metallischer Strukturen. Dazukommt eine Vielzahl numerischer Algorithmen, wie auf dem Finite Difference Time Domain (FDTD) Verfahren oder der Beam Propagation Method (BPM) beruhende Ausbreitungs-codes oder unterschiedlichste Eigenmodenlöser in

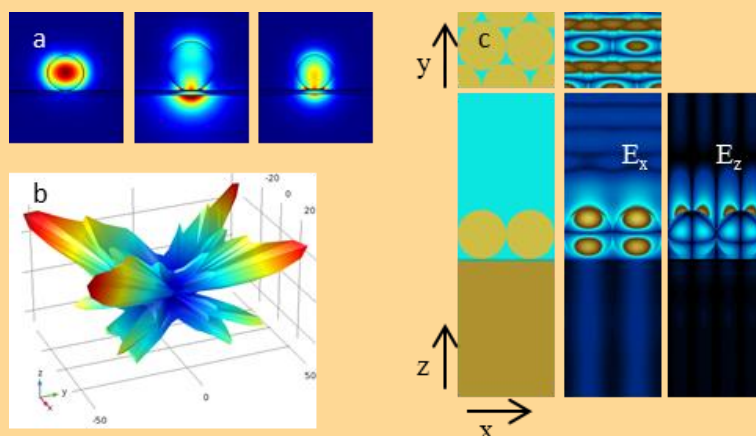


Abb. 3. Simulation nanophotonischer Komponenten auf Metallschichten, a) Moden eines Halbleiternanodrahtlasers und b) ihre Abstrahlcharakteristik, c) Anregung eines photonischen Kristalls

selbstgeschriebenen, aber auch kommerziellen Softwarepaketen zum Einsatz. Ziel ist neben der Überprüfung theore-

tischer Voraussagen die enge Zusammenarbeit mit dem Experiment.



# Institut für Optik und Quantenelektronik (IOQ)



Foto: Jan Nathanael



**Institutsdirektor: Prof. Dr. Malte Kaluza**

**Lehrstuhl für Experimentalphysik/Relativistische Laserphysik**

Prof. Dr. Malte Kaluza

**Lehrstuhl für Experimentalphysik/Nichtlineare Optik**

Prof. Dr. Gerhard G. Paulus

**Lehrstuhl für Experimentalphysik/Quantenelektronik**

Prof. Dr. Christian Spielmann

**Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen (am HI Jena)**

Prof. Dr. Thomas Stöhlker

**Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung (am HI Jena)**

Prof. Dr. Matt Zepf

**Lehrstuhl für Röntgenphysik (am HI Jena)**

Prof. Dr. Ralf Röhlsberger

**AG für Attosekunden-Laserphysik (bis 2019 Juniorprofessur)**

Dr. Adrian Pfeiffer

**Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe „Molekulare Movies“**

Dr. Matthias Kübel

**Adresse:** Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

**Homepage:** [www.ioq.uni-jena.de](http://www.ioq.uni-jena.de)

## Lehrstuhl für Experimentalphysik/Relativistische Laserphysik

### Prof. Dr. Malte C. Kaluza

#### Forschungsschwerpunkte

- Schwerpunkt 1: Entwicklung und Betrieb von Hochleistungslasersystemen mit Spitzenleistungen im Bereich von 100 TW bis 1 PW – Optimierung der Laserparameter für spezielle Anwendungen
- Schwerpunkt 2: Petawatt Optical Laser Amplifier for Radiation Intensive experiments – POLARIS
- Schwerpunkt 3: Design und Realisierung alternativer Konzepte zur Teilchenbeschleunigung: kompakte Laser-getriebene, Plasma-basierte Ionen- und Elektronenbeschleuniger
- Schwerpunkt 4: Charakterisierung von Laser-basierten Teilchenbeschleunigern: Entwicklung von bildgebenden Diagnostiken für Laser-erzeugte Plasmen, Entwicklung von few-cycle Probepulsen im sichtbaren und mittleren Infrarotbereich

#### Forschungsprojekt 1: Entwicklung Dioden-gepumpter Hochleistungslaser – POLARIS

Ein Hauptforschungsfeld des Lehrstuhls für Relativistische Laserphysik ist die Entwicklung von Dioden-gepumpten Hochleistungslasersystemen für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete. Prominentestes Beispiel ist das vollständig Dioden-gepumpte Lasersystem POLARIS, das vollständig am IOQ und am Helmholtz-Institut Jena entwickelt und gebaut wurde. Die verstärkte Frequenzbandbreite erlaubt eine Kompression der Pulse auf eine Dauer von unter 100 fs, so dass – bei einer auf dem Target erreichten Spitzenenergie von 16,7 J – eine Spitzenleistung von etwa 200 TW für Experimente zur Verfügung steht [1]. Damit ist POLARIS das Lasersystem mit der derzeit höchsten Spitzenleistung und –intensität, das vollständig Dioden-gepumpt ist und das darüber hinaus routinemäßig für Experimente zur Laser-induzierten Teilchenbeschleunigung genutzt werden kann. Für spezielle Anwendungen, z.B. die Laser-Ionenbeschleunigung werden u.U.

extreme Anforderungen an die Laserpulse gestellt, z.B. an den Pulscontrast [2], der so hoch sein muss, dass die für die Wechselwirkung verwendeten, teilweise nur wenige nm dicken Targetfolien nicht schon durch etwaige Vorpulse zerstört werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, sind von uns zahlreiche Optimierungen und auch theoretische Untersuchungen für das POLARIS Lasersystem durchgeführt worden, so dass der derzeit erzielte relative Kontrast der Laserpulse auf  $2 \times 10^{-13}$  ebenfalls einen Rekordwert für solche Lasersysteme darstellt [2]. Weiterhin wurden die experimentellen Möglichkeiten von POLARIS durch die Installation eines synchronisierten, few-cycle Probe-Pulses erweitert [3]. Mit dessen Hilfe können zum einen Prozesse sichtbar gemacht werden, die auf Zeitskalen unterhalb der Hauptpulsdauer ablaufen. Zum anderen besteht die Möglichkeit, zeitliche Entwicklungen während der Wechselwirkung über eine Dauer von mehreren Picosekunden in nur einem Schuss zu beobachten. Durch die Kooperation mit dem Helmholtz-Institut Jena und anderen Helmholtz-Zentren ist POLARIS weiterhin eine ideale Entwicklungsplattform für ähnliche Lasersysteme, die weltweit im Einsatz sind.

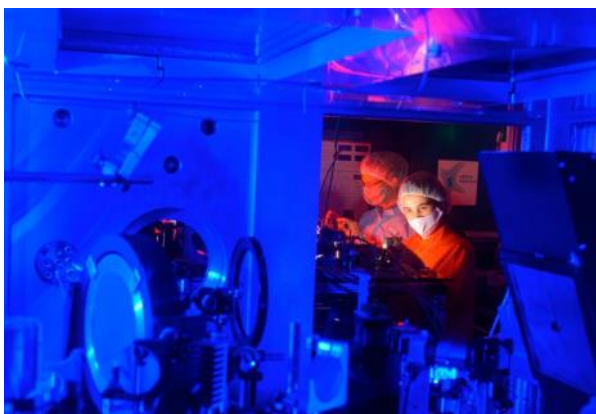


Abb. 1. Justierarbeiten an der Targetkammer von POLARIS Foto: Jens Meyer, FSU.

[1] Hornung M. et al., (2016): Generation of 54.2 J Pulses with 18-nm Bandwidth from a Diode-Pumped CPA-Laser System, Optics Letters 41, 5413 (2016)

[2] Keppler S. et al., (2016): The generation of amplified spontaneous emission in high-power CPA laser systems, Laser and Photonics Reviews, 10.1002/lpor.201500186

[3] Tamer I. et al. (2020): Few-cycle fs-pumped NOPA with passive ultrabroadband spectral shaping, Opt. Express 45, 6575 (2020)

## Forschungsprojekt 2: Alternative Beschleunigerkonzepte—Laser-basierte Teilchenbeschleuniger

Laser-basierte Teilchenbeschleuniger werden derzeit weltweit als eine der vielversprechendsten Alternativen zu konventionellen Beschleunigeranlagen angesehen. Mit solchen neuartigen Beschleunigern können Teilchenpulse mit Parametern (z.B. in Bezug auf Pulsdauer, Emittanz oder Quellgröße) erzeugt werden, die derzeit mit allen anderen Beschleunigerkonzepten nicht realisierbar sind. Weiterhin können diese Teilchenpulse in Experimenten erzeugt werden, die in einen Laboraufbau im Universitätsmaßstab passen. An unserem Lehrstuhl entwickeln wir u.a. Diagnostiken, um die physikalischen Prozesse, die diesem Beschleunigungsprozess zugrunde liegen, im Experiment zu untersuchen und besser zu verstehen [4]. Durch die weltweit einmalige Kombination aus sehr leistungsstarken Lasern, die die Wechselwirkung treiben, und dazu synchronisierten Probepulsen, die nur wenige optische Zyklen lang sind [5], sind uns erstmals detaillierte Einblicke in die Beschleunigung von Ionen von Wassertröpfchen [6] und Elektronen in sog. Laser-erzeugten Plasmawellen [7] gelungen, die bis dahin nur aus Simulationen bekannt waren. Durch die hieraus gewonnenen Erkenntnisse konnten wir die numerischen Simulationen, die bis dahin das wesentliche Werkzeug waren, um die Interaktion genau zu verstehen, anpassen, um die experimentellen Ergebnisse besser und realistischer zu reproduzieren. Unser ultimatives Ziel ist es – auch in Kollaboration mit nationalen und internationalen Partnern – mithilfe der Laser-basierten Teilchenbeschleunigung einen Prototyp eines solchen Beschleunigers zu realisieren, der Teilchenpulse mit vorwählbaren Parametern und der notwendigen Stabilität liefert, die für Anwendungsexperimente zur Verfügung stehen. Erste Experimente zur Verwendung von sekundären Strahlungspulsen oder Teilchenstrahlung, z.B. auch in der Medizin und der Tumorbestrahlung, konnten in unserer Gruppe in den vergangenen Jahren erfolgreich durchgeführt werden.

[4] Downer M. C. et al., (2018): Diagnostics for plasma-based electron accelerators. *Reviews of Modern Physics* 90, 035002 (2018)

[5] Adolph D. et al., (2017): Real-time, single-shot, carrier-envelope-phase measurement of a multi-TW laser. *Applied Physics Letters* 110, 081105 (2017)

[6] Becker, G. et al. (2019): Characterization of laser-driven proton acceleration from water droplets. *Scientific Reports* 9, 17169 (2019).

[7] Schwab, M. B. et al. (2020): Visualization of the Relativistic Laser Intensity Profile in Laser Wakefield Acceleration. *Physical Review Accelerators and Beams* 23, 032801 (2020).

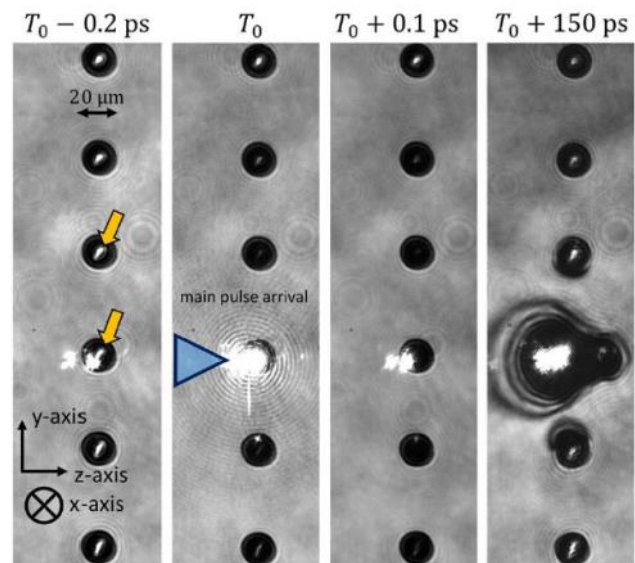


Abb. 2. Optisches Probing der Wechselwirkung eines hochintensiven Laserpulses (von links) mit einzelnen Wassertröpfchen (zu unterschiedlichen Zeiten der WW). Aus den Aufnahmen konnten wesentliche Erkenntnisse über den Prozess der Ionenbeschleunigung gewonnen werden. (Abb. aus [6])

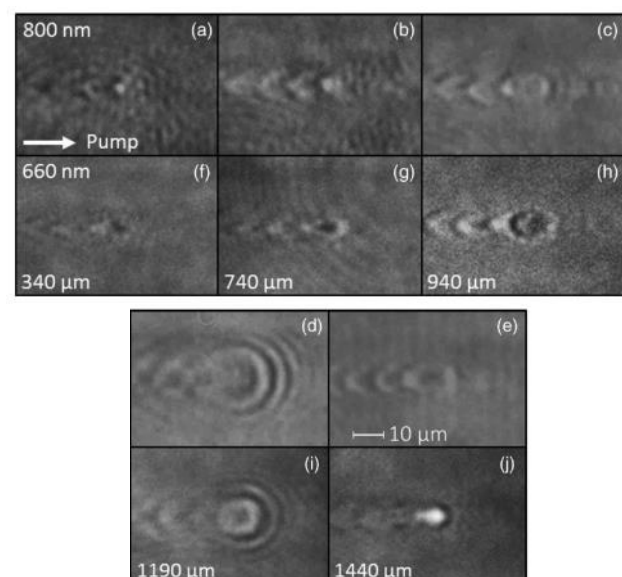


Abb. 3. Entwicklung einer Laser-erzeugten Plasmawelle während ihrer Propagation durch das Plasma. Durch Unterschiede zwischen zwei direkt übereinander liegenden Bildern (z.B. (e) und (j)) kann auf die Entwicklung der Intensität des Laserpulses geschlossen werden, der sonst nicht direkt beobachtet werden kann. (Abb. aus [7])

## Lehrstuhl für Quantenelektronik Prof. Dr. Christian Spielmann

### Forschungsschwerpunkte

- XUV Mikroskopie mit Laborquellen: Mikroskopie mit einer Auflösung im Bereich von wenigen 10nm durch Verwendung von kurzwelligem Lichtquellen, Entwicklung der Quellen und deren Charakterisierung, Implementierung neuer Methoden für linsenlose Mikroskopie
- Nichtperturbative nichtlineare Optik in nanostrukturierten Proben: Multiphoton und Tunnelanregung von Nanolasern: Erzeugung von dichten und heißen Plasmen durch Wechselwirkung von nanostrukturierten Proben mit intensiven Laserpulsen in einem weiten Spektralbereich, Röntgenspektroskopie an Plasmen
- Zeitaufgelöste XUV Absorptionsspektroskopie zur Untersuchung elementspezifischer Ladungsträgerdynamik in neuen 2D Materialien; Erzeugung von breitbandigen XUV Spektren mit wenigen Zyklenpulsen
- Spektroskopie von Plasmen bei FAIR: Entwicklung und Aufbau von Röntgenspektrometern zur Untersuchung von Plasmen geheizt mit Schwerionenstrahlen an der GSI und später bei FAIR

### Forschungsprojekt 1: XUV Mikroskopie

Optische Mikroskopie ist eine unverzichtbare Technologie für die Erforschung von mikroskopischen Strukturen. Allerdings können Nanoobjekte nicht untersucht werden, da die Auflösung durch die Wellenlänge der beleuchtenden Lichtquelle begrenzt ist. Mit der Verfügbarkeit von Synchrotronen und in letzter Zeit Röntgen-Freie-Elektronen-Lasern ist nun eine Bildgebung mit Nanometerauflösung möglich. Daneben gibt es den Wunsch nach XUV Laborquellen für die Mikroskopie. Diese reichen von laserbasierten Hohen Harmonischen, über lasergepumpte Röntgenlaser bis zu lasergepumpten Plasmaquellen. Hier haben wir besonders intensiv die Eignung unterschiedlicher Quellen für die Erzeugung räumlich und zeitlich kohä-

renter XUV Strahlung untersucht, die eine Voraussetzung für den Einsatz von linsenlosen Abbildungsverfahren ist. Denn in diesem Spektralbereich gibt es nahezu keine abbildenden Optiken mit hoher numerischer Apertur und geringen Verlusten. Daher wurden unterschiedliche Verfahren für linsenlose mikroskopische Bildgebung untersucht, die in der Literatur unter coherent diffraction imaging (CDI) bzw. ihrer Erweiterung der Ptychographie bekannt sind. Dabei werden Proben mit kohärenten XUV Lichtquellen beleuchtet. Aus den Beugungsbildern direkt hinter dem Objekt kann mit einem geeigneten Algorithmus sowohl das Objekt als auch die Probenbeleuchtung rekonstruiert werden. Dieser Ansatz wurde in den folgenden Experimenten erfolgreich eingesetzt:

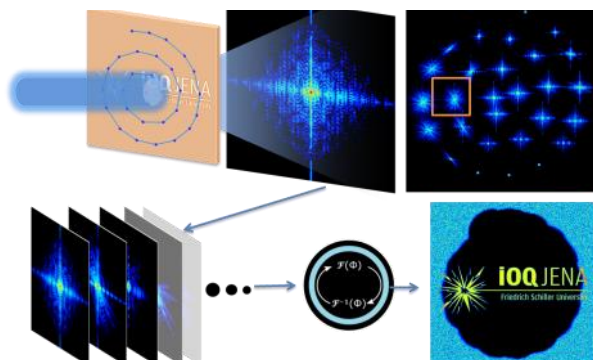


Abb. 1. Linsenlose Bildgebung mit Ptychographie: Die kohärente XUV Strahlung erzeugt an unterschiedlichen Positionen Beugungsbilder, aus denen das ausgedehnte Objekt und die Beleuchtungsfunktion rekonstruiert werden können

- In Kooperation mit dem IAP/FSU Jena wurde höchstauflösende Ptychographie im XUV demonstriert sowie Grenzen der erzielbaren Auflösung für reale Proben aufgezeigt.
- In Kooperationen mit MBI Berlin, UC Berkeley und LOA Paris wurde der Einsatz von Röntgenlasern für CDI und Ptychographie realisiert, um die Plasmadynamik zu untersuchen
- In Rahmen des Exzellenzclusters „Balance of the Microverse“ untersuchen wir neue Methoden für XUV Mikroskopie mit geringer Dosis zur Vermeidung von Strahlenschäden.

G. K. Tadesse, et al., Scientific Reports 9, 1 (2019).

F. Tuitje, et al., Light: Science & Applications 9, 187 (2020)

Z. Sun, et al., Optics Express 27, 33652 (2019)



## Forschungsprojekt 2: Wechselwirkung intensiver Laserpulse mit Nanostrukturen

Zusammenarbeit mit dem Institut für Festkörperphysik (FSU Jena), GSI (Darmstadt), HH Universität Düsseldorf und TU Wien haben wir die experimentelle Wechselwirkung von subrelativistischen und relativistischen Femtosekundenlaserpulsen mit nanostrukturierten Halbleitern untersucht. Dies ist ein hochaktuelles Thema in der modernen Starkfeldphysik, da neue Möglichkeiten eröffnet werden, die von nichtlinear gepumpten Nanolasern, über die Erzeugung hoher Harmonischer in Festkörpern, bis hin zur Erzeugung von ultraheißen und ultradichten Plasmen reichen. Pulse im mittleren Infrarot bei subrelativistischen Intensitäten ( $<10^{17} \text{ W/cm}^2$ ) bewirken in ZnO durch das extrem hohe elektrische Feld ein Verbiegen der Energiebänder und damit Tunneln von Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband. In diesem Regime kann Populationsinversion und damit Lasing im nahen UV von ZnO Nanodrähten demonstriert werden. Dabei hängt die Anregung nur mehr von der Intensität des Lichts und nicht mehr dessen Frequenz ab. Das relativistische Wechselwirkungsregime mit den nano-

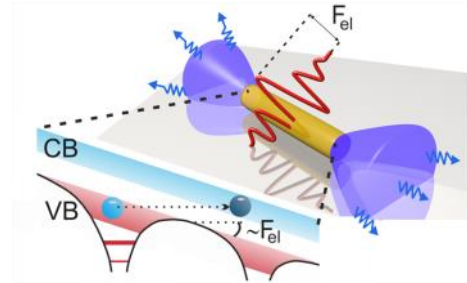


Abb. 2. Ein ZnO Nanodraht bestrahlt mit intensiven IR Pulsen wird zu einem tunnelgepumpten UV Nanolaser

strukturierten Targets wurde am JETi-40-Multi-TW-Lasersystem der FSU Jena untersucht. Die gemessene charakteristische Röntgenstrahlung von Übergängen in Ionen mit hohem Ladungszustand war ein klares Indiz für das Vorliegen von sehr heißen und dichten Plasmen, wie es sonst nicht möglich ist. Weitere Messungen in Verbindungen mit Simulationen erlaubten die relevanten Prozesse zu verstehen.

R. Hollinger, et al., Nano Letters 19, 3563 (2019)  
Z. Samsonva, et al., Physical Review X 9, 021029 (2019)

## Forschungsprojekt 3: Zeitaufgelöste XUV Spektroskopie an neuen Materialien

Im Rahmen des vom DAAD geförderten Projektes „QUESTforENERGY“ untersuchen wir gemeinsam mit Michael Zürc von der University of California in Berkeley, neue Nanomaterialien z.B. für die Verwendung in Solarzellen. Dazu gehören neue verschiedene zweidimensionale Materialien die, wenn sie kombiniert werden, aufgrund der unterschiedlichen Absorptionsspektren einen größeren spektralen Anteil des Sonnenlichts in elektrische Energie umwandeln könnten.

Um herauszufinden, welche Materialien sich dafür eignen, wird die Dynamik der optoelektronischen Eigenschaften untersucht, um zu verstehen wie Ladungsträger im Material bzw. über die Grenzflächen transportiert werden. Um diese Prozesse auf der Femtosekundenskala beobachten zu können, wird ein Experiment aufgebaut, das optische Anregung und Abfrage mit XUV Pulsen ermöglicht. XUV Strahlung hat den Vorteil, dass sie eine elementspezifische Absorption hat und daher der Transport über atomar dünne Schichten aus unterschiedlichen Materialien sehr gut durch spektrale Änderungen verfolgt werden kann. Um das erforderliche breite Spektrum zu erzeugen, wird die

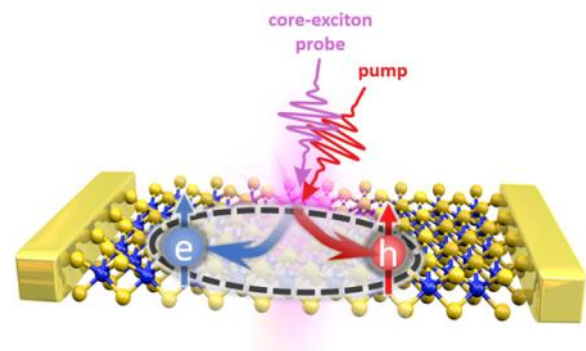


Abb. 3. Untersuchung des Ladungsträgertransports in 2D Materialien mittels zeitaufgelöster XUV Absorptionsspektroskopie nach optischer Anregung.

XUV Strahlung durch hohe Harmonische von wenigen Zyklen kurzen Laserpulsen erzeugt.

Aktuell können Pulse mit einer Dauer von bis zu 3fs erzeugt werden, die ein intensives kontinuierliches XUV Spektrum im Spektralbereich bis ca. 200eV ermöglichen. Damit können eine Reihe von wichtigen TMDC 2D Materialien untersucht werden.

## Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen Prof. Dr. Thomas Stöhlker

### Forschungsschwerpunkte

- Schwerpunkt 1: Untersuchung des Polarisationstransfers in Röntgen-Streuprozessen.
- Schwerpunkt 2: EBIT-basierte Röntgen- und UV-Astrophysik im Labor.
- Schwerpunkt 3: Laserexperimente an hochgeladenen Ionen: Konstruktion und Inbetriebnahme der HILITE-Ionenfalle.
- Schwerpunkt 4: Entwicklung und Inbetriebnahme kryogener Mikrokalorimeter-Detektoren für Hochpräzisions-Röntgenspektroskopie-Experimente.

### Polarisationstransfer in elastischen Röntgen-Streuprozessen

Durch die Beobachtung des Polarisationsgrads und -winkels von gestreuter Röntgenstrahlung kann die diesen Prozessen zugrundeliegende Quantenelektrodynamik hochpräzise überprüft werden. In einem Experiment am Synchrotron PETRA III wurde deshalb das Streuverhalten von linear polarisierten 175-keV-Photonen an einem Goldtarget untersucht. Zum Einsatz kam ein 2D-ortsauflösender Si(Li)-Streifendetektor, wobei die Comptonstreuung im Detektorkristall die Bestimmung der Polarisationsparameter erlaubt.

Erstmals wurde dabei die aus der Polarisations-ebene herausgestreute Strahlung beobachtet und damit eine erheblich tiefergehende Untersuchung des Streuprozesses ermöglicht.

Volotka A. et al. (2020): Rayleigh scattering of linearly polarized light: Scenario of the complete experiment. *Phys. Rev. A* 102, S. 042814, DOI: 10.1103/PhysRevA.102.042814

Vockert M. et al. (2017): Commissioning of a Si(Li) Compton polarimeter with improved energy resolution. *Nucl. Instrum. Meth. B* 408, S. 313, DOI: 10.1016/j.nimb.2017.05.035

Blumenhagen K.-H. et al. (2016): Polarization transfer in Rayleigh scattering of hard x-rays. *New J. Phys.* 18, S. 103034, DOI: 10.1088/1367-2630/18/10/103034

### Röntgen- und UV-Astrophysik im Labor

Die Spektren astrophysikalischer Objekte im UV- und Röntgen-Bereich weisen häufig eine Vielzahl an Emissions- und Absorptions-Linien auf, die von hochgeladenen Ionen stammen. Die beobachteten Wellenlängen und Stärken dieser Linien können dazu dienen, wertvolle Informationen über die Zusammensetzung, Temperatur, Dichte und Dynamik der Objekte zu erhalten. Eine notwendige Voraussetzung dafür ist ein tiefreichendes Verständnis der zugrundeliegenden atomphysikalischen Prozesse. Die kompakte Elektronenstrahlionenfalle PolarX-EBIT wurde dazu entwickelt, an Strahlungsquellen wie dem Synchrotron PETRA III in Hamburg die Wechselwirkung von hochgeladenen Ionen und Photonen zu untersuchen. Diese Experimente, sowie geplante komplementierende Messungen am Speicherring CRYRING in Darmstadt, helfen dabei, existierende Modelle astrophysikalischer Plasmen zu verfeinern.

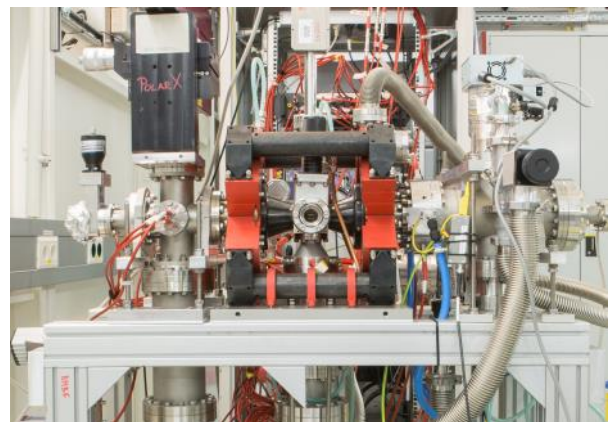


Abb. 2. Fallenzentrum der PolarX-EBIT bei PETRA III  
Foto: Marta Mayer, DESY.

Kühn S. et al. (2020): High Resolution Photoexcitation Measurements Exacerbate the Long-Standing Fe XVII Oscillator Strength Problem. *Phys. Rev. Lett.* 124, S. 225001, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.225001

Micke P. et al. (2018): The Heidelberg compact electron beam ion traps. *Rev. Sci. Instrum.* 89, S. 063109, DOI: 10.1063/1.5026961

## Hochintensitäts-Laser-Experimente an gespeicherten Ionen

Zur detaillierten Untersuchung der Ionisationsprozesse im Mehrphotonenregime ist es von Vorteil, einfache Systeme mit einem aktiven Elektron zu untersuchen. In Kollaboration mit dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt wurde deshalb eine Penningfalle entwickelt, die hochgeladene Ionen optimal speichern, komprimieren und zerstörungsfrei nachweisen kann. Innerhalb der Falle können die Eigenschaften einer Teilchenwolke bezüglich Ladungszustand, Ionendichte, Form und Art der Teilchen zuverlässig kontrolliert werden. Dieses wohldefinierte Ionentarget wird mit hochintensiver Laserstrahlung weiter ionisiert, dabei ist die Detektion sämtlicher Ladungszustände aller Nuklide bis Xenon zerstörungsfrei möglich. Der Aufbau wurde transportabel konstruiert und lässt sich in mehrere kleine Module zerlegen. Mit ihm wurden bereits erste Messungen am Freie-Elektronen-Laser FLASH in Hamburg durchgeführt. Die Falle soll nun auch mit anderen Großlasern



Abb. 1. Fotografie der HILITE-Penningfalle.  
Foto: Manuel Vogel, GSI und HI Jena.

vereinigt werden, wie z. B. POLARIS und JETi in Jena. Dadurch kann ein breites Spektrum an Ionisationsparametern abgedeckt werden.

Stallkamp N. et al. (2020): HILITE—A tool to investigate interactions of matter and light. X-Ray Spec. 49, S. 188, DOI: 10.1002/xrs.3087

Ringleb S. et al. (2015): HILITE—ions in intense photon fields. Phys. Scr. 2015, S. 014067, DOI: 10.1088/0031-8949/2015/T166/014067

## Entwicklung kryogener Mikrokalorimeter-Detektoren für Hochpräzisions-Röntgenspektroskopie

In Kollaboration mit dem Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg wurden in den vergangenen Jahren mehrere Röntgendetektor-Arrays basierend auf der metallisch-magnetischen Mikrokalorimeter-Technologie (maXs) entwickelt. Durch das Funktionsprinzip der Detektoren, Röntgenphotonen zu absorbieren und in Form einer Temperaturänderung mit Hilfe eines paramagnetischen Sensors zu messen, und dem Betrieb bei Temperaturen  $<50$  mK erreichen sie eine hohe Energieauflösung ( $E/\Delta E > 3500$ ). Gleichzeitig decken sie einen breiten spektralen Energiebereich von typischerweise 100 eV bis zu 100 keV ab. Diese Eigenschaften machen sie zu idealen Messinstrumenten für atomphysikalische Experimente, da diese häufig aufgrund der Dynamik der Prozesse Röntgenphotonen über ein breites Energiespektrum emittieren. In der Vergangenheit wurden die Detektoren unter anderem bereits erfolgreich in zwei Experimenten am ESR des Helmholtzzentrums GSI in Darmstadt eingesetzt. Zukünftig ist die Verwendung der Mikrokalorimeter am Niedrigenergie-Spei-

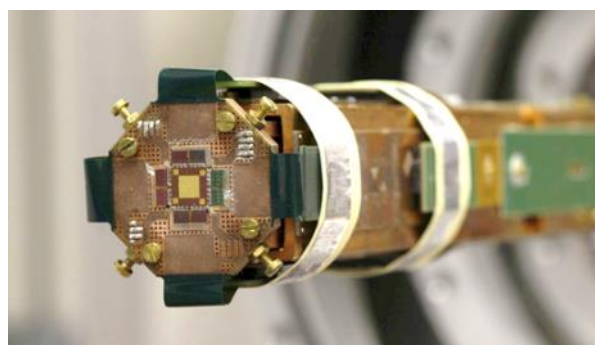


Abb. 3. Ansicht eines maXs-30-Mikrokalorimeters, montiert am Kühlfinger des Verdünnungskryostaten.  
Foto: Marc Oliver Herdrich.

cherring CRYRING@ESR der neuen FAIR-Anlage zur hochpräzisen Vermessung der  $1s$ -Lambverschiebung an Uran-Ionen geplant.

Herdrich M. O. et al. (2020): High-precision X-ray spectroscopy of Fe ions in an EBIT using a micro-calorimeter detector: First results. X-Ray Spec. 49, S. 184, DOI: 10.1002/xrs.3086

Kraft-Bertmuth S. et al. (2018): Microcalorimeters for X-Ray Spectroscopy of Highly Charged Ions at Storage Rings. Atoms 6, S. 59, DOI: 10.3390/atoms6040059

## Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung

### Prof. Dr. Matt Zepf

#### Forschungsschwerpunkte

- **Schwerpunkt 1: Laser-Teilchenbeschleunigung**  
Entwicklung und Anwendung von neuartigen, lasergetriebenen Beschleunigern.
- **Schwerpunkt 2: Intensive Attosekunden-Pulse und Röntgenquellen**  
Relativistisch oszillierende Plasmaspiegel und relativistische Teilchen konvertieren intensives optisches Laserlicht in Attosekunden Lichtblitze zur Erforschung der Natur auf den kürzesten Zeitskalen.
- **Schwerpunkt 3: Nichtlineare Quantenelektronendynamik**  
Erforschung des Quantenvakuums und der Dynamik geladener Elementarteilchen in extremen Laserfeldern.
- **Schwerpunkt 4: Entwicklung Ultraintensiver Laserquelle**  
Mit einer Spitzenleistung von bis zu einem Petawatt ( $10^{15}\text{W}$ ) gehören unsere Hochleistungslaser zu den leistungsstärksten Lasern überhaupt. Ihre fortwährende Entwicklung für Experimente bildet die Grundlage für Experimente von mehreren Arbeitsgruppen.

#### An die Grenzen des Machbaren

Die Erforschung der Natur unter extremen Bedingungen ist seit jeher ein Treiber der wissenschaftlichen Entwicklung. Ob extreme Temperaturen, Drücke oder Felder, oft haben solche Bedingungen zur Entwicklung bestehender Theorien beigetragen und zur Entdeckung neuer Phänomene geführt. Der gemeinsame Nenner unserer Forschung sind die extremen Lichtintensitäten, die durch Ultrakurzpuls laser möglich werden. Sie erlauben die Entwicklung von Röntgenblitzen zur Erforschung der schnellsten physikalischen Phänomene, neuartige Teilchenbeschleuniger mit weitreichenden Anwendungen sowie die Erforschung von fundamentalen Prozessen in der Quantenelektrodynamik.

#### Forschungsprojekt 1: Laser-Teilchenbeschleunigung – Entwicklung und Anwendung

Intensive Laser erzeugen extreme Feldstärken in ionisierten Gasen (Plasmen) und beschleunigen somit geladene Elementarteilchen auf extrem kurzen Strecken auf hohe Energien. Diese neue Generation von Teilchenbeschleunigern ermöglicht es z.B. Elektronen auf Wegstrecken von Zentimetern (anstatt der üblichen Kilometer!) auf Energien  $>1\text{ GeV}$  zu bringen.

Diese Teilchenstrahlen zeichnen sich zudem durch hohe Strahlqualität und besonders kurze Pulse aus – die insbesondere für Protonen und schwerere Kerne einzigartig sind.

Solch kompakte Beschleuniger ermöglichen es neuartige Röntgen- und Gammastrahlungsquellen mit extrem kurzen Pulsen zu erzeugen.

Protonenpulse mit wenigen Picosekunden Dauer erlauben zum ersten Mal direkte Einblicke in die Wechselwirkung von Ionen mit Materie auf der natürlichen Zeitskala dieser Prozesse. Das tiefere Verständnis von solchen Prozessen ist nicht zuletzt auch für die Krebstherapie von Bedeutung, wo Ionenstrahlen in vielen Fällen zu den schonendsten Behandlungsmodalitäten zählen.

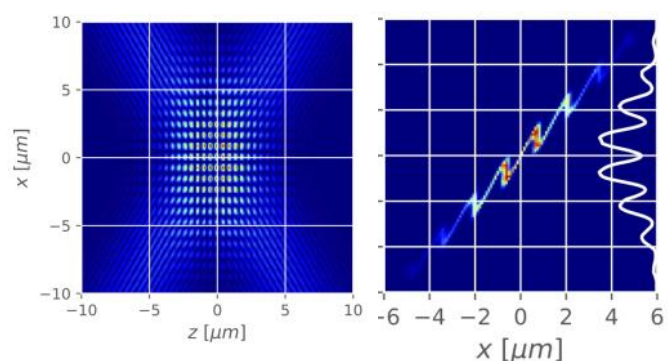


Abb. 1: Ultrapräzise Messmethode zur Bestimmung der Emittanz (Qualität) von Elektronenstrahlen. Die neue Generation von Elektronenstrahlen erfordert neue Messmethoden. Links: Laserinterferenzmuster und rechts damit erzeugte Phasenraummodulation [Seidel 2021]

Seidel et al., Characterising Ultralow Emittance Electron Beams Using Structured Light Fields, Phys.Rev. Accelerators & Beams, 24, 012703 (2021)

Dromey, B.; Coughlan, M.; Senje, L.; et al. (2016) Picosecond metrology of laser-driven proton bursts, NATURE COMMUNICATIONS DOI: 10.1038/ncomms10642

S. Kuschel et al., Controlling the Self-injection Threshold in Laser wakefield Accelerators. Physical Review Letters, 121, 154801 (2019)



## Forschungsprojekt 2: Intensive Attosekunden-Pulse

Lichtblitze mit extrem kurzen Pulsen ermöglichen es natürliche Prozesse mit nie dagewesener Auflösung zu erforschen. Die kürzesten Pulse sind derzeit mit Lichtblitzen im extremen UV möglich und werden in Attosekunden gemessen. Vorstellen lässt sich so eine kurze Zeitdauer durch die Wegstrecke, die Licht in dieser Zeit zurücklegt. Während Licht in einer Sekunde 300.000 km zurücklegt, so ist es in einer Attosekunde ( $10^{-18}$ s) nur die Breite eines Atoms. Ziel der Forschung ist die Erzeugung intensiver Attosekundenpulse mithilfe

von relativistischen Plasmen und deren Charakterisierung.

YX Zhang et al., Giant Attosecond Pulses from Two-Colour Laser-Plasma Interactions, *Physical Review Letters* 124, 114802 (2020)

Yeung, M.; Rykovanov, S.; Bierbach, J.; et al. (2017) Experimental observation of attosecond control over relativistic electron bunches with two-colour fields *NATURE PHOTONICS* DOI: 10.1038/NPHOTON.2016.239

Yeung, M.; Bierbach, J.; Eckner, E.; et al. (2016) Noncollinear Polarization Gating of Attosecond Pulse Trains in the Relativistic Regime *PHYSICAL REVIEW LETTERS* DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.193903

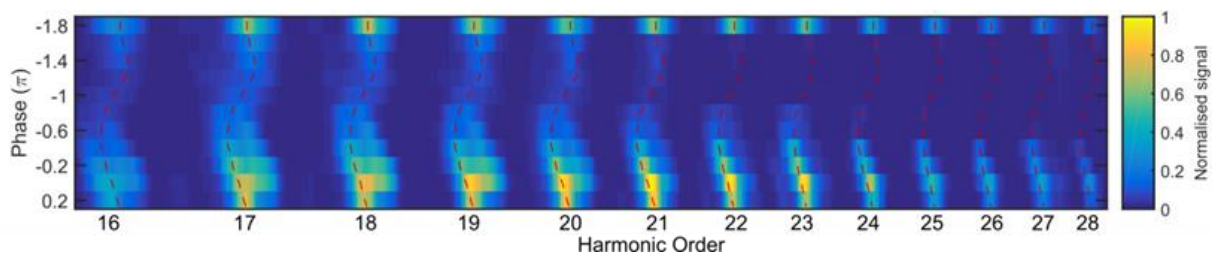


Abb. 2: Intensität der Strahlung im extremen UV als Funktion der relativen Phase zwischen einem infraroten und blauen Laserstrahl. Die phasenabhängige Modulation der Harmonischen (Vielfachen der infraroten Laserfrequenz) ist auf die Manipulation der Plasmaelektronen mit Attosekundengenauigkeit zurückzuführen. [Yeung, *Nature Photonics* (2017)]

## Forschungsprojekt 3: Nichtlineare Quantenelektrodynamik

Die extremen Felder im Brennpunkt von Hochleistungs-KurzpulsLasern ermöglichen es, fundamentale Vorhersagen der Quantenelektrodynamik zu prüfen. Im Blickpunkt stehen die Paarerzeugung im Vakuum, Vakuumdoppelbrechung und die vollständige Beschreibung der Bewegungsgleichung geladener Teilchen im Laserfeld. Derzeit werden die experimentellen und konzeptionellen Grundlagen für diese Projekte geschaffen, die im Zuge der Forschergruppe 2783 der DFG ([www.quantumvacuum.org](http://www.quantumvacuum.org)) erforscht werden. Unsere Arbeit ist zentral an dem Experimentdesign und der Durchführung beteiligt.

So ist die Erzeugung von Materie durch zwei Lichtquanten im Vakuum (z.B. ein Elektron/Positron-Paar) bis heute nicht experimentell gelungen. Die Verfügbarkeit von extremen Lichtblitzen ermöglicht dies direkt und wurde im Jahr 2018 zum ersten Mal in Angriff genommen. Ein weiteres fundamentales Feld ist das der Licht/Licht-Streuung und der Vakuum-Doppelbrechung.

In der klassischen Physik erfolgt durch das Vakuum keine Kopplung zweier Lichtstrahlen und auch keine Modifikation eines einzelnen Starken Lichtstrahls – im Gegensatz zur Quantenelektrodynamik die z.B. messbare Licht-an-Licht Streuung und Doppelbrechung im Vakuum vorhersagt.

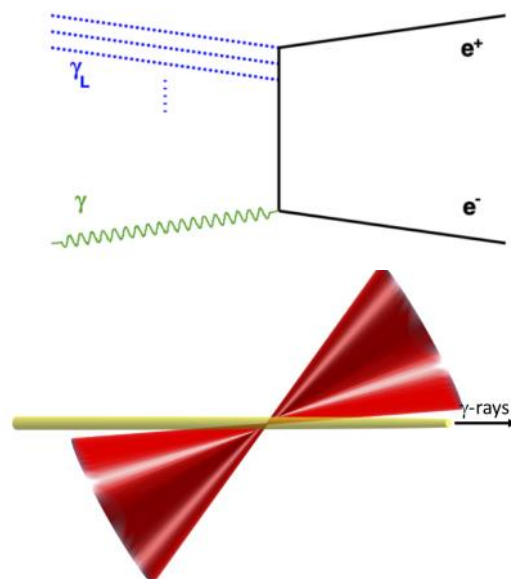


Abb. 3: Experimentelle Anordnung einer Photon/Photon Kollision und Reaktionsdiagramm des Breit-Wheeler Effekts

Ziel ist es diese Effekte experimentell zugänglich zu machen.

H. Abramowicz et al. Conceptual Design Report for the LUXE Experiment; arXiv:2102.02032 (2021)

K. Poder et al, Experimental Signatures of the Quantum Nature of Radiation Reaction in the Field of an Ultraintense Laser, *Phys.Rev.X*, 8, 021004 (2018)

F. Karbstein et al, *Phys.Rev.Lett.* 123 091802 (2019)

## Lehrstuhl für Röntgenphysik Prof. Dr. Ralf Röhlsberger

### Forschungsschwerpunkte

- Quantenoptik mit Röntgenstrahlung: Mit den ultrascharfen Resonanzen von Mössbauer-Isotopen als nahezu ideale Zwei-Niveau-Systeme untersuchen wir quantenoptische Phänomene im Röntgenbereich. Die optische Kohärenz höherer Ordnung wollen wir anwenden, um Intensitätskorrelationen von inkohärent gestreutem Röntgenlicht für bildgebende Verfahren mit atomarer Auflösung einzusetzen.
- Festkörperphysik mit hochreiner Röntgenpolarimetrie: Unter Verwendung gekreuzter linearer Bragg-Polarisatoren können winzige optische Rotationen bei der Streuung von Röntgenlicht an Festkörpern nachgewiesen werden. Dies ermöglicht eine neue Art der Spektroskopie zur Untersuchung elektronischer und magnetischer Ordnung in kondensierter Materie mit bisher unerreichter Empfindlichkeit.
- Entwicklung neuer Materialsysteme mittels innovativer Dünnschichttechnologie: Neu entwickelte Beschichtungsverfahren basierend auf dem Verfahren der Kathodenerstäubung ermöglichen uns die Präparation von Vielfach-Schichtmaterialien mit einzigartigen magnetischen, elektronischen und photonischen Eigenschaften.

### Kollektive Effekte in Röntgenstrahlungsfeldern

Albert Einstein, Willis Lamb und Roy Glauber haben mit ihren bahnbrechenden Arbeiten im 20. Jahrhundert den Weg für die Entwicklung der Quantenphotonik geebnet. So revolutionierte der Laser bei optischen Wellenlängen dieses Gebiet und brachte unter anderem das Gebiet der Quantenoptik hervor. Dieser Trend setzt sich heute mit dem Aufkommen von beschleunigerbasierten Lichtquellen wie Synchrotronstrahlungsquellen

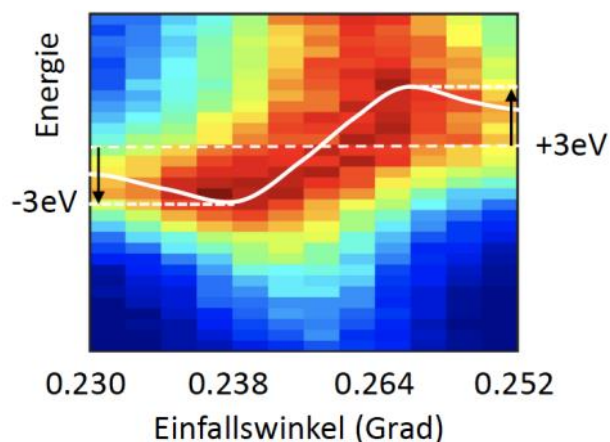


Abb. 1. Nachweis der kollektiven Lamb-Verschiebung von  $\pm 3$  eV im Bereich der ‚white-line‘-Resonanz an der  $L_3$ -Absorptionskante des Tantal.

Grafik: Ralf Röhlsberger.

und Röntgenlasern fort, die quantenoptische Phänomene bei Röntgenenergien in Reichweite bringen.

Eine Schlüsselrolle in der Röntgenquantenoptik spielen die Kernresonanzen der Mössbauer-Isotope. Ihre ultraschmale Resonanzbandbreite ermöglicht es, fundamentale Phänomene der Licht-Materie-Wechselwirkung wie z. B. die Beobachtung der kollektiven Lamb-Verschiebung, und die elektromagnetisch induzierte Transparenz von Atomkernen mit höchster spektraler Auflösung zu untersuchen. Heutzutage können röntgenphotonische Strukturen wie beispielsweise Wellenleiter, gekoppelte Dünnschicht-Kavitäten sowie resonante Vielfachschichten als neue Technik zur Realisierung quantenoptischer Konzepte bei Röntgenenergien betrachtet werden, die auch neue Wege zu nicht-linearen Wechselwirkungen zwischen Röntgenstrahlung und Materie eröffnen könnten. Einen ersten Schritt in diese Richtung stellt ein Experiment dar, in dem wir die kollektive Lamb-Verschiebung zum ersten Mal an einer elektronischen Hüllenresonanz des Tantal nachweisen konnten, s. Abb. 1.

Haber J. et al. (2019): Spectral Control of an X-ray L-Edge Transition via a Thin-Film Cavity. Phys. Rev. Lett. 122, S. 123608, DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.123608.

## Spektropolarimetrie an Übergangsmetalloxiden

Die Drehung der Polarisations Ebene des Lichts bei der Streuung an Materie enthält wertvolle Information über elektronische Anisotropien, die vielfach die Grundlage bilden für spezifische Eigenschaften von modernen Funktionsmaterialien, z. B. gerichteter Stromtransport, magnetische Ausrichtung von Nanostrukturen, optische Doppelbrechung u. v. m. In Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen am DESY in Hamburg sowie Forschungsinstituten in Grenoble und Paris haben wir einen neuen Weg entwickelt, wie Polarisationsänderungen von Röntgenstrahlung mit besonders großer Empfindlichkeit detektiert werden können und sich damit solche Anisotropien mit hoher Genauigkeit nachweisen lassen. Die untersuchten Proben waren die Metalloxide CuO sowie  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ . Diese sind Ausgangsmaterialien für Hochtemperatursupraleiter, in denen die Elektronen in den Orbitalen des Kupfer-Atoms eine große Rolle bei der Supraleitung spielen.

Der Schlüssel zu der neuen Messmethode ist eine Technik, die am IOQ schon seit vielen Jahren entwickelt wird, die Präzisionspolarimetrie mit Röntgenstrahlung. Dabei wird hochbrillante Synchrotronstrahlung durch eine Probe transmittiert,

die sich zwischen zwei gekreuzten Bragg-Polarisatoren befindet. Durch die hohe Polarisationsextinktion dieses Polarimeters lassen sich winzige Polarisationsdrehungen nachweisen, die nur ein Milliardstel der Primärintensität ausmachen. Zur Drehung der Polarisation tragen sowohl der optische Dichroismus als auch die Doppelbrechung in dem Material bei. In dem Experiment ist es uns gelungen, die Beiträge dieser beiden Effekte voneinander zu trennen und diese auf die Wechselwirkung des Röntgenlichts mit spezifischen Orbitalen des Kupfer-Atoms in den untersuchten Materialien zurückzuführen (siehe Abb. 2). Damit steht nun eine hochempfindliche Methode zur Verfügung, den elektronischen Anisotropien in komplexen Materialien auf die Spur zu kommen und zu untersuchen, welche Rolle diese z. B. für neuartige Formen von elektronischem Transport, Magnetismus und optische Eigenschaften spielen.

Schmitt A. T. et al. (2020): Disentangling x-ray dichroism and birefringence via high-purity polarimetry. Accepted for publication in Optica.

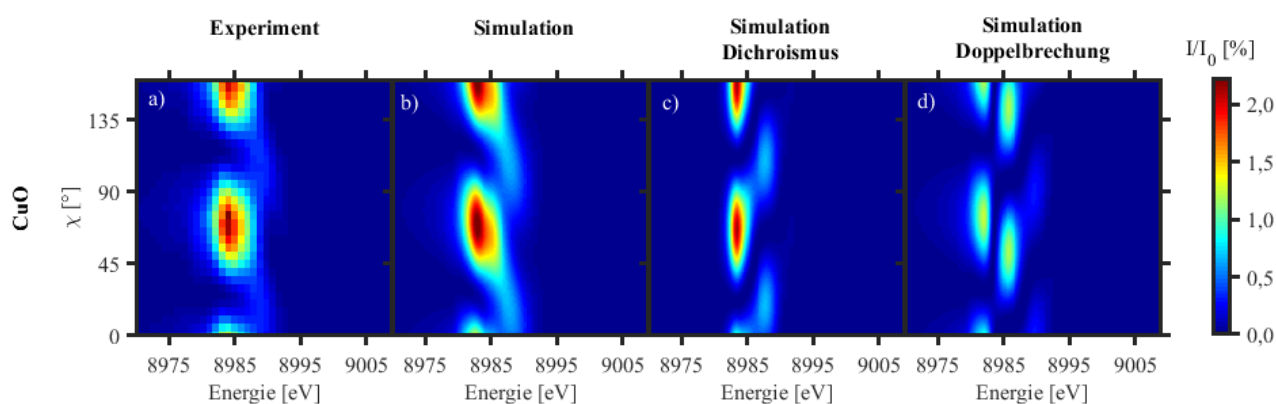


Abb. 2. Ergebnisse des Experiments für das untersuchte Material CuO. a) zeigt die Transmission des Polarimeters als Funktion der Energie im Bereich der K-Absorptionskante des Kupfers sowie des Drehwinkels  $\chi$  des CuO-Kristalls um die Richtung des einfallenden Röntgenstrahls. b) die theoretische Simulation gibt die gemessenen Daten sehr gut wieder. Unter Zuhilfenahme weiterer experimenteller Daten konnten daraus die Beiträge des Dichroismus und der Doppelbrechung getrennt bestimmt werden, dargestellt in c) und d). Die Unterschiede dieser Beiträge lassen sich auf Unterschiede in den Besetzungen der verschiedenen p-Orbitale des Kupfers in dem Material zurückführen. Grafik: Annika T. Schmitt

## AG für Attosekunden-Laserphysik

### Dr. Adrian Pfeiffer

#### Forschungsschwerpunkte

- Das Forschungsgebiet ist die Physik auf Zeitskalen im Bereich von Attosekunden ( $10^{-18}$  s). Beispiele wichtiger Prozesse, die innerhalb von Attosekunden ablaufen, sind kohärente Ladungsbewegungen in Atomen, Molekülen und Festkörpern, der Zerfall von Atomen mit Löchern in inneren Schalen, sowie Photoionisation.
- Das Interesse der Arbeitsgruppe liegt einerseits in fundamentalen Fragestellungen, wie der zeitaufgelösten Untersuchung von Elektronenbewegung, aber auch die Erzeugung von kurzen Pulsen im Ultraviolett (UV) und Vakuum-ultraviolett (VUV) sind wichtige Ziele.
- Die Grundlage sowohl für die Präparation dieser Prozesse als auch für deren Beobachtung liefern intensive Laserpulse, die aus nur wenigen optischen Zyklen bestehen.

#### Harmonische Konkatenation

Die harmonische Konkatenation ist unsere neue Methode zur Synthese von ultrakurzen Pulsen. Das Prinzip ist die Verkettung von räumlichen und zeitlichen Harmonischen, die durch zwei nichtkollineare Vis-IR-Pulse erzeugt werden. Kaskadierte Prozesse der Frequenzumwandlung und Selbstbeugung in einer dünnen dielektrischen Platte ergeben ein vielfältiges Emissionsmuster zeitlicher und räumlicher Harmonischer. Der Emissionswinkel der harmonischen Ordnungen ist abhängig von der Frequenz. Diese raumzeitliche Kopplung wird genutzt, um zwei benachbarte Raumharmonische zu verketteten, indem der Kreuzungswinkel der Grundimpulse angepasst wird. Es entstehen breitbandige Wellenformen, von denen die niederfrequenten Bänder zu einer

Raumharmonischen und die höherfrequenten Bänder zu der anderen Raumharmonischen gehören. Um ultrakurze Wellenformen aus diesen Frequenzbändern zu synthetisieren, müssen deren Phasen angepasst werden. Dies wird durch die Steuerung der Groove-Envelope-Phase (GEP) der fundamentalen Pulse erreicht, die durch ihre Verzögerung auf der Subzykluszeitskala bestimmt wird. Unter Verwendung von zeitlichen Harmonischen dritter Ordnung synthetisiert die Verkettung zweier räumlicher Oberwellen tiefe UV-Wellenformen von nur 1,5 fs.

J. Reislöhner, C. Leithold, A. N. Pfeiffer, "Harmonic concatenation of 1.5-femtosecond-pulses in the deep ultraviolet", ACS Photonics 6, 1351-1355 (2019)

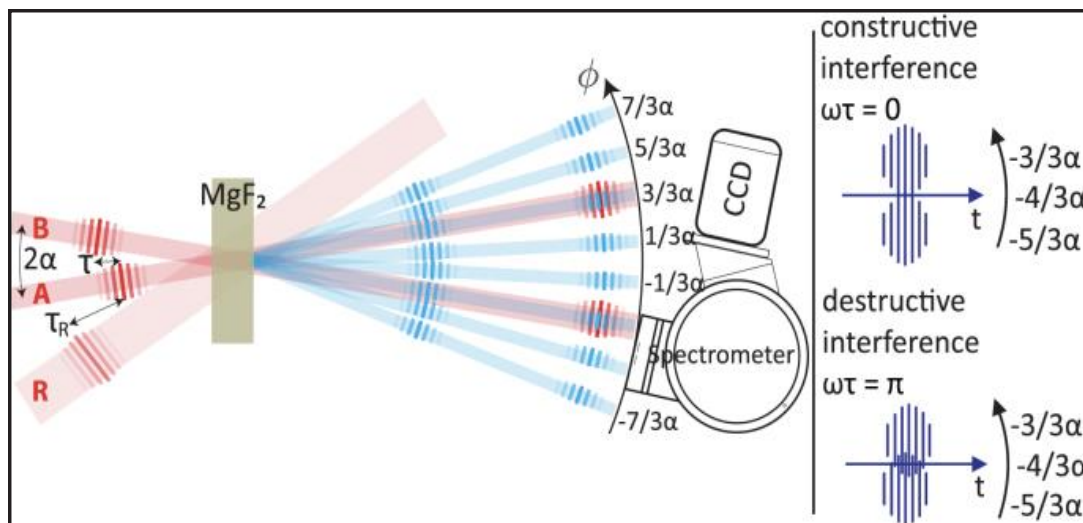


Abb. 1. Laserpulse ( $\sim 5$  fs) werden in eine Probe fokussiert und bilden ein Intensitätsgitter. Durch Nichtlinearität werden zusätzliche Pulse erzeugt und konkateniert.



### Transiente Absorption mit Miniatur-Beamlines

In den letzten Jahren wurden vielversprechende Fortschritte bei der Starkfeldwechselwirkung von Licht und Materie in festen Materialien erzielt. Aufgrund ihrer höheren Dichte könnte die Erzeugung von Harmonischen höherer Ordnung (HHG) aus Festkörpern Gasphasenquellen in Bezug auf die Umwandlungseffizienz übertreffen. Darüber hinaus ist die erforderliche Intensität für HHG aus Festkörpern im Vergleich zur Gasphase wesentlich geringer, was die Anforderungen an den Erzeugungslaser erleichtert. Zusammen mit dem Verzicht auf die für die Gasphasen-HHG erforderlichen Vakuum-Strahlführungen könnte die Attosekunden-Technologie in Festkörpern mit einfacheren und kompakteren Versuchsaufbauten breitere

Anwendung finden.

Ein Ziel ist es, die Physik auf der elektronischen Zeitskala durch Attosekunden-Spektroskopie zu verstehen. Für die Manipulation von Pump- und Probepulsen im Vis-IR und extremen UV sind normalerweise Strahlführungen von mehreren Metern Länge erforderlich. Wir haben Strahlführungen auf einer Zentimeterskala entwickelt, die eine transiente Absorption und Dispersion im tiefen UV-Bereich ermöglichen. Ziel dieses Projekts ist es, die nichtlineare Reaktionszeit von dünnen Gläsern, Kristallen und Flüssigkeitsfilmen zu messen, um die Grenzen der lichtinduzierten Signalverarbeitung auszuloten.

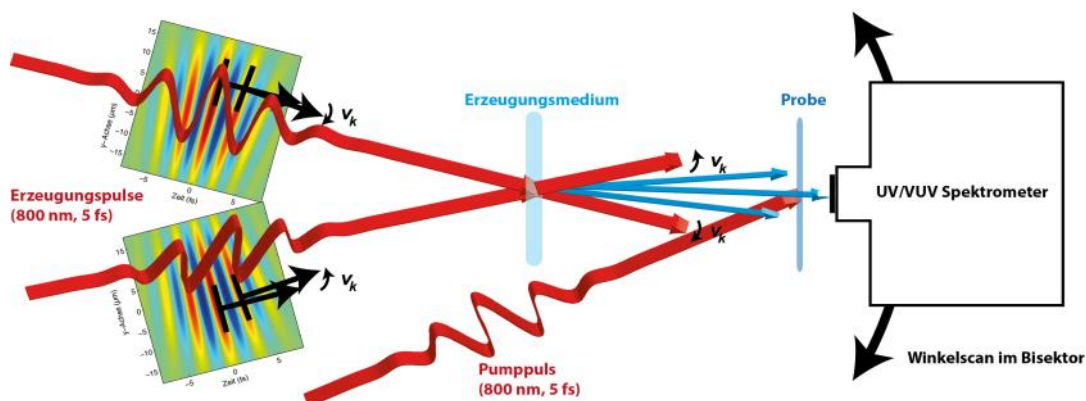


Abb. 2. Strahlengang zur Erzeugung von ultrakurzen Pulsen im Bereich 5 - 15 eV. Die fundamentalen Pulse (800 nm) werden nicht-kollinear in ein Erzeugungsmedium fokussiert.

Der Wellenlängenbereich mit Photonenenergien von 5-15 eV ist für spektroskopische Verfahren sehr wichtig, da sich Bindungsenergien von Valenzelektronen in der Regel innerhalb dieses Bereichs befinden. Um beispielsweise die transiente Änderung von Bandstrukturen in Dielektrika und die damit verbundenen Abschirmungen eines Starkfeldpulses zu beobachten, sind Abfragepulse erforderlich, die i) eine kürzere Dauer als die optische Periode des Starkfeldpulses aufweisen, ii) die Wellenlänge der dielektrischen Bandlücke umfassen und iii) an der Probenposition verfügbar sind.

Wir entwickeln Miniatur-Beamlines für die transiente Absorption, eine neuartige Methode in der Attosekunden-Spektroskopie. Die harmonische Konkatenation ist eine ideale Quelle, denn ein generisches Merkmal ist, dass diese Wellenformen räumlich von den Grundimpulsen getrennt sind und somit für den sofortigen spektroskopischen Einsatz ohne nachfolgende optische Elemente zur Verfügung stehen.

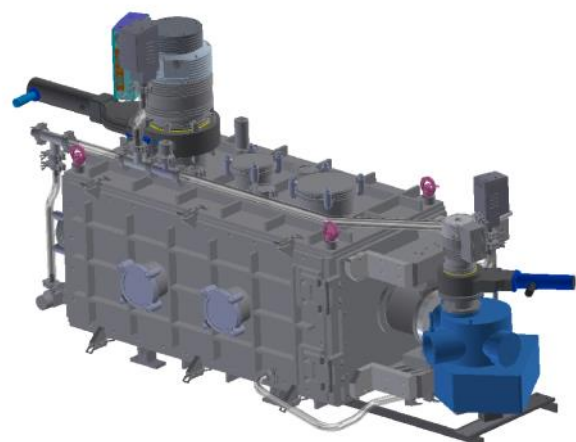


Abb. 3. Aufbau der Vakuumanlage. Das UV/VUV Spektrometer (blau) ist über einen Membranbalg mit der Hauptkammer verbunden und wird von einer motorisierten Verfahrereinheit geschwenkt.

## Lehrstuhl für Nichtlineare Optik Prof. Dr. Gerhard G. Paulus

### Forschungsschwerpunkte

Die Forschung des Lehrstuhls Nichtlineare Optik gliedert sich in drei Schwerpunkte: Die Starkfeld-Laserphysik, nanoskalige XUV-Bildgebung und Röntgen-Präzisionspolarimetrie. Der von uns in diesen drei Feldern jeweils gewählte Forschungsansatz ist weltweit einzigartig, wobei Röntgenpolarimetrie mit bei erreichten Präzision nirgend wo erreicht wird.

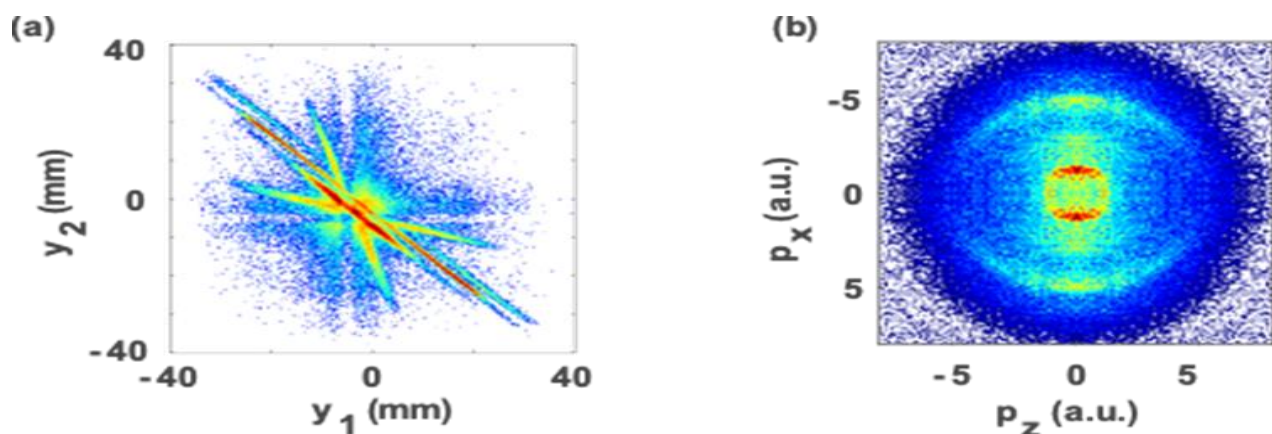
### Atome und Moleküle fundamentaler Bedeutung in starken Laserfeldern

In der Starkfeld-Laserphysik liegt unser Fokus auf der Erforschung elementarer Prozesse der Interaktion von Materie mit ultrakurzen Lichtpulsen. Unser besonderes Interesse gilt Systemen von fundamentaler Bedeutung in der Atom- und Molekülphysik, insbesondere solchen mit nur ein oder zwei Elektronen, da nur diese einer exakten theoretischen Beschreibung zugänglich sind. Beispiele sind  $\text{He}^+$ ,  $\text{H}_2^+$  und  $\text{HeH}^+$ , die wir erfolgreich mit unserer Ionenstrahlapparatur erzeugt und untersucht haben. Die Detektion aller nuklearen Fragmente der Reaktion in Koinzidenz ermöglicht die vollständige Rekonstruktion ihrer Impulse. Die Herausforderung dieser Experimente ist neben der Komplexität der Apparatur die äußerst geringe Dichte von Ionenstrahlen, typischerweise sechs Größenordnungen geringer ist als die Dichte von neutralen Atomen aus einer Gasdüse. Um gleichwohl handhabbare Messzeiten zu erreichen, führen wir die Experimente neuerdings mit einem Lasersystem sehr hoher Repetitionsrate (100 kHz) durch. Außerdem arbeiten wir an neuen Ionenquellen, die besonders dichte Ionenstrahlen erzeugt.

Dazu haben wir eine Flüssigmetallionenquelle in Betrieb genommen, mit der erstmals Ionen von

Metallen wie Silizium und Gold mit intensiven Laserpulsen untersucht werden können, wie z.B.  $\text{Si}^+$ ,  $\text{Au}^+$ ,  $\text{Au}_2^+$  (siehe Abbildung (a)).

Ein weiterer charakteristischer Aspekt unserer Forschung ist ein neuartiger Ansatz zur kohärenten Kontrolle photochemischer Reaktionen, also die Steuerung einer Reaktion hin auf vorgegebene Fragmente. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1840: Quantendynamik in maßgeschneiderten intensiven Strahlungsfeldern (QUTIF) untersuchen wir, wie die Asymmetrie einfacher Moleküle die Interaktion mit Laserpulsen asymmetrischen Feldverlaufs beeinflusst. Wir konzentrieren uns dabei auf das einfachste asymmetrische Molekül überhaupt, das Heliumhydridmolekülion  $\text{HeH}^+$ . Unsere Experimente zeigen, dass es in diesem Molekül möglich ist, mit einem Laserfeld direkt die Schwingungsfreiheitsgrade des Moleküls anzuregen. Dadurch gelingt es, den Molekülabstand, bei dem die Ionisation des Moleküls einsetzt, zu beeinflussen. Weiterhin können durch die Verwendung von Laserpulsen im mittleren Infrarot die Vibrationen so stark angeregt werden, dass es zum Aufbrechen der molekularen Bindung ohne Anregung der Elektronen kommt.



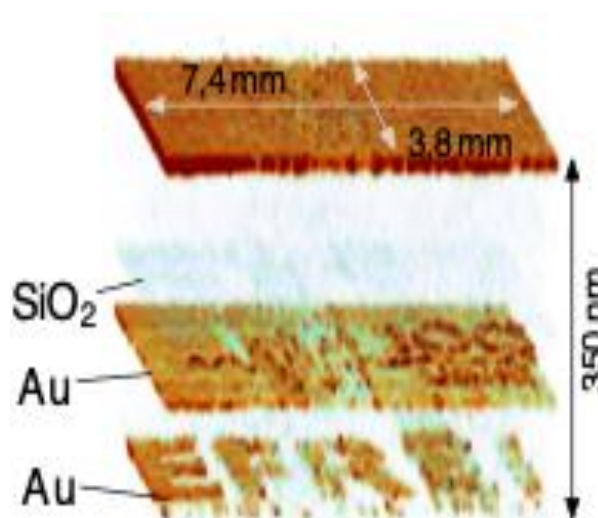
- (a) Koinzidenzdetektion der Fragmente eines Gold-Moleküls in intensiven Laserfeldern  
(b) Impulsverteilung der Fragmente bei dem laserinduzierten Aufbrechen der Bindung des  $\text{HeH}^+$ -Moleküls

## Nanoskalige Kohärenztomographie im XUV

Die Bildgebung auf kleinsten Skalen hat enorme Bedeutung für den wissenschaftlichen und technologischen Fortschritt. In unserer Arbeitsgruppe haben wir eine Technologie zur Untersuchung nanoskopischer Strukturen mit extrem ultravioletter (XUV-) Strahlung entwickelt – die sogenannte XUV-Kohärenztomographie (XCT). Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung der optischen Kohärenztomographie (OCT), welche im Infrarotbereich bspw. überaus erfolgreich in der Ophthalmologie eingesetzt wird. Mit Hilfe breitbandiger XUV-Strahlung können mit der XCT siliziumbasierte Proben zerstörungsfrei dreidimensional untersucht werden. Die axiale Auflösung, also die Tiefenauflösung, erreicht dabei wenige Nanometer. Bisher mussten Proben für eine exakte Messung der Tiefenstruktur aufgeschnitten und von der Seite inspiziert werden.

XCT ist eine ideale Anwendung für extrem breitbandige laserbasierte XUV-Quellen wie die am Standort Jena intensiv studierten Hohen Harmonischen (HH). Wir haben in den letzten Jahren eine entsprechende Quelle in unseren Laboren entwickelt und für die XCT eingesetzt. Die Messungen erreichen dabei Sensitivitäten, die uns selbst überrascht haben. Selbst dünnste Schichten wie native Oxide lassen sich problemlos detektieren (siehe Abbildung). Die XCT-Anlage wurde in den letzten Jahren weiterentwickelt und um mehrere neue Messmodalitäten erweitert. So wurden beispielsweise durch den Einsatz mehrerer XUV-Filter die nutzbare Bandbreite und damit die axiale Auflösung weiter gesteigert [1]. Ein neues hochauflösendes Spektrometer wurde eigens für XCT entwickelt. Durch die hohe spektrale Auflösung lassen sich sowohl höhere Eindringtiefen als auch bessere Rekonstruktionsergebnisse realisieren [2]. Des Weiteren wurde der Aufbau um einen Referenzstrahl ergänzt. Damit können zusätzlich zur herkömmlichen Spektroskopie auch interferometrische Methoden angewendet werden. Eine erste Anwendung des Systems war die exakte Vermessung der spektralen Auflösung des Instruments. Für die Zukunft erwarten wir, dass die Rekonstruktionsergebnisse ebenso verbessert werden wie die Unempfindlichkeit der Messungen gegenüber Leistungsschwankungen der Harmonischen-Quelle. Das XCT-Mikroskop wurde außerdem um die Möglichkeit eines infraroten Anregepulses erweitert.

Das ermöglicht zeitabhängige dreidimensionale Messungen im Femto- oder sogar Attosekundenbereich. Auch die Auswertalgorithmen wurden entscheidend weiterentwickelt. So sind wir nun in der Lage, neben den Strukturinformationen auch materialspezifische Daten aus den Messungen zu extrahieren.



[1] J. Nathanael, M. Wünsche, S. Fuchs, T. Weber, J. J. Abel, J. Reinhard, F. Wiesner, U. Hübner, S. J. Skruszewicz, G. G. Paulus, C. Rödel. *Laboratory setup for extreme ultraviolet coherence tomography driven by a high-harmonic source*. *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 113702 (2019).

[2] M. Wünsche, S. Fuchs, T. Weber, J. Nathanael, J. J. Abel, J. Reinhard, F. Wiesner, U. Hübner, S. J. Skruszewicz, G. G. Paulus, C. Rödel, *A high resolution extreme ultraviolet spectrometer system optimized for harmonic spectroscopy and XUV beam analysis*, *Review of Scientific Instruments* **90**, 023108 (2019).

## Hochpräzise Röntgenpolarimetrie auf dem Weg zum Nachweis der Vakuumdoppelbrechung

Seit gut einem Jahrzehnt erforschen, entwickeln und verwenden wir Polarimeter, die mit extrem hoher Empfindlichkeit Änderungen der Polarisation von Röntgenstrahlung nachweisen können. Bereits vor einigen Jahren konnten wir eine Polarisationsreinheit von rund 10 Größenordnungen demonstrieren. Dies führte zu zahlreichen Anwendungen in der Festkörperphysik bis hin zur Quantenoptik.

Als Benchmark für unser Streben nach der bestmöglichen Polarisationsreinheit dient allerdings nichts Geringeres als ein quantenelektrodynamischer Effekt, der bereits vor rund 70 Jahren vorhergesagt wurde: die Doppelbrechung des Vakuums in einem starken elektromagnetischen Feld.

In den letzten 3 Jahren konnten wir sowohl theoretisch als auch experimentell zeigen, dass die Reinheit unserer Polarimeter bisher durch die Divergenz der genutzten Synchrotronstrahlung begrenzt wird. Am Röntgenlaser erwartet man daher eine deutlich höhere Polarisationsreinheit. Dies konnten wir bei einer der ersten Strahlzeiten am HED Instrument des European XFELs im Jahr 2019 demonstrieren. Dort wurden im Rahmen der Messzeit tatsächlich *alle* Photonen dieser brillanten Strahlungsquelle durch gekreuzte Polarisatoren unterdrückt. Die Polarisationsreinheit und die Sensitivität unseres Polarimeters sind damit hoch genug geworden, um die winzige Signatur der Vakuumdoppelbrechung nachzuweisen.

Allerdings ist die Doppelbrechung des Vakuums nur im Fokus des Hochintensitätslasers nachweisbar, weshalb auch der Röntgenstrahl auf diese Größe fokussiert und anschließend wieder kollimiert werden muss. Gängige Röntgenlinsen aus Beryllium zerstören jedoch die hohe Polarisationsreinheit unserer Polarimeter. Die Suche nach Alternativen führte uns ans KIT (Arndt Last), wo lithographisch Röntgenlinsen aus Polymeren entwickelt werden. In einer Strahlzeit am Synchrotron PETRA III konnten wir 2020 zeigen, dass diese Linsen die Reinheit der Polarisation nicht messbar beeinflussen und gute Fokussiereigenschaften besitzen.

Alle diese Resultate und die Tatsache, dass am European XFEL nun ein Laser mit mehreren 100 TW Leistung in Betrieb gegangen ist, stimmen uns zuversichtlich in den nächsten Jahren die Doppelbrechung des Vakuums, 70 Jahre nach deren Vorhersage, endlich nachweisen zu können.

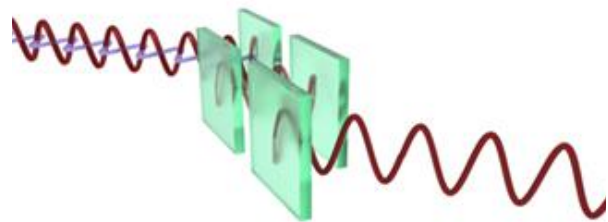


Abb.1. Schema eines Röntgenpolarisators, der aus vier präzise zu einander ausgerichteten Diamant-Kristallen besteht. Die Intensität der Strahlung mit der Schwingungsebene parallel zur Beugungsebene (blaue Schwingung) wird dabei um 10 Größenordnungen unterdrückt.



## Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe „Molecular Movies“

Dr. Matthias Kübel

### Forschungsschwerpunkte

Das übergeordnete Forschungsziel besteht darin, Veränderungen in den Bausteinen der Materie sichtbar zu machen. Solche Veränderungen treten beispielsweise auf, wenn ein Molekül mit Licht wechselwirkt oder eine chemische Reaktion eingeht. Dann geraten die Elektronen und Atomkerne innerhalb des Moleküls in Bewegung und nehmen neue Strukturen ein. Diese Vorgänge finden nicht nur auf den mikroskopischen Längenskalen eines Moleküls statt, sondern sind auch extrem schnell. Ihre akkurate Beschreibung stellt aktuell eine der großen Herausforderungen der Quantenphysik und -chemie dar. Daher haben wir es uns zum Ziel gesetzt, nicht nur die Bewegung der Atome, sondern auch der besonders schnellen Elektronen zeitlich und räumlich in *molecular movies* festzuhalten.

### Was ist ein molecular movie?

In einem *molecular movie* wird die Bewegung eines Moleküls oder dessen Komponenten (Kerne oder Elektronen) räumlich und zeitlich dargestellt. Man kann sich also die **Bewegung von Atomen oder Elektronen** wie in einem echten Film ansehen. Allerdings in ganz **extremer Zeitlupe**, verlangsamt um einen Faktor von etwa  $10^{-15}$ . Moleküldynamik läuft nämlich typischerweise in Femtosekunden ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) ab. Zwei Beispiele aus der bisherigen Arbeit des Gruppenleiters sind unten dargestellt.

### Wie dreht man ein molecular movie?

Zunächst gilt es, die extrem schnelle Bewegung der Atome und Elektronen einzufrieren. Diese Herausforderung kann man sich so ähnlich wie die der Sportfotografie vorstellen: Um die schnelle Bewegung eines Balls festzuhalten, muss die Belichtungszeit der Kamera, so kurz sein, dass sich der Ball während dessen nicht merklich bewegt. Die benötigte ultrakurze Belichtungszeit wird durch den Einsatz moderner Lasertechnologie erreicht, die **Laserpulse** mit einer Dauer weniger **Femtosekunden** (oder sogar **Attosekunden**) bereitstellt. In den geplanten Versuchen kommt dabei ein Faserlaser zum Einsatz, der am Institut für Angewandte Physik entwickelt und in Jena produziert wird.

Der „Filmdreh“ beruht auf dem sogenannten **Pump-Probe-Prinzip**: Ein erster Laserpuls („Pump“) dient als Startschuss, der die Bewegung im Molekül in Gang setzt. Ein zweiter, zeitlich verzögerter Laserpuls („Probe“), erzeugt einen Schnappschuss der Molekülstruktur zu einem gewählten Zeitpunkt nach Eintreffen des Pumpimpulses. Nun wird die Verzögerung zwischen Pump- und Probepuls variiert, und der nächste Schnappschuss aufgenommen. Durch Aneinanderreihen der Einzelbilder erhält man dann ein *molecular movie*.

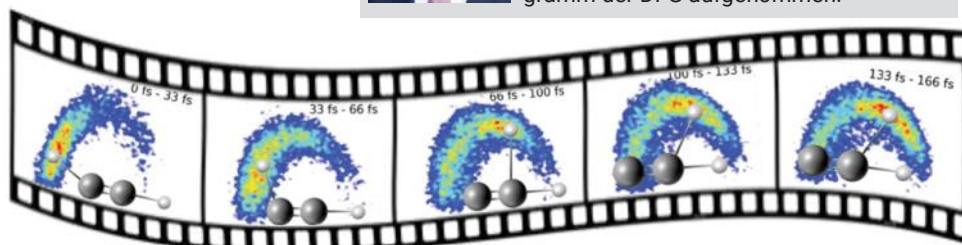
### Wie kann man ein Molekül abbilden?

Als nächstes gilt es, strukturelle Informationen des zu untersuchenden Moleküls zu erfassen. Die Auflösungstheorie nach Ernst Abbe verrät uns, dass dies mit optischen Licht nicht auf direktem Wege gelingen kann, da Moleküle viel kleiner als die Lichtwellenlänge sind. Ein Ausweg liegt darin, die Abbildung mit Hilfe von Teilchen durchzuführen. Die Methode der Wahl ist ein sogenanntes **COLTRIMS** (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy) Reaktionsmikroskops. Damit lassen sich sowohl Ionen wie auch Elektronen, die bei der Wechselwirkung zwischen Laserlicht und Molekülen entstehen, simultan und in **Koinzidenz** detektieren. Besonders wichtig dabei: Das COLTRIMS ermöglicht die präzise Vermessung der **Impulsvektoren** aller Fragmente in 3D, also allen drei Raumrichtungen. Aus diesen Informationen lässt sich dann am Computer ein Abbild des Moleküls berechnen. Ein Reaktionsmikroskop wird aktuell durch die DFG beschafft und wird Anfang 2021 in Betrieb genommen werden.

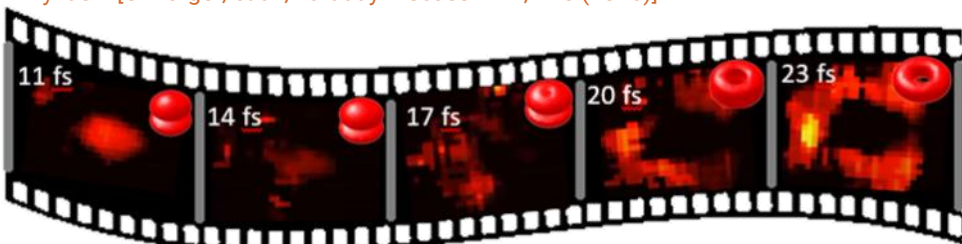
### Über den Gruppenleiter



Dr. Matthias Kübel (\*1984) hat in Jena Physik studiert und in München promoviert. Nach einem Postdoc am National Research Council in Ottawa / Kanada kehrte er 2018 nach Jena zurück. 2020 wurde er in das Emmy-Noether-Programm der DFG aufgenommen.



Film 1. Abbildung der Kernbewegung während der Isomerisierung von Acetylen zu Vinyliden. [C. Burger, et al., Faraday Discuss. 194, 495 (2016)]



Film 2. Abbildung der Bewegung eines Elektronenlochs durch eine Schwebung zweier Quantenzustände im Argonion [M. Kübel, et al., Nat. Commun. 10, 1042 (2019)]

## Otto-Schott-Institut für Materialforschung (OSIM)



Foto: Janett Grabow

**Institutsdirektor:**

**Prof. Dr. –Ing. Lothar Wondraczek**

(Standort Fraunhoferstr. 6, Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät)

**Geschäftsführender Institutsdirektor, Vertreter der PAF**

**Prof. Dr.-Ing. habil. Frank A. Müller**

(Standort Löbdergraben 32, Physikalisch-Astronomische Fakultät)

**Zur Physikalisch-Astronomischen Fakultät gehören folgende Arbeitsgruppen:**

**Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe**

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h.c. Markus Rettenmayr

**Lehrstuhl für Materialwissenschaft**

Prof. Dr. rer. nat. Klaus D. Jandt

**Professur für Mechanik der funktionellen Materialien**

Prof. Dr. Enrico Gnecco

**Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien**

Prof. Dr. –Ing. habil. Frank A. Müller

**Professur für Computational Materials Science**

Prof. Dr. rer. nat. habil. Marek Sierka

**Lehrstuhl für Faseroptik und -sensorik (am IPHT Jena)**

Prof. Dr. Markus A. Schmidt (siehe S. 132)

**Adresse:** Löbdergraben 32, 07743 Jena/ Fraunhoferstr. 6, 07743 Jena

**Homepage:** [www.osim.uni-jena.de](http://www.osim.uni-jena.de)

## Lehrstuhl Metallische Werkstoffe

### Prof. Dr. Dr. h.c. Markus Rettenmayr

#### Forschungsschwerpunkte

- Thermodynamik und Kinetik von Phasenumwandlungen: rasche Erstarrung, Massivumwandlung, Bildung von Oxidschichten
- Transmissionselektronenmikroskopie zur Analyse von Strukturen und Konzentrationsverteilungen auf atomarer Längenskala
- Hochdurchsatzexperimente zur Bestimmung thermodynamischer und kinetischer Daten
- Entwicklung von Al-Si- und Al-Li-Legierungen für selektives Laserschmelzen

In den letzten Jahren haben sich am Lehrstuhl zwei wesentliche Veränderungen ergeben:

PD Dr. Undisz hat einen Ruf an die TU Chemnitz angenommen; akademische und industrielle Untersuchungen an NiTi und Implantatlegierungen nimmt er als Forschungsgebiete mit an seine neue Arbeitsstelle, dementsprechend verringert sich der Stellenwert dieser Gebiete am Lehrstuhl. Über die Methodik der Untersuchungen (HRTEM und GD-OES) wird aber weiterhin eine enge Zusammenarbeit bestehen.

In 2019 wurde ein neues Großgerät in der Arbeitsgruppe installiert, ein JEOL neoARM 200 mit

Cs-Korrektor, kaltem Feldemitter und aktueller chemischer Analytik; am Gerät kann Konzentrationsanalyse mit den derzeit schnellsten und größtmöglichen EDX-Detektoren (200mm<sup>2</sup> Detektorfläche) erfolgen, womit atomare Auflösung nicht nur in der Abbildung (ca. 0.75Å), sondern auch in der Konzentrationsanalyse (ca. 1Å) erreicht wird; zusätzlich wurde die erst seit kurzem verfügbare neueste Generation von EEL-Spektrometern installiert, die eine wesentlich verbesserte Energieauflösung ermöglicht (0.3eV statt früher 0.6eV). Mehrere Mitarbeiter sind bereits am Gerät eingearbeitet.

#### Erstarren und Schmelzen

**Flüssig/fest-Phasenumwandlungen** sind am Lehrstuhl seit vielen Jahren präsent. Die aktuelle Forschung betrifft hauptsächlich rasche Erstarrung, z.B. bei Experimenten im elektromagnetischen Levitator, auf der ISS oder während des selektiven Laserschmelzens. Die Erstarrung erfolgt mit sehr hoher Geschwindigkeit bis zu m/s. Es wurde unter anderem das Verständnis des Einflusses der Konvektion auf die dendritische Erstarrung vertieft, was sich in Modellen widerspiegelt, die quantitativ exzellent mit den experimentellen Daten übereinstimmen. Beim selektiven Laserschmelzen wird die rasche Erstarrung bei der Entwicklung von Al-Si- und Al-Li-Legierungen mit erhöhter Steifigkeit eingesetzt.

**Fest/fest-Phasenumwandlungen** werden derzeit anhand von Massivumwandlung im System Cu-Zn-Al untersucht. Ziel ist es, mehr Information über den thermodynamischen Zustand einer sich bewegenden Grenzfläche zu erhalten. In der Arbeitsgruppe wurde mit Hilfe von Dr. Tympel aus der Physik ein Pulsheizgerät aufgebaut, das eine Probe in deutlich weniger als 1ms präzise auf eine Zieltemperatur aufheizt. Es wurde nachgewiesen, dass mit Hilfe dieses Geräts Massivumwandlung tatsächlich kontrolliert und reproduzierbar eingestellt werden kann. In den makroskopischen Proben, die im Pulsheizgerät verwendet werden, entstehen Gradienten bezüglich Temperatur und Abkühlgeschwindigkeit, womit mehrere Probenzustände mit einem einzigen Experiment hergestellt werden und ausgewertet werden.



### Bestimmung thermodynamischer und kinetischer Daten im Temperaturgradienten

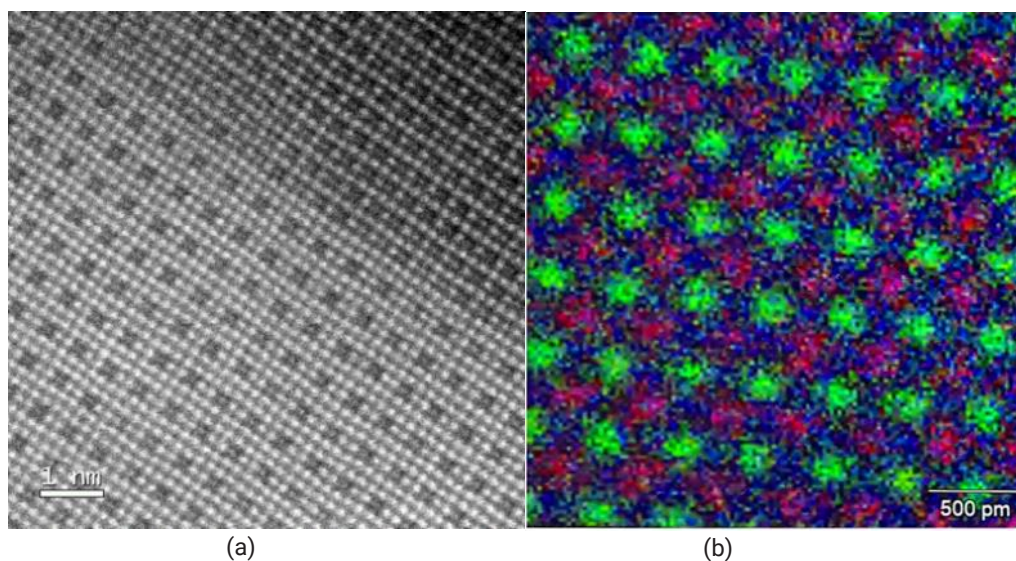
In Legierungen mit makroskopischen Konzentrationsgradienten lassen sich beim (teilweisen) Aufschmelzen und Wiedererstarren simultan in einem Temperaturgradienten eine ganze Reihe von thermodynamischen Zuständen physikalischer Prozesse beobachten. Im Vergleich mit Simulationsrechnungen lassen sich daraus Daten zur Thermodynamik, Thermophysik und Kinetik (in) der Legierung gewinnen. Dies betrifft z.B. konstitutionelle Daten (Solidus-, Liquidus- und Solvuslinien bzw. -flächen), Daten zur atomaren

Mobilität (temperaturabhängige Diffusionskoeffizienten), Grenzflächenenergien und thermische Daten (temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten, thermische Diffusivitäten und Wärmekapazitäten). Der Schwerpunkt der Tätigkeiten lag in den letzten Jahren auf der Bestimmung von temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten in hochkomponentigen Legierungen und der Bestimmung von temperaturabhängigen thermischen Daten.

### Transmissionselektronenmikroskopie

Erste Analysen mit dem neuen Transmissionselektronenmikroskop bestätigen die hervorragende Auflösung sowohl in Hellfeld-Bildern als auch in EDX-Analysen, s. Abb. 1.

Abb. 1. Bilder mit atomarer Auflösung: (a) Hellfeldbild des Übergangs einer Ausscheidung aus einem Titan-Aluminid in eine Platin-Mischkristallmatrix, und (b) EDX-Analyse von Strontiumtitanat; die Gitterpositionen von Ti (grün), Sr (rot) und O (blau) sind klar erkennbar.



### Mechanismen der Oxidschichtbildung auf Stahl und Hochentropielegierungen

Wachstumskinetik von Oxidschichten, Lage der Oxidationsfront und Ausbildung von Konzentrationsverteilungen in den Oxidschichten in frühen Stadien der Oxidation (Schichtdicken von einigen nm bis ca. 100nm) werden mit einer Kombination von Elektronenmikroskopie an FIB-Lamellen und Glimmentladungsspektroskopie untersucht. Es zeigt sich, dass es notwendig ist, bei Konzentrationsgradienten zu unterscheiden in solche, die auf-

grund der atomaren Bindungen unveränderlich sind und solche, die zu Diffusion und Wachstum der Schicht führen. In einigen Fällen konnte gezeigt werden, dass sich die Position der Wachstumsfront während der Oxidation verändert und nicht immer an klar definierten Grenzflächen (Oberfläche/Oxid, Oxid/Oxid oder Oxid/Metall) erfolgt, sondern sich während der Oxidation auch verändern kann.

## Lehrstuhl für Materialwissenschaft Prof. Dr. Klaus D. Jandt

### Forschungsschwerpunkte

- Materials for LIFE
  - Antimikrobielle Materialien für Gesundheits- und Mobilitätsanwendungen
  - Biosensormaterialien: Proteinadsorption an nanostrukturierten Oberflächen
  - Materialien für Geweberegeneration und -ersatz: Bioaktive und biologisch abbaubare Knochenzemente
- Materials for LIGHT
  - Polymere: Funktionelle Nanomaterialien durch Selbstorganisation: Hybrid Protein-Nanofasern
  - Polymerbasierte Nanowirkstofftransportsysteme mit maßgeschneiderten Eigenschaften
- Composites
  - Kohlenstoffbasierte (Graphen, Kohlenstoff-Nanoröhrchen) Nanocomposites mit kontrollierte Strukturen und Eigenschaften

### Entwicklung von Polymer-Nanopartikeln für Targeted Drug Delivery mit einstellbarer Wirkstofffreisetzung

Der DFG SFB 1278 PolyTarget an der FSU Jena entwickelt und erforscht innovative Polymer-Nanopartikel (NP) als Trägermaterial für Wirkstoffe (Targeted Drug Delivery). Der Lehrstuhl für Materialwissenschaft arbeitet kooperativ an zwei der Kernprojekte des SFB. Im ersten Projekt „A06 - Controlling the degradation behavior of polymeric nanoparticles by structurally tailored thermal properties“ werden Struktur-Eigenschafts

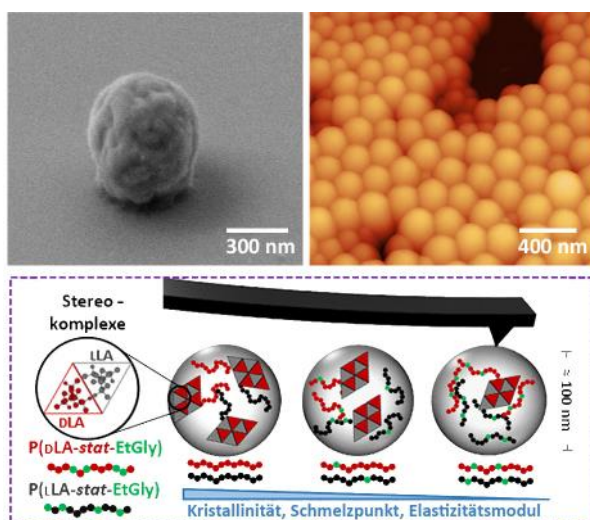


Abb. 1. Polymer-Nanopartikel (oben) mit abstimmbaren physikalischen Eigenschaften, Stereokomplexation (unten) von P(LLA-*stat*-EtGly) und P(DLA-*stat*-EtGly) (EtGly: 3-Ethylglykolid) als Methode, um gezielten Einfluss auf die Kristallinität und thermischen Eigenschaften zu nehmen.

-Beziehungen von Polyester NP aus Polymerblends und Copolymeren entwickelt. Die Polymere sind maßgeschneidert und weisen eine einstellbare Kristallinität sowie variable thermische und mechanische Eigenschaften bei konstanter Hydrophilizitäts-/Hydrophobizitätsbalance auf [1]. Somit kann letztere als Einflussgröße bei Degradationsuntersuchungen ausgeschlossen werden. Wir haben gezeigt, dass sich die Kristallinität und die thermischen Eigenschaften vom Bulkmaterial auf die NP übertragen lassen. Nun folgen Untersuchungen, wie diese Merkmale das Degradations- und Wirkstofffreisetzungverhalten beeinflussen. Ziel ist es, ein Modell zu entwickeln, um die Degradationskinetik für zukünftige NP vorherzusagen. Im zweiten Projekt „A03 - Photo-triggered swelling and release from core-shell-corona micelles“ wird das lichtgesteuerte Quellverhalten von Kern-Schale-Corona-Mizellen NPs zur kontrollierten Freisetzung von Wirkstoffen untersucht. Dabei stimulieren wir die photosensitiven NP mit UV Licht über einen eigens dafür entwickelten AFM Aufbau. Hier werden Proben direkt während der AFM Messung über ein Glasfaserkabel mittels UV-Strahlung beleuchtet, was *in-situ* AFM-Messungen des Quellverhaltens dieser NP ermöglicht.

[1] Scheuer *et al.* (2020): Self-Assembly of Copolyesters into Stereocomplex Crystallites Tunes the Properties of Polyester Nanoparticles, *Macromolecules*, 2020, 53, 19, 8340–8351.

[2] Cao *et al.* (2019): The action-network of nanomaterials" in "On the issue of transparency and reproducibility in nanomedicine *Nature Nanotechnology* 2019 14, 629-635.

## Druckfeste, resorbierbare und bioaktive Calcium-Phosphat-Zemente als Knochenersatz

Die Osteoporose zählt zu den zehn häufigsten Erkrankungen unserer Zeit und ist ein weltweit bedeutsames, sozioökonomisch-medizinisches Problem. In Europa erleiden dabei jährlich bis 1,5 Millionen Menschen eine osteoporotische Wirbelkörperfraktur. Die Ballon-Kyphoplastie wird aktuell als modernes, minimalinvasives Operationsverfahren zur Behandlung von Wirbelkörperfrakturen eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden injizierbare PMMA-Zemente verwendet, die jedoch einen zu großen Elastizitätsmodul haben, nicht resorbierbar sind und Entzündungsreaktionen hervorrufen können. Um eine bessere Alternative zu PMMA-Zement zu entwickeln, wurde das BMBF Projekt "KMU-Innovativ: Biotechnologie - Biochance" ins Leben gerufen.

Bei dem neuen Zement handelt es sich um einen biologisch abbaubaren Calcium-Phosphat-Zement (CaP), der mit abbaubaren Polylactid-Glykolsäure-Fasern (PLGA) verstärkt und mit dem knocheninduktiv wirksamen, humanen Bone Morphogenetic Protein (BMP) modifiziert ist. Der Lehrstuhl befasst sich insbesondere mit der Frage, wie sich Veränderungen der PLGA-Fasermor-

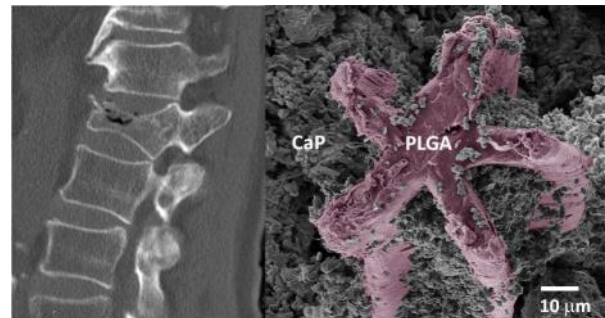


Abb. 2. Wirbelkörperfraktur (links). CaP-Zement bestückt mit profilierten PLGA-Fasern, die zur Erhöhung der Zementfestigkeit durch bessere Faser-Matrix-Haftung eingesetzt werden (rechts).

Grafik: Izabela Firkowska-Boden.

phologie (Abb.2) und der Oberflächenchemie [3] auf die biomechanischen Eigenschaften von CaP-Zement auswirken. Dies geschieht in enger Zusammenarbeit mit den Partnern aus dem klinischen und biotechnologischen Bereich.

[3] Firkowska-Boden *et al.* (2020): Biopolymer surface modification of PLGA fibers enhances interfacial shear strength and support immobilization of rhGDF-5 in fiber-reinforced brushite cement. *J Mech Behav Biome Mater.* 2020, 15, 104285.

### Veranstaltung des europäischen Symposiums für Biomaterialien

Die Euro BioMat ist eine der führenden internationalen Konferenzen auf dem Gebiet der Biomaterialien und der bioinspirierten Materialien in Europa. Organisiert von der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e. V. (DGM) und ihrem Fachausschuss Biomaterialien unter Leitung von Prof. Dr. Klaus D. Jandt findet die Euro BioMat alle zwei Jahre in der Kulturstadt Weimar statt.

Dieses zweitägige Symposium richtet sich an das wachsende Interesse von Wissenschaft, Wirtschaft und Medizin unter Berücksichtigung der verschiedenen Aspekte der Herstellung, Charakterisierung,



Abb. 3. Wissensteilung auf der Euro BioMat. Foto: Izabela Firkowska-

Prüfung and Anwendung von Biomaterialien. Die Euro BioMat bringt über 200 Experten auf den eng verwandten Gebieten der Biomimetik, der Biomineralisation und der Biopolymere zusammen. Mit Vortrags- und Posterbeiträgen sowie Ple-

narvorträgen von führenden internationalen Biomaterialforschern bringt die Euro BioMat herausragende Persönlichkeiten aus der Praxis zusammen und fördert den Austausch faszinierender wissenschaftlicher Erkenntnisse.



## Professur für Mechanik der funktionellen Materialien

### Prof. Dr. Enrico Gnecco

#### Forschungsschwerpunkte

- Grundlagen der Haft- und Gleitreibung auf der Nano- und Mesoskala:
  - Mechanismen der Kontaktalterung
  - Anisotropie-Effekte bei der Reibung auf atomarer Ebene
  - Nanotribologie in flüssigen Umgebungen
  - Gleitreibung von Molekülketten (Modellierung)
- Nanoexfoliation und kontrollierte Nanomanipulation auf 2D-Materialien:
  - Morphologie und Energetik des Verschleißes an TMD-Oberflächen auf der Nanoskala
  - Kontrollierte Manipulation von Metallclustern auf Molybdändisulfid
- Frühstadien des Pflugverschleißes auf Glas- und Polymeroberflächen:
  - Stick-Slip und Rippelbildung auf abgeschliffenen Glasoberflächen
  - Musterbildung bei Pflugverschleiß an Polymeren (Experimente und Theorie)

#### Grundlagen der Haft- und Gleitreibung auf der Nano- und Mesoskala

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Haft- und Gleitreibung auf der Nanoskala wurden in Zusammenarbeit mit verschiedenen Arbeitsgruppen durchgeführt. Erwähnenswert sind die Ergebnisse zur Alterung von Siliziumdi-

oxid-Nanobrücken mit der Kontaktzeit [1], zur Anisotropie der Nanoreibung auf organischen Schichten, und zum kontrollierten Abheben von einzelsträngiger DNA von Metalloberflächen [2].

Neuartige Charakterisierung der Reibung in Ethanol erweiterten frühere Stick-Slip-Studien im atomaren Maßstab im Ultrahochvakuum auf neue Umgebungen und Belastungsbedingungen und halfen, das neue DFG-Projekt „*Gleitkontakt in Flüssigkeiten: Eine nanotribologische Studie*“ zu fördern [3]. In einem nächsten Schritt sollen mehrere gleichzeitig auftretende Stick-Slip-Ereignisse auf rauen Oberflächen untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde ein zweites DFG-Projekt „*Mehrfachkontaktreibung an laser-induzierten periodischen Oberflächenstrukturen (LIPSS)*“ in Zusammenarbeit mit der Müller-Gruppe am OSIM gerade erst begonnen.

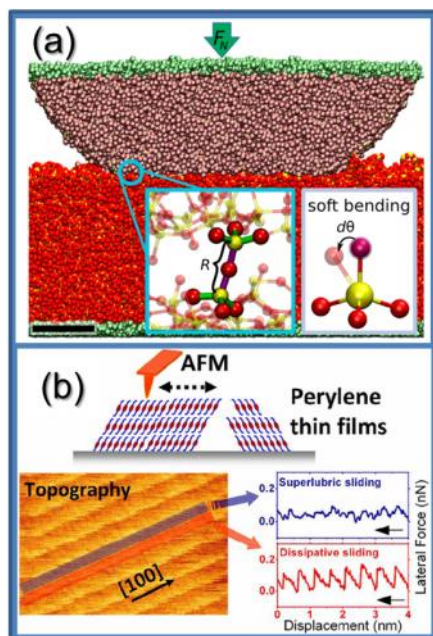


Abb. 1. (a) Atomistische Ansicht eines statischen Kontakts zwischen zwei SiO<sub>2</sub>-Oberflächen und (b) Charakterisierung der Reibungsanisotropie einer organischen Dünnschicht auf der Nanoskala.

[1] M. Vorholzer et al. (2019): Temperature activates contact aging in silica nanocontacts, Phys. Rev. X, DOI: 10.1103/PhysRevX.9.041045

[2] R. Pawlak et al. (2019): Conformations and cryo-force spectroscopy of spray-deposited single-strand on gold, Nature Communications, DOI: 10.1038/s41467-019-08531-4

[3] L. Agmon et al. (2018): Estimation of interaction energy and contact stiffness in atomic-scale sliding on a model sodium chloride surface in ethanol. Scientific Reports, DOI: 10.1038/s41598-018-22847-z



## Nanoexfoliation und kontrollierte Nanomanipulation auf 2D-Materialien

Wir untersuchen die Exfoliation von Übergangsmetall-Dichalcogenid-Oberflächen, die durch kontrollierte Nanokratzversuche verursacht wird. Dies ist wichtig in Anbetracht der zunehmenden Anwendung dieser Materialien als Schutzschichten oder Festschmierstoffe. Je nach Anzahl der betroffenen Monoschichten kann zwischen Faltenbildung und Abplatzungen unterscheiden werden, die wir mit der im Verschleißprozess gemessenen Energiedissipation zu korrelieren versuchten [4].

Molibdenum-Dysulfid-Oberflächen wurden auch als Spielwiese für die kontrollierte Nanomanipulation von Goldclustern verwendet. Die Cluster neigen dazu, den dicht gepackten „super-schmierenden“ Richtungen des Gitters zu folgen [5] und sich in Form von diskontinuierlichen Streifen zu agglomerieren [6]. Es wurde auch eine überraschende Abhängigkeit von der Anzahl der Monolagen festgestellt. Diese Ergebnisse können für den Zusammenbau von Metallnanoelektroden verwendet werden.

[4] A. Özogul et al. (2020): Plowing-induced nanoexfoliation of mono- and multilayer MoS<sub>2</sub> surfaces, Phys. Rev. Materials, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.4.033603

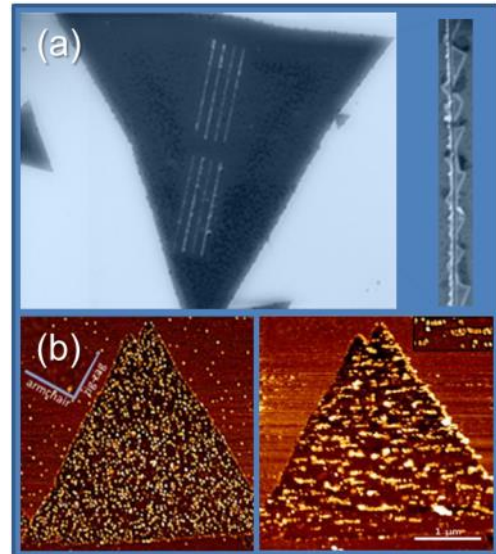


Abb. 2. (a) Nanokrater und (b) scan-induzierte Organisation von Au-Clustern auf MoS<sub>2</sub>-Monolayer-Inseln.

[5] F. Trillitzsch et al. (2018): Directional and angular locking in the driven motion of Au islands on MoS<sub>2</sub>, Phys. Rev. B, DOI: 10.1103/PhysRevB.98.165417

[6] F. Trillitzsch et al. (2020): Scanning-probe-induced assembling of gold striations on mono- and bi-layered MoS<sub>2</sub> on SiO<sub>2</sub>, MRS Advances, DOI: 10.1557/adv.2020.151

## Frühstadien des Pflugverschleißes auf Glas- und Polymeroberflächen

Die Bildung von wellenförmigen Nanostrukturen auf standardmäßigen spröden (Quarzglas) und nachgiebigen (Polystyrol) Oberflächen durch Kratzen wurde sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht. Die Geometrie der resultierenden Muster konnte mit der Gleitgeschwindigkeit, der Haft- und Gleitreibung und der Kontaktsteifigkeit gemäß der grundlegenden Stick-Slip-Theorie [7] bzw. einer originellen Erweiterung des Prandtl-Tomlinson-Modells für Reibung auf atomarer Skala [8] in Beziehung gesetzt werden. Das Verständnis der Erzeugung von Nanokunststoffen durch Wiederholung des Scanprozesses ist der nächste Schritt, den wir derzeit untersuchen. Dies hat eine herausragende Bedeutung für die Umweltproblematik.

[7] E. Gnecco et al. (2018): Surface rippling of silica glass surfaces scraped by a diamond nanoindenter, Phys. Rev. Materials, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.115601

[8] J. J. Mazo et al. (2019): Plowing-induced structuring of compliant surfaces, Phys. Rev. Lett., DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.246101

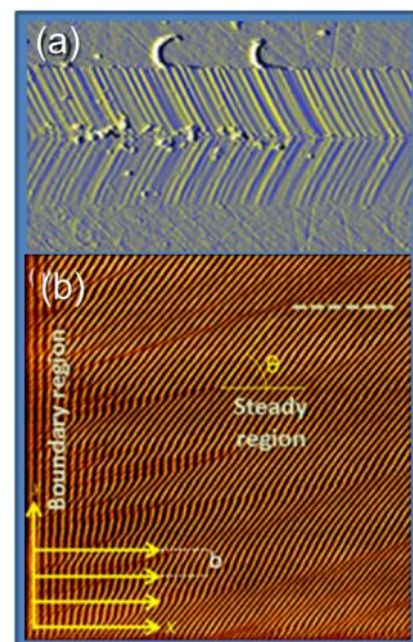


Abb. 3. Plowing-induzierte Wellenmuster (a) auf Polystyrol- und (b) Silika-Oberflächen

## Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien

### Prof. Dr.-Ing. Frank A. Müller



#### Forschungsschwerpunkte

- Verwendung von CO<sub>2</sub>- und Ultrakurzpulslasern zur Herstellung von Oberflächen- und Volumenstrukturen mit spezifischen funktionellen Eigenschaften für Anwendungen in der Optik, Energietechnik und als Biomaterial.
- Gasphasen-Kondensation funktioneller keramischer Nanopartikel (NP) mittels CO<sub>2</sub>-Laservaporisation (LAVA): ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NP für biokompatible Dispersionskeramiken mit herausragenden mechanischen Eigenschaften, ferri- und supermagnetische Eisenoxid-NP bzw. Eisenoxid-NP in einer amorphen Siliziumdioxid-Matrix als MRT-Kontrastmittel, für Hyperthermie und Drug-Targeting, dotierte NP als Fluoreszenzmarker für das Bioimaging und Basis aktiver Lasermedien, NP keramischer Halbleiter (z.B. ZnO, TiO<sub>2</sub>) für die Umwelt- und Energietechnik.
- Bioinspirierte Materialien (Biomimikation, biomimetische Oberflächen, Strukturhybride), Selbstheilung von Calciumphosphatzementen.
- Photolumineszenzspektroskopie, photoakustische Messtechnik und Untersuchungen zur photokatalytischen Aktivität von Halbleiter-NP.

#### Laser-induzierte periodische Oberflächenstrukturen: Winzige Strukturen, großes Potenzial

Durch die Nanostrukturierung mit laser-induzierten periodischen Oberflächenstrukturen („laser-induced periodic surface structures“; kurz: LIPSS) lässt sich die Topographie von Materialoberflächen maßgeschneidert einzustellen. Dies ermöglicht vielseitige funktionelle Oberflächeneigenschaften. Ziel der Untersuchung ist das detaillierte Verständnis der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen, um in der Folge die Materialoberfläche optimal an die entsprechende Anwendung anzupassen.

Durch LIPSS können beispielsweise spezifische Benetzungszustände der Materialoberfläche im Kontakt mit verschiedensten Flüssigkeiten realisiert werden. Diese haben großes Anwendungspotenzial in der Mikrofluidik, etwa beim gerichteten Transport von Flüssigkeiten (z.B. Lab-on-a-chip). Ein solcher gerichteter Flüssigkeitstransport lässt sich auch basierend auf dem bereits im Jahre 1756 beschriebenen Leidenfrost-Effekt realisieren, wobei hier die LIPSS eine signifikante Absenkung der charakteristischen Leidenfrost-Temperatur ermöglichen.

Die in Form der LIPSS an der Oberfläche erzeugten Gitterstrukturen beugen einfallendes Licht, was zur Bildung charakteristischer Strukturfarben führt. Diese werden unter anderem zur optischen Datenspeicherung, Produktkennzeichnung und Fälschungssicherung verwendet. Die mechanisch induzierte Änderung der Strukturfarben lässt sich darüber hinaus für Sensoren wie

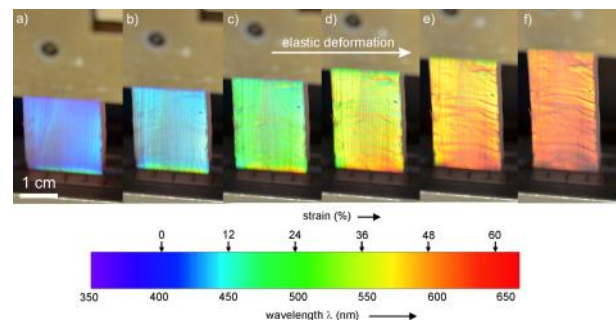


Abb. 1. Reversible Änderung der durch LIPSS induzierten Strukturfarben durch elastische Substratdeformation.

beispielsweise miniaturisierte Dehnungssensoren nutzen. LIPSS mit geeigneter Periode können zudem zur Erzeugung antireflektierender Oberflächen, insbesondere bei transparenten Werkstoffen (Gläser), verwendet werden.

Großes Potenzial im Hinblick auf die Einsparung von Ressourcen und Energie bieten LIPSS auf Grund der verbesserten tribologischen Eigenschaften der nanostrukturierten Oberflächen, die sich vor allem in einem reduzierten Reibungskoeffizienten ausdrücken.

S Gräf, C Kunz, A Undisz, R Wonneberger, M Rettenmayr, FA Müller "Mechano-responsive colour change of laser-induced periodic surface structures" Appl. Surf. Sci. 471 (2019) 645-651.

O Dubnack, C Kunz, S Gräf, FA Müller "Laser-induced Leidenfrost surfaces" Appl. Surf. Sci. 532 (2020) 147407.

C Kunz, J Bonse, D Spaltmann, C Neumann, A Turchanin, JF Bartolome, FA Müller, S Gräf "Tribological performance of metal-reinforced ceramic composites selectively structured with femtosecond laser-induced periodic surface structures" Appl. Surf. Sci. 499 (2020) 143917.

**DFG SPP: Selbstheilende Materialien „Selbstheilung schadenstoleranter Calciumphosphat-Zemente“**

Calciumphosphatzemente (CPC) sind aufgrund ihrer Biokompatibilität und osteokonduktiven Eigenschaften ein vielversprechendes Material für die Regeneration von Knochengewebe insbesondere nach einer Tumorentfernung oder Zahnextraktion. Allerdings ist die Anwendung solcher CPC aufgrund ihrer inhärenten Sprödigkeit bisher auf nicht-lasttragende Knochenbereiche beschränkt. Aus diesem Grund haben wir uns mit der Herstellung eines schadenstoleranten CPC beschäftigt, bei dem die Einarbeitung von funktionalisierten Kohlenstofffasern im Schadensfall eine stabile, flache Rissausbreitung mit Rissöffnungen kleiner 10 µm ermöglicht. Ein anschlie-

ßender Selbstheilungsprozess in simulierter Körperflüssigkeit (SBF), der die *in vivo* Mineralisierung bioaktiver Oberflächen *in vitro* nachahmt, schließt die Risse und stellt die mechanischen Eigenschaften vollständig wieder her. Dabei wurden zwei Wege der Selbstheilung untersucht: i) intrinsische Heilung, die auf den bioaktiven Eigenschaften der Zementmatrix und der chemisch behandelten C-Fasern basiert und so eine Nukleation von Apatit an den Rissflanken ermöglicht, und ii) extrinsische Selbstheilung, bei der aus polymeren Kapselsystemen, die durch einen fortschreitenden Riss geöffnet werden,  $H_2PO_4^-$  als Initiator für die Apatitbildung freigesetzt wird und es durch lokale Übersättigung an  $PO_4^{3-}$ -Ionen zu einer vollständigen Mineralisierung der Risse kommt. Die Selbstheilungskapazität der CPC bleibt dabei auch bei wiederholter Schädigung über mehrere Zyklen hinweg erhalten. Schadenstolerante, selbstheilende CPC sind von besonderer Bedeutung, um die Lebensdauer von Calciumphosphat-basierten Implantaten zu erhöhen und ihr Einsatzpotential auf lasttragende Bereiche zu erweitern .

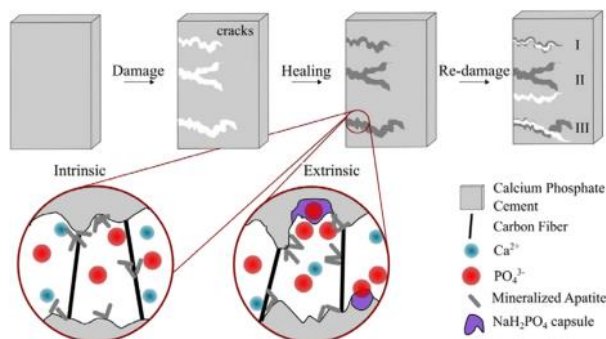


Abb. 2. Selbstheilungsmechanismen faserverstärkter CPC.

Boehm, A.V., Meining, S., Gbureck, U., Müller, F.A. (2020): Self-healing capacity of fiber-reinforced calcium phosphate cements. Scientific Reports 10, 9430, DOI: 10.1038/s41598-020-66207-2 .

**Fernstudium „Lasertechnik“**

Ziel des Studiums ist es, Absolventen mit Entscheidungskompetenz in den Bereichen Lasertechnik und Lasereinsatz auszubilden.

Das Studium vermittelt Grundlagen- und Spezialkenntnisse der Lasertechnik, Lasermaterialbearbeitung und Lasermesstechnik sowie in den Bereichen technisch-ökonomischer Aspekte des Lasereinsatzes und Arbeitsschutz bei Arbeiten mit Laserstrahlung.

Das vier Semester dauernde Studium ist als weiterbildender Fernstudiengang konzipiert und berufsbegleitend ab-

solvierbar. Die Einschreibung erfolgt jährlich zum Wintersemester.

Das Studium wird mit einem bundesweit anerkannten Universitäts-Zertifikat sowie

der zertifizierten "Sachkunde als Laserschutzbeauftragter" abgeschlossen.

Im aktuellen Jahrgang nehmen 6 Studenten am Fernstudiengang teil.

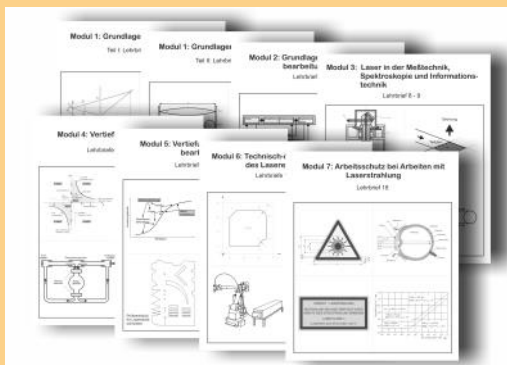


Abb. 3. Lehrmaterialien: 8 Lehrbriefe in 7 Modulen.



## Computational Materials Science

### Prof. Dr. Marek Sierka

#### Forschungsschwerpunkte

- *Ab initio*- und atomistische Methoden zur Erforschung der Struktur und Eigenschaften komplexer, nanostrukturierter Materialien. Im Fokus stehen vor allem Nanopartikel, Makromoleküle sowie Festkörper und deren Oberflächen.
- Neue Strategien zum maßgeschneiderten Design multifunktionaler Polymere und Nanopartikel mit optimierter Kompatibilität von bioabbaubarem Kern und eingeschlossenem Wirkstoff, um ein Maximum an Wirkstoffaufnahmekapazität und Freisetzungseffizienz zu erreichen.
- Entwicklung und Anwendungen genauer und rechnerisch effizienter quantenmechanischer Simulationsmethoden zur Beschreibung des optischen Verhaltens hybrider Systeme.

#### Quantenmechanische Methoden für große Moleküle, Oberflächen und Festkörper

Die rechnergestützte Erforschung nanostrukturierter Materialien erfordert Rechenverfahren, die nicht nur in der Lage sind größere molekulare und ausgedehnte Systeme beliebiger Dimensionalität bzw. Periodizität einheitlich zu beschreiben, sondern auch einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Recheneffizienz bieten. Deshalb entwickeln wir quantenmechanische und atomistische Simulationsmethoden für eine einheitliche Beschreibung von Molekülen und ausgedehnten Systemen bei einem hohen Maß an numerischer Genauigkeit und Recheneffizienz.

Die in diesem Projekt entstandene Software behandelt größere molekulare und ausgedehnte, periodische Systeme methodisch einheitlich und numerisch genau. In Verbindung mit einer effizienten Parallelisierung sind Dichtefunktionaltheorie-Berechnungen von Systemen mit über tausend Atomen möglich (Abb. 1). Zurzeit befassen wir uns mit der Entwicklung neuartiger Methoden und Algorithmen für effiziente Simulationen der Licht-Materie-Wechselwirkung in großen, ausgedehnten Systemen.

Becker M., Sierka M. (2019): Density Functional Theory For Molecular And Periodic Systems Using Density Fitting And Continuous Fast Multipole Method: Stress Tensor. *J. Comput. Chem.*, DOI: 10.1002/jcc.26033.

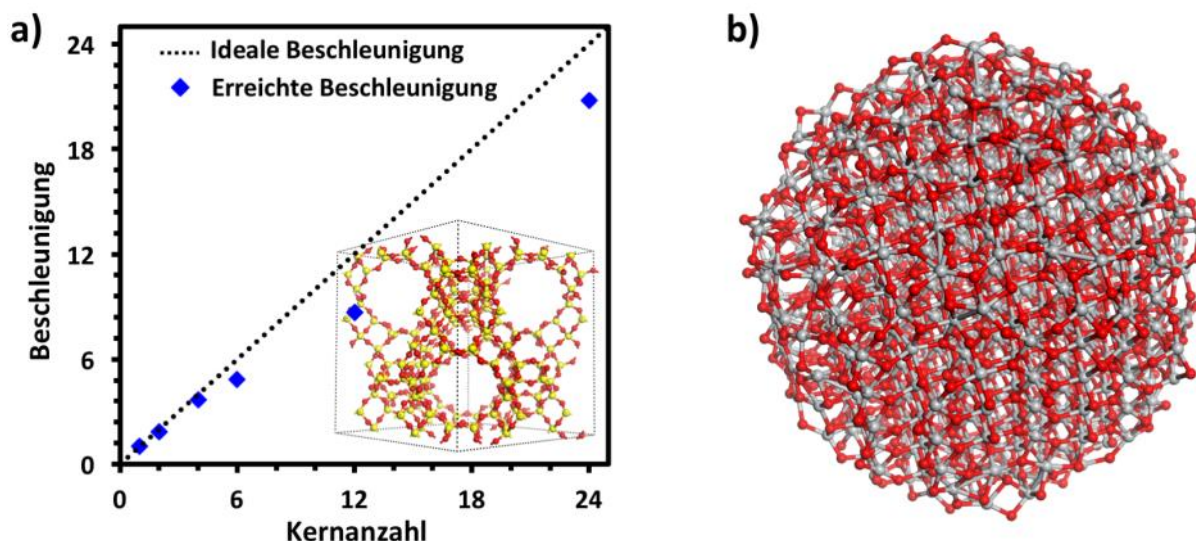


Abb. 1. *Ab initio*-Simulationen ausgedehnter Systeme: a) Parallele Beschleunigung für die Energie- und Gradientenberechnung des Faujasit-Zeolithen ( $\text{Si}_{192}\text{O}_{384}$ -Elementarzelle). b)  $(\text{TiO}_2)_{545}$ -Nanopartikel, Energie- und Gradientenberechnung: 8 Stunden/24 CPU-Kerne. (O: rot, Si: gelb, Ti: grau).



## Maßgeschneiderte multifunktionale Polymere und Nanopartikel auf Polymerbasis

Im Jenaer Sonderforschungsbereich 1278 *PolyTarget* werden polymerbasierte, nanopartikuläre Trägermaterialien zur zielgerichteten Applikation von pharmazeutischen Wirkstoffen entwickelt. Im Vordergrund stehen Systeme, die zur Therapie von Krankheiten und Syndromen geeignet sind, deren Morbidität maßgeblich durch eine entzündliche Reaktion gekennzeichnet ist. Dabei sollen Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Polymeren bzw. Nanopartikeln und deren biologischer Wirkung ermittelt werden.

Der Beitrag unserer Arbeitsgruppe ist mithilfe einer Kombination aus Computersimulationen und Experimenten neue Strategien zum maßgeschneiderten Design polymerer Nanomaterialien zu entwickeln, welche die höchstmögliche Speicherkapazität medizinischer Wirkstoffe sowie die maximale Effizienz zur Freisetzung dieser aufweisen (Abb. 2).

Erlebach A., Muljajew I., Chi M., Bückmann C., Weber C., Schubert U. S., Sierka M. (2020): Predicting solubility of small molecules in macromolecular compounds for nanomedicine application from atomistic simulations. *Adv. Theory Simul.*, DOI: 10.1002/adts.202000001.

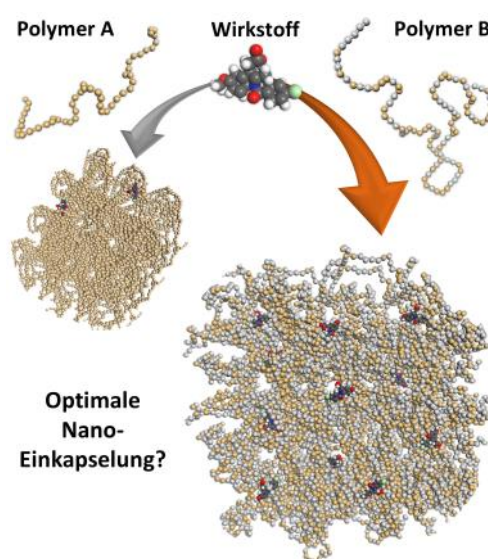


Abb. 2. Mittels eines kombinierten rechnerischen und experimentellen Ansatzes wird die Hydrophobizität von Polymeren systematisch variiert um die höchstmögliche Speicherkapazität medizinischer Wirkstoffe zu erreichen.

## Modellierung nichtlinearer optischer Eigenschaften funktionalisierter Oberflächen

Der Sonderforschungsbereich 1375 NOA folgt der Vision, ein grundlegendes Verständnis nichtlinearer optischer Prozesse bis hinunter auf die atomare Skala zu entwickeln.

Der Beitrag unserer Arbeitsgruppe besteht in der Modellierung und Simulation des optischen Verhaltens von hybriden Systemen, die aus Molekülen bestehen, die auf metallischen und Halbleiteroberflächen, Halbleiter-Nanodrähten, Nanopartikeln und 2D-Materialien adsorbiert sind oder an diesen haften. Dieses Ziel erfordert die Entwicklung und Anwendung von genauen und recheneffizienten quantenmechanischen Simulationsmethoden zur Beschreibung solcher Materialien. Der methodische Schwerpunkt liegt dabei auf der Implementierung eines rechnerisch effizienten und genauen Dichtefunktionaleinbettungsschemas und dessen Kopplung mit wellenfunktionsbasierten Methoden und der (Echtzeit-)zeitabhängigen Dichtefunktionaltheorie.

Müller C., Sharma M., Sierka M. (2020): Real-time time-dependent density functional theory using density fitting and the continuous fast multipole method. *J. Comput. Chem.*, DOI: 10.1002/jcc.26412.

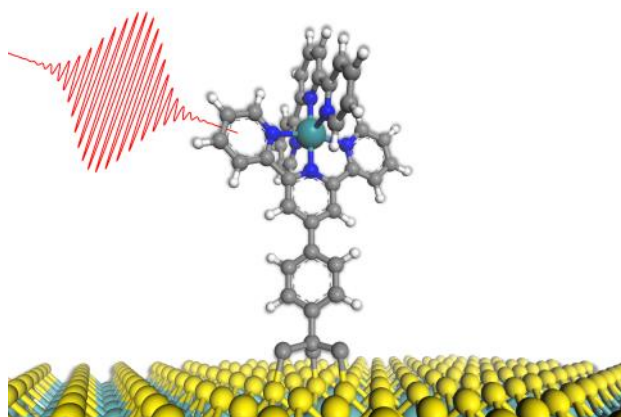


Abb. 3. Die in diesem Projekt entwickelten genauen und recheneffizienten quantenmechanischen Methoden werden zur Beschreibung und Analyse des lichtinduzierten Ladungs- und Energietransfers zwischen Oberflächen und gebundenen oder adsorbierten Molekülen eingesetzt.

## Theoretisch-Physikalisches Institut (TPI)



Foto: Jan-Peter Kasper

**Institutsdirektor: Prof. Dr. Bernd Brügmann**

**Lehrstuhl für Theoretische Physik/Quantentheorie**

Prof. Dr. Andreas Wipf

**Lehrstuhl für Quantentheorie (ehemals Heisenberg-Professur)**

Prof. Dr. Holger Gies

**Lehrstuhl für Theoretische Physik/Gravitationstheorie**

Prof. Dr. Bernd Brügmann

**Lehrstuhl für Theorie korrelierter Quantensysteme in intensiven Feldern (am Helmholtz-Institut Jena)**

Prof. Dr. Stephan Fritzsche

**Professur für Raumzeit und Materie**

Prof. Dr. Martin Ammon

**Professur für Gravitationstheorie**

Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi

**Dozentur für Relativistische Astrophysik**

apl. Prof. Dr. Reinhard Meinel

**Adresse:** Fröbelstieg 1 (Abbeanum), 07743 Jena

**Homepage:** [www.tpi.uni-jena.de](http://www.tpi.uni-jena.de)

## Lehrstuhl für Quantentheorie

### Prof. Dr. Andreas Wipf

#### Forschungsschwerpunkte

- Relativistische fermionische Systeme in 2+1 Dimensionen: Analytische Untersuchung und Simulation von 4-Fermi Theorien auf einem Raumzeit Gitter. Relevant für Quantensysteme von wechselwirkenden Fermionen mit Phasenübergängen. Anwendungen auf Materialien mit Dirac Punkt(en).
- Inhomogene Kondensate in fermionischen Theorien bei endlicher Baryondichte: Untersuchungen, ob in 1+1 Dimensionen die Translationssymmetrie in Gross-Neveu und Nambu-Jona-Lasino Modelle spontan gebrochen werden kann. Relevant für die Zustandsgleichung bei sehr hoher Baryondichte.
- Supersymmetrische Eichtheorien: Berechnung von Teilchenmassen von in der Theorie mit  $N=1$  Supersymmetrie. Relevant für Modelle der Elementarteilchenphysik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik.

#### Forschungsprojekt 1: Die kritische Flavorzahl für Thirring-Modelle

Graphen, topologische Isolatoren und d-Wellen Supraleiter gehören zur Klasse der Dirac-Materialien. Ihre Niederenergie-Eigenschaften werden von einer linearen und damit relativistischen Dispersionsrelation in der Umgebung der Dirac-punkte bestimmt. Wechselwirkungen zwischen den Ladungsträgern werden durch relativistische 4-Fermi Theorien modelliert. Durch Änderung der äußeren Bedingungen oder Systemparameter können Phasenübergänge von einer geordneten Phase mit Bandlücke in eine ungeordnete ohne Bandlücke induziert werden.

Ob Thirring Modelle - dies sind 4-Fermi Theorien mit Strom-Strom Kopplung - einen derartigen Phasenübergang mit spontaner Brechung der Paritätssymmetrie bei starker Kopplung zeigen, war viele Jahrzehnte ein Rätsel. Die Antwort hängt von der Anzahl Fermionen  $N$  (proportional der Anzahl Dirac-Punkte) ab. In einer kürzlich erschienenen Publikation gelang es uns, diese Frage mithilfe von aufwändigen Gittersimulationen zu beantworten. Wir konnten zeigen, dass es für gerade  $N$  keinen Phasenübergang gibt, und für ungerade  $N$  nur für  $N < 9$ . Diese neuen Resultate war nur möglich, weil bei den Gittersimulationen chirale Fermionen eingesetzt wurden, die in unserer Arbeitsgruppe seit etlichen Jahren entwickelt und erfolgreich eingesetzt werden.

J. Lenz, B. Wellegehausen, A. Wipf, Phys. Rev. D 100 (1919) 05450

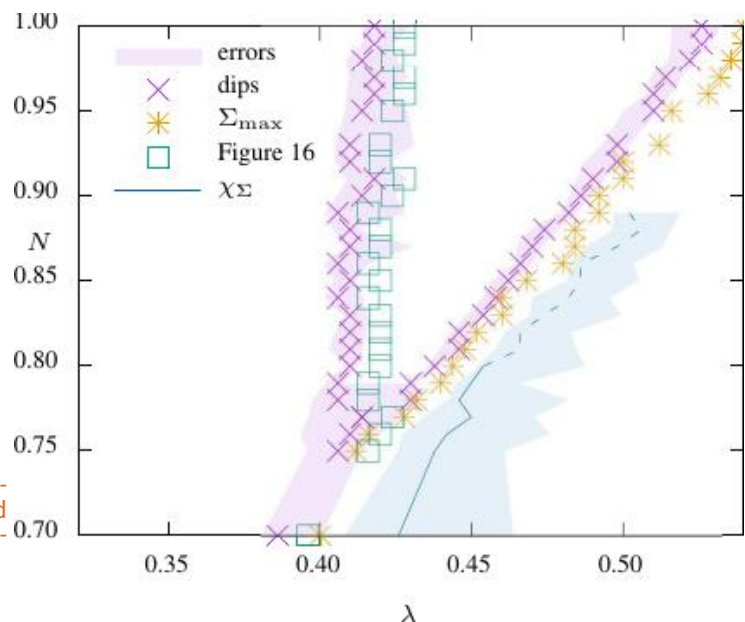


Abb. 1. Bestimmung der Phasengrenzen zwischen spontan gebrochener, symmetrischer und Gitterphase im dreidimensionalen Thirring Modell mit aufwändigen Monte-Carlo Simulationen.



## Forschungsprojekt 2: Inhomogene Phasen in fermionischen Systemen

Bei genügend hoher Baryondichte und tiefer Temperatur kann der Gleichgewichtszustand von wechselwirkenden Fermi-Systemen ein inhomogenes Kondensat aufweisen. Im Rahmen einer relativistischen Quantenfeldtheorie konnte dies bisher nur für 1+1 dimensionale Gross-Neveu (GN) und Nambu-Jona-Lasino (NJL) Theorien für eine asymptotisch große Anzahl  $N$  von Fermion-Spezies bewiesen werden. Es gab überzeugende theoretische Gründe anzunehmen, dass für kleine  $N$  die Translations-Symmetrie nicht gebrochen werden kann. Unsere Arbeitsgruppe, in Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Marc Wagner in Frankfurt, simulierte GN und NJL Modelle in 1+1

Dimensionen bei endlicher Baryondichte und endlicher Temperatur. Simuliert wurde eine Gittertheorie mit chiralen Fermionen, die alle inneren Symmetrien der Kontinuumstheorie aufweist. Wir konnten zeigen, dass Systeme mit  $N=2,8$  und 16 Fermionspezies der Gleichgewichtszustand nicht translationsinvariant ist. Dabei zeigte sich auch, dass sie sich qualitativ ähnlich verhalten wie Systeme mit asymptotisch großem  $N$ .

J. Lenz, L. Panullo, M. Wagner, B. Wellegehausen, A. Wipf, Phys. Rev. D 101 (2020) 094512; Phys. Rev. D 102 (2020) 114501

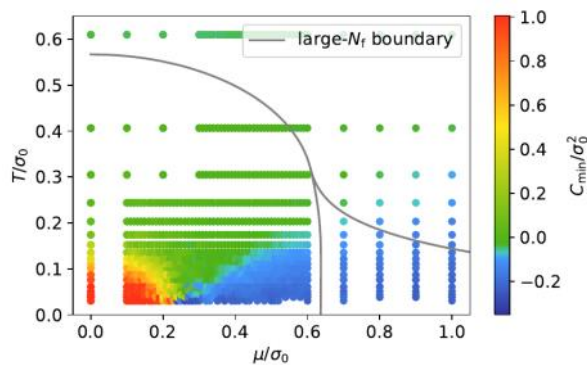


Abb. 2. Bei hoher Baryondichte und tiefer Temperatur ist der Gleichgewichtszustand des GN-Modells inhomogen (blaues Gebiet).

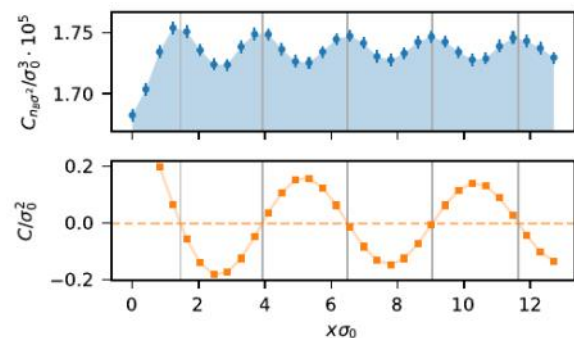


Abb. 3. Das quasi-periodische chirale Kondensat rührt von einem Baryonengitter.

## Forschungsprojekt 3: Spektrum der N=1 Super-Yang-Mills Theorie

Diskretisiert man Feldtheorien mit einer Supersymmetrie auf einem Raumzeitgitter, dann geht die Symmetrie verloren – diese ist nicht verträglich mit einer diskreten Raumzeitstruktur. Die Parameter der Theorie (Massen, Kopplungen, etc.) müssen dann beim Kontinuums-Limes verschwindender Gitterkonstante  $a$  als Funktion von  $a$  so gewählt werden, dass im Limes die Supersymmetrie wiederhergestellt wird. Dies ist das fine-tuning Problem bei der Simulation dieser Theorien. In der Arbeitsgruppe wurde eine neue Gitterformulierung der N=1 Super-Yang-Mills

Theorie mit verdrehten Fermionen konstruiert und derart optimiert, dass das fine-tuning unproblematisch ist. Mit dieser neuen Diskretisierung und dem erstmaligen Einsatz des DdaAMG Multigrad Löser wurde auf den SuperMUC und SuperMUC-NG Rechnern am Leibniz Supercomputing Zentrum die Massen der leichtesten gebundenen Zustände berechnet und supersymmetrische Ward-Identitäten geprüft.

D. August, M. Steinhauser, B. Wellegehausen, A. Wipf, Phys. JHEP 01 (2019) 099;  
M. Steinhauser, A. Sternbeck, B. Wellegehausen, W. Wipf, e-Print 2010.00946

## Professur für Quantentheorie

### Prof. Dr. Holger Gies

#### Forschungsschwerpunkte

Die Arbeitsgruppe untersucht die Theorie einer Reihe von physikalischen Systemen der Elementarteilchen- und Vielteilchenphysik, bei denen wesentliche makroskopische Eigenschaften durch mikroskopische Fluktuationen geprägt werden. Ziel ist es, in Experimenten zugängliche messbare Eigenschaften der Natur aus ersten fundamentalen Prinzipien herzuleiten und bislang unentdeckte Eigenschaften quantitativ vorherzusagen. Spezielle Schwerpunkte sind:

- Starkkorrelierte Quantenfeldtheorien der Hochenergiephysik und Vielteilchenphysik
- Quantenelektrodynamik in starken Feldern

#### Starkkorrelierte Quantenfeldtheorien der Hochenergiephysik und Vielteilchenphysik

Während die fundamentalen Freiheitsgrade der Elementarteilchenphysik in Form von Materiebausteinen und ihrer Wechselwirkungen vergleichsweise einfachen mikroskopischen Gesetzmäßigkeiten gehorchen, beobachten wir makroskopisch eine komplexe Vielfalt von Materieeigenschaften. Der Schritt vom Elementaren zum Komplexen geschieht oft durch die Bildung von zusammengesetzten Freiheitsgraden, durch Bereiche starker Wechselwirkung oder starker Korrelation, deren Beschreibung aus ersten Prinzipien heraus eine große theoretische Herausforderung darstellt. Die aktuelle Forschung bedarf daher einer Vielfalt von theoretischen Methoden, um quantitative Resultate und Vorhersagen zu ermöglichen.

In einer Reihe von Fragestellungen haben wir die moderne Methode der funktionalen Renormierungsgruppe zum Einsatz gebracht und mit Hilfe von analytischen, numerischen und computeralgebraischen Werkzeugen weiterentwickelt. Aktuelle Anwendungsbereiche umfassen die Elementarteilchenphysik des Higgs-Bosons, dass auf mikroskopischer Ebene wesentlich für das Verständnis der Masse des Elektrons und weiterer Elementarteilchen ist, aber auch eine wichtige Rolle bei der Baryogenese, also der Erzeugung der Materie im frühen Universum gespielt haben kann.

Ebenso geht unsere Gruppe intensiv der Frage nach, inwiefern Szenarien einer quantisierten Theorie der Gravitation verträglich mit teilchenphysikalischen Beobachtungen, wie z.B. Existenz und Eigenschaften der Materiebausteine, sind.

So impliziert die einfache Beobachtung, dass Fermionen wie das Elektron oder Quarks vergleichsweise kleine Massen haben, dass quanti-

sierte Gravitation in ihrem ggf. stark-korrelierten Regime nahe oder über der Planck-Skala nicht unbegrenzt stark gekoppelt sein kann. Innerhalb konkreter Szenarien, wie der asymptotisch sicheren Quantengravitation führt dies zu Schranken an die effektive Kopplungsstärke, bzw. im Umkehrschluss zu Schranken an den Materieinhalt teilchenphysikalischer Modelle.

Insbesondere bei den konzeptionellen und methodischen Entwicklungen in unserer Arbeitsgruppe ist die Konstruktion von Hochenergievollständigen Quantenfeldtheorien für fundamentale Physik ein Leitthema unserer Forschungsarbeit. Hierbei steht die Suche nach bzw. die Erforschung von Mechanismen, die zu asymptotisch freien oder asymptotisch sicheren Theorien führen im Zentrum unserer grundlegenden Forschung.

Alle diese Themen stehen beispielhaft für die Forschungsgebiete, die gemeinsam mit Kollegen am TPI Jena und am ITP Leipzig im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 2522 "Dynamics and Criticality in Quantum and Gravitational Systems" ([www.rtg2522.uni-jena.de](http://www.rtg2522.uni-jena.de)) erforscht werden.

M. Reichert, A. Eichhorn, H. Gies, J. M. Pawłowski, T. Plehn: Probing baryogenesis through the Higgs boson self-coupling, *Phys.Rev.D* 97 (2018) 7, 075008, DOI: 10.1103/PhysRevD.97.075008

Holger Gies, Riccardo Martini: Curvature bound from gravitational catalysis, *Phys.Rev.* D97 (2018), 085017, DOI: 10.1103/PhysRevD.97.085017

Holger Gies, René Sondenheimer, Alessandro Ugoletti, Luca Zambelli: Asymptotic freedom in Z<sub>2</sub>-Yukawa-QCD models, *Eur.Phys.J.* C79 (2019), 101, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6604-z



Abb. 1. Kickoff-Meeting des DFG-GRK 2522 in Bad Kösen, Februar 2020.

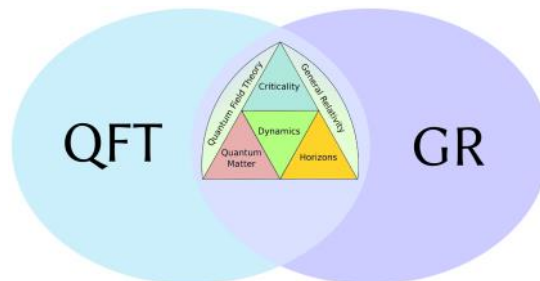


Abb. 2. Struktur des DFG-Graduiertenkollegs 2522 “Dynamics and Criticality in Quantum and Gravitational Systems” an der Schnittstelle zwischen Quantenfeldtheorie (QFT) und Allgemeiner Relativitätstheorie (GR).

### Quantenelektrodynamik in starken Feldern

Quantenfluktuationen können Standardeigenschaften der klassischen Theorien grundlegend ändern. Durch Quantenfluktuationen erhält beispielsweise der Grundzustand der Quantenelektrodynamik – das Quantenvakuum – Eigenschaften, die denen eines Materials ähneln können.

Moderne Hochintensitätslaser eröffnen einen völlig neuen Zugang zur Untersuchung solcher grundlegender physikalischer Fragestellungen. Unsere Arbeitsgruppe erforscht diese neuen Möglichkeiten im Rahmen der DFG-Forschungsgruppe FOR 2783 ([www.quantumvacuum.org](http://www.quantumvacuum.org)) gemeinsam mit experimentell und theoretisch Forschenden aus Jena, Düsseldorf und München.

Im derzeitigen internationalen Wettbewerb auf dem Weg zu einer erstmaligen experimentellen

Entdeckung von Quantenvakuumphänomenen in starken Feldern ist das Verständnis dieser kleinen Quantensignaturen im Vergleich zum oft klassischen Untergrund in konkreten experimentellen Realisierung unabdingbar. Konkrete Rechnungen zeigen in Beispielkonfigurationen, dass Quantensignaturen teilweise in unerwarteten, beispielsweise inelastischen Kanälen dominierend sein können. Mit Hilfe unserer neu entwickelten analytischen wie numerischen Methoden fokussiert sich unsere Arbeitsgruppe daher darauf, Vorhersagen und theoretische Simulationen möglichst nah am Experiment zu erarbeiten, um ebenfalls optimierte experimentelle Konfigurationen und Detektionsverfahren vorschlagen zu können.

Felix Karbstein, Alexander Blinne, Holger Gies, Matt Zepf: Boosting quantum vacuum signatures by coherent harmonic focusing, Phys.Rev. Lett. 123 (2019) 9, 091802, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.091802

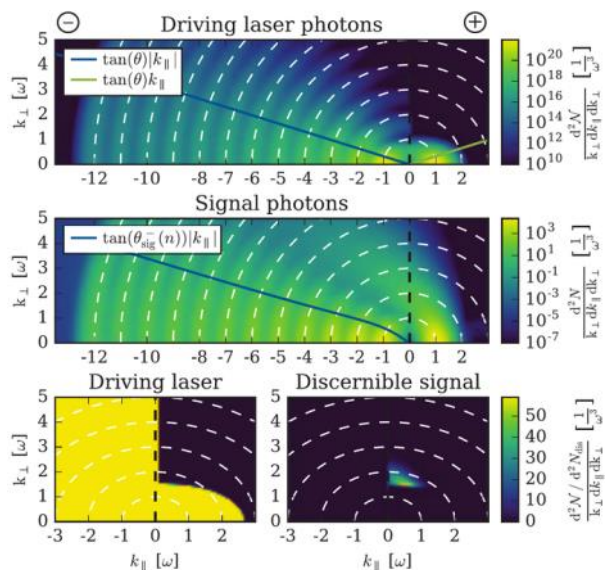


Abb. 3. Theoretische Vorhersagen für Signaturen des Quantenvakuums (“discernible signal”) in starken Fel-

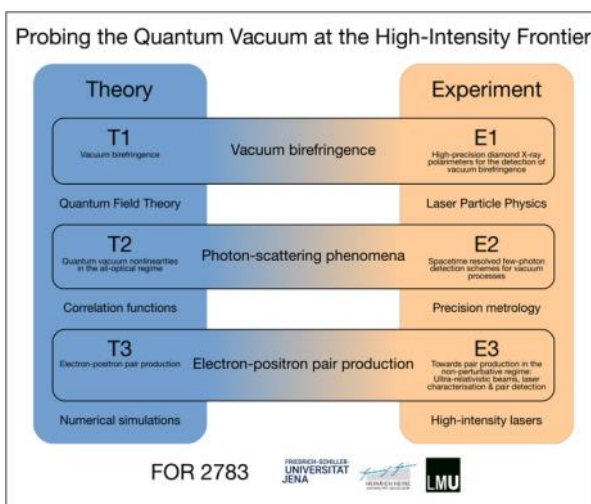


Abb. 4. Struktur der DFG-Forschungsgruppe FOR 2783, [www.quantumvacuum.org](http://www.quantumvacuum.org).

## Professur für Gravitationstheorie Prof. Dr. Bernd Brügmann

### Forschungsschwerpunkte

- Physik und Astrophysik von Schwarzen Löchern, Neutronensternen und Gravitationswellen, insbesondere im Bereich starker Gravitationsfelder, wie sie durch die Allgemeine Relativitätstheorie beschrieben werden
- Numerische und Analytische Methoden in der Relativitätstheorie, die die Lösung der Einstein-Gleichungen für starke Gravitationsfelder ermöglichen
- Computational Physics, High-Performance Computing und Software-Entwicklung für Partielle Differentialgleichungen, Maschinelles Lernen in der Datenanalyse von Gravitationswellen

### Gravitationswellen: 100 Jahre nach Einstein erstmals gemessen

Albert Einstein hatte Gravitationswellen schon 1916 als Konsequenz aus der damals neuen Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Anfang 2016 gab die LIGO Kollaboration in einer vielbeachteten Pressekonferenz bekannt, dass am 14. September 2015 zum ersten Mal ein Gravitationswellensignal direkt gemessen worden ist. Schon 2017 wurde für dieses bahnbrechende Ergebnis der Nobel-Preis in Physik verliehen. Bei dem ersten Signal handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um ein Signal von der Kollision und Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher. Bisher waren solche Ereignisse noch nicht beobachtet worden, waren aber Gegenstand der theoretischen Forschung. Die erzielten Fortschritte in Experiment und Theorie ermöglichen eine neue Astronomie, die Gravitationswellenastronomie.

Die Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Gravitationsphysik beschäftigt sich mit vielfältigen Aspekten der Theorie der Gravitationswellenphysik.

Computersimulationen erlauben es, das Zwei-Körper-Problem der Allgemeinen Relativitätstheorie zu lösen. Dies erfordert einen erheblichen Aufwand in der mathematischen Beschreibung des Problems, und ebenso in der numerischen Methodik, um diese hochkomplexe Problematik einer Lösung auf Supercomputern zuzuführen. Ein wesentliches Ergebnis der Simulation von Schwarzen Löchern und Neutronensternen ist die Vorhersage von Gravitationswellen. In Anbetracht der ersten Beobachtungen ist ein neues, zentrales Thema, die gemessenen Gravitationswellensignale bestimmten astrophysikalischen Ereignissen zuzuordnen.

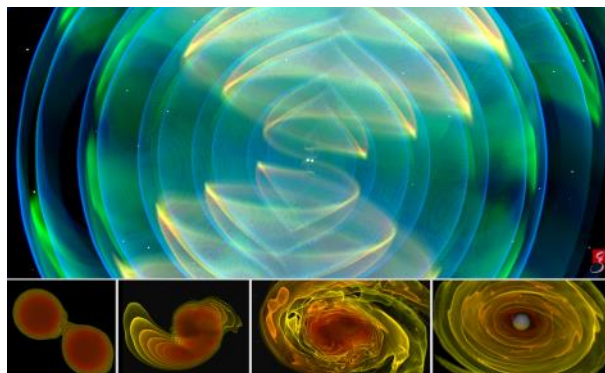
### Gravitationswellen einer Neutronenstern-Kollision

Im August 2017 wurde zum ersten Mal ein Gravitationswellensignal von der Kollision zweier Neutronensterne aufgezeichnet. Während bei Schwarzen Löchern die Geometrie der Raumzeit die Hauptrolle spielt, führt die Kollision der Materie in Neutronensternen zur Erzeugung von schweren Elementen. Nachdem das LIGO (Laser

Interferometer Gravitational Wave Observatory) in den USA und das Virgo-Interferometer in Italien die der Kollision der Sterne vorausgehenden Gravitationswellen aufgezeichnet hatten, richteten Astronomen weltweit ihre Teleskope auf die Galaxie NGC 4993, die sich mit etwa 130 Millionen Lichtjahren relativ nah an unserem Sonnen-



system befindet. Beobachtet wurden der Lichtblitz der Explosion und das tagelange Abklingen der Strahlung, wodurch weitere erhellende Erkenntnisse gelangen. Durch die nach der Sternenkollision ablaufenden Prozesse entstehen schwere Elemente wie Platin und Gold, die in den interstellaren Raum geschleudert werden. Bis vor kurzem ging man davon aus, dass die schweren Elemente von Supernovae stammen, d.h. von der Explosion einzelner Sterne. Die detaillierte Beobachtung einer sogenannten Makronova nach der Kollision von Neutronensternen ist ein fantastisches Ergebnis, weil sie die beobachtete Häufigkeit der schweren Elemente wesentlich besser erklärt als das Modell der Supernovas.



Computersimulation von der Kollision zweier Neutronensterne. Oben: Gravitationswellen (in blau-grün), die während der letzten Orbits der zwei Neutronensterne mit Lichtgeschwindigkeit ausgesandt wurden. Unten: Bei der Kollision wird Materie der Neutronensterne (in gelb-orange) in den Weltraum geschleudert, während sich im Zentrum ein Schwarzes Loch mit Akkretionsscheibe bildet.

Simulation: T. Dietrich (MPI für Gravitationsphysik) und die BAM/Jena Kollaboration.

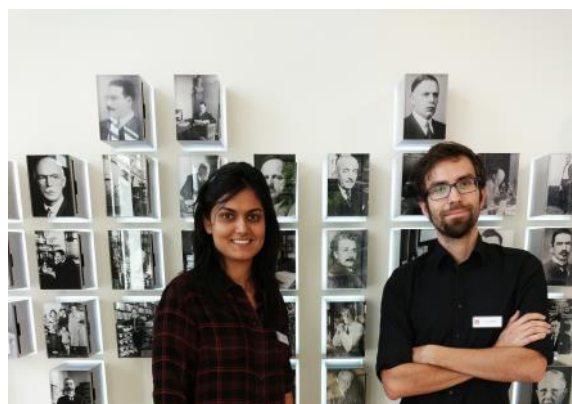
Visualisierung: T. Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno (MPI für Gravitationsphysik)

## Vorhersage von Gravitationswellen

Die jüngsten Entdeckungen in der Gravitationswellenastronomie beruhen zunächst auf möglichst exakten Vorhersagen durch Modelle, die in der Theoretischen Physik u. a. in Jena erarbeitet werden. Für die Kollision von Neutronensternen entwickelt die Arbeitsgruppe von Brüggemann Computerprogramme, die auf einigen der größten Supercomputer Europas laufen.

Daran war auch Dr. Tim Dietrich beteiligt, der in Jena promovierte und einen Promotionspreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, und ebenso den Promotionspreis der Physikalisch-Astronomischen Fakultät erhielt. Dietrich forscht mittlerweile als Juniorprofessor an der Universität Potsdam zur numerischen Relativitätstheorie. Zukunftsweisend war zudem die Dissertation von Reetika Dudi in 2020, Doktorandin im Graduiertenkolleg für Quanten- und Gravitationsfelder in Jena, die an der numerischen Datenanalyse für Gravitationswellen von Neutronensternen arbeitete.

Noch vor Kurzem war das Thema Neutronensterne für die LIGO/Virgo-Kollaboration nur eines unter vielen, bis die verblüffende Entdeckung genau solch einer Quelle die Thematik der Arbeiten von Dietrich und Dudi in den Mittelpunkt des Interesses rückte.



Reetika Dudi und Dr. Tim Dietrich im Harnack Haus, Berlin. (Foto: Privat)

## Lehrstuhl für Theorie korrelierter Quantensysteme in intensiven Feldern

### Prof. Dr. Stephan Fritzsche

#### Forschungsschwerpunkte

- Elektronenstruktur und Dynamik endlicher Quantensysteme, insbesondere Entwicklung relativistischer und quantenelektrodynamischer Methoden für (super-) schwere Elemente
- Atomare Ionisations- und Rekombinationsprozesse nach Innerschalenanregung; Simulation von Photoionisations- und Augerkaskaden.
- Ionisationsdynamik atomarer Systeme in kurzen und intensiven Pulsen; Zusammenarbeit mit experimentellen Gruppen am DESY und XFEL (Hamburg).
- Entwicklung moderner Codes zur atomaren Struktur und Dynamik

#### Atomare Ionisations- und Rekombinationsprozesse in intensiven Feldern

Atomphysikalische Methoden helfen seit vielen Jahren, die Struktur, Wechselwirkung und das Verhalten mittlerer und hochgeladener Ionen besser zu verstehen. In diesen Ionen bewegen sich die Elektronen in starken (Coulomb-) Feldern und oftmals mit zum Licht vergleichbaren Geschwindigkeiten. Theoretische Untersuchungen solcher Systeme in äußeren (Licht-) Feldern erfordert daher leistungsfähige relativistische (Elektronenstruktur-) Programme, die in unserer Gruppe aktiv weiterentwickelt werden.

Paufler W., Böning B and Fritzsche S. (2019): *High harmonic generation with Laguerre-Gaussian beams*; J. Optics. **21** 094001, DOI 10.1088/2040-8986/ab31c3.

Zaytsev V. A., Volotka A. V., Yu D., et al. (2019): *Ab initio QED treatment of the two-photon annihilation of positrons with bound electrons*; Phys. Rev. Lett. **123**, 093401, DOI 10.1103/PhysRevLett.123.093401.

Fritzsche S. (2019); *A fresh computational approach to atomic structures, processes and cascades*; Comp. Phys. Commun. **240**, 1, DOI: 10.1016/j.cpc.2019.01.012.

Perry-Sassmannshausen A., Buhr T., Borovik Jr. A., et al. (2020): *Multiple photodetachment of carbon anions via single and double corehole creation*; Phys. Rev. Lett. **124** 083203, DOI 10.1103/PhysRevLett.124.083203.

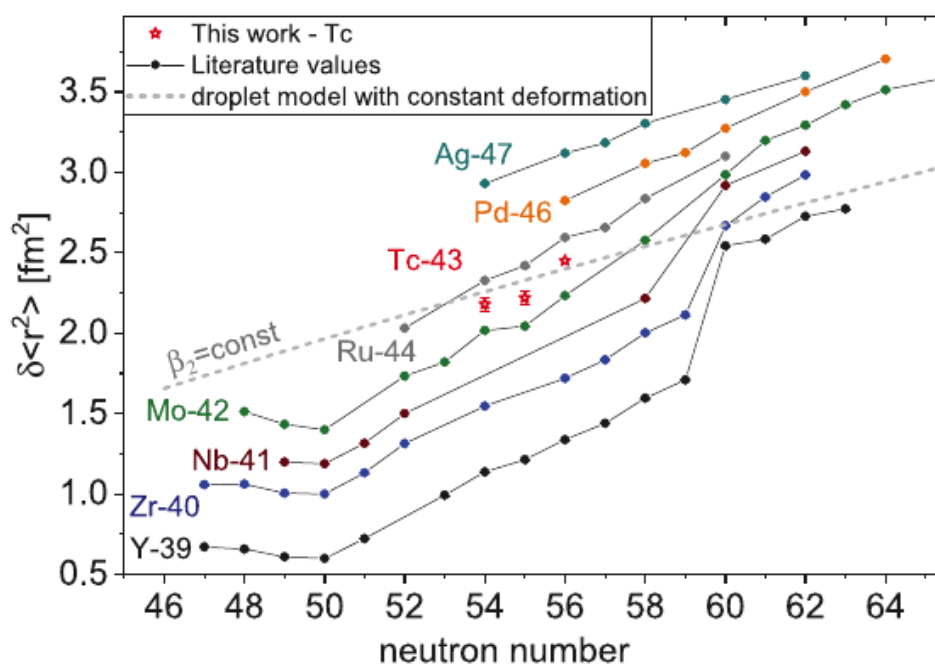


Abb. 1. Änderung der Kernladungsradien nahe zu Tc und Vergleich mit dem Tröpfchenmodell; aus Kron et al. (2020).

## Präzise Vorhersagen für (super-) schwere Elemente

Freie Atome und Ionen weisen mit ihren Spektrallinien ihren ganz eigenen „Fingerabdruck“ auf, der sowohl zur Identifizierung als auch in vielfältigen Anwendungen genutzt wird. Dieser Fingerabdruck entsteht aus der Dynamik der Elektronen in der sogenannten (Elektronen-) Hülle der Atome und ist für viele leichte und mittelschwere Atome in den vergangenen Jahrzehnten sehr detailliert untersucht worden. Die Kenntnis dieser Spektrallinien der Elemente wird heute nicht nur bei der Entwicklung und Charakterisierung neuer Materialien, in der Informationstechnik oder für die Entwicklung neuartigen Lichtquellen genutzt, sondern hilft auch die Grundlagen der Astro- und Plasmaphysik sowie vieler anderer Teilgebieten der Physik besser zu verstehen. In der Kernphysik bspw. helfen präzise laser-spektroskopische Messungen die Multipolmomente und Spins der Kerne zu bestimmen und so mehr über die Stabilität radioaktiver Isotope zu lernen. – Dennoch stellen präzise Vorhersagen zu den Spektrallinien schwerer und offenschaliger Elemente noch immer eine große Herausforderung dar, auch wenn heute oftmals lange Isotopenketten experimentell

erzeugt werden können. In enger Zusammenarbeit mit verschiedenen experimentellen Gruppen am CERN, in Jyväskylä (Finnland), Löwen (Belgien) oder Manchester (UK) führen wir gegenwärtig daher umfangreiche Rechnungen durch, um die Hyperfeinstruktur und Isotopieverschiebung schwerer Elemente besser vorhersagen zu können. Solche winzigen Verschiebungen in den Spektrallinien verschiedener Isotope eines Elementes entstehen vor allem aus der Mitbewegung der Kerne (der sogenannten Massenverschiebung) sowie der Form der Kerne und deren verschiedenen Ladungs- und Magnetisierungsverteilungen; siehe auch Abb. 1.

Barzakh A. E., Cubiss J. G., Andreyev A. N., et al. (2019): *Inverse odd-even staggering in nuclear charge radii and possible octupole collectivity in 217, 218, 219At revealed by in-source laser spectroscopy*; Phys. Rev. C **99**, 054317: DOI: 10.1103/PhysRevC.99.054317..

Kron T., Beerwerth R., Raeder S., et al. (2020), *Hyperfine structure study of 97-99Tc in a new laser ion source for high-resolution laser spectroscopy*; Phys. Rev. C **102**, 34307, 10.1103/PhysRevC.102.034307.

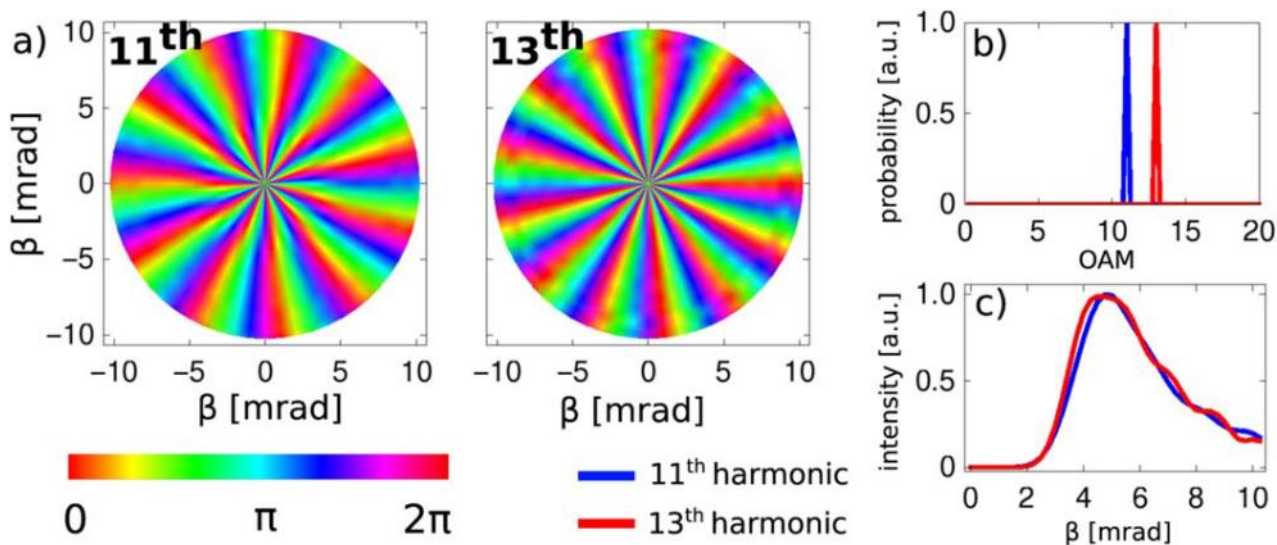


Abb. 2. Erzeugung höherer Harmonischer mit einem linear-polarisierten Laguerre-Gauß Strahl: (a) Phaseprofil der 11. und 13. Harmonischen am Detektor; (b) OAM der 11. (blau) und 13. (rot) Harmonischen im Fernfeld; aus Paufler et al. (2019).

## Professur für Raumzeit und Materie

### Prof. Dr. Martin Ammon

#### Forschungsschwerpunkte

Die Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe liegen einerseits auf fundamentale Einsichten für **Quantenfeldtheorien bei starker Kopplung**, und andererseits auf dem theoretischen Verständnis von **Quantengravitation**. Hierzu werden unter anderem holographische Dualitäten zwischen Quantenfeld- und Gravitationstheorien verwendet. Der Fokus liegt insbesondere auf:

- der Weiterentwicklung dieser holographischen Dualitäten (beispielsweise auf asymptotisch flache bzw. asymptotisch deSitter Raumzeiten)
- der Untersuchung stark gekoppelter Quantenfeldtheorien, insbesondere im Hinblick auf deren Phasendiagramm und der Dynamik fern vom Gleichgewicht.
- den (Quanten-)Gravitationsaspekten holographischer Dualitäten und neue Einsichten in die Quantennatur Schwarzer Löcher.

#### Forschungsschwerpunkte: Dualitäten zwischen Quantenfeld- und Gravitationstheorien

Gravitationstheorien beschreiben die Physik erfolgreich auf kosmischen Skalen und besitzen faszinierende Lösungen wie beispielsweise Schwarze Löcher. Hingegen werden Quantenfeldtheorien verwendet, um die Wechselwirkung der kleinsten Teilchen und Systeme der kondensierten Materie zu beschreiben. Allein aufgrund dieser Fakten ist es umso überraschender, dass man eine Abbildung von Quantenfeld- und Gravitationstheorien finden kann. In anderen Worten: gewisse Quantenfeldtheorien und Gravitationstheorien beschreiben ein- und dasselbe System.

Solche Abbildungen, die auch unter den Bezeichnungen AdS/CFT Korrespondenz bzw. holographische Dualitäten bekannt sind, können im Rahmen von Stringtheorie motiviert werden, in der die fundamentalen Freiheitsgrade nicht mehr punktförmig sind sondern vielmehr kleine Saiten. Die Gravitationstheorie lebt hierbei in einer höherdimensionalen (negativ gekrümmten) Raumzeit, wobei die Extradimension als Energieskala der zugehörigen Quantenfeldtheorie interpretiert werden kann. Dies ist auch schematisch in der Abbildung links dargestellt.

Schwarze Löcher und deren Quantenaspekte spielen eine wichtige Rolle in der AdS/CFT Dualität. Sie erlauben einerseits die Beschreibung stark gekoppelter Quantenfeldtheorien bei endlicher Temperatur und Dichte. Andererseits ermöglicht die AdS/CFT Dualität neue Einsichten in ungelöste Paradoxa im Zusammenhang mit Schwarzen Löchern, beispielsweise in das berühmte Informationsverlustproblem von Hawking.

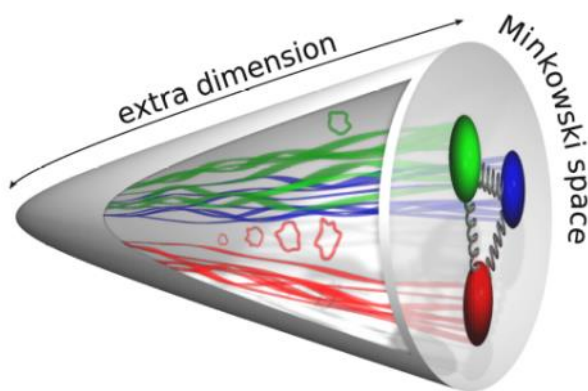


Abb. 1. Schematische Darstellung der AdS/CFT Dualität; die Quantenfeldtheorie wird symbolisiert durch ein Proton bestehend aus drei farbigen Quarks, die Gravitationstheorie durch farbige Saiten.



## Hydrodynamische Beschreibung von Quantenfeldtheorien mit gebrochener Translationsinvarianz

Symmetrien spielen eine wichtige Rolle in der Physik. So manifestieren sich gebrochene Symmetrien in Effekten der Hochenergiephysik und Physik der kondensierten Materie. Ein Beispiel hierfür ist die spontane Brechung der Translationsinvarianz, die im Rahmen der Hydrodynamik viscoelastischer Materialien zu transversalen phononischen Anregungen führt.

Obwohl die hydrodynamische Beschreibung solcher Systeme seit Jahrzehnten als sehr gut verstanden gilt und in bereits vielen Lehrbüchern eingegangen ist, ist es uns gelungen, neue bisher nicht in Betracht gezogene Transportkoeffizienten mittels holographischer Dualitäten zu identifizieren und hierfür eine konsistente hydrodynamische Formulierung zu etablieren.

Des Weiteren haben wir das Wechselspiel zwischen spontaner und expliziter Symmetriebrechung mit Fokus auf die pseudo-spontane Brechung der Translationsinvarianz untersucht mittels neuartiger holographischer Dualitäten für massive Gravitationstheorien. Die Dispersionsrelationen niederenergetischer Anregungen deu-

ten auf eine verallgemeinerte hydrodynamische Beschreibung hin. Eine konsistente Formulierung hiervon steht jedoch gegenwärtig noch aus.

Zur Zeit studieren wir im Rahmen der holographischen Dualität auch das Verhalten fern des Gleichgewichts. Die Ergebnisse deuten auf ein universelles Verhalten für Scheranregungen hin.

Alberte, L., Ammon, M., Jimenez-Alba, A., Baggioli, M., Pujolas, O., (2018): Black hole elasticity and gapped transverse phonons in holography, JHEP, DOI:10.1007/JHEP01(2018)129.

Alberte, L., Ammon, M., Jimenez-Alba, A., Baggioli, M., Pujolas, O., (2018): Holographic Phonons. Phys. Rev. Lett., DOI:10.1103/PhysRevLett.120.171602.

Baggioli, M., Grienering, S., Soltanpanahi, H. (2020): Nonlinear oscillatory shear tests in viscoelastic holography. Phys. Rev. Lett., DOI:10.1103/PhysRevLett.124.081601.

Ammon, M., Baggioli, M., Gray, S., Grienering, S., Jain, A. (2020): On the hydrodynamic description of holographic viscoelastic models. Phys. Lett. B., DOI:10.1016/J.PhysLetB.2020.135691.

### Neue DFG finanzierte Emmy-Noether Nachwuchsgruppe zur Quantengravitation

In den letzten Jahren hat sich Quantengravitation als dritte Säule des Theoretisch-Physikalischen Instituts im Rahmen der Heisenberg -Professur für Raumzeit und Materie etabliert. Die seit Januar 2020 bestehende Emmy-Noether Nachwuchsgruppe unter Leitung von Dr. Sebastian Steinhaus erweitert diese Forschungsaktivitäten.

Die DFG finanzierte Nachwuchsgruppe ist mit Mitteln von mehr als einer Million Euro für sechs Jahre ausgestattet. Neben Dr. Steinhaus werden damit unter anderem ein Postdoktorand sowie zwei Doktoranden beschäftigt.

Der Weg zu einer konsistenten Formulierung der Quantengravitation ist nicht eindeutig, und als Konsequenz existieren viele verschiedene Ansätze.

Dr. Steinhaus erforscht Spin-Schaum-Modelle, im Rahmen derer – im Sinne eines Pfadintegrals – das klassische Konzept einer Raumzeit durch eine Quantensuperposition von Raumzeiten ersetzt wird. Zur numerischen Berechnung werden die „Bausteine der Raumzeit“ diskretisiert; die Summation über alle Raumzeiten wird des Weiteren mit einer Quantenamplitude gewichtet.

Die Emmy-Noether Gruppe beschäftigt sich mit drei eng



Abb. 2. Dr. Sebastian Steinhaus

verknüpften Forschungsfragen im Rahmen der Spin-Schaum-Modelle, die die Dynamik der Theorie, die Berechenbarkeit und numerische Methoden sowie die Observablen und Materiekopplung umfassen.

## Professur für Gravitationstheorie

### Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi

#### Forschungsschwerpunkte

- Gravitationswellen aus der Verschmelzung kompakter Doppelsysteme (Schwarze Löcher und Neutronensterne)
- Numerische Relativitätstheorie und rechnergestützte Astrophysik mit High-Performance Computing
- Astrophysikalische Datenanalyse und Interpretation von Multimessenger-Transienten aus kompakten Doppelsystemen

Der Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die theoretische Modellierung der Kollision von verschmelzenden kompakten Objekten (schwarze Löcher und/oder Neutronensterne) und die Interpretation der Beobachtungen von Gravitationswellen und elektromagnetischen Transienten im Rahmen der Gravitationswellenastronomie. Unsere langjährigen Bemühungen auf diesem Gebiet gipfelten 2017 bei der bahnbrechenden Beobachtung der Multimessenger (d.h. hier Gravitationswellen und Licht) Entdeckung einer binären Neutronensternverschmelzung, welche bei dem Virgo Experiment erstmals nachgewiesen werden konnten. Seitdem wird intensiv weiter geforscht um künftige Beobachtungen vorzubereiten.

Neutronensternverschmelzungen sind ein einzigartiges astrophysikalisches Phänomen, anhand dessen sich die dynamischen und extremen Bedingungen aller fundamentalen Wechselwirkungen untersuchen lassen. Die Beobachtung der von diesen Quellen emittierten Gravitations- und elektromagnetischen Strahlung kann uns Aufschluss geben über: Eigenschaften der Materie bei supra-

nuklearen Dichten, den Ursprung des schwersten Elementes im Universum, die Expansion des Universums und die Natur einiger der energiereichsten astrophysikalischen Ereignisse.

Die Forschungsgruppe untersucht die Verschmelzung von Neutronensternen sowohl theoretisch als auch beobachtungsbasiert mit einem höchst multidisziplinären Ansatz. Das Team entwickelt hochentwickelte ab-initio (3+1)D-Simulationen in der Allgemeinen Relativitätstheorie, sowie detaillierte Gravitationswellenmodelle mittels Analytischer Methoden als auch Bayessche Methoden für astrophysikalische Datenanalysen.

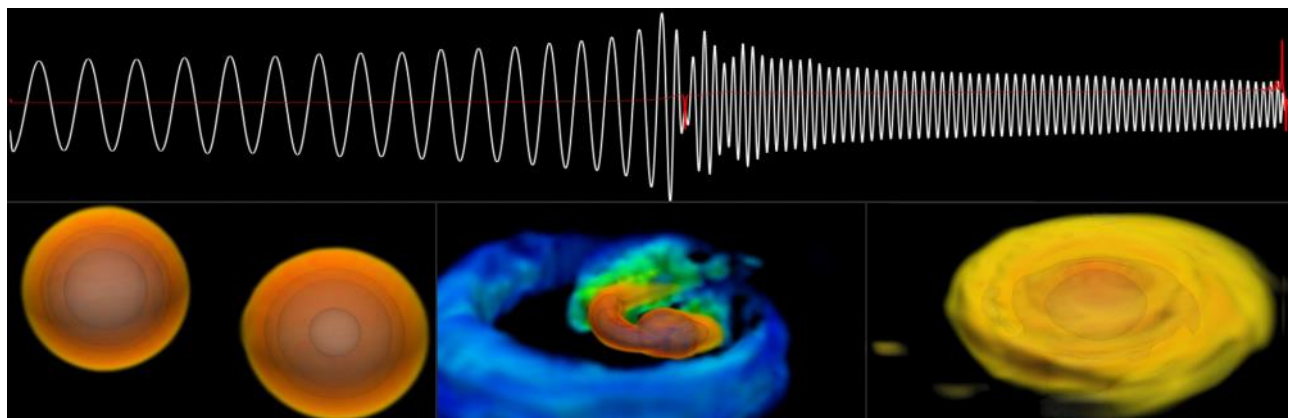


Abb.1 Simulation einer Neutronensternverschmelzung und Gravitationswellen.

## Modellierung des Gravitationspektrums von Neutronenstern-Binären (BinGraSp)

Das vom Europäischen Forschungsrat geförderte Projekt BinGraSp (ERC-StG-2015) hat zum Ziel, detaillierte theoretische Modelle des Gravitationspektrums von Neutronenstern-Binären zu entwickeln. Die Teams arbeiten an neuen, speziellen Methoden für numerischrelativistische Simulationen und kombinieren die Daten der Simulationen mit den fortschrittlichsten analytischen Methoden zur Lösung des Allgemeinen Relativistischen Zwei-Körper-Problems (Abb.2, rechts). Die detaillierte *a priori* Kenntnis der Signale ist essentiell für die Datenanalyse der Beobachtungsdaten und um aus Letzteren Informationen über die fundamentale Physik und Astrophysik zu extrahieren. Die Ergebnisse von BinGraSp sind von zentraler Bedeutung für die Entwicklung der Gravitationswellenastronomie.

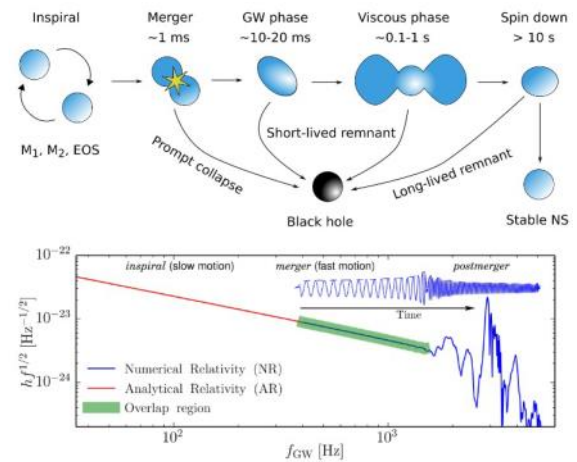


Abb. 2.

## Modellierung von Elektromagnetischen Wellen und Inferenz von Multi-Messenger-Beobachtungen von Neutronensternfusionen (MEMI)

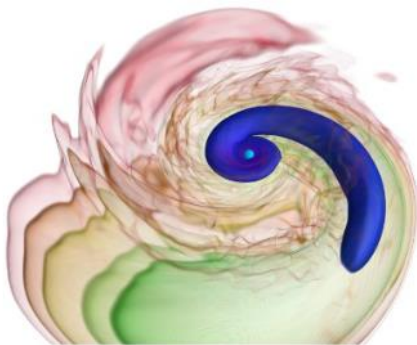


Abb. 3.

Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft ab 2020 geförderte Projekt MeMi setzt die bisherigen Arbeiten zur Modellierung der elektromagnetischen Wellen von Neutronensternverschmelzungen und zur Entwicklung von Methoden

zur Analyse von gemeinsamen Beobachtungen von Kilonovae und Gravitationswellen fort. Das Team entwirft Modelle von Kilonova-Lichtkurven, die auf Simulationen der numerischen Relativitätstheorie basieren (Abb.3, links), und ein Bayes'sches Inferenz-Framework ("bajes", *Bayes'sche Jenaer Software*) um die Beobachtungsdaten zu analysieren. Das Projekt bereitet sich auf die Analyse zukünftiger Ereignisse vor, identifiziert Methoden zur Einschränkung der Zustandsgleichung von Kernmaterie bei extremen Dichten und der Stark-Schwerkraft-Motoren der energiereichsten astrophysikalischen Phänomene, die mit den Fusionsereignissen verbunden sind.

## Virgo und Gravitationswellenastronomie

Die Gruppe ist das erste deutsche Mitglied des Virgo-Experiments, eines der drei Interferometer rund um die Welt, das zusammen mit LIGO die ersten Gravitationswellensignale aufspürt. Wir leiten die PROMETEO-Untergruppe, die sich aus Theoretikern und Astrophysikern verschiedener europäischer Universitäten und Forschungszentren zusammensetzt, und arbeiten im wissenschaftlichen Rat von Virgo mit. Die PROMETEO-Mitglieder unterstützen die Virgo Datenanalyse und die Interpretation der Beobachtungen.



Abb. 4. Virgo (Pisa, Italien)

## Hochschuldozentur für Relativistische Astrophysik apl. Prof. Dr. Reinhard Meinel

### Forschungsschwerpunkte

- Relativistische Gleichgewichtsfiguren: stationäre Konfigurationen rotierender Flüssigkeiten unter dem Einfluss der eigenen Gravitation im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie, relevant für die Modellierung von Neutronensternen
- Quasistationäre Wege zu Schwarzen Löchern: stetiger Übergang von Gleichgewichtskonfigurationen normaler Materie zu Schwarzen Löchern (parametrischer Kollaps), relevant für die Thematik der "kosmischen Zensur"
- Lösung der Einstein-Gleichungen mit Hilfe der "inversen Spektraltransformation": Lösungsverfahren aus der Solitontheorie, anwendbar auf die Vakuum-Einstein-Gleichungen bei Vorliegen geeigneter Symmetrien, relevant für Schwarze Löcher und Gravitationswellen

### Eine neue Lösungsklasse der Einsteinschen Feldgleichungen – erzeugt durch Bäcklund-Transformation

Die allgemein-relativistische Lösung des Problems einer rotierenden Staubscheibe (Neugebauer und Meinel 1995) gestattet einen interessanten Parametergrenzfall, der zu einem Schwarzen Loch, genauer gesagt zur extremen Kerr-Lösung außerhalb des Ereignishorizontes führt ("äußere Perspektive"). Aus der "inneren Perspektive" führt derselbe Parametergrenzfall zu einer Lösung, die eine rotierende Staubscheibe beschreibt, welche von einer Vakuum-Raumzeit umgeben ist, die im räumlich Unendlichen durch die "extreme Kerr near-horizon geometry" (EKNHG) charakterisiert ist.

Ein analoges Verhalten wurde mit Hilfe numerischer Rechnungen auch für rotierende Flüssigkeitsringe gefunden.

Das war unsere Motivation für die systematische Suche nach Vakuum-Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen mit EKNHG-Asymptotik. Zu diesem Zweck haben wir die EKNHG-Lösung selbst als Ausgangslösung für die Methode der Bäcklund-Transformation verwendet. Diese ursprünglich für die sogenannte Sinus-Gordon-Gleichung entdeckte Methode ist auch auf die Einsteinschen Vakuum-Gleichungen im Falle von Axialsymmetrie und Stationarität anwendbar (Harrison 1978, Neugebauer 1979).

Wendet man die Bäcklund-Transformation mehrfach auf die triviale Lösung der Sinus-Gordon-Gleichung an, kann man Multi-Solitonen-Lösungen dieser Gleichung erhalten. Durch mehrfache Bäcklund-Transformation der trivialen Lösung der Einstein-Gleichungen (Minkowski-Raum) kann man Multi-Kerr-Lösungen erzeugen, die im Unendlichen gegen die Minkowski-Geometrie streben und beispielsweise zur Approximation des Außenfeldes rotierender Neutronensterne benutzt werden können.

Durch Anwendung auf die nicht triviale EKNHG-Lösung – dazu musste ein System von Riccati-Gleichungen gelöst werden – konnten wir eine  $3n$ -Parameter-Familie ( $n=1,2,3,\dots$ ) von Lösungen der Einsteinschen Vakuum-Gleichungen gewinnen, die im Unendlichen gegen die EKNHG streben.

Von der weiteren Untersuchung dieser Lösungsklasse erhoffen wir uns neue Einsichten in die Eigenschaften von Grenzübergängen zu Schwarzen Löchern aus der "inneren Perspektive".

Die neuen Lösungen könnten auch für die "Kerr-CFT-Korrespondenz" von Interesse sein.



## Neues Lehrbuch: Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie für Bachelorstudenten

Im Zeitalter der Gravitationswellenastronomie ist es wünschenswert, dass neben der speziellen endlich auch die allgemeine Relativitätstheorie in die Standardausbildung des Physikstudiums integriert wird. Das nun bereits in zweiter Auflage vorliegende Lehrbuch zeigt einen Weg auf, wie dies gelingen kann.

Die ersten beiden Teile des Buches entsprechen einer Vorlesung, die der Autor seit 2007 regelmäßig für Bachelorstudenten im fünften Semester hält (wöchentlich zwei Stunden Vorlesung und zwei Stunden Übung). Diese Vorlesung kann von allen Studenten im Anschluss an die Vorlesungen zur Theoretischen Mechanik und Elektrodynamik gut verstanden werden. Die spezielle Relativitätstheorie (Teil I) beansprucht etwa ein Drittel der Vorlesung, die restlichen zwei Drittel stehen für die allgemeine Relativitätstheorie zur Verfügung (Teil II).

Im dritten Teil des Lehrbuches werden mathematische Methoden dargestellt, mit denen einige anspruchsvolle physikalische Probleme im Rahmen der Einsteinschen Gravitationstheorie analytisch gelöst werden können.

Überblick über den Inhalt:

### Teil I Spezielle Relativitätstheorie (SRT)

- Einführung
- Der Minkowski-Raum – Die Raumzeit der SRT
- Lorentz-Transformationen
- Vierervektoren und Vierertensoren
- Relativistische Punktmechanik
- Andere Teilgebiete der Physik im Rahmen der SRT

### Teil II Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

- Grundideen
- Geometrie der Raumzeit
- Physik in der gekrümmten Raumzeit
- Die Einsteinschen Feldgleichungen
- Der Newtonsche Grenzfall
- Die Schwarzschild-Lösung
- Die klassischen Effekte der ART
- Kugelsymmetrische Sternmodelle
- Die Schwarzschild-Lösung als Schwarzes Loch
- Das Wirkungsprinzip der ART
- Ausblick

### Teil III Ergänzungen für Fortgeschrittene

- Mathematische Methoden
- Rotierende und elektrisch geladene Schwarze Löcher



Das Buch enthält eine Vielzahl von Übungsaufgaben mit ausführlich dargestellten Lösungen und ist auch zum Selbststudium geeignet.

Der für die zweite Auflage aktualisierte und erweiterte letzte Abschnitt von Teil II gibt einen Ausblick auf die Themen Gravitationswellen und Kosmologie sowie das Problem der Quantengravitation. Das sind Gebiete, die in Jena im Rahmen des Masterstudiums vertieft werden können.

Teil III enthält eine noch in keinem anderen Lehrbuch zu findende physikalische Herleitung der berühmten Kerr-Newman-Lösung, die ein rotierendes und elektrisch geladenes Schwarzes Loch beschreibt. Dieser Teil kann gegebenenfalls auch als Grundlage eines anspruchsvollen Oberseminars im Masterstudium verwendet werden.

Meinel R. (2019): Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie für Bachelorstudenten, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin, xi + 311 Seiten, DOI 10.1007/978-3-662-58967-0.

## **Arbeitsgruppe Fachdidaktik der Physik und Astronomie (PAD)**



**Arbeitsgruppenleiter: Prof. Dr. Holger Cartarius**

**Professur für Physik und ihre Didaktik**

Prof. Dr. Holger Cartarius

**Heraeus-Seniorprofessur für Physik- und Astronomiedidaktik**

apl. Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze

**Lehrstuhl für Geschichte der Physik mit Schwerpunkt Wissenschaftskommunikation**

Prof. Dr. Timo Mappes (Gründungsdirektor des Deutschen Optischen Museums)

**Adresse:** August-Bebel-Str. 4, 07743 Jena

**Homepage:** [www.physik.uni-jena.de/didaktik](http://www.physik.uni-jena.de/didaktik)



## AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie

### Prof. Dr. Holger Cartarius, Sen.-Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze

#### Forschungs- und Arbeitsschwerpunkte

- Didaktische Rekonstruktion mit Fokus auf Lehreinheiten zur modernen Physik, Astronomie und Kosmologie in der Schule und an außerschulischen Lernorten
- Studieneingangsphase, Mathematikausbildung und professionsorientierte Ergänzung der theoretischen Physik im Physik-Lehramtsstudium
- Integration des Schülerlabors in Ausbildung der Lehramtsstudierenden, Entwicklung neuer Lehrmittel und -konzepte

#### Moderne Physik, Astronomie und Kosmologie

Der größte Teil der Forschung der Arbeitsgruppe konzentriert sich auf die Vermittlung moderner Physik sowie Themen der modernen Astronomie und der Kosmologie mit Fokus auf Schülerinnen und Schülern.

Das Angebot unseres Schülerlabors soll auf die nichtklassische Physik ausgedehnt werden. Dazu werden in ersten Projekten Analogexperimente aus dem Themenbereich der Relativitätstheorie entwickelt, welche den Schülerinnen und Schülern verschiedene Aspekte der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie veranschaulichen und näherbringen sollen. Eine neu entwickelte Arduino-basierte relativistische Uhr soll Schülerinnen und Schülern ermöglichen, die relativistischen Effekte der Zeitdilatation, Längenkontraktion und Massenzunahme zu untersuchen.

Die Astronomie ist, wie durch Studien belegt ist, eines der Fächer, das Schülerinnen und Schüler sowie Studierende gleichermaßen fasziniert. Daher ist es Ziel einer weiteren Arbeit, Unterrichtsmaterialien zu den

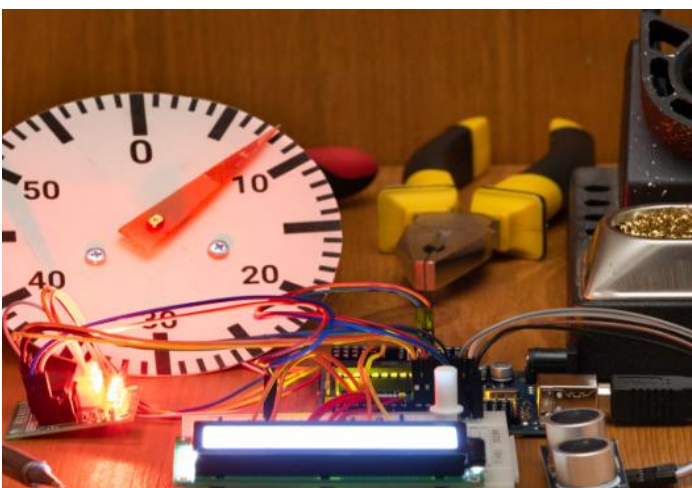
Themenfeldern der dunklen Materie und der Gravitationslinsen zu entwickeln, wobei nach Möglichkeit auch experimentelle Aspekte einbezogen werden sollen. Diese kosmologischen Themen können sehr effektiv eingesetzt werden, um Inhalte der Schullehrpläne aus der Mathematik- und Physik zu üben, zu vertiefen und sie auf reale astrophysikalische Probleme anzuwenden. Es hat sich gezeigt, dass solche Anwendungen langfristiges Wissen fördern und die Entwicklung wichtiger Fähigkeiten stimulieren.

In einer ähnlich motivierten Arbeit werden Mathematikaufgaben für die Klassen 5–10 an Gymnasien entwickelt, die ausschließlich Gegenstände und Problemstellungen der Astronomie benutzen, um mathematische Kompetenzen zu trainieren. Auf diese Weise profitiert die Mathematik vom hohen Interesse an der Astronomie. Genauso profitiert aber auch die Astronomie, da in vielen Bundesländern kaum astronomische Inhalte gelehrt werden und dadurch mehr astronomisches Wissen verankert wird. Die Arbeit gliedert sich in die Ermittlung des Bedarfs, die Auseinandersetzung mit Kriterien für Lehrbuchaufgaben, und den Hauptteil, der aus der didaktischen Rekonstruktion von Themen der modernen Astronomie für die Aufgaben besteht. Weiterhin soll eine Lehrerfortbildung ausgearbeitet werden.

J. Schneider, H. Cartarius—Experimente und Lerneinheiten zur modernen Physik im Schülerlabor—Untersuchung der Zeitdilatation mit einer relativistischen Uhr—In: Frühjahrstagung Bonn 2020, V. Nordmeier, H. Grötzebach (Eds.) *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, pp. 423-427 (2020)

K.-H. Lotze, S. Simonato—Gravitational Lensing as Focal Point for Teaching General Relativity—In: *Teaching Einsteinian Physics in Schools*, Routledge – Taylor and Francis Group (erscheint 2021)

E. Hammer, H. Cartarius – Astronomie im Mathematikunterricht—Aufgaben für Mathematikschulbücher der Sekundarstufe I – In: Frühjahrstagung Bonn 2020, V. Nordmeier, H. Grötzebach (Eds.) *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, pp. 29-34 (2020)



Entwicklung einer Arduino-basierten relativistischen Uhr  
Foto: F. Eberhardt



## Hochschuldidaktik Theoretische Physik

Interaktive sowie aktivierende Lehrkonzepte (Peer Instruction, Worked Examples und multiple externe Repräsentationen) haben sich im Schulunterricht oder in universitären Einführungsvorlesungen in der Physik schon lange etabliert. Eine Verbesserung des Lernerfolgs bei Schülerinnen und Schülern, bzw. bei Studierenden mithilfe solcher Lehrkonzepte ist auch hinreichend belegt. In fortgeschritteneren Themenfeldern wie der Theoretischen Physik in den Gebieten Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik und der statistischen Physik gibt es jedoch im deutschsprachigen Raum noch kaum konkrete Umsetzungen dieser Konzepte.

Ziel dieser Arbeit, die in Kooperation mit der Universität Stuttgart entsteht, ist es, mit den interaktiven und aktivierenden Lehrmethoden neue Zugänge zur theoretischen Physik und dem dazugehörigen mathematischen Formalismus zu entwickeln und Studierenden bzw. Hochschulleh-



Tafelanschrieb zu Kugelkoordinaten

Foto: F. Eberhardt

renden anzubieten.

P. Scheiger, R. Nawrodt, H. Cartarius – Interaktive und aktivierende Lehrkonzepte in der Theoretischen Physik – In: Frühjahrstagung Bonn 2020, V. Nordmeier, H. Grötzebauch (Eds.) PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, pp. 77-83 (2020)

## Outreach, Veranstaltungen und Fortbildungen

Die Arbeitsgruppe betreibt das **Schülerlabor** der Physikalisch-Astronomischen Fakultät. In den letzten 3 Jahren konnten wir 1997 Besucher verbuchen. Dabei werden Versuche vom Grundschul- bis zum Oberstufenniveau angeboten. Als besonderes Angebot werden Versuche und Messmöglichkeiten zur Verfügung gestellt, die in der Schule nicht gegeben sind (z. B. Schülerversuche zur Radioaktivität, parallele Versuche zum Oszilloskop, etc.) Die Versuche werden in Absprache mit uns passend zum Unterricht, Anlass des Besuches und Vorkenntnissen der Schülerinnen und Schüler individuell ausgewählt. Das Schülerlabor wird durch unsere Studierenden im Lehramt betreut und ermöglicht so unmittelbar realistische Übungsphasen.

Als besonderes Highlight wurden zahlreiche Versuche zur **Langen Nacht der Wissenschaften 2019** mit den Besuchern gemeinsam durchgeführt. Mehr als 500 Besucher kamen an diesem

Abend in die Räume der Arbeitsgruppe.

Das 1. **MINT-Festival 2018** war ein voller Erfolg. Das Wissenschaftsfestival rund um die MINT-Disziplinen wurde von der Arbeitsgruppe mit zahlreichen Workshops unterstützt. Es richtet sich hauptsächlich an Schulklassen.

Im Rahmen der Wilhelm und Else Heraeus-Seniorprofessur fanden 2018 und 2019 **bundesweite Lehrerfortbildungen Astronomie** in Jena sowie 2019 eine **Heraeus Sommerschule**

„**Astronomy from four perspectives**“ in Jena statt.

Sie war die einzige Tagung in Deutschland, die dem 100-jährigen Jubiläum des ersten Nachweises der allgemeinrelativistischen Lichtablenkung gewidmet war.

Ziel war es, einem breiten Publikum aus Lehrern und Studierenden moderne Aspekte der Astronomie zu vermitteln und in den wissenschaftlichen Austausch zu treten.



Veranstaltung: Lange Nacht der Wissenschaften 2019 Foto: F. Eberhardt

# Lehrstuhl Geschichte der Physik mit Schwerpunkt Wissenschaftskommunikation

## Prof. Dr.-Ing. Timo Mappes

### Forschungsschwerpunkte

- Experimentelle Replikation der Meilensteine in der Entwicklung der Optik & Photonik: Charakterisierung der Weitfeldmikroskopie bei 275 nm sowie die dabei erfolgte Entdeckung der Autofluoreszenz in der Mikroskopie. Leistungsfähigkeit der Immersionsobjekte in der Mikroskopie vor 1900.
- Physikalische Charakterisierung historischer Optiken: Untersuchungen zur Performanz historischer Mikroskopoptiken mit dem Ziel die Qualität historischer gezeichneter Strukturen zu evaluieren. Lens-Mapping historischer Brillengläser um Aufschluss über Herstellung, Verbreitung und Anwendung zu erhalten.
- Edutainment als Form der Wissenschaftskommunikation: Leitgedanke, Konzeption, Aufbau und Erprobung im Feldversuch von didaktisch optimierten Mitmachstationen im Museumskontext zur Wissensvermittlung optischer Phänomene. Konzeption von temporären Versuchsaufbauten zur Wissenschaftskommunikation neuester Ergebnisse bei geringem Budget.

### Experimentelle Replikation der Meilensteine der Entwicklung der Optik & Photonik

Mit einem experimentellen Aufbau unter Einsatz historischer Optiken (Abb. 1) wurde die UV-Mikroskopie bei  $\lambda = 275$  nm unter Verwendung von Fotografieverfahren repliziert. Experimentell wurde die damaligen Limitierung der Leistungsfähigkeit der Bildgebung dieser Optiken im Kontrast der eingesetzten Fotoplatten nachgewiesen. Mit modernen CCD-Kameras wurde ferner belegt, dass Details der Testobjekte im Bereich der Auflösungsgrenze im Weitfeld bei  $d = 145$  nm des eingesetzten UV-C liegen.

Köhler, August (1904): Eine mikroskopische Einrichtung für ultraviolettes Licht und damit angestellte Untersuchungen organischer Gewebe. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft VI (15/16): 271-278



Abb. 1. Monochromat für die Mikroskopie bei 275 nm von Carl Zeiss Jena aus dem Jahre 1907

### Leitprinzip der Dauerausstellung D.O.M.

Mit den Erfahrungen aus der Entwicklung von Verkaufsprozessen und robusten physikalischen Demonstratoren, welche Laien die Möglichkeit eröffnet optische Systeme jenseits des sichtbaren Spektrums zu charakterisieren [2] entwickelt das Team des Deutschen Optischen Museums (D.O.M.) derzeit die neue Dauerausstellung des D.O.M. Dem Leitgedanken Konfuzius' folgend „erzähl es mir und ich werde es vergessen | zeige es mir und ich werde mich erinnern | lass es mich tun und ich werde es verstehen“ wird die Umsetzung der Ausstellung des D.O.M. durchgängig auf drei Bausteinen fußen:

(1) Interaktive Demonstratoren: als Mitmachstationen zum Begreifen des optischen Effekts (erlebte Experimente) bzw. alltäglicher optischer Phänomene und ausgewählter optischer Effekte, in Form des Edutainments einer Erlebniswelt. Das D.O.M. wird hier keine Effekthascherei betreiben, sondern zielt vor allem auf die Vermittlung des Verständnisses der Inhalte ab.

(2) Aufzeigen der Anwendung: Die in (1) erkannten Effekte sollen in ihrer Umsetzung in (historischen und modernen) Apparaten bzw. Geräten präsentiert und deren Einsatz für den Erkenntnisgewinn aufgezeigt werden. Hiermit wird ein starker Alltagsbezug und eine gesellschaftliche Relevanz vermittelt. Ferner wird die große Bedeutung der Optik transparent, Erkenntnisse in den Lebens- und Naturwissenschaften überhaupt erst zu ermöglichen.

(3) Schaufenster der Optikforschung: In den jeweiligen thematischen Bereichen werden disloziert mindestens ein halbes Dutzend Stationen entstehen, bei denen in jedem Quartal einmal wechselnd und damit ständig aktuelle Inhalte von Nachwuchswissenschaftler\*innen der Optik und Photonik aus ASP und MPSP allgemeinverständlich erklärt werden.

Lappe C, Schaupp P, Mappes T (2018): Method for demonstrating optical properties of lenses for spectacle glasses. US10782540.B2 (granted 2020)

### Edutainment als Form der Wissenschaftskommunikation: Konzeption der Dauerausstellung D.O.M.

Die mit 8,875 Mio € geförderte Ausstellung des Deutschen Optischen Museums (D.O.M.) entsteht bis 2024 inkl. Museums-Shop und Museums-Café auf gut 3000 m<sup>2</sup> am Carl-Zeiss-Platz in Jena. In 2018-2020 wurden über 60 interaktive Stationen mit realen Experimenten grob konzipiert. In den folgenden Jahren werden sie umgesetzt – der allergrößte Teil davon wird eigens durch das Team des D.O.M. und seine Partner neu entwickelt und iterativ getestet, um die optimale Wissenschaftskommunikation als Edutainment zu garantieren.

Erste konkrete Planungen gewähren einen Eindruck der neuen Ausstellung. So wird das Monumentalgemälde „Fraunhofer erklärt seinen Freunden den Spektrometer“ von Rudolph Wimmer als Dauerleihgabe im D.O.M. zu sehen sein. Vor diesem Gemälde wird auf ungefähr 2 Metern Länge das Spektrum des Sonnenlichts gezeigt werden – eingespiegelt über einen dem Sonnenverlauf folgenden Spiegel (Heliostat) und zerlegt mit einem Diffraktionsgitter. Alle paar Minuten wechselnd bzw. besonders an bewölkten Tagen und des Abends wird ein kontinuierliches bzw. diskretes Spektrum zerlegt dargestellt werden. Zusätzlich können moderne Lichtquellen durch ein historisches Spektroskop betrachtet werden. Dies ist zwar in der konservatorisch korrekten Umsetzung aufwändig, doch es erlaubt den Besuchern ein umfassendes Erlebnis jenes Eindrucks, den die Personen auf der Szene vor über 200 Jahren erfuhren (Abb. 2).



Abb. 2. In Planung befindlichen Ausstellungsraumes zur Spektroskopie. Grafik: D.O.M. und studio klv Berlin.



Abb. 3. In Planung befindlichen Ausstellungsraumes mit Glasstreifenproben, Grafik: D.O.M. und studio klv Berlin.

Ferner werden die Besucher\*innen in das weltweit größte Archiv optischen Glases hineintreten können (Abb. 3). Jede Schmelze optischen Glases ist in ihren physikalischen Parametern neu zu bestimmen. Diese Messungen erfolgen an Glasstreifen, die als Messobjekt über viele Jahrzehnte verwahrt wurden. Die aus den Gläsern zu fertigenden Optiken sind in den Parametern der Linsen stets auf das jeweils neue Glas anzupassen. Das Prinzip ist heute das selbe wie vor einem Jahrhundert. Im D.O.M. werden viele zehntausende Glasstreifen konservatorisch ideal gelagert, für die Wissenschaft

zugänglich und für jeden Besucher zu bestaunen sein. Mitten im Glasarchiv stehend werden über einen berührungslos zu steuernden Monitor die Besucher\*innen verschiedene Objekte auswählen können – um aus den abertausenden Glasstreifen genau jene hervorgehoben zu bekommen, die in diesem speziellen Objektiv verbaut wurden. Neben dem großen ästhetischen Reiz macht das D.O.M. so die Nachvollziehbarkeit der Fertigung beeindruckend erlebbar.



## Gemeinsame Berufungen mit außeruniversitären Einrichtungen

Foto: IPHT, Sven Döring



Foto: Helmholtz-Institut Jena



Foto: Thüringer Landessternwarte Tautenburg





***Leibniz-Institut für Photonische Technologien***

**Lehrstuhl für Faseroptik und -sensorik**

Prof. Dr. Markus A. Schmidt

**Lehrstuhl für Wellenleiteroptik/Faseroptik**

Prof. Dr. Tomáš Čížmár

**Lehrstuhl für Festkörperphysik /Quantendetektion**

Prof. Dr. Heidemarie Schmidt

***Helmholtz-Institut Jena***

**Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen (siehe IOQ)**

Prof. Dr. Thomas Stöhlker

**Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung (siehe IOQ)**

Prof. Dr. Matt Zepf

**Lehrstuhl für Theorie korrelierter Quantensysteme in intensiven Feldern (siehe TPI)**

Prof. Dr. Stephan Fritzsche

***Thüringer Landessternwarte Tautenburg***

**Lehrstuhl für Astronomie**

Prof. Dr. Artie Hatzes

***Deutsches Optisches Museum (D.O.M.)***

**Lehrstuhl für Geschichte der Physik mit Schwerpunkt Wissenschaftskommunikation (siehe PAD)**

Prof. Dr. Timo Mappes (Gründungsdirektor des D. O. M.)

## Lehrstuhl für Faseroptik und –sensorik

### Prof. Dr. Markus A. Schmidt

#### Forschungsschwerpunkte

- Untersuchung der Generation von Licht auf Basis von nichtlinearen Wechselwirkungen in mikrostrukturierten hybriden optischen Glasfasern. Der Schwerpunkt liegt derzeit auf der Superkontinuumsgeneration in Flüssigkernwellenleitern zur gezielten Adressierung spezieller Spektralbereiche, welche vorzugsweise im mittleren Infraroten liegen.
- Erforschung und Implementierung neuartiger Sensorkonzepte mittels hybrider Fasern mit dem Fokus auf Detektion einzelner Nanoobjekte wie Viren oder DNA-Fragmente oder dem Einfangen von Mikro- und Nanopartikeln mittels optischer fasereintegrierter Fallen.
- Entwicklung, Untersuchung und Realisierung neuer Faserkonzepte und –typen für Anwendungen im Bereich der Lebenswissenschaften. Derzeit fokussieren sich die Aktivitäten auf on-chip und faserbasierten Wellenleitern zur Erschließung von Spektralbereichen, die mittels üblicher Wellenleiter schwer zugänglich sind.
- Integration von Nanostrukturen auf Faserendflächen wie Metaoberflächen oder plasmonische Resonatoren auf Faserendflächen mittels Planarisierung und Elektronenstrahl-Lithographie für verbesserte Fasereinkopplung und Sensorik.

#### Dispersionsanpassung für dispersive Wellen mittels Nanofilmen auf mikrostrukturierten Fasern

Breitbandige Lichtquellen mit hoher Brillanz werden für Anwendungen in der Spektroskopie und optischen Kohärenztomographie benötigt, wobei sich Superkontinuumquellen sehr gut eignen. Das Fundament der ultraschnellen Superkontinuumserzeugung bildet die Dispersion der zugrunde liegenden Faser. Diese kann durch hinzugefügte Resonanzen stark manipuliert werden, wodurch bestimmte Frequenzen maßgeschneidert generiert werden. Das hier verwendete Kon-

zept nutzt die zusätzliche optische Mode in einer dünnen, hochbrechenden Schicht, die nanometerakkurat mittels Atomlagenabscheidung direkt auf dem Kern einer mikrostrukturierten Faser aufgetragen wird und deren Interaktion mit der fundamentalen Kernmode (Abb. 1). Mit der geeigneten Wahl von Schichtmaterial (hier am Beispiel von Titandioxid) kombiniert mit verschiedenen Schichtdicken lässt sich das generierte Spektrum in Hinsicht auf von Nutzern gewünschte Anwendungen im nahen Infrarotbereich (1,1–1,7  $\mu\text{m}$ ) maßschneidern. Die angepasste Schichtherstellung, die auch leichte Dispersionsungenauigkeiten der Basisfaser ausgleichen kann, hat den Vorteil, dass eine iterative Faseroptimierung inkl. Herstellung obsolet wird. Diese Methode lässt nicht nur konstante Schichtdicken, sondern auch Schichtdickengradienten sowie die Verwendung von nichtlinearen 2D-Materialien zu.

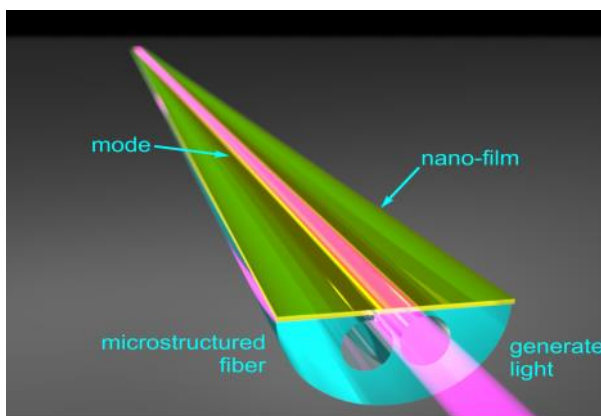


Abb. 1. Mikrostrukturierte Faser mit einer hochbrechenden Nanoschicht auf dem optischen Kern.  
Foto: M. A. Schmidt

T. A. K. Luehder *et al.* (2020), Resonance-induced dispersion tuning for tailoring nonsolitonic radiation via nano-films in exposed core fibers. *Laser & Photon. Rev.*, 10.1002/lpor.201900418

## On-chip Lichtkäfige für integrierte Absorptionsspektroskopie

Anwendungen in der Bioanalytik erfordern integrierte sensorische Elemente mit kleinsten geometrischen Abmessungen und schnellen Reaktionszeiten. Hier stellen Lichtwellenleiter mit Hohlkernen einen vielversprechenden Ansatz aufgrund intensiver Licht-Materie-Wechselwirkung und Lichtführung innerhalb des relevanten Mediums dar. In diesem Artikel wird das Konzept des optofluidischen Lichtkäfigs vorgestellt, welcher eine schnelle integrierte Spektroskopie unter Verwendung einer neuartigen On-Chip-Hohlleiter-Plattform ermöglicht (Abb. 2). Die Wellenleiterstruktur, welche durch 3D-Nanodrucken realisiert wird, besteht aus Polymer-Strängen mit hohem Aspektverhältnis (Einzelstrangdurchmesser  $3\mu\text{m}$ , Länge  $>1\text{cm}$ ), die einen Hohlkern umgeben und das Licht über den Antiresonanz-Effekt über Distanzen von mehreren Zentimeter in Wasser führen. Die wesentlichen Vorteile dieser Struktur hinsichtlich Spektroskopie sind robuste Lichttransmission im Wasserkern, seitlicher Zugang

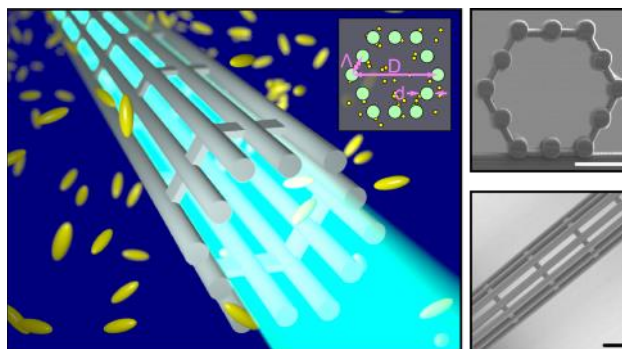


Abb. 2: Der optofluidische Lichtkäfig, welcher für integrierte Absorptionsspektroskopie eingesetzt werden kann. Rechts: Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Lichtkäfigs. Foto: M. A. Schmidt

zum Kern, hohe Überlappung des Feldes mit dem Material im Kern ( $>99,9\%$ ) und flexible Implementierung durch 3D-Nanodrucken.

Kim J. et al. (2020) The optofluidic light cage – on-chip integrated spectroscopy using an anti-resonance hollow core waveguide. *Anal. Chem.*, 10.1021/acs.analchem.0c02857

## Tracking und Analyse der Brownschen Bewegung von diffundierenden Nano-Objekten in Hohlkernfasern

Die Charakterisierung von Nano-Objekten in natürlicher Umgebung stellt ein Forschungsziel in der Bioanalytik, Medizin und Mikrorheologie dar. Die Nanopartikel-Tracking-Analyse (NTA) spielt eine Schlüsselrolle, da sie die nicht-invasive und schnelle Detektion und Analyse von nanoskaligen Objekten ermöglicht. Hierfür werden die zu untersuchenden Partikel in Wasser gelöst und anschließend in eine Hohlkernfaser gefüllt (Abb. 3). Durch Einkoppeln von Licht in die Faser werden die Partikel sichtbar, da diese das geführte Licht streuen. Dieses kann durch ein transversal zur Faser stehendes Mikroskop abgebildet werden, sodass die Bewegung der Partikel mit einer Kamera aufgenommen werden kann. Die statische Auswertung der Partikel-Trajektorie erlaubt die Bestimmung des Durchmessers, welche umso präziser wird je mehr Bilder aufgenommen werden. Die Verwendung einer Hohlkernfaser ermöglicht hier im Vergleich zu einer klassischen Petrischale deutlich höhere Bildraten, da die Lichtlinienbeleuchtung eine deutlich höhere Streuintensität gewährleistet. Bisher wurden Gold-Nanopartikel und Viren mit Durchmessern bis zu  $40\text{ nm}$  bzw.  $70\text{ nm}$  gemessen.

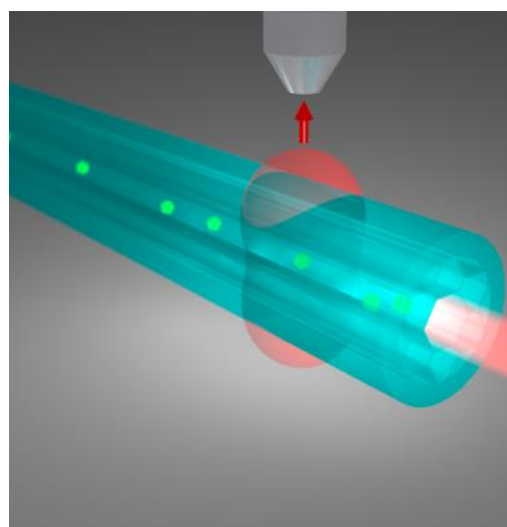


Abb. 3. In Wasser gelöste Nanopartikel (grün) werden in eine optische Hohlkernfaser gefüllt, sodass an ihnen das geführte Licht der Kernmode (rot) gestreut wird. Foto: M. A. Schmidt

Foerster R. et al. (2020). Tracking and analysing the Brownian motion of nano-objects inside hollow core fibers. *ACS Sensors*, 10.1021/acssensors.0c00339

## Lehrstuhl für Wellenleiteroptik/Faseroptik

Prof. Dr. Tomáš Čížmár

### Forschungsschwerpunkte:

- **Untersuchung der Lichtausbreitung in Multimode-optische Fasern**  
Dabei geht es insbesondere um die Fähigkeit, gewünschte Ausgangslichtfelder mit Hilfe von Wellenfrontformungsmethoden zu erzeugen.
- **Nutzung von Multimode-Fasern für die biomedizinische Bildgebung**  
Haarfeine optische Fasern werden als Miniatur-Endoskope eingesetzt, die in große Tiefen von empfindlichen Geweben lebender Organismen vordringen.
- **Optische Manipulation unter Ausnutzung von Faseroptik**  
Optische Fasern bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten, optische Kräfte auf Mikroobjekte einzuwirken. Wir konzentrieren uns insbesondere auf dynamische holografische optische Pinzetten, die durch Ausgänge von Multimode-Fasern erzeugt werden.

### Holographische Endoskopie für die in-vivo-Bildgebung

Die Komplexität der lebenden Materie stellt derzeit das größte Hindernis für die moderne In-vivo-Mikroskopie dar. Stellen Sie sich ein Endoskop vor, das so klein ist, dass es überall im Organismus eingeführt werden kann und dabei nur minimale Schäden verursacht. Die zelluläre Auflösung könnte an jeder beliebigen Stelle im Körper erreicht werden. Das ist es, was wir mit einem Endoskop auf Basis von Multimode-optischen Fasern erreichen wollen. Diese Technologie kann potenziell so weit gehen, dass eine Superauflösung mit Instrumenten erreicht wird, deren Grundfläche mit den Abmessungen einer einzelnen Zelle vergleichbar ist.

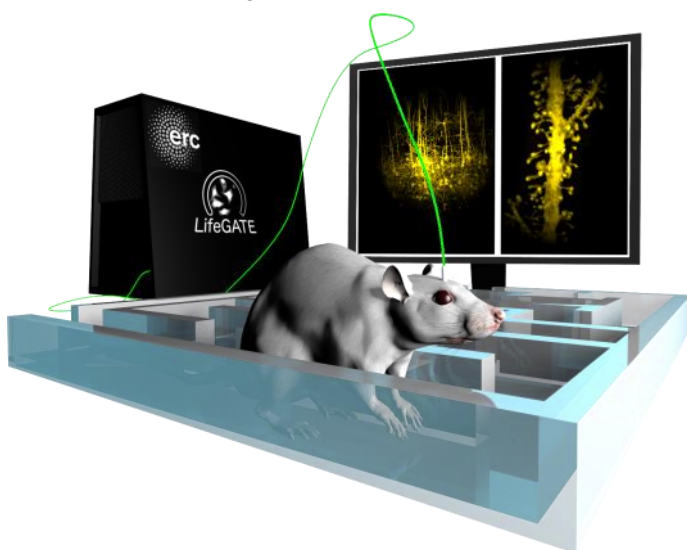


Abb. 1. Illustration eines haarfeinen Endoskops in der Anwendung für Tiefenhirn-Bildgebung am Tiermodell. Bildquelle: Tomas Cizmar

Das Projekt LIFEGATE ("*Holographic super-resolution micro-endoscopy for in-vivo applications*") wird als Consolidator Grant vom Europäischen Forschungsrat (ERC) gefördert. Wir stoßen nun an die fundamentalen und technologischen Grenzen des Ermöglichungsprinzips - holographische Kontrolle der Lichtausbreitung in Multimode-Fasern. Kürzlich eingeführte Methoden zur holographischen Kontrolle der Lichtausbreitung in komplexen Medien ermöglichen in der Tat die Nutzung einer Multimode-Faser als bildgebendes Werkzeug. Basierend auf diesem neuen Ansatz haben wir ein kompaktes System für die Fluoreszenzabbildung an der Spitze einer Faser entwickelt, das im Vergleich zu konventionellen Endoskopen, die auf Faserbündeln oder Gradientenindexlinsen basieren, eine wesentlich geringere Grundfläche sowie eine höhere Auflösung bietet.

Dieses "*Gate-Through-Life*" könnte es uns ermöglichen, mehrere prominente lichtbasierte Bildgebungsmethoden, einschließlich supraauflösender Ansätze, in frei beweglichen Tiermodellen und schließlich im Menschen einzusetzen.

Turtaev S., Leite I.T., Altwegg-Boussac T., Pakan J.M.P, Rochefort N.L., Čížmár T. (2018): High-fidelity multimode fibre-based endoscopy for deep brain in vivo imaging. *Light: Science & Applications* 7, <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0094-x>

Vasquez-Lopez S.A., Turcotte R., Koren V., Plöschner M., Padamsey Z., Booth M.J., Čížmár T., Emptage N.J. (2018): Subcellular spatial resolution achieved for deep-brain imaging in vivo using a minimally invasive multimode fiber. *Light: Science & Applications* 7, <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0111-0>

Trägårdh J., Pikálek T., Šerý M., Meyer T., Popp J., Čížmár T. (2019): Label-free CARS microscopy through a multimode fiber endoscope. *Optics Express* 27, <https://doi.org/10.1364/OE.27.030055>



## Biegeelastische Multimode-Fasern für bildgebende Anwendungen

Endoskope ermöglichen es Ärzten, wie durch ein Schlüsselloch in den Körper eines Patienten zu sehen. Typischerweise werden die Bilder über ein Bündel von mehreren hundert optischen Fasern übertragen. Sie sind der Grund für den relativ großen Durchmesser der Endoskope, der ihren Einsatz in empfindlichen Körperregionen wie dem Gehirn erschwert. Im Projekt wurde ein Weg vorgestellt, Bildinformationen durch haardünne multimodale Fasern nahezu verzerrungsfrei zu übertragen - selbst wenn die Faser geknickt wird. Dies ist eine Herausforderung, da bei der Biegung einer typischen Multimode-Faser das übertragene Bild zufällig und bis zur Unkenntlichkeit verzerrt wird. Frühere Studien haben gezeigt, dass eine solche Verschlechterung theoretisch vorhergesagt werden kann und das Abbildungsverfahren entsprechend korrigiert werden kann. Da dies eine eher mühsame Aufgabe ist, konzentrierte sich dieses Projekt auf die Verbesserungen der Faser selbst und machte sich daran, verschiedene Typen von optischen Fasern sowohl theoretisch als auch experimentell zu untersuchen. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die Signalübertragung in Fasern mit einem perfekt parabolischen Profil des Brechungsindex fast vollständig immun gegen Bewegung und Biegung ist. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass Fasern von ausreichender Qualität derzeit nicht kommerziell verfügbar sind. Die vor-

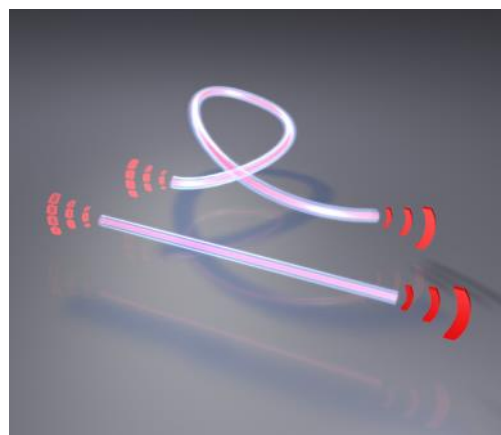


Abb.2. Biegeelastische Multimode-Fasern  
Bildquelle: Leibniz-IPHT

liegende Forschung beschäftigt sich daher mit der Entwicklung von Fasern mit verbesserten optischen Eigenschaften und deren Anwendung für die medizinische Bildgebung.

Boonzajer-Flaes D.E., Stopka J., Turtaev S., De Boer J.F., Tyc T., Čižmár T. (2018): Robustness of light-transport processes to bending deformations in graded-index multimode waveguides. *Physical review letters* 120, 10.1103/PhysRevLett.120.233901  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.233901>

## Faserbasierte holographische optische Pinzetten für in-vivo-Anwendungen

Optische Fallen sind hoch fokussierte Laserstrahlen, mit denen mikroskopische Objekte, wie Bakterien, Zellen oder DNA-Stränge, eingefangen, bewegt und untersucht werden können. Solche Pinzetten aus Licht sind im biomedizinischen Bereich seit mehreren Jahrzehnten etabliert, doch aufgrund der relativ sperrigen Optik, die in ihren Geometrien verwendet wird, konnten Forscher Biomoleküle und ihre Funktion bisher nur in-vitro, also außerhalb der natürlichen Umgebung des lebenden Organismus, untersuchen.

In diesem Projekt ist es erstmals gelungen, dynamische Muster von optischen Fallen durch haarfeine Multimode-Fasern zu erzeugen. Ermöglicht wurde dies durch verbesserte optische Fasern, die eine viel feinere Fokussierung als handelsübliche Typen ermöglichen, sowie durch effiziente holographische Wellenfrontformungsalgorithmen. Mit solchen faserbasierten optischen Pinzetten lassen sich nun dreidimensionale Mikroobjekte in Echtzeit und mit nanometergenauer Ortsauflösung positionieren. Aufgrund ihres geringen Durchmessers können die multimodalen Fasern in lebendes Gewebe und Organismen eindringen, ohne diese signifikant zu schädigen. Wir haben nun die Möglichkeit, optische Pinzetten in bisher unzugänglichen Geweberegionen einzusetzen und Zellbestandteile oder einzelne Moleküle in ihrer natürlichen, komplexen Umgebung zu untersuchen. Dies kann zu einem viel besseren Verständnis von intrazellulären Prozessen, der Me-

chanochemie verschiedener Transportvorgänge und der Synthese genetischer Moleküle führen.

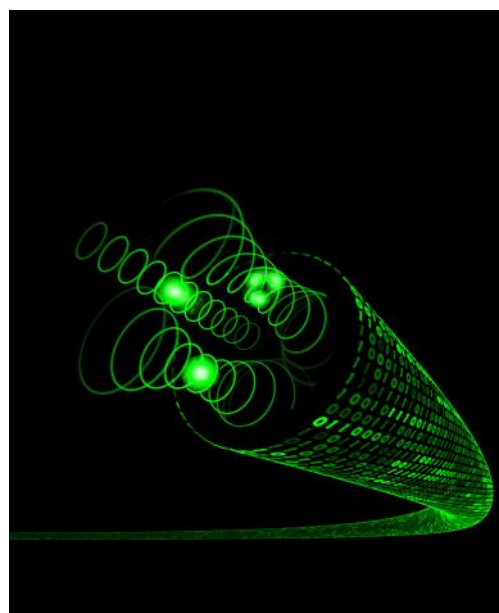


Abb. 3. Cover-Vorschlag Nature Photonics  
Bildquelle: Tomas Cizmar

Leite I.T., Turtaev S., Jiang X., Šiler M., Cuschieri A., Russell P.S.J., Čižmár T. (2018): Three-dimensional holographic optical manipulation through a high-numerical-aperture soft-glass multimode fibre. *Nature Photonics* 12, 33-39, <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0053-8>.

## **Abbe Center of Photonics**

### **Geschäftsführender Direktor (06/20 –05/21):**

### **Prof. Dr. Andreas Tünnermann**

#### **Das Abbe Center of Photonics stellt sich vor:**

- Hochschulzentrum gemäß §27 Abs. 3 Nr. 9 des Thüringer Hochschulgesetzes
- Im Jahr 2010 gegründet
- Mitglieder: 57 Wissenschaftler (principal scientists), darunter 4 Hochschullehrer, die schwerpunktmäßig, jedoch nicht ausschließlich der Physikalisch-Astronomischen Fakultät zuzuordnen sind
- Fakultäts- und disziplinübergreifende Weiterentwicklung der universitären Optik und Photonik in Forschung, Lehre und Transfer und innerhalb der Profillinie LIGHT
- Vernetzung und strategischer Ausbau der vorhandenen Optik- und Photonikkompetenzen am Standort, um um hohe internationale Wettbewerbsfähigkeit in Grundlagen- und angewandter Forschung zu sichern

Die wissenschaftlichen Aktivitäten des ACP sind durch leitende Positionen seiner Mitglieder eng mit dem Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien sowie dem Helmholtz-Institut Jena abgestimmt. Strategische Kooperationen in Forschung und Ausbildung werden zudem mit mehr als 20 Industrieunternehmen, insbesondere der Carl Zeiss AG, unterhalten. Darüber hinaus spielen ACP-Mitglieder in einer Reihe strategischer Forschungs- und Verbundprojekte in der Optik und Photonik, aber auch in peripheren Wissenschaftsgebieten wie den Lebenswissenschaften, eine führende Rolle.

Die Leitung des ACP obliegt einem von den ACP-Mitgliedern aller drei Jahre gewählten, 5-köpfigen Direktorium. Dieses besteht seit der letzten Wahl 2020 aus den Profs. Stefanie Gräfe, Jürgen Popp, Christian Spielmann, Thomas Pertsch und Andreas Tünnermann. Das Amt des geschäftsführenden ACP-Direktors wird durch eine interne Wahl geregelt. Zuletzt am 01.06.2020 wurde dieses Amt von Thomas Pertsch an Andreas Tünnermann übergeben. Das Direktorium wird in seiner operativen Arbeit durch die ACP-Geschäftsstelle unterstützt.

Das ACP wird seit seiner Gründung durch verschiedene Strukturkonzepte, u.a. der Carl Zeiss Stiftung und der Thüringer Landesregierung, gefördert. Maßgeblich war dabei im Zeitraum 2015 bis 2020 die ProExzellenz-Landesförderung des Roadmap-Vorhabens "ACP<sup>2020</sup> – Agenda für Exzellente Photonik" mit einer Förderhöhe von 3,9 Mio. Euro. Eckpfeiler der Agenda waren die flexible, interne Initiierung von sogenannten ACP Explore Forschungsprojekten zur Verbesserung der An-

tragsfähigkeit in strukturierten Förderformaten der DFG und EU, die Einrichtung einer ACP-Nachwuchsgruppe um Isabelle Staude, die 2020 einen Ruf auf eine permanente Professur an der FSU erhielt, die Weiterentwicklung und Verstetigung professioneller Forschungsmanagement-Strukturen, das internationale Gastprofessorenprogramm sowie die Fortschreibung der strategischen Internationalisierung und Digitalisierung des Ausbildungskonzepts.

Inhaltlich definiert sich das ACP über die drei Forschungsschwerpunkte Ultraoptik, Starkfeldphysik und Biophotonik sowie die Lehre, die durch die Abbe School of Photonics vertreten wird. In der Ultraoptik wird in den Bereichen Laserphysik, Nanooptik, Photonische Materialien und Optische Systeme die komplette Kontrolle von Licht in all seinen Eigenschaften angestrebt. Hier hat sich in den letzten Jahren auch die Erforschung optischer Quantentechnologien etabliert. Die Starkfeldphysik widmet sich der Erzeugung von Licht mit extremen Eigenschaften und bei relativistischen Feldintensitäten. Dies umfasst die Wechselwirkung von Materie mit ultrakurzen, intensiven Laserpulsen, nichtlineare und relativistische Laserphysik ebenso wie die Röntgenoptik. In der Biophotonik wird der Einsatz innovativer optischer und photonischer Technologien in den Lebenswissenschaften und in der Medizin vorangetrieben. Der Schwerpunkt Biophotonik schließt beispielsweise neuartige spektroskopische Techniken, die biomedizinische Bildgebung und Mikroskopie sowie die Chip-basierte optische Analytik und Diagnostik ein. Alle drei Forschungsschwerpunkte sind durch die stark internationalisierte Ausbildung der ebenfalls fakultätsübergreifenden



Abb. 1. Einordnung von Abbe Center/School of Photonics innerhalb von LIGHT und strukturierten Förderprogrammen.

**Aktivitäten des Abbe Centers of Photonics**

Auf die zahlreichen Aktivitäten des ACP kann hier nur eine schlaglichtartige Benennung erfolgen. Die Strategiefortschreibung und die wissenschaftliche Ausrichtung des ACP wurden erneut im Rahmen einer jährlichen Zentrumsversammlung vorangetrieben. 2020 konnte bilanziert werden, dass die seit 2015 innerhalb des Landesprogramms „ACP<sup>2020</sup>–Agenda für exzellente Photonik“ laufenden ACP Explore Projekte eine nachweislich hohe Wirkung entfaltet haben. In diesem Format wurden insgesamt 21 Anschubfinanzierungen i.H.v. 60 TEUR bis 100 TEUR für Forschungsprojekte ACP-intern vergeben. Besonders erfreulich war der zunehmende Erfolg der Jenaer Photonik in den strukturierten Förderprogrammen der DFG, was in vielen Fällen durch die synergetischen Effekte und Vernetzungsmechanismen innerhalb des ACPs befördert wurde.

Hier sind ganz besonders die photonischen Beiträge im Exzellenzcluster "Balance of the Microverse", der Sonderforschungsbereichs "NOA – Nonlinear Optics down to Atomic scales" und das "Leibniz Center for Photonics in Infection Research" hervorzuheben. Eine nicht mehr wegzudenkende Rolle und Wirkung hat zudem das Forschungsgebäude „Abbe Center of Photonics“ eingenommen, in dem unter Einbindung vieler Akteursgruppen nun Forschung, Lehre und Transfer tagtäglich Hand in Hand gehen. In der Sitzung des ACP-Beirats am 14.11.2019 hoben dessen Mitglieder die herausragende Entwicklung und jetzige Rolle des ACPs in Forschung und Lehre hervor und gratulierten dem Zentrum zu seiner vielfältig erwiesenen wissenschaftlichen Exzellenz, und wies das Präsidium der FSU zu diesbezüglichen Handlungsempfehlungen.



Abb. 2. v.l.n.r.: Forschungsgebäude ACP am Beutenberg Campus, Workshop während der BMBF-geförderten Photonik-Akademie der ACP-Lichtwerkstatt, Sitzung des ACP-Beirats im Dezember 2020 (Mitte. Vorsitzender Prof. Günter Tränkle).



## Wissenschaftliche Werkstätten/Werkstattverbund

### Leiter: Andreas Winnefeld

#### Struktur und Aufgabenschwerpunkte

- Der Werkstattverbund zwischen Physikalisch-Astronomischer und Chemisch-Geowissenschaftlicher Fakultät ist die zentrale Infrastruktur zur Sicherung der technischen Voraussetzungen für Lehre und Forschung und wird durch den Technischen Leiter der PAF geführt, der direkt dem Dekan unterstellt ist .
- Der Werkstattverbund gliedert sich in Konstruktion, Feinwerktechnik 1 und 2, Servicepunkt Mechanik, Schlosserei, Elektrotechnik und Elektronik.
- Die Aufgaben erstrecken sich von der Planung, Entwicklung und Konstruktion von Geräten, Apparaturen, Lehr- und Demonstrationsmodellen bis zum Aufbau kompletter Versuchsanlagen für die Forschung mit Inbetriebnahme, Wartung und Reparatur. Dabei ist Voraussetzung, dass die Werkstätten unmittelbar an Forschung und Lehre beteiligt sind und nicht rein dienstleistungsorientiert arbeiten.

#### Organigramm und Abläufe

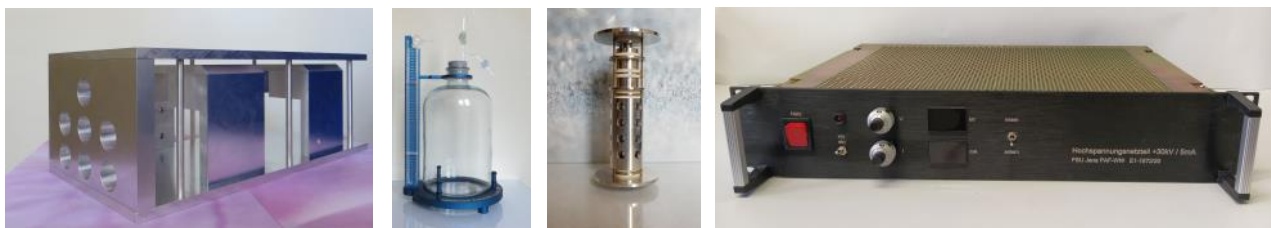


Abb. 1. Struktur Wissenschaftliche Werkstätten

Nach Auftragserteilung wird in Wechselwirkung zwischen der Technischen Leitung, der Abt. Konstruktion und den Werkstattleitern der technologische Ablauf festgelegt. Bei umfangreichen Projekten werden dem Auftraggeber Kostenabschätzungen vorgelegt, Varianten der Kooperationen verglichen und bereits erste Angebote über notwendige Materialien und Normteile eingeholt.

Die Abrechnung der Aufträge erfolgt mittels eines Systems, in welchem die jeweiligen Kosten, differenziert nach Lehre und haushalts- bzw. drittmittelfinanzierter Forschung abgebildet werden. Jeder Auftrag wird hinsichtlich Wirtschaftlichkeit überprüft.

Die Aufträge werden von den Mitarbeitern aller beteiligten Partner am Werkstattverbund (Physik, Chemie, Biologie und HI-Jena) bearbeitet und auch exakt mit diesen Partnern verrechnet. In Zukunft soll auch das Deutsche Optische Museum in den Verbund integriert werden.





**Mechanische Werkstätten Feinwerktechnik 1 und 2, Servicepunkt Mechanik, Schlosserei mit Konstruktion**

Um die mechanischen Aufgabenschwerpunkte zu erfüllen, stehen konventionelle Werkzeugmaschinen (drehen, fräsen, schleifen, bohren, sägen u.a.), 4 CNC-gesteuerte Universalfräsmaschinen, eine CNC-Dreh(-fräs)maschine und 4 digital-gesteuerte Leit- und Zugspindel-Drehmaschinen zur Verfügung.

Bearbeitbare Größen sind:

- Drehen bis Ø 500 x 1000 mm
- Fräsen bis 800 x 400 mm
- Schleifen 400 x 300 mm (Fläche)
- Bohren bis Ø 40 mm
- Gravieren bis Größe 18 mm

Unverzichtbarer Bestandteil der Fertigung ist die Schlosserei. Hier stehen moderne Schweißverfahren (WIG, CO<sub>2</sub>, E-Handschweißen) sowie diverse Blechbearbeitungsverfahren zur Verfügung.

In der Konstruktionsabteilung werden komplexe mechanische Baugruppen und Geräte mittels CAD (3D) entwickelt. Komplizierte Bauteile werden dann über CAM in die CNC-Fertigung exportiert.

2021 wird ein Reinigungslabor/eine Waschstrecke für Vakuumbauteile in Betrieb gehen.



Abb.2. CNC-Bearbeitungstechnik  
Foto: Bernhard Klumbies



Abb. 3. Kammermontage, Foto: Hendrik Wöhl

**Elektrotechnik, Elektronik**

Der Bereich Elektronik entwickelt und fertigt elektronische Geräte und Anlagen der Analog-, Digital-, Hochspannungs/-strom-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. Das Spektrum reicht von kleinen Zusatzgeräten über hochgenaue Positionier- und Antriebssysteme, Spezialmessgeräte, Netzgeräte für Hochleistungslaser u.v.a. bis hin zu kompletten computergesteuerten Anlagen. Ein wichtiger Aufgabenteil ist auch Service und Reparatur von kommerziell beschafften Anlagen und Geräten.

Der Bereich Elektrotechnik ist verantwortlich für die Entwicklung und den Aufbau spezieller elektrischer Baugruppen und Versuchseinrichtungen und für Umbauten an elektrischen Apparaturen in Laboren und Praktikumeinrichtungen. Der Bereich ist Ansprechpartner bei Neu- und Erweiterungsinstallationen von Laboren und Funktionsräumen. Hinzu kommen die gesetzlich vorgeschriebenen Überprüfungen aller elektrischen Geräte und Anlagen.

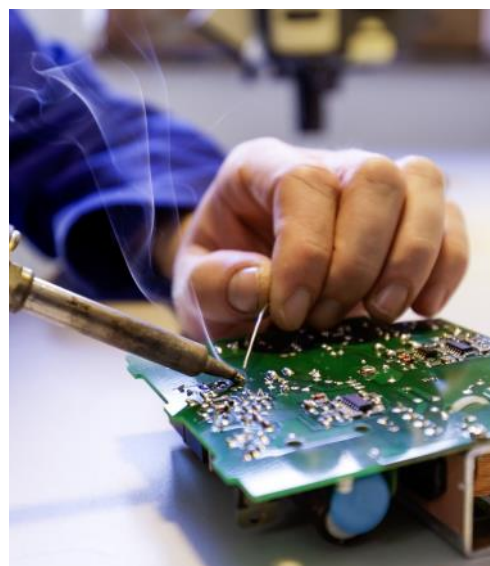


Abb.4. Reparatur Platine, Foto: Anna Schroll

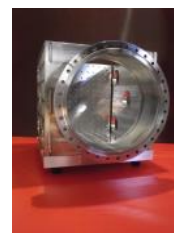


Abb.5-12. Ausgewählte Arbeiten 2020, Fotos: Bernhard Klumbies, Peter Hanse, Dirk Hieronymus

# STUDIUM UND LEHRE

## Studienangebot

### Studiengänge und Besonderheiten

- B.Sc. Physik: 6 Semester, Studienbeginn: Sommer– und Wintersemester, Grundlage für die Studiengänge M.Sc. Physik, M.Sc. Photonics oder den interdisziplinären Studiengang M.Sc. Medical Photonics
- B.Sc. Werkstoffwissenschaft: 6 Semester, Studienbeginn: Wintersemester, Grundlage für den Studiengang M.Sc. Werkstoffwissenschaft
- Lehramt Physik Gymnasium (9 Semester) und Regelschule (8 Semester) nach dem Jenaer Modell mit frühzeitigem Praxisbezug, kombinierbar mit Erweiterungsfach Astronomie, Studienbeginn: Wintersemester
- M.Sc. Physik: 4 Semester, deutsch-englischsprachiger Studiengang seit WS 2016/17, Studienbeginn: Sommer– und Wintersemester, Vertiefungsmöglichkeiten: Astronomie/Astrophysik, Festkörperphysik/Materialwissenschaft, Quanten– und Gravitationstheorie, Optik
- M.Sc. Photonics: 4 Semester, englisch-sprachiger Studiengang mit Schwerpunkt Optik/Photonics und hohem Anteil an internationalen Studierenden, Forschungspraktika in Forschungsinstituten und bei Industriepartnern, Studienbeginn: Wintersemester, Bewerbung [online](#).
- M.Sc. Werkstoffwissenschaft: 4 Semester, Studienbeginn: Sommer– und Wintersemester

### Zusatzangebote im Lehramt Physik

Für Lehramtsstudierende steht seit WS 2019/2020 mit der Lernwerkstatt ein Raum zur Verfügung, in dem sie eigene Arbeiten durchführen oder sich einfach zum Lernen treffen können. Lehrende der Fakultät sind in der Nähe und stehen jederzeit bei Fragen zur Verfügung.

In den Vorlesungen der theoretischen Physik begleitet die Fakultät Lehramtsstudierende mit Mathematik-Intensivkursen und Ergänzungsseminaren, die das Verständnis, insbesondere in den Theorievorlesungen vertiefen und die Schulrelevanz der Themen herausarbeiten.

Besondere Praxisnähe dürfen Lehramtsstudierende schon in der Lehre an der Fakultät erfahren. Sowohl fachdidaktische Seminare im Praxsemester als auch die fachdidaktischen Staatsexamensprüfungen werden von aktiven Lehrerinnen und Lehrern begleitet.

Auch in physikalischen Wahlpflichtfächern steht den Lehramtsstudierenden regelmäßig ein Angebot zur Verfügung, das speziell auf ihr Studium abgestimmt ist. Beispiele dafür sind:

- Spezielle Relativitätstheorie für Lehramt
- Optik für Lehramt
- Astronomie im Unterricht
- Fortgeschrittene Quantenmechanik aus der Sicht von Schülerfragen
- Scholorientierte Optik und Thermodynamik

Eine Bereicherung für das Lehramtsstudium sind auch die vielfältigen Möglichkeiten, neben dem Studium mit Schülerinnen und Schülern in Kontakt zu treten:

- Betreuung im Schülerlabor
- Preplab
- Standbetreuung bei der Langen Nacht der Wissenschaften / Tag der Physik / MINT Festival

Aktuell wird das Lehramtsstudium grundlegend strukturell überarbeitet.

## Umstellung auf digitale Lehr- und Prüfungsformate Sommersemester 2020-Sommersemester 2021

Durch die Covid-19-Pandemie wurden auch an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät im Sommersemester 2019 und im Wintersemester 2020/21 zahlreiche digitale Lehrformate ausprobiert:

- Vorlesung im Livestream übertragen durch Multimediazentrum bzw. geeigneter Webkonferenzsoftware, Bereitstellung von Materialien via Moodle
- Voraufzeichnung der Vorlesung, jedoch Übungen per Videokonferenz, Materialien über Moodle
- Reiner Moodlekurs ohne Videoanteil

Eine erste Befragung der Studierenden im Sommersemester 2020 bestätigt, dass die Onlinelehrveranstaltungen den Vorlesungsinhalten gerecht werden. Die Studierenden bewerteten auf einer Skale von 1...6 ( trifft nicht zu.... trifft voll zu) im Durchschnitt mit 5,1.

Eine besondere Herausforderung stellte die Ermöglichung von Praktika und die Übermittlung von Demonstrationsexperimenten dar. In den Physikalischen Schulexperimenten wurden fertige Boxen mit Experimentiermaterialien ausgeliehen, so dass die Studierenden zu Hause experimentieren konnten.

In den Vorlesungen zur Experimentalphysik wurden die Experimente live via youtube übertragen und mit mehreren Kameras gleichzeitig gefilmt, wobei teilweise auch Studierende im Hörsaal an der Vorlesung teilnehmen konnten. Diese hybride Form der Vorlesung Experimentalphysik von Prof. Paulus wurde mit dem Fellowship des Thüringer Wissenschaftsministeriums in Zusammenarbeit mit dem Stifterverband ausgezeichnet.



Abb. 1. Prof. Holger Cartarius, neuberufener Professor und Leiter der Arbeitsgruppe Fachdidaktik der Physik und Astronomie experimentiert mit Studierenden an einer Nebelkammer. Foto: Silvana Fischer



## Studierendenwerbung und Outreach

### Angebote speziell für Schülerinnen und Schüler und Schulklassen

- Rent a Prof: Das seit einigen Jahren etablierte Programm, soll Schülerinnen und Schülern einmal mehr in der Schulzeit die Gelegenheit geben mit Physikerinnen und Physikern in Kontakt zu kommen und einen Vortrag zu verfolgen, welcher über Lehrplanthemen hinausgeht. Im Durchschnitt wird einmal im Monat ein Vortrag an einer Schule oder für Schülerinnen und Schüler an unserer Fakultät gehalten. Die vielfältige Themenliste findet sich auf der Homepage unter [www.physik.uni-jena.de/rentaprof](http://www.physik.uni-jena.de/rentaprof)
- Schülerlabor: Im Schülerlabor experimentieren Schülerinnen und Schüler zu ausgewählten Themen. Seit 2017 sind die Teilnehmerzahlen auf hohem Niveau mit jeweils über 800 Schülerinnen und Schülern, die mit ihren Lehrkräften das Schülerlabor besuchen. Mehr dazu [online](#) und auf den Seiten der AG Didaktik der Physik und Astronomie.
- Workshop „Physik für Schülerinnen“: Dieser viertägige Ferien-Workshop richtet sich speziell an Schülerinnen. Die intensive Beschäftigung mit Physik durch die Arbeit in kleinen Projektgruppen, das Halten eines Vortrages, den Besuch einer Vorlesung und das Absolvieren eines Praktikumsversuches gibt ihnen Gelegenheit, die eigenen physikalisch-technischen Fähigkeiten zu erkunden.
- Preplab: Lehramtsstudierende haben in einem erfolgreichen Pilotprojekt 2019 Abiturvorbereitung für Schülerinnen und Schüler angeboten. Wöchentlich gab es 4 Stunden Mathe- und Physikbetreuung und in den Osterferien eine Woche Intensivkurs mit Aufgabenrechnen und Experimenten.
- Physikarena: Mindestens einmal pro Semester kommen Schulklassen in den großen Hörsaal am Max-Wien-Platz. Gerade bei Grundschulklassen werden die Experimente in eine kleine Geschichte oder Show eingebettet. Auch die jährliche Weihnachtsvorlesung am letzten Donnerstag vor Weihnachten erfreut sich großer Beliebtheit.



Abb. 1. Sehr erfolgreiche Lange Nacht der Wissenschaften 2019 Foto: Friedrich Eberhardt



## 1. MINT Festival 2018 – Fortsetzung folgt.

Als Wissenschaftsfestival rund um die MINT-Disziplinen Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik wurde das MINT-Festival Jena von der Friedrich-Schiller-Universität initiiert und vom 11.-13.09.2018 erstmals und mit großem Erfolg durchgeführt.

Federführend von Vertretern der Physikalisch-Astronomischen Fakultät, der Fakultät für Mathematik und Informatik, der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät sowie der Biologisch-Pharmazeutischen Fakultät wurde seitens der FSU die Organisation und Gestaltung des Festivalprogramms übernommen. Inhaltlich unterstützt wurde das Organisationsteam der Universität Jena von der Ernst-Abbe-Hochschule Jena und den Vereinen witelo e.V. und OptoNet e.V. sowie der Wirtschaftsförderungsgesellschaft Jena mbH.

Mehrere Tausend Schülerinnen und Schüler aus Thüringen, Sachsen und Bayern besuchten beim 1. MINT-Festival Jena täglich den Campus der Friedrich-Schiller-Universität und konnten live erleben, wie spannend und vielfältig die MINT-Fächer sind. Die SchülerInnen jeder Altersstufe erwartete täglich eine Vortragsreihe, eine Ausstellungslandschaft aus Mitmach-Experimenten und wissenschaftlichen Exponaten sowie zahlreiche Workshops und ein Schülerwettbewerb.

Für besonders viel Spaß und Spannung sorgten Wissenschaftsshows mit Live-Experimenten auf einer open air - Bühne.

Das 1. MINT-Festival in Zahlen:

- 40 Ausstellungsstände, 34 Vorträge, 65 Workshops, 9 Beiträge zum Schülerwettbewerb plus Bühnenshows und InnoTruck
- 34 beteiligte Einrichtungen (Hochschulen, außeruniversitäre Forschungsinstitute, Vereine, Firmen, Bildungseinrichtungen, Agentur für Arbeit); innerhalb der Friedrich-Schiller-Universität waren die Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät, die Fakultät für Biowissenschaften, die Fakultät für Mathematik und Informatik und die Physikalisch-Astronomische Fakultät mit rund 50 Arbeitsgruppen involviert
- 26 Partner, Sponsoren und Förderer
- pro Tag circa 1.000 SchülerInnen der Klassenstufen 1-12 , v.a. SchülerInnen der Sekundarstufe 1
- Anmeldungen von 59 Schulen aus Thüringen, Sachsen und Bayern (37% aus Jena, 54% aus Thüringen ohne Jena, 9% aus anderen Bundesländern)

Das nächste MINT-Festival soll im September 2021 stattfinden.



Abb. 2. 1. MINT-Festival in Jena: Magic Andy macht Experimente für Hunderte Schülerinnen und Schüler Foto: FSU/Anne Günther

## Studieneingangsphase

### Vorkursangebot

- *Auffrischkurs Mathematik für B.Sc. Physik und Lehramt Physik*: Der zum Wintersemester 2015/16 eingeführte zweiwöchige Ferienkurs wird von der Fachschaft der Physik organisiert und durchgeführt.
- *Vorkurs Mathematik für B.Sc. Physik und Lehramt Physik*: Seit dem WS 2000/01 etablierter Vorkurs als Grundlage für das grundständige Studium, insbesondere auch für die Vorlesung „Mathematische Methoden der Physik I“. Der Vorkurs wird von ca. 80% der Studienanfänger und –anfängerinnen wahrgenommen und beinhaltet auch einige Themen, die schon über das Schulniveau hinausgehen wie die Einführung in die komplexen Zahlen.
- *Pre-Course Physics and Mathematics im M.Sc. Photonics*: Seit 2011 gibt es ein jeweils einwöchiges Vorkursangebot sowohl in Mathematik als auch in Physik, um das Niveau der Studierenden des Masterstudienganges, welche zum Teil sehr unterschiedliche Bachelor-Abschlüsse haben, anzugleichen. Die Themen im Pre-Course Mathematics reichen dabei von Differentialrechnung mit mehreren Veränderlichen über Mehrfachintegrale bis zur Fourier-Analyse.

### ProMint - Projekt

Die Physikalisch-Astronomische Fakultät hat im Laufe der Jahre eine Reihe von Maßnahmen eingeführt, um ihre Studierenden während ihres gesamten Studiums, insbesondere aber in der Studieneingangsphase zu unterstützen. Im Rahmen des ProMint - Projekts (2019 -2020) wurde die Gelegenheit genutzt, alle bestehenden Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit zu prüfen und Bedarfe in der Umsetzung zu identifizieren. Als Beispiel sind in Tabelle 1 die Angebote im MSc. Photonics aufgeführt.

Bei allen Maßnahmen ist die Fachschaft mittelbar oder unmittelbar beteiligt und füllt damit eine Lücke bei der Umsetzung. Die Arbeitsleistung der gesamten Fachschaft entspricht etwa einer Vollzeitstelle, wobei gut die Hälfte der zeitlichen Aufwendungen in organisatorische Angelegenheiten fließt. Zudem ist in den letzten Jahren beobachtet wurden, dass trotz des hohen Einsatzes und der guten Organisation der Fachschaft, die Aufgaben die Kapazitäten von Studierenden überschreiten. Zur Entlastung und zur langfristigen Verstetigung von Konzepten hat die Fakultät ganz klar den Bedarf einer permanenten personellen Unterstützung.

Aus Überzeugung in die Notwendigkeit der Maßnahmen zum Ausgleich fachlicher Heterogenitäten und zur Integration bringt die PAF jährlich über 60.000 € auf. Das Pro-Mint Projekt

hat neben dem Austausch mit anderen Mint-Fakultäten auch den Austausch zwischen Studiengängen der PAF gefördert. Große Maßnahmen, wie die Einführung eines naturwissenschaftlichen Vorseminesters, wurden im Rahmen des Projektes insbesondere auf Drängen der PAF ausführlich zwischen den Fakultäten diskutiert. Zur Diskussion wurden auch Studien/Evaluationen von Universitäten ausgewertet, die bereits Vorseminester einführt haben. Im Hinblick auf den Ausgleich von Heterogenitäten konnten von den Projektteilnehmern keine Vorteile gegenüber den sehr viel individuelleren Maßnahmen der Fakultäten gefunden werden.

Besonders intensiv durch Fakultät und Akademie für Lehrentwicklung wird das Klausurvorbereitungswochenende gefördert. Es wurde zum WS 17/18 für Studierende im 1. Semester für B.Sc. Physik und Lehramt Physik eingeführt. Seit WS 18/19 nehmen auch Studierende im B.Sc. Werkstoffwissenschaft teil. Die Teilnehmerzahlen sind dabei kontinuierlich gestiegen, beginnend mit 45 % des Jahrgangs, nahmen im WS 19/20 schon 75% des Jahrgangs teil. Im WS 2020/21 wurde das Klausurvorbereitungswochenende digital durchgeführt.

Positive Auswirkungen können am Beispiel der Klausur „Experimentalphysik I“, die in den vergangenen Jahren immer vom gleichen Dozenten mit gleichen Inhalten gehalten wurde, festgestellt werden. Die Durchfallquote sank von ca. 50% vor Einführung des Vorbereitungswochenendes auf 25% mit dieser Maßnahme.

<b>Bezeichnung des Angebots</b>	<b>Ziel</b>	<b>Welches Format wird genutzt?</b>
Intensivkurs deutsch (4 Wochen)	Erlangung von Grundkenntnissen oder Wiederholung vorhandener Deutschkenntnisse	Vorlesung/Seminar
Deutschkurse semesterbegleitend	Erlangung von Grundkenntnissen oder Wiederholung vorhandener Deutschkenntnisse	Vorlesung/Seminar
IB-Mentoren (Internationales Büro)	Integration ausländischer Studierender, Unterstützung bei administrativen Aufgaben zum Studienstart	Mentoring
Mathevorkurs	Herstellen eines einheitlichen Wissenstandes	Vorlesung/Seminar
Guided Tours	Physikcampus und Beutenberg Campus, inkl. Bibliotheken, Mensen, etc.	Event
Physikvorkurs	Herstellen eines einheitlichen Wissenstandes	Vorlesung/Seminar
Master Welcome Party	Kennenlernen Mitstudierende	Event
interkulturelles Training	Erlernen interkultureller Kompetenzen, Sozialen Verhaltens / Kennenlernen Mitstudierende	Workshop
Probeklausuren	Self-Assessment	Probeklausur
Careerservice	Vorbereitung Berufseinstieg: application training / Jobmesse	Workshop / Messe
Workshop gute wissenschaftliche Praxis	Anleitung zum wissenschaftlichen Arbeiten, Grundlagen Guter Wissenschaftlicher Praxis	Workshop
Einführung Bibliothek	Erlernen der Benutzung der Datenbanken und Services der Bibliothek	Vorlesung
Einführungsvorlesung	Überblick über Anforderungen des kommenden Semesters, fachliche Beratung	Vorlesung
Exkursion Firma/ Messe	Einblick in Praxis / Berufseinstieg	Exkursion

Tab. 1. Angebote in der Studieneingangsphase im MSc. Photonics

## Entwicklung der Studierendenzahlen

### Maßnahmen zur Steigerung der Studierendenzahlen

- Ausweitung der Kapazitäten im M.Sc. Photonics auf 60 Studierende
- Weiterentwicklung des M.Sc. Physik zum englischsprachigen Studiengang
- Verbesserung der Studieneingangsphase durch Tutorienprogramme und Mathematik Auffrischkurs
- Weiterentwicklung der Sommerimmatrikulation im B.Sc. Physik
- Outreach-Maßnahmen, insbesondere Kontakt zu Schulen, Überarbeitung der Webseiten für Schülerinnen und Schüler sowie Studieninteressierte

### Entwicklung der Studierendenzahlen

Erfreulicherweise ist die Zahl der Studierenden im 1. Semester trotz Pandemie konstant geblieben. Eine Zunahme von Studienanfängerinnen und -anfängern gibt es insbesondere im Lehramt Physik, während im B.Sc. Physik die Zahlen leicht gesunken sind. Eine Ursache dafür könnte sein, dass aufgrund der Pandemie viele Studierende in der Nähe ihres Heimatortes das Studium aufnehmen.

Beim Übergang vom B.Sc. Physik zum M.Sc.

Physik verliert die Fakultät aktuell immer noch mehr Studierende an andere Universitäten als von außen dazu kommen. Daran wird gearbeitet. Im WS 2020/21 waren im M.Sc. Photonics erstmals 15 Studierende fernimmatrikuliert, d.h. sie nahmen vollständig digital an allen Veranstaltungen und Prüfungen teil. Die Möglichkeit der Fernimmatrikulation bzw. des digitalen Studiums wird zum folgenden Wintersemester weiter ausgebaut.

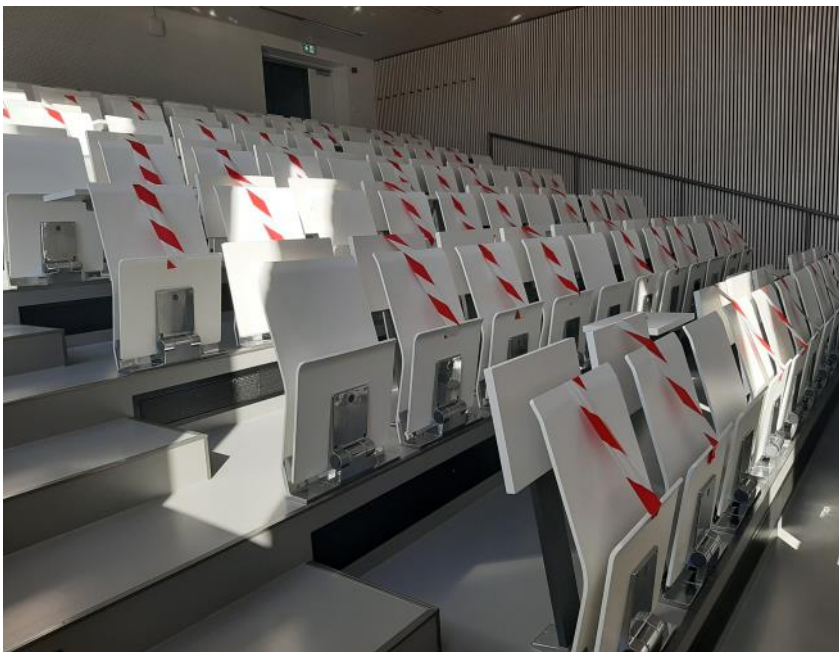


Abb. 1. Leere Hörsäle während der Corona-Pandemie, Foto: Dorit Schmidt

### Aus den Studiengängen:

- Die Studiengänge B.Sc. Werkstoffwissenschaft und M.Sc. Werkstoffwissenschaft werden grundlegend strukturell überarbeitet.
- Die Sommerimmatrikulation im B.Sc. Physik wird fortgesetzt
- Die Musterstudienpläne und Modulkataloge im Lehramt Physik werden überarbeitet und stärker vom B.Sc. Physik abgegrenzt.



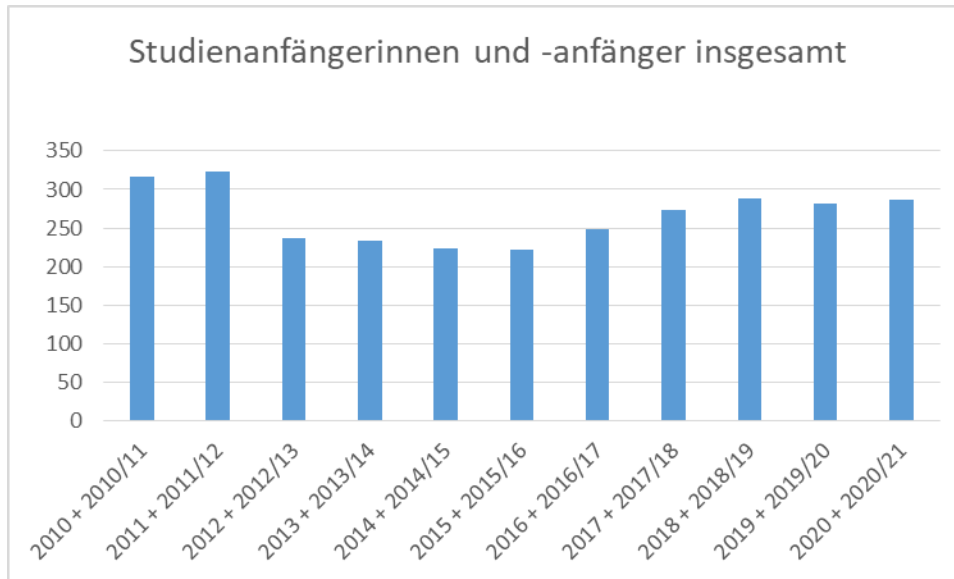
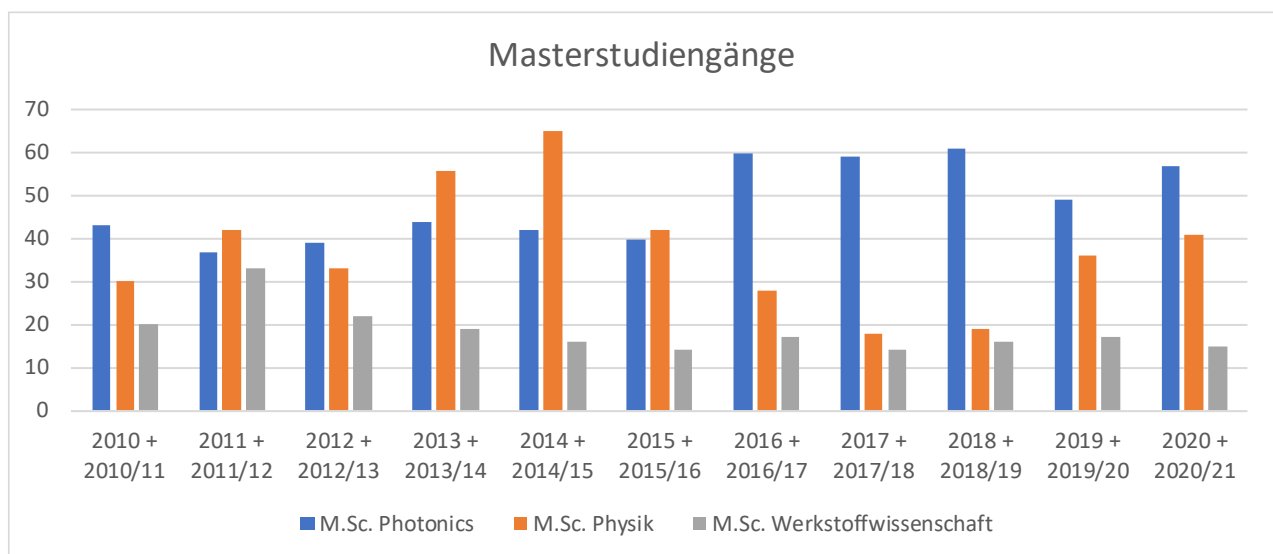
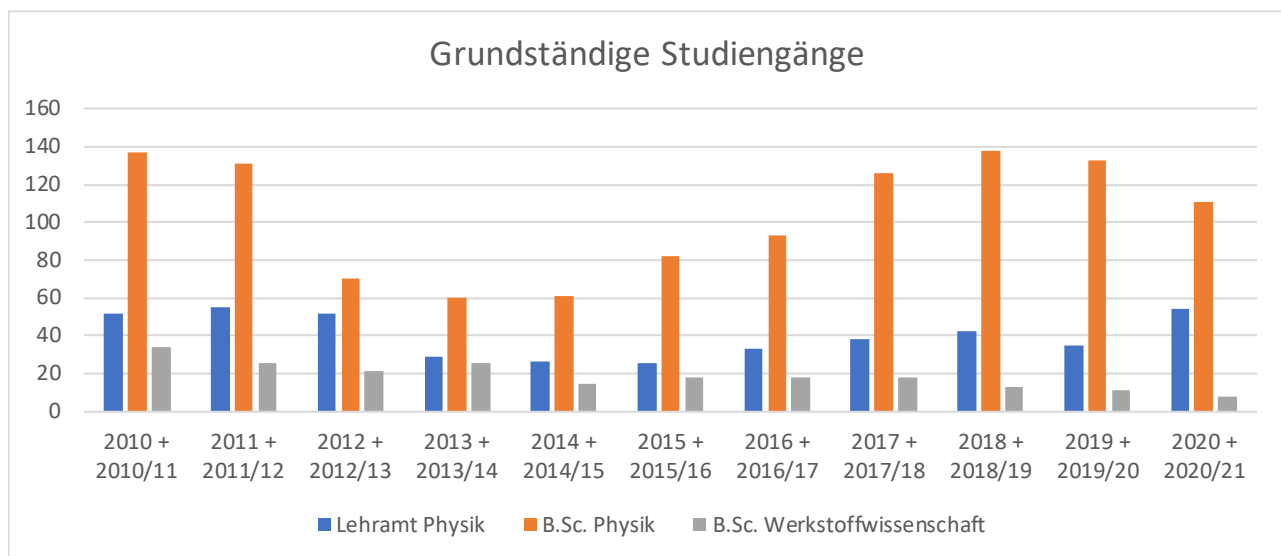


Abb. 2. Entwicklung der Studierendenzahlen



## Abbe School of Photonics(ASP)

### Die Abbe School of Photonics stellt sich vor:

- Forschungsorientiertes, internationalisiertes Ausbildungsangebot des Abbe Centers of Photonics
- Umfassendes akademisches, interdisziplinäres Bildungsprogramm auf Master- und Promotions-ebene mit besonderem Fokus auf Optik und Photonik
- Institutsübergreifender und interfakultärer Charakter durch Einbindung von Lehrkräften aus den Fakultäten für Chemie und Geowissenschaften, Biologie und Medizin in das Curriculum und Gastprofessorenprogramm
- Internationalisierte Masterstudiengänge Photonics und Medical Photonics
- Strukturiertes Promotionsprogramm für Optik und Photonik

### Abbe School of Photonics

Die Abbe School of Photonics (ASP) bildet den Ausbildungsschwerpunkt des Abbe Centers of Photonics ab. Zusammengefasst bietet die ASP ein umfassendes akademisches, interdisziplinäres Bildungsprogramm auf Master- und Promotionsebene mit besonderem Fokus auf Optik und Photonik und mit internationaler Sichtbarkeit. Während die Geschäftsstelle der ASP strukturell an der PAF angesiedelt ist, hat sie einen stark institutionsübergreifenden und interfakultativen Charakter. Die Prozesse innerhalb der ASP werden durch einen Sprecherat und das besonders hohe Engagement des langjährigen Sprechers Prof. Thomas Pertsch gesteuert und durch eine Geschäftsstelle unterstützt.

Das ASP-Bildungsangebot gliedert sich in internatio-

nalisierte Masterstudiengänge sowie ein durch die Graduiertenakademie der FSU zuletzt in 2020 herausragend positiv evaluiertes Promotionsprogramm. Der internationale Masterstudiengang M.Sc. Photonics ist 2008 aus einer mehrjährigen öffentlich-privaten Partnerschaft aus Bund und deutscher Photonikindustrie sowie der Einwerbung europäischer, transnationaler Studienprogramme hervorgegangen. Ebenso ist der Masterstudiengang Physik mit Vertiefungsschwerpunkt Optik nach wie vor das Rückgrat des Optik- und Photonik-Lehrplans der Fakultät und durchlief in den letzten Jahren ebenso einen kohärenten Internationalisierungsprozess.



Abb. 1. M.Sc. Photonics Jahrgang 2017 vor dem Abbe Center of Photonics, in dem große Teile der Präsenzlehre stattfinden.

## Masterprogramm der ASP

Die ASP ist bis heute durch abgeschlossene und laufende Austauschprogramme sehr eng mit einigen der führenden Zentren in der europäischen und amerikanischen Photonikausbildung verbunden. Dies ermöglicht es ASP-Studierenden, sehr mobil zu sein. Das Masterstudium Photonics wird weiterhin durch interkulturelle Trainings, Sprach- und Blockkurse, z.B. zu guter wissenschaftlicher Praxis oder Bewerbungstraining, abgerundet.

Die ASP erhält jährlich mehr als 1.000 Bewerbungen zur Teilnahme am Master- und/oder Promotionsprogramm. In einem systematischen Auswahlprozess werden dabei die BewerberInnen, die auf Basis ihrer bisherigen Leistungen ein besonders hohes akademisches Potenzial und eine überdurchschnittlich hohe Affinität zur Photonik aufweisen, ausgewählt. Die exzellentesten BewerberInnen erhalten zudem Angebote von Masterstipendien, die bis 2020 durch den Freistaat Thüringen und seit 2021 durch die Carl Zeiss Stiftung gefördert werden. Dieses Instrument der Exzellenzbewerberakquise ist enorm wichtig, um eine große Anzahl internationaler Studierender auf die Bildungsmöglichkeiten in der ASP und in Jena aufmerksam zu machen und einen quantitativ hochqualitativen Bewerber-Pool zu generieren.

Seit 2009 wurden insgesamt 627 Studierende aus 64 Ländern im M.Sc. Photonics immatrikuliert. Der Studiengang ist über Jahre hinweg der

mit Abstand zahlenstärkste Masterstudiengang der Physikalisch-Astronomischen Fakultät. Ein besonderes Merkmal des Masterstudiums der ASP ist die enge Einbindung von Industriepartnern in die praktische Ausbildung. Viele Studierende absolvieren ihre Praktika und Masterarbeiten in regionalen und nationalen Optikunternehmen. Regelmäßig angebotene Exkursionen zu Industriepartnern und Forschungseinrichtungen bieten die Möglichkeit, Einblicke in Forschungs- und Karrieremöglichkeiten zu gewinnen. Neben Sprachkursen wird für die Absolventen ein spezielles Bewerbungstraining angeboten und die Teilnahme an Jobbörsen sowie Speed-Datings mit Firmenvertretern organisiert.

Als besonderer Erfolg und weitere Chance des Ausbildungsprogramms sind die Einwerbung und der Start der Hochschul-übergreifenden, bundesweit wirksamen Max Planck School of Photonics anzusehen, die ganz wesentlich auf dem Erfolg und den etablierten Strukturen der ASP aufbaut und nun durch diese von Jena aus koordiniert wird. Zudem wollen die Dozenten der ASP auf den durch die COVID-19-Pandemie erzwungenen Schub in der Digitallehre konstruktiv reagieren: mithilfe des durch den DAAD geförderten Projekts „digiPHOTON“ sollen bis Ende 2022 weitere, nachhaltige und möglichst hochqualitative Elemente digitalbasierter Lehre im M.Sc. Photonics getestet und verankert werden.

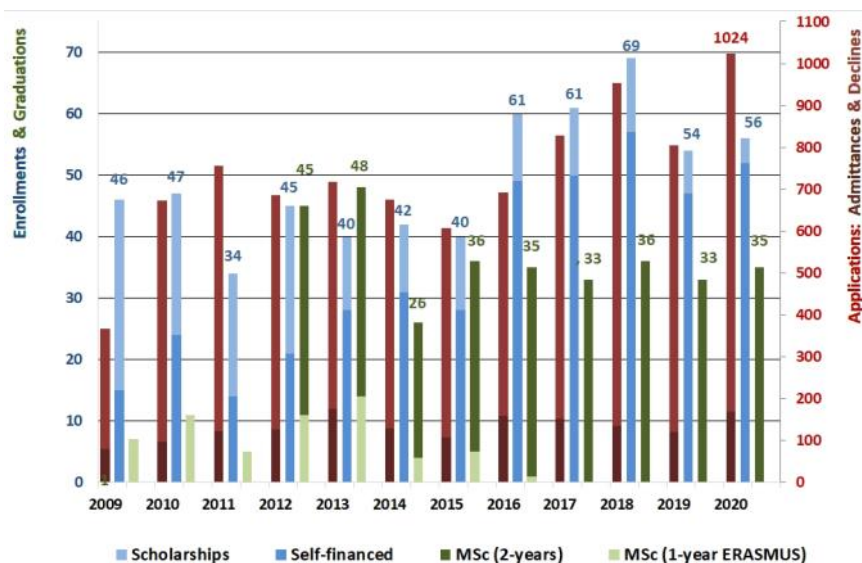


Abb. 2. Entwicklung der Bewerbungen, Stipendienvergaben, Immatrikulationen und Abschlüsse für den M.Sc. Photonics.

## Der Fachschaftsrat der Physikalisch-Astronomischen Fakultät

### Aufgaben und Schwerpunkte:

- Hilfe, Vermittlung und Studienberatung: Durch den engen Kontakt zu Dozierenden und anderen Gremien der Fakultät sieht sich der Fachschaftsrat als erste Anlaufstelle für Studierende der PAF, die Fragen zum Physikstudium und anderen Belangen des universitären Umfeldes haben.
- Hochschulpolitik: Als gewähltes Gremium vertritt der Fachschaftsrat die Interessen der Studierenden an der Fakultät. Er hält engen Kontakt mit VertreterInnen im Fakultätsrat und in universitären Gremien.
- Evaluation der Lehre: Jedes Semester werden sämtliche Veranstaltungen der Fakultät durch den Fachschaftsrat evaluiert. Die Fragebögen werden zentral ausgewertet und dienen den Studierenden sowie der Fakultätsleitung als Qualitätsmonitoring.
- Veranstaltungen und Projekte: Der Fachschaftsrat organisiert für Studierende zahlreiche Veranstaltungen, darunter die Studieneinführungstage, Mentoringprogramm, Klausurvorbereitungswochenende, Exkursionen, Software - Einführungskurse sowie vorlesungsbegleitende Tutorien. Das universitäre Leben wird durch die Ausrichtung von Sportturnieren, Wanderungen, Spieleabenden und Partys ergänzt.

### Wirken an der Fakultät

Als Vertretung der Studierenden ist das Ziel des Fachschaftsrates (FSR) Probleme der Studierenden zu lösen und die Studienbedingungen kontinuierlich zu verbessern. Zur Realisierung dieser Ziele wurden einige Projekte ins Leben gerufen.

Eines der größten Projekte ist das **Klausurvorbereitungswochenende (KlaVoWo)**. Dieses wurde zum ersten mal schon im Jahr 2017 durchgeführt und hat sich durch die jährliche Wiederholung bis 2020 zu einer Konstante entwickelt. Das Klausurvorbereitungswochenende wird für die Erst- und Zweitsemester des B.Sc. Physik, B.Sc. Werkstoff-



Abb. 1. Studierende beim Lernen im Rahmen des Klausurvorbereitungswochenendes vom 24. bis 26.01.2020.

wissenschaften und Lehramts veranstaltet. Mit den verschiedenen TutorInnen rechnen die Studierenden in Gruppen drei Tage lang Übungsaufgaben und Probeklausuren. Diese Veranstaltung hilft den Studierenden maßgeblich sich in der zumeist ersten Klausurenphase zurecht zu finden und sich auf diese adäquat vorzubereiten.

Ein weiteres Projekt, an dem sich die Fachschaft beteiligte, ist die Diskussion über die Sprache des M.Sc. Physik. Zu diesem Zweck wurde am 04.07.18 eine Fachschaftsvollversammlung einberufen. Es wurde darüber diskutiert, inwiefern die Sprache des M.Sc. Physik Englisch oder Deutsch sein sollte und wie die jeweiligen Möglichkeiten umgesetzt werden könnten. Mit der Fachschaftsvollversammlung konnte ein umfangreiches Meinungsbild der Studierenden zu dieser weitreichenden Entscheidung eingeholt werden.

Weiterhin ist der Fachschaftsrat in die laufenden Überarbeitungen der Studiengänge eingebunden. Hierzu gehören die Lehramts AG und die Kommission zur Überarbeitung der werkstoffwissenschaftlichen Studiengänge. Zuletzt hat sich der FSR aktiv eingebracht, als es darum ging neue Konzepte für die coronabedingte Online-Lehre zu erstellen und diese später mit einer außerplanmäßige Zwischenevaluation zu bewerten.



## Veranstaltungen für die Fachschaft

In den vergangenen Jahren fanden mehrere Exkursionen durch den FSR statt. Ziel dieser Exkursionen ist es, einerseits spannende Einblicke in moderne physikalische Forschung zu geben, andererseits das Berufsbild von PhysikerInnen in der Industrie zu beleuchten. Vom 22.-23.05.18 reisten Studierende nach Hannover, wo u.a. der Gravitational Wave Detector und das Laser Zentrum Hannover besucht wurden. Ein Jahr später ging die Sommerexkursion nach Karlsruhe, wo das KIT sowie Industrieunternehmen wie Siemens, Precitec und Daimler besucht wurden.

Um den Studierenden einen besseren Einstieg in ihre akademische Laufbahn zu geben, finden regelmäßige Einführungskurse in die Textsatzsoftware LaTeX, sowohl in deutscher als auch englischer Sprache, statt. Zusätzlich wurden Softwarekurse für eine Einführung in Python angeboten.

Als während des Lockdowns alle sozialen Kontakte verringert werden mussten und Präsenz undenkbar war, wurden zwangsweise Alternativen gefunden. Um neben der Lehre am Bildschirm den



Abb. 2. Führung bei Precitec während der Sommerexkursion nach Karlsruhe im Mai 2019.

Zusammenhalt zwischen den Studierenden zu ermöglichen, war die Lösung eine online-Kneipentour. Dafür wurde die Wagnergasse online rekonstruiert, wo verschiedene digitale Gesellschaftsspiele bereitgestellt wurden.

### Der Fachschaftsrat stellt sich vor

Die Mitglieder des Fachschaftsrates werden von der Fachschaft der Physikalisch- Astronomischen Fakultät zu jedem Wintersemester neu gewählt.

#### Ab WiSe 2018:

Maximilian Keller  
Tjorben Matthes  
Michael Dimler  
Georg Pfeifer  
Johann Möbius  
Tom Lippoldt  
Georg Schwartz  
Marcel Horstmann  
Lucas Eisenbach  
Fanny Getzlaff  
Felix Hildebrandt  
Markus Leipe  
Emil Donkersloot  
Alexander Litschko  
Fabian Schneider

#### Ab WiSe 2019:

Tjorben Matthes  
Michael Dimler  
Markus Leipe  
Georg Schwartz  
Tom Lippoldt  
Franziska Gladitz  
Georg Pfeifer  
Felix Hildebrandt  
Leonie Graf  
Fanny Getzlaff  
Tobias Hössel  
Jakob Hollweck  
Tim Bien  
Fabian Schneider  
Samuel Ritzkowski

#### Ab WiSe 2020:

Gesa Hölzer  
Tabea Kowald  
Leonie Graf  
Franziska Rauh  
Georg Pfeifer  
Dagmar Coelle  
Anneke Tombrägel  
Christina Richter  
Adrian Minnich  
Mats Segbers  
Samuel Lutz Döpfner  
Fabian Schneider  
Samuel Ritzkowski  
Johannes Laufkötter  
Tom Jungnickel

## Der Alumni der Physikalisch-Astronomischen Fakultät e.V.

### Aufgaben und Schwerpunkte:

- Networking mit ehemaligen Studierenden, Mitgliedern, Freunden und Förderern der Fakultät
- Ideelle und finanzielle Unterstützung der Fakultät in Ausbildung, Wissenschaft und Forschung
- Förderung der Verbindung zwischen Theorie und Praxis

### Wirken an der Fakultät

Der Zweck des Alumni-Vereins ist darauf gerichtet, die Verbindung der ehemaligen Mitglieder der Fakultät untereinander, zur Fakultät und zu den gegenwärtigen Mitgliedern aufrechtzuerhalten und zu vertiefen. Die Herstellung von Kontakten unserer Studierenden zu Absolventen aus der Arbeitswelt soll das Berufsbild verbessern, Besuche am Arbeitsort in Industrie, Forschungslaboratorien und Instituten ermöglichen und vielleicht auch Türen für einen späteren Arbeitsplatz öffnen. Mit den Aktivitäten des Vereins sollen andererseits die Informationen für die Alumni über neue Forschungsrichtungen und Schwerpunkte der Fakultät verbessert werden, um damit eine Zusammenarbeit in Projekten und die Vermittlung von Absolventen zu ermöglichen.

Wesentliche Aktivitäten des Alumni-Vereins sind daher:

- Organisatorische Unterstützung der **Absolventen-Befragung** im Rahmen der Systemakkreditierung
- Finanzielle und organisatorische Unterstützung von **Exkursionen** der Studierenden (siehe Fachschaftsrat)

- Jährliche Veranstaltung einer **Job-Börse** speziell für die Studierenden und Promovierenden unserer Fakultät. Diese Form der Veranstaltung stellt eine nützliche Alternative zu anderen „Großveranstaltungen“ dar und wird sowohl von den sieben bis zehn teilnehmenden Firmen als auch den Studierenden und Promovierenden gut angenommen. Leider musste in 2020 die Job-Börse corona-bedingt ausfallen.

- Organisation und finanzielle Absicherung des jährlichen **Alumni-Tages mit Feierlicher Zeugnisübergabe**. Zur im Juni stattfindenden Festveranstaltung wird die Festrede traditionell von einem Alumnus/ einer Alumna der Fakultät gehalten. Am 21. Juni 2019 war dies Dr. Martin Götz von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, der über die Neudefinition der SI-Einheiten referierte. Außerdem werden neben den Master-Zeugnissen und Promotionsurkunden noch von verschiedenen Sponsoren gestiftete Preise für die besten Abschlussarbeiten unter Anwesenheit der Preisstifter verliehen. (s. S. 173 ff.) Coronabedingt wurde der

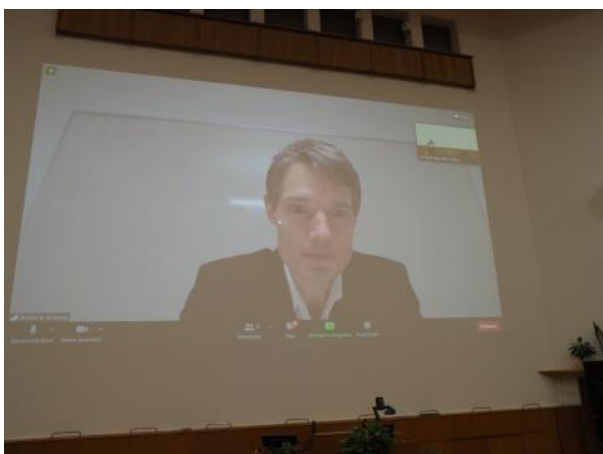


Abb. 1. Preisverleihung anno 2020: Der Sponsor ist per Zoom zugeschaltet (links), Übergabe des Preises im fast leeren Hörsaal mit Abstand und Mund-Nasen-Schutz in Fakultätsfarbe (rechts) Foto: Volker Helmig



Alumni-Tag 2020 auf den 20. November verschoben und mit der ebenfalls vom Alumni-Verein unterstützten traditionellen Veranstaltung „Der Dekan informiert“ zusammengelegt. Dennoch konnte er leider nur als online-Veranstaltung stattfinden.

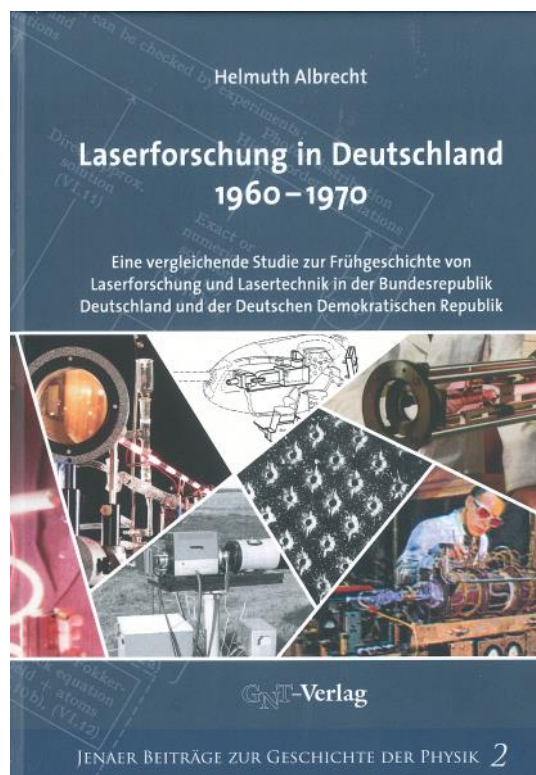
Der Alumni-Verein hat zahlreiche Aktivitäten des Fachschaftsrates und der Fakultät zur **Verbesserung der Lehre und zur Gewinnung von Studierenden** finanziell unterstützt. Dazu gehören:

- Pausenversorgung für den Auffrischkurs Mathematik
- Unterstützung der Lehrevaluation
- Klausurvorbereitungswochenende
- Studenten-Professoren-Treffen zum regen Austausch
- Tag der Physik
- Ferienworkshop „Physik für Schülerinnen“
- Öffentliche Samstagsvorlesungen

Ein wichtiges Anliegen des Alumni-Vereins ist auch die **Verbesserung des Studiensumfeldes**. So wurden mittels einer breit angelegten Spendenaktion die Fahrradständer am Max-Wien-Platz modernisiert.

Zur besseren Identitätsstiftung und Bindung der Absolventen an die Fakultät befasst sich der Alumni-Verein auch mit der **Geschichte der Fakultät**. 2019 wurde der 2. Band der Reihe „Jenaer Beiträge zur Geschichte der Physik“ herausgegeben, der sich mit der Laserforschung in Deutsch-

land von 1960 -1970 befasst (ISBN 978-3-86225-109-4 ). Am 3. Juni 2019 wurde dieser im Rahmen des Physikalischen Kolloquiums durch den Autor Prof. Dr. Helmuth Albrecht von der TU Bergakademie Freiberg vorgestellt.



#### Der Alumni-Verein der PAF stellt sich vor

Der Alumni der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der Friedrich –Schiller-Universität Jena e.V. ist ein gemeinnütziger Verein, der am 27. Mai 2004 gegründet wurde.

Es wird kein Mitgliedsbeitrag erhoben. Die Aktivitäten des Vereins werden ausschließlich über Spenden, Sponsoring sowie den wirtschaftlichen Eigenbetrieb (Ausstellergebühren bei Jobbörse, Verkauf von Büchern) finanziert.

Zum Jahresende 2020 hatte der Verein 350 Mitglieder.

Dem **Vorstand des Alumni-Vereins** gehören an:

Prof. Dr. Paul Seidel	Vorsitzender
Michel Pannier	stellvertretender Vorsitzender
Dr. Angela Unkroth	Schatzmeisterin
Dr.-Ing. habil Volker Herold	
Dr. habil. Konrad Schöbel	
Dr. Christian Königsdörffer	

# GLEICHSTELLUNG

Die Physikalisch-Astronomische Fakultät ist in die Gleichstellungsbestrebungen und –maßnahmen der Universität fest eingebunden. In Gleichstellungsfragen hat sich die Fakultät positiv entwickelt.

## Professoren und Professorinnen

Im Zeitraum 2018-2020 ist es gelungen, eine der beiden 2017 berufenen Juniorprofessorinnen im Zuge von Bleibeverhandlungen auf eine W2-Professur zu berufen. Die andere Juniorprofessorin hat die Fakultät leider aus familiären Gründen vorzeitig verlassen. Die PAF hat damit nunmehr zwei W3-Professorinnen, eine W2-Professorin und zwei apl. Professorinnen, was einem Professorinnenanteil von 11,4 % entspricht. Außerdem wurde mit Frau Prof. Stefanie Gräfe einer Professorin der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät die Zweitmitgliedschaft in unserer Fakultät gewährt (derzeit hat die PAF drei Zweitmitglieder). Der Frauenanteil unter den Professoren in der PAF wird sich trotz aller Maßnahmen bei den Berufungsverfahren nicht wesentlich weiter steigern lassen, da der Frauenanteil bei den Studierenden und Promovierenden auch unter dem Basiswert von 30% gemäß Ziel- und Leistungsvereinbarungen liegt.

Es bleibt zu hoffen, dass sich die Vorbildrolle dieser sechs Professorinnen langfristig auf die Erhöhung des Frauenanteils beim wissenschaftli-

chen Nachwuchs und den Studierenden auswirkt.

## Studierende

Der Frauenanteil unter den Studierenden lag zum Wintersemester 2020/21 je nach Studiengang zwischen 13,8% beim M.Sc. Physik und 36,5% beim M.Sc. Photonics (siehe Abb. 2). Insgesamt sind 27,8% unserer Studierenden weiblich. Der Studentinnenanteil konnte damit um 3,8% gegenüber dem Berichtszeitraum 2016/17 gesteigert werden.

## Wissenschaftlicher Nachwuchs

Der Frauenanteil bei den Promovierenden konnte ebenfalls um ca. 3% auf 25,4% gesteigert werden. Er liegt damit nur knapp unter dem Frauenanteil bei den Studierenden. Allerdings ist der Frauenanteil bei den abgeschlossenen Promotionen mit 18,8% deutlich geringer (Abb. 3). Und Habilitationen von Frauen hat es 2018-2020 gar keine gegeben. Allerdings gibt es zwei laufende Habilitationsverfahren von Frauen, die wegen der Corona-Restriktionen erst in 2021 abgeschlossen werden konnten. Bei den Privatdozenturen und Nachwuchsgruppenleitern ist der Frauenanteil mit 13% steigerungswürdig. Er liegt damit etwa 5% unter dem Frauenanteil bei den abgeschlossenen Promotionen.

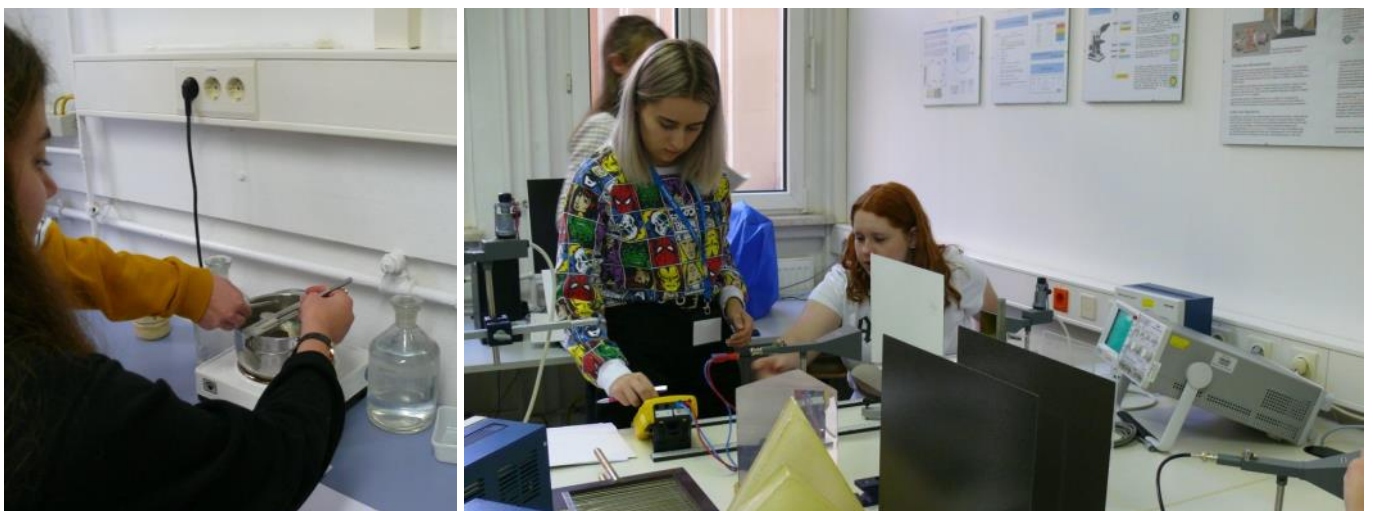


Abb.1: Im Ferien-Workshop „Physik für Schülerinnen“ experimentieren die Schülerinnen im Physikalischen Grundpraktikum. Links: Versuch zur spezifischen Wärme, Rechts: Mikrowellen-Versuch Foto: Angela Unkroth



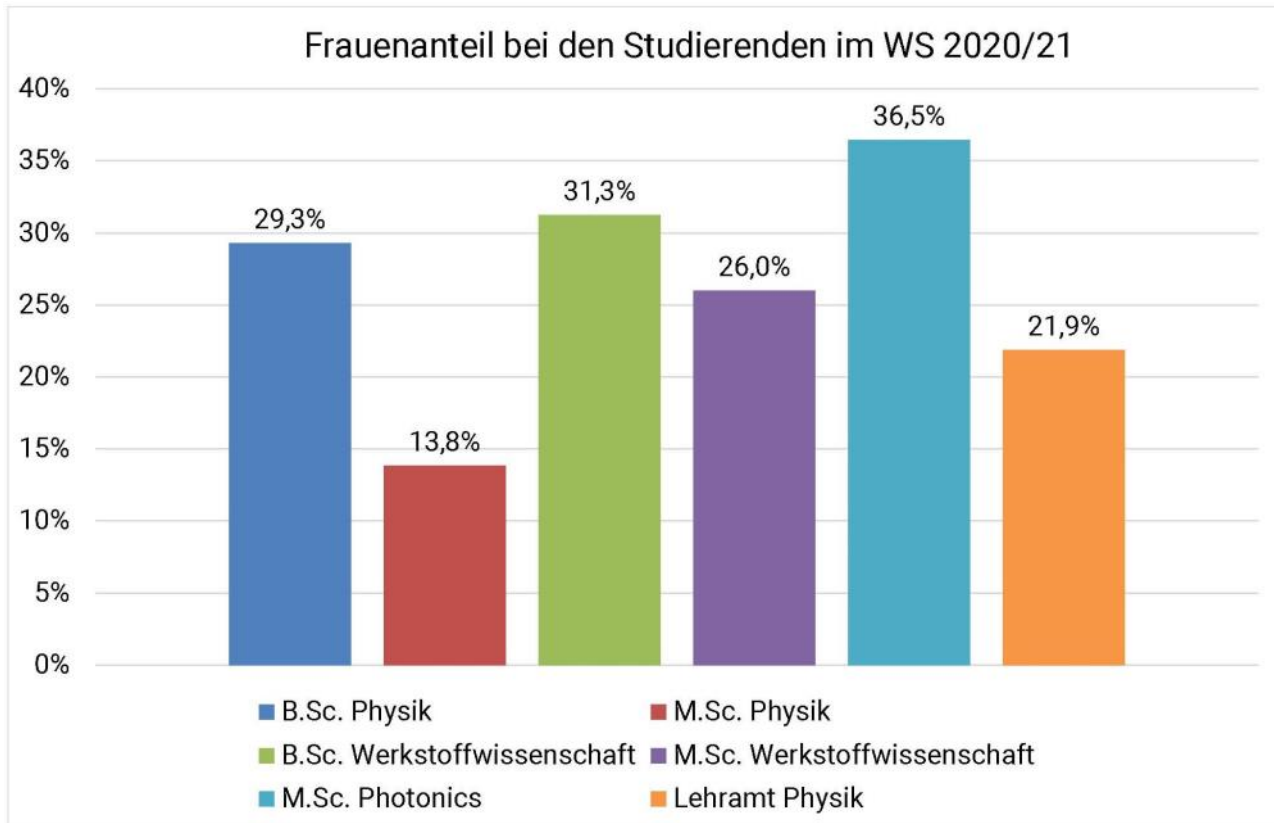


Abb.2: Frauenanteil bei den Studierenden, Datenquelle: HISPOS

Die Fakultät setzt bei der Nachwuchsgewinnung bereits in den Schulen an. So wird einmal pro Jahr der *Workshop „Physik für Schülerinnen“* durchgeführt, welcher sich an Schülerinnen der Klassen 10 bis 12 wendet. (siehe Abb. 1) Die Ausschreibung erfolgt in Thüringen und den angrenzenden Bundesländern. Damit wird auch die Aufmerksamkeit der Schulen auf die Universität Jena als Ausbildungsort gelenkt. Coronabedingt musste dieser Workshop jedoch in 2020 ausfallen und wird auch 2021 nicht stattfinden können.

Das **preplab** bietet einmal wöchentlich für vier Stunden einen von der Schule unabhängigen Raum zum Klären von Fragen zum Schulstoff und darüber hinaus eine Ferienwoche zur intensiven Abiturvorbereitung. Dabei stehen zwei angehende Physiklehrer und zwei künftige Physiklehrerinnen sowie ausreichend Platz und Experimentiermaterial bereit, um in geschützter Atmosphäre individuell zu arbeiten. Bei der Gruppenaufteilung wird darauf geachtet, dass die Schülerinnen möglichst unter sich sind und von einer Lehramtsstudentin betreut werden.

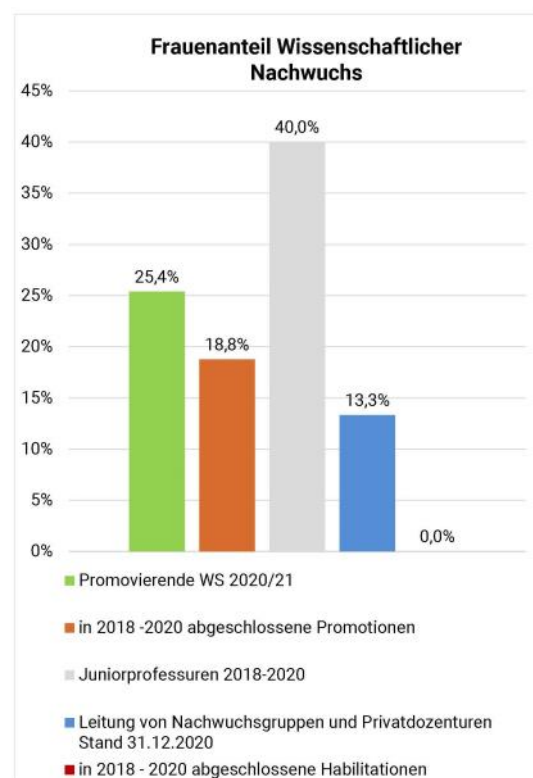


Abb. 3: Frauenanteil beim wissenschaftlichen Nachwuchs

# WIRTSCHAFT UND KOOPERATIONEN

## Die Fakultät und ihre Partner

Die Physikalisch-Astronomische Fakultät ist national wie international sehr gut vernetzt. So bestehen auf Instituts- und Projektebenen zahlreiche Kooperationen mit deutschen und ausländischen Universitäten, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen. Gleiches gilt auch für die lokale und regionale Zusammenarbeit: Es besteht ein enges Netzwerk mit Forschungseinrichtungen in und um Jena, deren Direktoren und Abteilungsleiter oft gleichzeitig eine Professur an der PAF innehaben und dadurch Forschung und Lehre auf allen Ebenen verstärken. Hervorzuheben sind hier das Helmholtz Institut Jena (mit dem Direktor Prof. Thomas Stöhlker und den Professoren Stephan Fritzsche, Ralf Röhlsberger und Matt Zepf), das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (Direktor: Prof. Andreas Tünnermann, Gruppenleiter apl. Prof. Uwe Zeitner), das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Abteilungsleiter: Prof. Heidemarie Schmidt, Prof. Markus Schmidt, Prof. Tomáš Čížmár) und die Thüringer Landessternwarte in Tautenburg (Direktor: Prof. Artie Hatzes). Neu hinzugekommen ist 2018 das Deutsche Optische Museum, dessen Direktor Timo Mappes ebenfalls eine Professur an der PAF innehat.

Innerhalb der Universität bestehen ebenfalls enge Kooperationen, insbesondere mit der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät, der Medizinischen Fakultät und der Fakultät für Mathematik und Informatik insbesondere im Rahmen von Zentren und Graduiertenschulen.

Der Jenaer Tradition seit den Zeiten von Ernst Abbe und Carl Zeiss folgend, sind die wichtigsten lokalen Industriepartner die Carl Zeiss AG, die JENOPTIK AG sowie zahlreiche kleinere Firmen auf dem Gebiet der Optik. Diese fruchtbare, enge Zusammenarbeit zwischen universitärer naturwissenschaftlicher Forschung und industrieller Produktion auf hohem technologischen Niveau, gepaart mit einer sehr erfolgreichen und international sichtbaren Grundlagenforschung, ist bis heute das Markenzeichen des Wissenschaftsstandortes Jena.

Die nachfolgende Auflistung enthält eine Auswahl an wichtigen Kooperationspartnern der einzelnen Arbeitsgruppen.

### Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

- Jesse Chapman, New York U, USA
- Rainer Arlt, AIP Potsdam
- Amir Harrak, U Toronto, Canada
- W.P. Chen, U Taiwan, Taiwan
- Guillermo Torres, CfA Harvard, USA
- Herve Beust, IPAG Grenoble, France
- Jürgen Blum, TU Braunschweig
- Carlos del Burgo, INAOE, Mexico
- Virginie Faramaz, JPL, Pasadena, USA
- Antonio Hales, ALMA, Chile
- Florian Kirchschrager, University College London, UK
- Jean-Francois Lestrade, Paris Observatory, France
- Ralf Launhardt, Arianna Musso-Barcucci, MPIA Heidelberg
- Luca Matra, Galway University, Ireland
- Kate Su, Steward Observatory, USA
- Sebastian Wolf, Minjae Kim, U Kiel
- Mark C. Wyatt, Sebastian Marino, Nicole Pawellek, Cambridge University, UK

### Institut für Angewandte Optik und Biophysik

#### Lehrstuhl für Superaufgelöste Mikroskopie (Prof. Eggeling)

- Weatherall Institute of Molecular Medicine, University of Oxford, GB
- Stefan Hell, Max-Planck Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen
- José Luis Nieva, Biophysics Unit (CSIC-UPV/EHU) and Biochemistry Department, University of the Basque Country, Bilbao, Spanien
- Ralf Erdmann, Medizinische Fakultät Biochemie und Pathobiochemie/ Systembiochemie, Ruhr-Universität Bochum
- Martin Booth, Department Engineering, University of Oxford, GB
- Cyril Favard / Delphine Mureaux, University Marseille, Marseille, Frankreich

#### Lehrstuhl für Experimentalphysik/Kohärenzoptik (Prof. Kowarschik)

- Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena

#### Junioprofessur für digitalisierte experimentelle Mikroskopie (Jun.-Prof. Franke)

- Prof. Marino Zerial (Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden)
- Dr. Sebastian van de Linde (University of Strathclyde, Glasgow)
- Dr. Marek Cebeauer (J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Prag)

#### Lehrstuhl für Wellenleiteroptik/Faseroptik (Prof. Dr. Čížmár)

- Institute of Scientific Instruments of the Czech Academy of Science, Brno, Czech Republik
- DZNE Magdeburg, Center for Behavioral Brain Sciences (CBBS), University Magdeburg, Germany
- Prof. Dave Philips, University of Exeter, UK
- Prof. Miles Padgett, University of Glasgow, UK
- UCF CREOL, The College of Optics and Photonics, Florida, USA

### Institut für Angewandte Physik

#### Lehrstuhl für Angewandte Physik (Prof. Tünnermann)

- Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen, Germany
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen-Wessling, Germany
- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada
- Centre d'optique, photonique et laser (COPL), Université Laval, Québec, Canada
- College of Optics and Photonics, CREOL & FPCE, University of Central Florida, Orlando, USA
- Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, USA
- Department of Physics, ETH Zürich, Zürich, Switzerland

- Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Changchun, China
- innoFSPEC, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
- Albert-Einstein-Institut Hannover, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und Leibniz Universität Hannover

#### Professur für Festkörperlaser (Prof. Limpert)

- ELI-ALPS, Extreme Light Infrastructure, Szeged, Hungary
- College of Optics and Photonics, CREOL & FPCE, University of Central Florida, Orlando, USA
- Max-Planck Institut für Quantenoptik, Max-Planck Gesellschaft, Garching
- DESY, Helmholtz Gesellschaft, Hamburg
- Helmholtz-Institut Jena, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Jena
- Institut für Optik und Quantenelektronik, FSU Jena

#### Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)

- Centre of Ultrahigh bandwidth Devices for Optical Systems (CUDOS), MQPhotonics Research Centre, Department of Physics and Astronomy, Macquarie University, Sydney, Australia
- College of Optics and Photonics, CREOL & FPCE, University of Central Florida, Orlando, USA
- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Canada
- Énergie, Matériaux et Télécommunications Research Center, Institut national de la recherche scientifique (INRS), Varennes, Canada
- innoFSPEC, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
- Laboratoire Ondes et Matière d'aquitaine (LOMA), Université Bordeaux, Bordeaux, France
- LCP group, Ghent University, Ghent, Belgium
- LP3 - Lasers, Plasmas et Procédés Photoniques, Aix-Marseille Université, CNRS, Marseille, France
- National Accelerator Laboratory, SLAC, Menlo Park, USA

- Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Göttingen
- Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik, TU Braunschweig
- Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, TU Bergakademie Freiberg
- Fachbereich SciTec, Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Otto-Schott-Institut für Materialforschung, FSU Jena
- Institut für Geowissenschaften, FSU Jena

#### Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)

- Nonlinear Physics Center, Australian National University, Canberra
- Aston University, Birmingham, UK
- Laboratory of Nanophotonics & Metamaterials, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
- Optical Sciences Center, National Central University, Zhongli, Taiwan
- Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico (USA)
- Laboratory of Quantum Materials and Phenomena, University Paris Diderot, Paris, France
- ARC Centre for Ultrahigh-Bandwidth Devices, University of Sydney, Sydney, Australia
- Institute of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia
- Natalia Noginova, Norfolk State University, Norfolk, USA
- Institut für Physik/Nanooptik, Humboldt-Universität zu Berlin
- Institut für Theoretische Festkörperphysik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- innoFSPEC, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
- Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
- Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen, Germany
- Department of Photonics Engineering, University of Southern Denmark, Odense

#### Lehrstuhl für Theorie optischer Systeme (Prof. Gross)

- Laboratoire d'optique biomédicale LOB, EPFL Lausanne, Schweiz
- Medizinische Physik, Universität Innsbruck, Österreich
- Ecole d'Optique, Université St. Etienne, St. Etienne, France

- Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK), TU Bergakademie Freiberg, Germany
- Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, Dresden, Germany
- Sick AG, Waldkirch, Germany
- Schölly Fiberoptic GmbH, Denzlingen
- Carl Zeiss AG, Jena, Germany
- Docter Optics SE, Neustadt a.d. Orla, Germany
- Jenoptik AG, Jena, Germany
- KLA-Tencor MIE GmbH, Weilburg, Germany
- Mahr GmbH, Jena, Germany
- optiX fab GmbH, Jena, Germany
- POG Präzisionsoptik Gera GmbH, Germany
- SCHOTT AG, Mainz, Germany
- Trumpf GmbH, Dietzingen/Schramberg, Germany

#### Professur für Technische Physik (Prof. Wyrowski)

- AT Technologies, Veldhoven, Niederlande
- Carl Zeiss AG, Oberkochen
- CNRS, France
- Datalogic, Bologna, Italy
- Optics Research Group, Delft University of Technology, The Netherlands
- KLA-Tencor, Milpitas, California, USA
- LPI, Madrid, Spain
- School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology (NJUST), Nanjing, China
- OSRAM, München
- Engineering Center OPTICA, State University of Information, Mechanics, and Optics (ITMO) St. Petersburg, Russia
- Optical Engineering Group, Universidad Politecnico de Madrid (UPM), Spain
- Department of Physics and Mathematics, University of Eastern Finland (UEF), Joensuu, Finland
- Brussels Photonics Team, Vrije Universiteit Brussel, Brussel, Belgium
- Fraunhofer IOF Jena

#### Apl. Professur für Mikro- & Nanostrukturtechnik (apl. Prof. Zeitner)

- Dept. of Applied Physics, Eindhoven Univ. of Technology, Eindhoven
- Layertec GmbH, Mellingen
- Albert-Einstein Institut (Max Planck Institut für Gravitationsphysik), Leibniz Universität Hannover
- Huawei, München, Germany
- Academica Sinica, Taipeh, Taiwan



- Metrology for Functional Nanosystems, Technical University Braunschweig/ PTB, Germany
- SciTec, Applied Optics, University of Applied Sciences Jena (EAH), Germany
- VSL - Dutch Metrology Institute, Delft, The Netherlands
- CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Erfurt
- Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam (AIP), Potsdam, Germany

### Institut für Festkörperphysik

- Prof. Dr. Oliver Monti, University of Arizona, USA
- Prof. Dr. Hiroyuki Yoshida, Chiba University, Japan
- Prof. Dr. Satoshi Kera, Institute of Molecular Science Okazaki, Japan
- Prof. Dr. Dragomir Neshev, Australian National University, Australien
- Dr. Igal Brener, Sandia National Laboratories, USA
- Dr. Jaime Segura-Ruiz, ESRF Grenoble, Frankreich
- Dr. Rupert Oulton, Imperial College London, UK
- Prof. M.A. Kats, U Wisconsin@Madison, USA
- Prof. J.G. Lu, U Southern California, USA
- Prof. K. Bharuth-Ram, Durban University of Technology, South Africa
- Prof. A. Lugstein, TU Wien, Österreich
- Prof. M. Wuttig, RWTH Aachen
- Prof. M. Grundmann, Universität Leipzig
- Prof. Andrea C. Ferrari, University of Cambridge (UK)
- Prof. Giulio Cerullo, Politecnico di Milano, Italien
- Prof Tobias Kippenberg, EPFL, Switzerland
- Dr. M. Schwickert, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt
- Dr. J. Tan , Dr. O.R. Jones, CERN Genf, Antiproton Decelerator
- Prof. De Gerssem, TU Darmstadt
- Dr. R. Stolz, Leibniz-Institut für Photonische Technologien Jena,
- Dr. J. Kobow, Supracon AG Jena
- Prof. B. Voß, Ernst-Abbe-Hochschule Jena
- Prof. A. Lehrach, Forschungszentrum Jülich, Institut für Kernphysik
- Prof. J. Abrecht, Hochschule Aalen, (FINO)
- Dr. M. Fenker, Forschungsinstitut Edelmetalle

- und Metallchemie (fem) Schwäbisch Gmünd
- Fraunhofer IOF Jena
- Dr. S. Klose, Thüringer Landessternwarte Tautenburg,
- Dr. M. Belogolowskii, Akademie der Wissenschaften der Ukraine Kiew
- Prof. Yu. M. Shukrinov, JINR Dubna
- Prof. Dr. Paul Scheier, Institute for Ion Physics and Applied Physics, Universität Innsbruck, Austria
- Prof. Dr. Oliver Trapp, Department of Chemistry, Ludwig-Maximilians-Universität München
- Dr. Svitlana Zhukovska, University of Exeter, Exeter, UK
- Prof. Dr. Elisabetta Palumbo, Istituto Nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astrofisico di Catania, Catania, Italy
- Prof. Dr. Harold Linnartz, Chair of Laboratory Astrophysics Leiden Observatory, University of Leiden, The Netherlands

### Institut für Festkörpertheorie und -optik

#### Lehrstuhl für Festkörpertheorie (Prof. Botti)

- O. Pulci, University of Rome Tor Vergata
- L. Reining, Ecole Polytechnique Palaiseau
- G. Kresse, University of Vienna
- Wolf Gero Schmidt, University of Paderborn
- European Theoretical Spectroscopy Facility
- Miguel A.L. Marques, Martin-Luther University Halle-Wittenberg
- Lara Kühl Teles, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brazil
- Prof. Dr. Giancarlo Cappellini, University of Cagliari, Italy
- Prof. Dr. Cristiana di Valentin, University of Milano-Bicocca, Italy
- Prof. Dr. Maria Antonietta Loi, University of Groningen, Netherlands
- Prof. Dr. Claudia Schnorr und Prof. Dr. Marius Grundmann, Universität Leipzig
- Prof. Dr. Erik Bakkers, Prof. Dr. Jos Haverkort, TU Eindhoven, Niederlande
- Prof. Dr. Michael Johnston, University of Oxford, UK
- Prof. Dr. Jonathan Finley, TU München
- Prof. Dr. Julian Stangl, Johannes Kepler, Universität Linz, Österreich
- Dr. Heinz Schmid, BM Zürich, Schweiz

**Lehrstuhl für Festkörperoptik (Prof. Peschel)**

- Sebastian Klembt (Universität Würzburg)
- Christian Schneider (Universität Oldenburg)
- D. Christodoulides, CREOL, University of Central Florida, Orlando, USA
- R. Morandotti, INRS, University Montreal, Canada
- H. Price, University of Birmingham, U.K.
- I. Carusotto, University Trento, Italy
- Roberto Morandotti, INRS Montreal, Kanada

## Institut für Optik und Quantenelektronik

**Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen (Prof. Stöhlker)**

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Goethe-Universität Frankfurt
- TU Darmstadt
- Karlsruher Institut für Technologie
- CERN (Europäische Organisation für Kernforschung) Genf/Schweiz

**Lehrstuhl für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)**

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Max-Born-Institut Berlin
- Technische Universität Wien/Österreich
- Weizmann Institute of Science Rehovot/Israel

**Lehrstuhl für Röntgenphysik (Prof. Röhlberger)**

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- DESY Hamburg (Deutsches Elektronen-Synchrotron)
- ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) Grenoble/Frankreich
- Weizmann Institute of Science Rehovot/Israel
- HZDR (Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf)
- European XFEL, Schenefeld
- Institut Néel, Grenoble/Frankreich
- Friedrich-Alexander Universität Erlangen
- TU Kaiserslautern
- Argonne National Laboratory, USA
- Shizuoka Institute of Science and Technology, Japan

**Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung (Prof. Zepf)**

- Stanford University
- Queen's University Belfast
- Peking University
- Michigan University, USA
- Centre for Advanced Laser Applications (CALA), München
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- CEA Saclay, France

**Lehrstuhl für Quantenelektronik (Prof. Spielmann)**

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Max-Born-Institut Berlin
- TU Braunschweig
- Technische Universität Wien, Österreich
- Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- University of California Berkeley, Berkeley, USA
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- INRS Montreal, Canada
- Laboratoire d'Optique Appliquée, Palaiseau, France

**Lehrstuhl für Relativistische Laserphysik (Prof. Kaluza)**

- GSI Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung
- TU Darmstadt
- Universität Frankfurt/Main
- TU Dresden
- HZDR (Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf)
- DESY Hamburg (Deutsches Elektronen-Synchrotron)
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin
- Lastronics GmbH, Jena
- Ernst-Abbe-Hochschule, Jena
- Helmholtz-Zentrum Berlin
- Forschungszentrum Jülich
- Universität Düsseldorf
- Ludwig-Maximilian Universität München
- Max-Planck-Institut Garching
- Universität Zürich
- Paul-Scherrer-Institut, Villigen, Schweiz
- Imperial College London, UK
- University of Oxford, UK
- University of Strathclyde, UK
- Queens University Belfast, UK

- University of Gothenburg, Sweden
- Université de Bordeaux, France
- HILASE Dolní Břežany, Czech Republic
- Universität Salamanca, Spain
- Universidad Politecnica de Madrid, Spain
- University of Michigan, USA
- University of Austin, Texas, USA
- Stanford Linear Accelerator Center, USA
- University of Alberta, Canada
- Osaka University, Japan

### Otto-Schott-Institut für Materialforschung

#### Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe (Prof. Rettenmayr)

- Prof. Mingfang Zhu, Southeast University, Nanjing, China
- Prof. Evgenyi Kharanzhevski, Udmurt State University, Russland
- Prof. Dmitry Alexandrov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russland

#### Lehrstuhl für Materialwissenschaft (Prof. Jandt)

- Prof. Dr. U.S. Schubert, FSU Jena
- Prof. Dr. Axel Brakhage, FSU Jena, HKI Jena

#### Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien (Prof. Müller)

- Prof. Gbureck, Universität Würzburg
- Prof. Fischer, Universität Erlangen
- Prof. Hillger, Uniklinikum Jena
- Dr. Bonse, BAM Berlin
- Dr. Fuchs, asphericon GmbH, Jena

#### Professur für Mechanik funktioneller Materialien (Prof. Gnecco)

- Universität Basel, Schweiz
- Justus-Liebig-Universität Giessen
- Jagiellonian University Krakow, Polen
- University of Zaragoza, Spanien

### Theoretisch –Physikalisches Institut

#### Lehrstuhl für Gravitationstheorie (Prof. Brügmann)

- Wolfgang Tichy, Florida Atlantic University, USA
- D. Hilditch, Uni Lissabon, Portugal
- T. Dietrich, Uni Potsdam

#### Professur für Gravitationstheorie (Prof. Bernuzzi)

- A. Nagar, INFN, Italy
- A. Perego, Uni Trento, Italy
- D. Radice, PSU, USA

#### Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Gies)

- die Gruppen des Instituts für Theoretische Physik Leipzig (Partner im GRK 2522)
- die Gruppen der Profs. S. Karsch, J. Schreiber, H. Ruhl der LMU München und
- die Gruppe von Prof. C. Müller der HHU Düsseldorf (Partner in der FOR 2783)
- die Gruppe von Prof. Astrid Eichhorn, CP3-Origins, SDU Odense, Dänemark, (Mercator Fellow im GRK 2522)

#### Lehrstuhl für Theorie korrelierter Quantensysteme in intensiven Feldern (Prof. Fritzsche)

- Prof. Andrey Surzhykov, University of Technology **Braunschweig**, Germany
- Prof. Wilfried Nörtershäuser, University of Technology **Darmstadt**, Germany
- Prof. Stefan Schippers, Justus Liebig University of **Giessen**, Germany
- Prof. Michael Meyer, XFEL **Hamburg**

#### Professur für Raumzeit und Materie (Prof. Ammon)

- IFT Madrid,
- University of Washington, Seattle, USA
- Harvard University, USA
- Daniel Grumiller, TU Wien, Österreich
- Matthias Kaminski, Alabama, USA

#### Dozentur für Relativistische Astrophysik (Prof. Meinel)

- Piotr Chrusciel, Universität Wien, Österreich
- Jörg Hennig, University of Otago, Dunedin, Neuseeland

### AG Physik- und Astronomiedidaktik

#### Professur für Physik und ihre Didaktik (Prof. Cartarius)

- Prof. Dr. Ronny Nawrodt, Physik und ihre Didaktik, Universität Stuttgart

## Forschungsmarketing und Forschungstransfer

### Erteilte und angemeldete Patente

#### Patentanmeldungen 2018

**K. Bergner, M. Gebhardt, S. Nolte**, Erzeugung von Mehrfach-Laserpulsen durch Überlagerung von Laserstrahlung (PCT/EP2018/073751)

**T. Gottschall, J. Limpert, A. Tünnermann, T. Meyer, J. Popp**, Erzeugung von synchronisierten Laserpulsen bei variablen Wellenlängen (PCT/EP2018/068875)

**S. Nolte, M.P. Siems, M. Heck, D. Richter, R. Krämer, T.A. Goebel**, Laserbasierte Anpassung der Eigenschaften optischer Komponenten (DE10 2018 120 568 A1)

**S. Schröder, N. Felde, L. Coriand, M. Trost, G. Notni**, Kontaminationsabweisende Beschichtung für optische Komponenten (DE102018110251.8)

**K. Bergner, S. Nolte**; Laserbearbeitung eines transparenten Werkstücks (PCT/EP2018/073604)

**F. Setzpfand, F. Eilenberger, M. Gräfe, M. Bilaberte-Basset**, Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische Anwendungen (DE102018215831B4, DE102018215833B4)

**T.Pertsch, F. Setzpfand, F. Eilenberger, M. Gräfe**, Optische Anordnung zur hyperspektralen Beleuchtung und Auswertung eines Objektes (DE102018210777B4)

**M. Steglich, D. Schmelz, M. Oehme, J. Schulze**, Strahlungsdetektierendes Halbleiterbauelement (PCT/EP2018/064015)

**S. Nolte, D. Richter, R. Krämer, M. P. Siems, T. A. Goebel**, Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung mittels interferierender Laserstrahlung (DE102018105254B4)

**M.P. Siems, S. Nolte, M. Heck, D. Richter, R. Krämer, T.A. Goebel**, Verfahren zur Herstellung eines optischen Bauelementes mittels Laserstrahlung (DE102018120568.6)

**C. Stihler, C. Jáuregui Misas, J. Limpert, A. Tünnermann**, Vermeidung von Modeninstabilität in einer optischen Verstärkerfaser (PCT/EP2018/069383)

#### Patentanmeldungen 2019

**S. Schröder, N. Felde, L. Coriand, M. Trost, G. Notni**, Antifouling mirror and method for producing the same (JP 2019-075427)

**C. Jáuregui Misas, A. Tünnermann, J. Limpert**, Lichtwellenleiter (DE 102019114974.6)

**S. Schröder, N. Felde, L. Coriand, M. Trost, G. Notni**, Contamination-Repellent Mirror and Method for Producing the Same (NL 2022968, US 16/396,492)

**J. Sperrhake, M. Nisser, M. Rapczynski, C. Zhan, G. Notni, A. Al-Hamadi, T. Pertsch**, Dreidimensionale Messung orts aufgelöster Farbveränderungen in Echtzeit (DE 102019132708.3)

**M. Gräfe, M. Bilaberte-Basset, F. Eilenberger, F. Setzpfand**, Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische Anwendungen (PCT/EP2019/074338, PCT/EP2019/074340)

**F. Setzpfand, F. Eilenberger, M. Gräfe, T. Pertsch**, Optische Anordnung zur hyperspektralen Beleuchtung und Auswertung eines Objektes (PCT/EP2019/067221)

**D. Richter, R. Krämer, T.A. Goebel, M.P. Siems, S. Nolte**, Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung mittels interferierender Laserstrahlung (PCT/EP2019/055651)

**C. Bösel**, Verfahren und Vorrichtung zur Projektion von Mustern (DE 102019001922.9)

**S. Stempfhuber, D. Gäbler, P. Schenk, P. Munzert, S. Schwinde**, Verfahren zur Herstellung einer Aluminiumschicht und optisches Element (DE 102019122078.5)

**E.-B. Kley, U.D. Zeitner, F. Schrempel**, Verfahren zur Herstellung eines diffraktiven optischen Elements und diffraktives optisches Element (DE 102019134336.4)

**M.P. Siems, S. Nolte, M. Heck, D. Richter, R. Krämer, T.A. Goebel**, Verfahren zur Herstellung eines optischen Bauelementes mittels Laserstrahlung (PCT/EP2019/072605)

**S. Schröder, N. Felde, L. Coriand, A. Gärtner, G. Notni, J. Eberhardt**, Verfahren zur Herstellung und Verwendung eines Substrats mit einer funktionalisierten Oberfläche (PCT/EP2019/056862)

**J. Körner, A. Lucianetti, T. Mocek, J. Hein**, A laser system providing a tapered intensity profile of an output beam within an unstable optical resonator layout and method thereof (EP3729573, WO/2019/219101)

#### Patentanmeldungen 2020

**A. Tünnermann, C. Stihler, C. Jáuregui Misas, J. Limpert**, Avoiding mode instability in an optical amplifier fiber (US 16/631,867)

**A. Tünnermann, C. Jáuregui Misas, J. Limpert**, Lichtwellenleiter (PCT/EP2020/065422)



**M.A. Schmidt, F. Eilenberger, A. George, A. Turchanin**, Bauteil und Verfahren zur effizienten nicht-linearen Lichtkonversion basierend auf dem direkten Wachstum von atomar dünnen Übergangsmetalldichalkogenen (TMDCs) auf dem wellenleitenden Bereich optischer Fasern oder vergleichbarer optischer Wellenleiter (DE 102020118780.7, DE 102020002708.3)

**T. Pertsch, J. Sperrhake, M. Nisser, C. Zhang, G. Notni, A. Al-Hamadi, M. Rapczynski**, Dreidimensionale Messung orts aufgelöster Farbveränderungen in Echtzeit (DE 102020108064.6)

**S. Nolte, K. Bergner, M. Gebhardt**, Erzeugung von Mehrfach-Laserpulsen durch Überlagerung von Laserstrahlung (EP 18773345.6)

**S. Nolte, D. Richter, R. Krämer, P.M. Siems, T.A. Goebel**, Erzeugung von Periodischen Modifikationen mittels Fokussierung, Strahlteilung, adaptiven Elementen und ultrakurzen Pulsen (EP19715393.5)

**A. Tünnermann, J. Popp, T. Gottschall, T. Meyer, J. Limpert**, Erzeugung von synchronisierten Laserpulsen bei variablen Wellenlängen (EP 18749308.5)

**S. Nolte, K. Bergner**, Laser Machining a Transparent Workpiece (US 16/643,641)

**S. Nolte, K. Bergner**, Laserbearbeitung eines transparenten Werkstücks (EP 18773343.1)

**S. Nolte, D. Richter, R. Krämer, P.M. Siems, T.A. Goebel**, Method and Device for machining by means of interfering laser radiation (CA 3093339)

**S. Nolte, Q. Li, M. Chambonneau**, Method and system for laser welding of a semiconductor material (DE 102020115878.5)

**G. Notni, E.-B. Kley, S. Heist**, Sequenzielle Streifenprojektion (DE 102020201536.8)

**F. Eilenberger, S. Vogl**, Verfahren und Anordnung zur Erzeugung einzelner Photonen zur Verwendung in Systemen zur Quantenkryptographie mittels Operation auf einer Fraunhofer-Linie (DE 102020126956.0)

**S. Nolte, D. Richter, R. Krämer, P.M. Siems, T.A. Goebel**, Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung mittels interferierender Laserstrahlung (US 16/978,718)

**J. Rothhardt, W. Eschen, J. Limpert**, Verfahren und Vorrichtung zur Charakterisierung eines kohä-

renten Lichtfelds in Amplitude und Phase (DE 102020101989.0)

**E. Shestaev, A. Tünnermann, J. Limpert, A. Klenke**, Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung gepulster Laserstrahlung mit Bestimmung von zeitlichen Änderungen der Träger-Einhüllenden-Phase (DE 102020124969.1)

**J. Rothhardt, G.T. Tadesse, W. Eschen, J. Limpert**, Verfahren und Vorrichtung zur linsenlosen Bildgebung mittels Fourier-Transformations-Holographie (DE 102020101994.7)

**P. Schenk, S. Stempfhuber, D. Gäbler, P. Munzert, S. Schwinde**, Verfahren zur Herstellung einer Aluminiumschicht und optisches Element (EP 20187203.3, US 16/994,526)

**A. Tünnermann, C. Stihler, C. Jáuregui Misas, J. Limpert**, Vermeidung von Modeninstabilität in einer optischen Verstärkerfaser (EP 18750342.0)

#### Schutzrechtserteilungen 2018

**A. Klenke, J. Limpert, H.-J. Otto, A. Tünnermann**, Optical Array Comprising a Beam Splitter (US9,941,653B2)

**T. Gottschall, J. Limpert, A. Tünnermann, M. Baumgartl**, Apparatus and Method for Producing Short Radiation Pulses (US9,880446B2)

**U.D. Zeitner, T. Weichelt, Y. Bourgin**, Beleuchtungseinheit und Vorrichtung zur lithografischen Belichtung (EP3141961B1)

**T. Gottschall, J. Limpert, A. Tünnermann, T. Meyer, J. Popp**, Erzeugung von synchronisierten Laserpulsen bei variablen Wellenlängen (DE102017115687B3)

**N. Felde, L. Coriand, A. Duparré, P. Dannberg, G. Notni**, Funktionale Beschichtung und Verfahren zu deren Herstellung (DE102014119233B4)

**U.D. Zeitner, T. Weichelt, Y. Bourgin**, Illumination Unit and Device for Lithographic Exposure (US10,101,665B2)

**M. Müller, M. Kienel, A. Klenke, A. Tünnermann, J. Limpert**, Lasersystem mit Überlagerung von zeitlich oder räumlich separaten Laserpulsen (DE102016108282B4)

**C. Voigtländer, J. U. Thomas, S. Nolte, A. Tünnermann, R. Williams**, Modenfilter mit Brechzahlmodifikation (EP2761344 B1)

**C. Jauregui Misas, F. Stutzki, J. Limpert, J. U. Thomas, C. Voigtländer, S. Nolte, A. Tünnermann**, Transversalmodenfilter für Wellenleiter (EP2478400B1)

**T. Gottschall, M. Baumgartl, A. Tünnermann, J. Limpert**, Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von kurzen Strahlungspulsen (EP3063590B2)

**T. Eidam, J. Limpert, A. Tünnermann, J. Rothhardt, A. Klenke, S. Hädrich, E. Seise**, Vorrichtung zur Erzeugung von Lichtpulsen (EP2807710B1)

**D. Weigel, E. Wong, A. Stark, R. Kowarschik, H. Babovsky**, Verfahren zur strukturierten Beleuchtung (DE102018004078A1)

**R. Kowarschik, A. Stark, D. Weigel, L. Schmidl, C. Geis, H. Babovsky**, Verfahren und Vorrichtung zur hochaufgelösten Fluoreszenzmikroskopie (DE102018124984A1)

#### Schutzrechtserteilungen 2019

**H. Gross, M. Zhong**, Device for contactless optical distance measurement (CN105992929B)

**C. Stihler, C. Jauregui Misas, J. Limpert, H.-J. Otto, A. Tünnermann**, Active Stabilization of Mode Instabilities (US10,490,969B2)

**C. Jauregui Misas, A. Tünnermann, J. Limpert, C. Gaida**, Optical Waveguide (US10,281,647B2)

**H.-J. Otto, C. Jauregui Misas, J. Limpert, A. Tünnermann**, Optical Waveguide as Amplifier Fibre for High-Performance Operation (US10,340,655B2)

**A. Klenke, A. Tünnermann, E. Seise, J. Limpert**, Optische Verstärkeranordnung (EP2612405B1)

**U. Schulz, A. Szeghalmi, L. Ghazaryan, E.-B. Kley**, Verfahren zur Herstellung einer niedrigbrechenden Schicht und Schichtsysteme zur Entspiegelung (DE102016100907B4)

**U. Schulz, A. Szeghalmi, L. Ghazaryan, E.-B. Kley**, Verfahren zur Herstellung einer porösen Brechzahlgradientenschicht (DE102016100914B4)

**H. Gross, M. Zhong**, Vorrichtung zur berührungslosen optischen Abstandsmessung (DE102013113265B4)

#### Schutzrechtserteilungen 2020

**S. Nolte, M.P. Siems, M. Heck, D. Richter, R. Krämer, T.A. Goebel**, Laserbasierte Anpassung der Eigenschaften optischer Komponenten (DE10 2018 120 568 A1)

**F. Setzpfand, F. Eilenberger, M. Gräfe, M. Bilaberte-Basset**, Optische Anordnung für fluoreszenzmikroskopische Anwendungen (DE102018215831B4)

**T. Pertsch, F. Setzpfand, F. Eilenberger, M. Gräfe**, Optische Anordnung zur hyperspektralen Beleuchtung und Auswertung eines Objektes (DE102018210777B4)

**D. Richter, J. U. Thomas, C. Voigtländer, S. Nolte**, Optisches Bragg-Gitter (DE102015107013B4)

**E.-B. Kley, M. Steglich, T. Käsebier, D. Lehr**, Strahlungsabsorber (DE102013108288B4)

**S. Nolte, D. Richter, R. Krämer, M. P. Siems, T. A. Goebel**, Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung mittels interferierender Laserstrahlung (DE102018105254B4)

**A. Szameit, M. Gräfe, R. Heilmann, A. Perez-Leija, S. Nolte**, Verfahren und Vorrichtung zur Generierung von Zufallszahlen (DE 102014202312.2)

**G. Notni, I. Schmidt, P. Lutzke, K. Srokos, P. Kühmstet, S. Heist**, Vorrichtung und Verfahren zum räumlichen Vermessen von Oberflächen (EP3292371B1)

## Messebeteiligungen

**Schülermesse „Traumberuf IT & Technik“ 2018**, 06.07.2018, München

**Schülermesse „Traumberuf IT & Technik“ 2019**, 04.12.2019, Berlin



Der Physikstudent Adrian Minnich bei der Beratung von Schülern auf der Schülermesse „Traumberuf IT & Technik“ am 04.12.2019 in Berlin Foto: Claudia Hilbert (Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät)

# INTERNATIONALES

## Gastwissenschaftler

Nachfolgend sind Gastwissenschaftler aufgeführt, die im Berichtszeitraum an der Physikalisch–Astronomischen Fakultät gearbeitet haben oder noch hier arbeiten.

### Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

**Stefanie Rätz:** ESA ESTEC Noordwijk, Niederlande

**Ronny Errmann:** University of Hertfordshire, GB

**Ernst Paunzen:** Universität Brno, Tschechische Republik

**Andrea Sant'Angelo:** Universität Tübingen

**Steve Ertel:** Steward Observatory, University of Arizona, USA

**Nicole Pawellek:** Cambridge University, UK

**Theo Pribulla, Zoltan Garai:** Observatorium Tatranská Lomnica, Slowakei

**Tobias Schmidt:** Universität Hamburg

**Po-Chieh Jason Huang:** University of Taiwan

**Dario Fritzewski:** AIP Potsdam

**Jesse Chapman:** University of Berkeley, USA

**Gracjan Maciejewski:** Universität Toruń, Polen

**Pawel Zielinski:** Universität Warschau, Polen

**Anna Julia Poser:** Universität Rostock

**Gerardo Avila:** ESO Garching

### Institut für Angewandte Physik

Lehrstuhl für Angewandte Physik  
(Prof. Tünnermann)

**Rubert Ursin:** Österreichische Akademie der Wissenschaften, IQOQI – Institute für Quantum Optics and Quantum Information Vienna, Austria

**Giorgio Basagno:** ESA / ESTEC Copernicus Sentinel 4 Project Manager

**Ingo Walter:** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Germany

**Fabian Dürr:** Vrije Universiteit Brussel, Belgium

**Manfred Albrecht:** Universität Augsburg; Institut für Physik, Germany

Lehrstuhl für Theorie optischer Systeme  
(Prof. Gross)

**Theo Lasser:** EPFL, Lausanne, Switzerland

Professur für Festkörperlaser (Prof. Limpert)

**Andreas Przystawik, David Schwickert, Slawomir Skruszewicz:** DESY, Hamburg, Germany

**Giedre Astrauskaite:** University of Glasgow, Glasgow, Scotland

**Valerie Gauthier:** Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada

**Elissa Haddad:** Institut National de la Recherche Scientifique, Varennes, Canada

**Yigit Ozan Aydin:** Université Laval, Quebec City, Canada

**Gayathri Bharatan:** Macquarie University, Sydney, Australia

**Andreas Blumenstein Peter Simon:** Laserlabor Göttingen, Göttingen, Germany

**Rebecca Daoud:** University of Windsor, Ontario, Canada

**Frédéric Maes:** Université Laval, Quebec City, Canada

**Tamas Nagy:** Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Berlin, Germany

**Steffen Wittek:** CREOL, University of South Florida, Orlando, USA

Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)

**Bennet Fisher:** Institut National de la Recherche Scientifique, Varennes, Canada

**Roberto Osellame:** Politecnico di Milano, Milano, Italy

**Lauris Talbot:** Université Laval, Quebec, Canada

**Stylianos Tzortzakakis:** Texas A&M University at Qatar, Doha, Qatar

**Gayathri Bharathan:** Macquarie University, Sydney, Australia

**Nicholas Crescimanno:** Ohio State University, Columbus, USA

**Heike Ebdorff-Heidpriem:** University of Adelaide, Adelaide, Australia

**Alex Fuerbach:** Macquarie University, Sydney, Australia

**Sergio G. Leon-Saval:** The University of Sydney, Sydney, Australia

**Teodor Malendevych:** University of Central Florida, Orlando, USA

**Beat Neuenschwander:** Bern University of Applied Sciences, Bern, Switzerland

### Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)

**Shih-Yen Lim:** Academia Sinica, Taipeh, Taiwan  
**Dragomir Neshev Rifat Aoni, Yuri Kivshar, Andrei Komar, Kirill Koshelev, Andrey Sukhorukov, Matthias Wurdack, Matthew Parry, Kay Wang, Marcus Cai, Allessandro Tuniz, Birgit Stiller:** Australian National University, Canberra, Australia  
**Mattes Liebsch:** Cellavision, Lund, Sweden  
**Balamati Choudhury, Bhavya M V:** CSIR-National Aerospace Laboratories, Bangalore, India  
**Alexander Minovich:** Eureka Aerospace Inc, Pasadena, USA  
**Lukas Heller:** ICFO, The Institute of Photonic Sciences, Barcelona, Spain  
**Maxime Pinsard:** INRS Montréal, Montréal, Canada  
**Sören Wengerowsky:** Institute for Quantum Optics and Quantum Information, Wien, Austria  
**Ray-Kuang Lee:** Institute of Photonics Technologies, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan  
**Markus Raschke:** JILA, University of Colorado at Boulder, Boulder, USA  
**Dziugas Kimbaras, Stefan Maier, Christian Schneider:** Julius-Maximilians-Universität München, München, Germany  
**Ivan Fernandez-Corbaton:** Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany  
**Maria Kroychuk:** Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
**Yen-Hung Chen:** National Central University, Zhongli, Taiwan  
**Gia Quyet Ngo:** Philipps-Universität Marburg, Marburg, Germany  
**Kuan-Chao Chen, Shi-Yen Lin:** Research Center for Applied Sciences, Academia Sinica, Taipeh, Taiwan  
**Steffen Porthun:** RHK Technology, Troy, USA  
**Jianshu Gao:** Technical University Ilmenau, Ilmenau, Germany  
**Valerio Gili:** Université Paris Diderot, Paris, France  
**Roland Schiek:** University of Applied Science Regensburg, Regensburg, Germany  
**Angela Barreda:** University of Cantabria, Santander, Spain  
**Georg von Freymann:** University of Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany  
**Pablo Albella:** University of Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, Spain  
**Asger Mortensen:** University of Southern Denmark, Odense, Denmark

**Igor Aharonovich, Alexander Solntsev:** University of Technology Sydney, Sydney, Australia  
**Ben Kraus:** University of York, York, Ukraine  
**Bert Hecht:** University Würzburg, Würzburg, Germany

### Professur für Technische Physik (Prof. Wyrowski)

**Tao Liu:** Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun, China  
**Yang Qiao:** Changchun University of Science and Technology, Changchun, China  
**Qiang Song:** Telecom Bretagne, IMT- Atlantique, Paris, France  
**Bentouhami Billel:** Université de Bordj Bou Arréridj, Bordj Bou Arréridj, Algeria  
**Tingchen Zhang:** China Academy of Space Technology, Beijing, China

## Institut für Festkörperphysik

**Lehrstuhl für Festkörperphysik (Prof. Fritz)**  
**Benedikt Schrode:** Uni Graz, Österreich  
**Oliver Monti:** University of Arizona, Tuscon, USA  
**Haruki Sato:** Chiba University Japan  
**Takumi Aihara:** Chiba University Japan  
**Lehrstuhl für Festkörperphysik (Prof. Ronning)**  
**Mbopda Tcheum Gabin Landry:** University of Yaoundé, Cameroon  
**Vladimir Rajic:** University of Belgrad, Serbia

### Professur für Tieftemperaturphysik

**Olena Zhytlukhina, Mikhail Belogolovskii:** Donetsk Institute for Physics and Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Donetsk  
**Yuri Shukrinov, Ilhom Rahmonov:** Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

## Institut für Festkörpertheorie und -optik

**Lehrstuhl für Festkörpertheorie (Prof. Botti)**  
**Francesco Delodovici:** Università degli Studi di Milano, Italien  
**Giancarlo Cappellini:** University of Cagliari, Italien  
**Constanza Ronchi:** Università degli Studi di Milano-Bicocca, Italien  
**Ernesto Wrasse:** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasilien



## Institut für Optik und Quantenelektronik

### Lehrstuhl für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

**Fang Li:** Ohio State University, USA

**Yunyun Dai:** Aalto University, Finnland

**Alexander Dreischuh:** Sofia University, Sofia, Bulgarien

**Henryk Fiedorowicz, Andrzej Bartnik, Karol Janulewicz, Przemysław Wachulak, Jose Antony Arikatt:** Military University of Technology, Warschau, Polen

### Lehrstuhl für Quantenelektronik (Prof. Spielmann)

**Michael Chini, Mihai E. Vaida:** University of Central Florida in Orlando, USA

**Aleksei Murzanev, Aleksei Korytin:** Institut für Angewandte Physik RAS Nizhny Novgorod, Russland

**Pavel Polynkin:** College of Optical Sciences, The University of Arizona, Tucson, USA

**Sergej Makarov, Ekaterina Tiguntseva:** ITMO University, Sankt Petersburg, Russland

**Georgii Zograf:** Gastdoktorand, ITMO University, Sankt Petersburg, Russland

### AG Röntgenoptik (Prof. Förster)

**Baifei Shen, Diriu Xu:** Shanghai Normal University, China

**Liankiang Ji, Tongjun Xu, Jiancai Xu:** Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM), China

**Andrzej Kornaszewski:** University of Strathclyde, Glasgow, UK

**Eyal Kroupp, Meiri Pessah, Evgeny Stambulchik:** Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel

## Otto-Schott-Institut für Materialforschung

### Lehrstuhl für Materialwissenschaft (Prof. Jandt)

**Huiliang Cao,** Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Science, PR China, Humboldt-Forschungsstipendiat

### Professur für Mechanik funktioneller Materialien (Prof. Gnecco)

**Santiago Casado:** Technical University of Ambato, Ecuador

**Mathew Jacob Shiby:** Kaunas University of Technology, Litauen

## Theoretisch – Physikalisches Institut

### Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Gies)

**Sebastian Steinhaus:** Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo, Canada

**Benjamin Knorr:** Radboud University, Nijmegen, Niederlande

**Wolfgang Tichy:** Florida Atlantic University, USA

**Carsten Müller:** Heinrich Heine Uni Düsseldorf

**Jörg Schreiber, Patrik Böhl, Leonard Doyle:** Ludwig-Maximilians-Universität München, Garching

**Aaron Held:** Imperial College London, UK

**Hanno Sahlmann:** Universität Erlangen

**Axel Maas:** Universität Graz, Österreich

**Michael Thies:** Universität Bielefeld

**Cesa Mata:** Universität Regensburg

**Dimitri Gkiatas:** Universität Köln

**Sabor Salek:** Universität Frankfurt/Main

**P. Millington:** University of Nottingham, UK

### Professur für Raumzeit & Materie (Prof. Ammon)

**Johanna Erdmenger, Pascal Fries:** Universität Würzburg

**Oliver Schlotterer:** Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und Universität, Potsdam

**Mario Flory:** Universität Krakau, Polen

**Amadeo Jimenez:** Humboldt-Universität Berlin

### Lehrstuhl für Gravitationstheorie (Brüggemann)

**Piotr Chrusciel:** Universität Wien, Österreich

**Roman Gold:** Universität Frankfurt/Main

**Tim Dietrich:** Nikhef, Amsterdam, Niederlande

**Nils Deppe:** Cornell University, Ithaca, NY, USA

**Wolfgang Tichy:** Florida Atlantic University, USA

**Mikhail Plyushchay:** Universidad de Santiago de Chile

**Sophie Munzel:** Aix Marseille Université, Frankreich

### Professur für Gravitationstheorie (Prof. Bernuzzi)

**Roland Haas:** University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

**Vijay Varma:** Caltech, Pasadena, USA

**Abhiruo Ghosh:** Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und Universität Potsdam

**Federico Schianchi:** Universität Potsdam

**Viktor Skoupy:** Charles University, Prague, Czech Republic

**Domenico Logoteta:** Pisa University, Italien

### Freigeist-Fellow Dr. André Großardt

**Linda van Manen:** Institut für Theoret. Physik, Amsterdam, Niederlande

**Cichy Krzysztof:** Adam Mickiewicz University Poznan, Polen

**Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Wipf)****Luis Inzunza:** Universität Santiago de Chile**Karl Jansen, Paolo Stornati:** DESY Zeuthen**Michael Mandl:** Universität Graz, Österreich**Marc Wagner, Laurin Panullo:** Universität Frankfurt/Main**DFG– Arbeitsgruppe Dr. Georg Bergner****Evan Berkowitz:** Forschungszentrum Jülich

Im Rahmen der Max Planck School of Photonics (siehe S. 43 ) wurden 2020 zahlreiche Gastredner eingeladen:

01.07.2020	Prof. Peter Hommelhoff: Controlling electrons on attosecond time scales
15.07.2020	Prof. Martin Wegener: 3D Laser Nanoprinting
29.07.2020	Prof. Matthias Kling: Ultrafast and ultrasmall: Attosecond chronoscopy and reaction nanoscopy
12.08.2020	Prof. Carsten Rockstuhl: Improved Sensing of Circular Dichroism Using Dielectric Photonic Structures
26.08.2020	Prof. J.H. Schleifenbaum: Digital Additive Production
09.09.2020	Dr. Hanieh Fattahi: Laser spectroscopy at extreme limits
23.09.2020	Dr. Birgit Stiller: Light-sound interaction in optical waveguides
21.10.2020	Prof. Tim Salditt: Coherent X-ray Optics and Holographic Imaging
04.11.2020	Prof. Stefan Hell: MINFLUX nanoscopy and related matters
11.11.2020	Prof. Christine Silberhorn: Integrated quantum optics
18.11.2020	Prof. Stefan Karsch: A sharper image in space and time: High-brilliance laser-driven X-ray sources
25.11.2020	Prof. Franz Kärtner: How to shrink accelerators



Der Physik-Nobelpreisträger 2018, Prof. Dr. Gérard Albert Mourou, bei seiner Keynote Speech während der Photonics Days 2019 im Hörsaal der Friedrich-Schiller-Universität.

Fotorechte: Fraunhofer IOF Jena

## Gastaufenthalte im Ausland

### Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

**Ralph Neuhäuser:** Wien (Vorbereitung und Durchführung des IAU Focus Meetings 2018)  
Universität Padua, Italien

### Institut für Angewandte Physik

Professur für Angewandte Physik  
(Prof. Tünnermann)

**Andreas Tünnermann:** Delegationsreise des MP  
Thüringen, Vietnam, Singapur

Fa. Gigaphoton, Tokyo, Japan

Professur für Festkörperlaser (Prof. Limpert)

**Christoph Stihler:** Université Laval, Centre d'optique, photonique et laser (COPL), Québec City, Kanada

**Vincent Hilbert:** GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

**Vittoria Schuster:** National Research Council, Ottawa, Canada; Institut national de la recherche scientifique - Énergie, Matériaux et Télécommunications (INRS-EMT), Varennes, Canada

Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)

**Alessandro Alberucci:** Ghent University, Gent, Belgium

**Kim Lammers:** Université Laval, Quebec, Canada

Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)

**Frank Setzpfand:** National Central University, Zhongli, Taiwan

Universite Paris-Diderot, Paris, France

Apl. Professur für Mikro- & Nanostrukturtechnik  
(apl. Prof. Zeitner)

**Falk Eilenberger:** Academia Sinica, Taipeh, Taiwan

### Institut für Festkörperphysik

Lehrstuhl für Festkörperphysik (Prof. Fritz)

**Torsten Fritz:** University of Arizona, Tuscon, USA

**Maximilian Schaal:** Institute for Molecular Science, Okazaki, Japan

**Torsten Fritz:** Institute for Molecular Science, Okazaki und Chiba University, Japan

### Institut für Festkörpertheorie und -optik

Lehrstuhl für Festkörperoptik (Prof. Peschel)

**Arstan Bisianov, André Luiz Marques Muniz,**

**Monika Monika:** International Research Training Group GRK 2101 am Centre Énergie Mateériaux Télécommunications (INRS), Montreal, Kanada

### Otto-Schott-Institut für Material- forschung

Professur für Mechanik funktioneller Materialien  
(Prof. Gnecco)

**Enrico Gnecco:** Ben Gurion University of Negev, Israel

### Theoretisch –Physikalisches Institut

Lehrstuhl für Quantentheorie

**Georg Bergner:** Lanarca und Nicosia, Zypern

**Sean Sohrab Gray:** Universidad' Autónoma de Madrid, Spanien

**Andreas Wipf:** RUDN Universität Moskau

**Luca Zambelli:** INFN Bologna

Professur für Gravitationstheorie

**Matteo Breschi:** Villazano, Italien

## Internationale Studierende

Während in den grundständigen Studiengängen Physik und Werkstoffwissenschaft der Anteil der ausländischen Studierenden im Wintersemester 2020/21 zwischen 2,8 % (Lehramt Gymnasium) und 40% (M.Sc. Werkstoffwissenschaft) liegt, kommen im komplett englischsprachigen Studiengang M.Sc. Photonics über 95 % der Studierenden aus dem Ausland. Jeweils zum Wintersemester wurden ca. 50 Studierende aus der ganzen Welt in den M.Sc. Photonics neu immatrikuliert, 2018 waren es sogar 61. Wegen der COVID 19-Pandemie wurde zum Wintersemester 20/21 eine Fernimmatrikulation insbesondere für die ausländischen Studierenden ermöglicht, die nahezu das gesamte Studium– mit Ausnahme der Praktika– online absolvieren können. Die Physikalisch-Astronomische Fakultät unternimmt große Anstrengungen, auch den M.Sc. Physik zu internationalisieren, bisher jedoch mit mäßigem Erfolg.

Abb. 1: Ausländeranteil bei den Studierenden der Studiengänge der PAF zum Wintersemester 2020/21  
Quelle: HISPOS

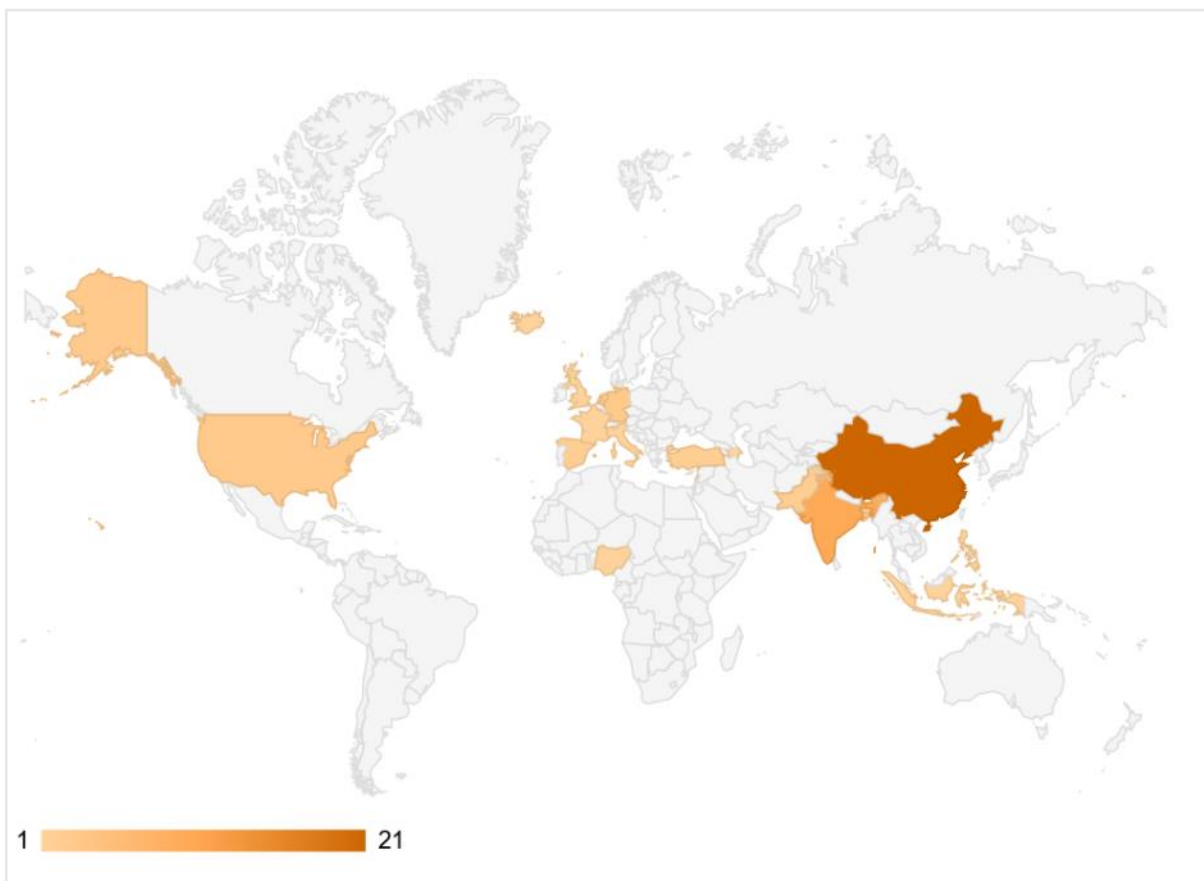
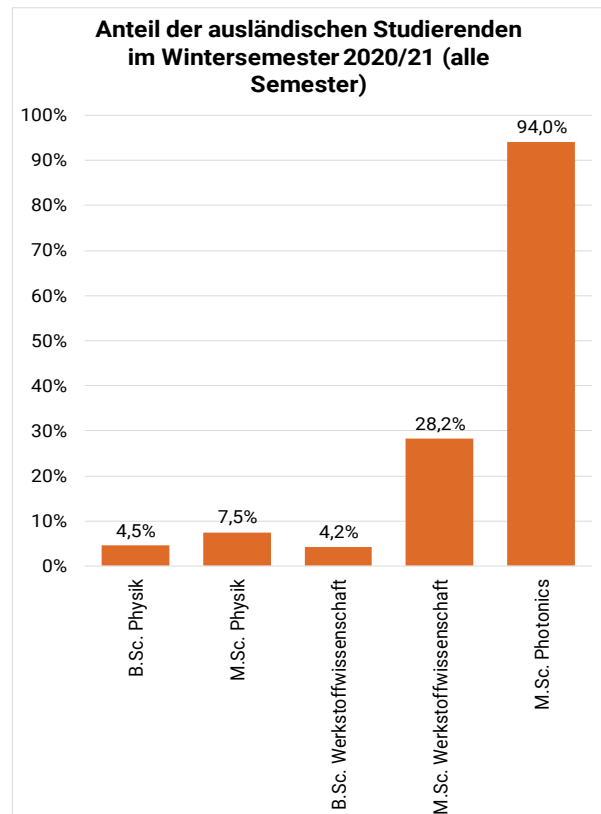


Abb.2: Herkunft der Studienanfänger im Studiengang M.Sc. Photonics im Wintersemester 2020/21



# PERSONALIA

## Berufungen und Pensionierungen

### Berufungen an die PAF

**Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi**, W2 –Professur für Theoretische Physik/Gravitationstheorie, April 2018

**Prof. Dr. Timo Mappes**, W3 –Professur für Geschichte der Physik mit Schwerpunkt Wissenschaftskommunikation (Direktor des Deutschen Optischen Museums, cofinanziert Stiftung D.O.M.), 2018

**Prof. Dr. Holger Cartarius**, W2/W3 –Professur für Physik und ihre Didaktik, September 2019

**Jun.-Prof. Dr. Giancarlo Soavi**, W1/W2 –Professur für Optik zweidimensionaler Festkörper, tenure track Juniorprofessur (cofinanziert DFG–1000-Professoren-Programm), Januar 2019

**Prof. Dr. Ralf Röhlsberger**, W3-Professur für Röntgenphysik (cofinanziert Helmholtz-Institut Jena), 2020

**Prof. Dr. Isabelle Staude**, W2-Professur für Photonische Nanomaterialien, April 2020

**Jun.-Prof. Dr. Christian Franke**, W1/W2 –Professur für digitalisierte experimentelle Mikroskopie, tenure track Juniorprofessur (cofinanziert DFG–1000-Professoren-Programm), November 2020

**Prof. Dr. Stefanie Gräfe**, W2-Professur für Theoretische Chemie am Institut für Physikalische Chemie; Erteilung der Zweitmitgliedschaft in der Physikalisch-Astronomischen Fakultät im Januar 2020

### Laufende Berufungsverfahren

**W2 /W3 –Professur für Quantenfeldtheorie** (Wiederbesetzung), Ruferteilung Dezember 2020

**W3–Professur für Astrophysik** (an der Thüringer Landessternwarte Tautenburg), Ruferteilung Dezember 2020

**W2 / W3-Professur für optisches Systemdesign** (Nachfolge Prof. Gross)

**W3 –Professur für Theoretische Physik – Raumzeit und Materie** (Berufungsverfahren auf eine höherwertige Professur)

### Rufannahmen nach außen

**PD Dr. Claudia Schnohr**, W3-Professur für Experimentelle Festkörperphysik, Universität Leipzig, 2019

**Prof. Dr. Torsten Fritz**, Visiting Professor im Department of Chemistry and Biochemistry, University of Arizona, Tucson, USA, 2019

**PD Dr. Andreas Undisz**, Professur für Elektronenmikroskopie und Mikrostrukturanalytik, TU Chemnitz, 2020

### Ablehnungen von Ruf nach außen

**Dr. Robert Röder**, W1-Professur, Universität Paderborn

**Jun.-Prof. Dr. Isabelle Staude**, W2-Professur für Quantenmaterialien, Universität Oldenburg

**Prof. Dr. Martin Ammon**, W3-Professur, Universität Stuttgart

### Pensionierungen

**Prof. Dr. Paul Seidel**, C3 –Professur für Angewandte Physik/Tieftemperaturphysik, September 2018, seit Oktober 2018 Seniorprofessor

**Prof. Dr. Andreas Wipf**, C4-Professur für Theoretische Physik/ Quantentheorie, September 2020, seit Oktober 2020 Seniorprofessor



Foto: privat

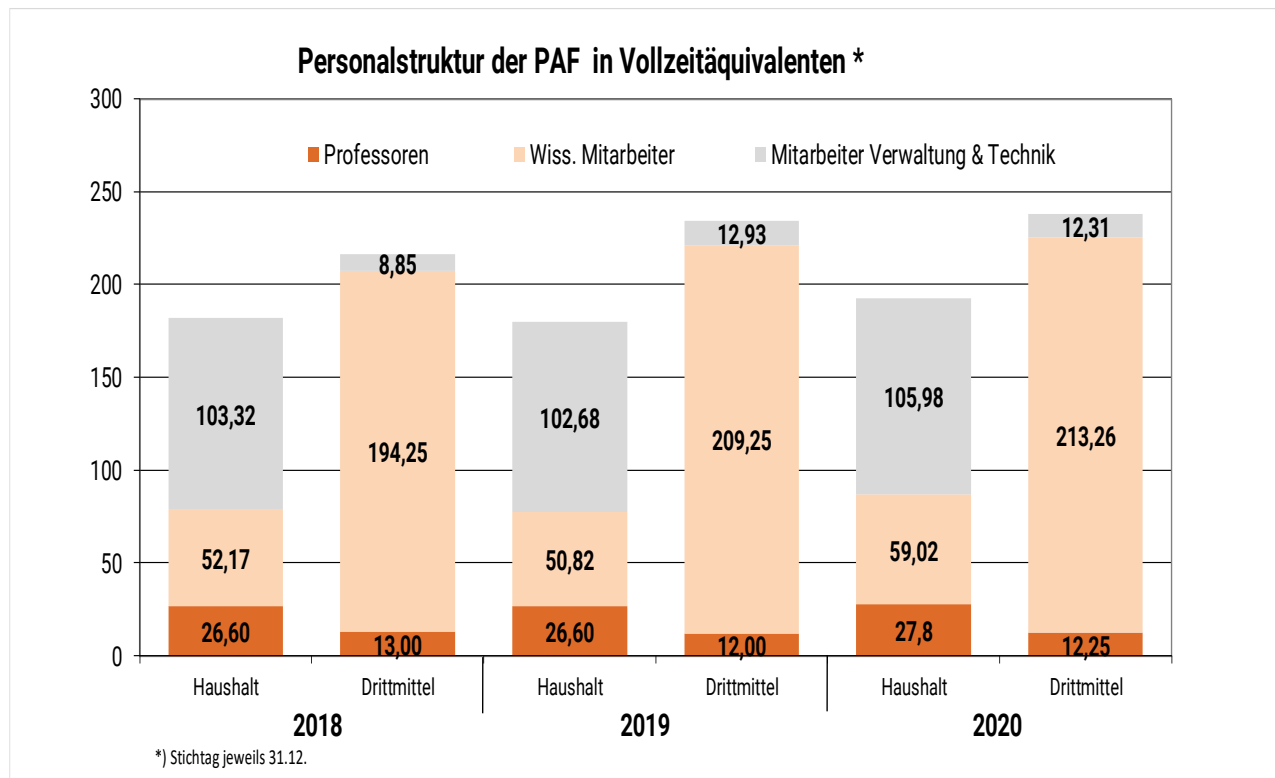
Abb. Der ehemalige Dekan, Prof. Wipf, wird sich als Seniorprofessor u.a. um die Austragung der DPG–(Frühjahrs-)Tagungen 2021 in Jena kümmern.

## Personalstruktur

Wie dem unten aufgeführten Diagramm zur Personalstruktur der Physikalisch-Astronomischen Fakultät zu entnehmen ist, sind mehr als die Hälfte unserer Mitarbeiter über Drittmittel oder Stipendien beschäftigt. Im Bereich der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Stipendiaten sind dank der sehr erfolgreichen Drittmittelwerbung (siehe S. 7) sogar nur etwa ein Viertel aus dem Haushalt finanziert. Und selbst bei den Professoren sind mehr als ein Drittel über Stiftungs-Professuren oder gemeinsame Berufungen mit außeruniversitären Einrichtungen finanziert. Meist hat dies eine deutlich reduzierte Lehrverpflichtung zur Folge.

Zur Absicherung einer hochqualitativen Lehre und zur wissenschaftlichen Betreuung von Großgeräten sind im Bereich der akademischen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen entsprechend dem gemeinsam mit dem Personaldezernat und der Universitätsleitung erarbeiteten Dauerstellenmodell sogenannte Funktionsstellen eingerichtet

worden. Gegenwärtig sind etwa 36% der Wissenschaftler-Vollzeitäquivalente bzw. 22% der Wissenschaftlerköpfe unbefristet. Da die Fakultät nur in Ausnahmefällen wie z.B. Bleibeverhandlungen zusätzliche Haushaltsstellen bekommen hat, geht eine Erhöhung der Zahl der Dauerstellen zu Lasten der befristeten Wissenschaftler- oder Technikerstellen. Fakultätsleitung und Fakultätsrat hatten sich daher bereits 2017 im zähen Ringen auf 21 Dauerstellen, die zur Absicherung von Lehre und Forschungsinfrastruktur unbedingt notwendig sind, geeinigt.



## Preise und Ehrungen

Nachfolgend sind Preise und Ehrungen aufgeführt, die Mitglieder der Physikalisch-Astronomischen Fakultät im Berichtszeitraum erhalten haben.

### Dekanat / Studiendekanat

**Team des Physikalischen Grundpraktikums (Katharina Schreyer, Torsten Zentgraf, Regina Geiling, Frank Perner):** Lehrpreis des Dekanats der PAF 2018

**Agnes Sambale:** Lehrpreis des Dekanats der PAF 2019



Abb. 1. Das Team des Physikalischen Grundpraktikums erhielt 2018 den Lehrpreis des Dekanats für sein außerordentliches Engagement.

Foto: JanBernert Photography

### Institut für Angewandte Physik

**Andreas Tünnermann, Jens Limpert:** Kaiser-Friedrich-Forschungspreis, "CDIS Jena – Cancer Diagnostic Imaging Solution Jena: Die Revolution in der intraoperativen Schnellschnitt-diagnostik", 2018

**Lehrstuhl für Angewandte Physik (Prof. Tünnermann)**

**Markus Gräfe:** STIFT Special Prize - Applied Photonics Award, "Integrated Photonic Quantum Walks in Complex Lattice Structures", 2018

**Stefan Heist:** Applied Photonics Dissertation Award, "Hochgeschwindigkeits-3D-Formvermessung mittels aperiodischer Sinus-Muster", 2018

**Fabian Stutzki:** Carl Zeiss Award for Young Researchers; "Active large-core fibers for ultrashort pulse lasers", 2018

**Andreas Tünnermann:** Lothar-Späth-Award, "Ultrakurzpuls-laser der nächsten Generation", 2018

**Andreas Tünnermann:** Wissenschaftspreis Stifterverband für Verbundforschung, 2018

**Stefan Heist:** SPIE »Rising Researcher Award« "Forschungsarbeit in den Bereichen der optischen Messtechnik, dreidimensionalen Formmessung und schnellen Musterprojektion", 2019

**Carolin Rothhardt:** Promotionspreis der FSU 2020, "Plasma-aktives Fügen von optischen Komponenten für Hochleistungslaser"

**Professur für Festkörperlaser (Prof. Limpert)**

**Christian Gaida:** 3rd Place Best Student Paper, Photonics West "Fiber Lasers: Technology and Systems", "Toward kW-level average power from a Thulium-doped fiber laser", 2018

**Martin Gebhardt:** Giersch Excellence Grant 2018 "Development of high-power, ultrafast laser sources in the mid-infrared wavelength regime"

**Martin Gebhardt:** 1st Place Best Student Paper, Photonics West "Fiber Lasers: Technology and Systems", "Nonlinear pulse compression stage delivering 43-W few-cycle pulses with GW peak-power at 2- $\mu$ m wavelength", 2018

**Tobias Heuermann:** Runner-up student award, ASSL 2018, "50fs-pulses emitted by a Tm-doped nonlinear fiber amplifier at 20W of average power"

**Marco Kienel:** Best Dissertation "Power Scaling of Ultrashort Pulses by Spatial and Temporal Coherent Combining", 2018

**Michael Müller:** 2nd Place Best Student Paper, Photonics West "Fiber Lasers: Technology and Systems", 2018, "1.8kW 16-channel ultrafast fiber laser system"

**Birgitta Schultze-Bernhardt:** Postdoktoranden-Stipendium der Daimler-Benz-Stiftung, 2018,

**Wilhelm Eschen:** ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics, "Table-top Coherent Diffractive Imaging using a High-Harmonic Source", 2019

**César Jáuregui-Misas:** Heisenbergstipendium, 2019

**Tobias Heuermann:** 3rd Place: Best student paper "Fiber Lasers XV: Technology, Systems, and Applications" 2019; "High-Power ultrafast Tm-doped fiber lasers for the generation of mid-infrared radiation in the molecular fingerprint region "

**Lukas Heller:** Fakultätspreis für beste Masterarbeit (Rohde & Schwarz), "Cavity enhanced cold atom quantum memories for temporally multiplexed quantum repeater nodes", 2019



Abb.2. Den von Rohde & Schwarz München gesponserten Fakultätspreis für die beste Masterarbeit erhielt 2019 Lukas Heller (Mitte).

Foto: JanBernert Photography

**Jens Limpert:** ERC Advanced Grant 2019 „SALT“ (High-Flux Synchrotron Alternatives Driven by Powerful Long-Wavelength Fiber Lasers)

**Michael Müller:** 2nd Place: Best Student Paper "Fiber Lasers XV: Technology, Systems, and Applications", 2019, "3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser"

**Henning Stark:** 1st Place: Best student paper "Fiber Lasers XV: Technology, Systems, and Applications" 2019, "High-power electro-optically controlled divided-pulse amplification"

**Christopher Aleshire:** 3rd Place, IOF Photonics Days Elevator Pitch Contest 2020, "The Laser Display: Using Multicore Fibers to Their Full Potential"

**Christian Gaida:** Fakultätspreis Dissertation (Rohde & Schwarz) 2020, "Power-scaling of ultrafast thulium-doped fiber laser systems"

**Robert Klas:** OSA Student Paper Award 2020 "Sub-20 fs High-energy Pulse generation at 515 nm with 50 W of Average Power"

**Martin Gebhardt:** 1st Place: Best Student Paper "Fiber Lasers XVII: Technology, Systems, and Applications" 2020, "Soft x-ray high order harmonic generation driven by high repetition rate ultrafast thulium-doped fiber lasers"

**Michael Müller:** 2nd Place: Best Student Paper "Fiber Lasers XVII: Technology, Systems, and Applications" 2020, "10.4 kW coherently-combined ultrafast fiber laser"

**Jan Rothhardt,** Röntgenpreis 2020, "Entwicklung und Anwendung von Laserquellen für extrem ultravioletter (XUV) Strahlung und weiche Röntgenstrahlung"

**Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)**

**Thorsten Goebel:** 1st Place Best Student Paper, Photonics West "Frontiers in Ultrafast Optics" 2018, "Fs-written fiber Bragg gratings in multicore fibers for astrophotonic applications"

**Daniel Richter:** Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides & Materials - Student Award, 2018

**Malte Per Siems:** Fakultätspreis Masterarbeit (Rohde & Schwarz) 2018, "Untersuchung und Anpassung der Eigenschaften ultrakurzpuls-laser-geschriebener Volumen-Bragg-Gitter in Kieselglas"

**Alessandro Alberucci:** Outstanding Reviewer of The Optical Society (OSA), 2019

**Alessandro Alberucci:** Outstanding referee of American Physical Society (APS), 2019

**Maximilian Heck:** 3rd place "Best Paper Award - SPIE Frontiers in Ultrafast Optics" 2019, "Next generation of tailored mode selective transmission gratings for fiber integrated devices"

**Stefan Nolte:** SPIE Senior Member, 2019

**Klaus Bergner:** Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung, beste Dissertation auf dem Gebiet der optischen Messtechnik, 2020; "Zeit- und orts aufgelöste Analyse der Wechselwirkung intensiver ultrakurzer Laserpulse mit Gläsern"

**Maximilian Heck:** Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung, beste Dissertation auf dem Gebiet der optischen Messtechnik 2020, "Tailored light propagation by femtosecond pulse written long period fiber gratings"

**Ria Krämer:** 2nd place "Best Paper Award - SPIE Frontiers in Ultrafast Optics" 2020, "High contrast ultrashort pulse written transmission filter based on Moiré fiber grating"

**Jan Sperrhake:** 2nd Place: »Elevator Pitches«, 2019, "Kontaktlose medizinische Sensorik für Neugeborene - Aufbruch in die Diagnostik der Zukunft"

**Jan Sperrhake, Chen Zhang, Maria Nisser:** Edmund Optics Educational Award in »Gold« "NeoVitalSensor", 2020

**Maximilian Weißflog:** Examenspreis 2020 der FSU Jena 2020, "Spontaneous Parametric Down-Conversion in GaAs Nanoantennas"



**Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)**

**Jan Sperrhake:** 2nd Place HotStuffAward 2018 "Single-Pixel-Hyperspektralkamera"

**Isabelle Staude:** Mitglied der Jungen Akademie, 2018

**Sina Saravi:** Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung, beste Dissertation auf dem Gebiet der optischen Messtechnik 2019; "Photon -pair generation in photonic crystal waveguides"



Abb.3. Den Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung für die beste Dissertation auf dem Gebiet der optischen Messtechnik erhielt 2019 Dr. Sina Saravi (Mitte)  
Foto: JanBernart Photography

**Lehrstuhl für Theorie optischer Systeme (Prof. Gross)**

**Johannes Stock:** ZEISS PhD Award in Modern Optics 2018

**Yi Zhong:** Promotionspreis der Friedrich-Schiller-Universität 2019, "Optical design methods of non-rotational symmetric optical systems with free-form surfaces"

**Johannes Stock:** Friedrich-Hund-Dissertationspreis 2020, "Holistic Simulation of Optical Systems"

**Apl. Professur für Mikro- & Nanostrukturtechnik (apl. Prof. Zeitner)**

**Meritxell Cabrejo:** Poster Award 2018, "Shape from Color: Towards Ultrafast 3D Measurements of Surfaces"

**Falk Eilenberger:** 3rd Place HotStuffAward 2018, "Regen aus der Quantenzufallswolke"

**David Schmelz:** 1st Place HotStuffAward 2018 "KOH-Nassätzen zur rückseitigen Ausdünnung von Ge-on-Si-Photodetektoren"

**Tina Weichelt:** Cymer Leadership for Best Student Paper Award 2018, "Laser-based illumination system for flexible Mask Aligner Lithography"

**Uwe D. Zeitner:** Best Paper Award 2018, "Effective Refractive Index Structures for Tailoring the Optical Function of Asphere-Test-CGHs and Broad-band Diffraction Gratings"

**Heiko Knopf:** Nanoscale Advances Poster Prize "Nanophotonics of 2D Materials", 2019

**Kristin Pfeiffer:** Best Paper Awards 2018, 2nd Place, "Antireflection Coatings for Strongly Curved Glass Lenses by Atomic Layer Deposition"

**Paul Schenk:** 3rd Place: »Elevator Pitches« 2019, "Funktionalisierung von Brochosomen für optische Anwendungen"

**Falk Eilenberger, Tobias Vogl, Heiko Knopf:** 2nd Place Elevator Pitches: First Call 2020 "Truquant: concept for the commercialization of their defect state emitters in hexagonal Boron-Nitride"

**Martin Heusinger:** Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung, beste Dissertation auf dem Gebiet der optischen Messtechnik 2020, Untersuchungen zu deterministischem und stochastischem Streulicht in hocheffizienten binären Beugungsgittern"

**Paul Schmitt:** Honourable mention in 2020 OPN photo contest, "Scanning electron microscopy image of brochosomes conformally coated with 10 nm of iridium by atomic layer deposition"

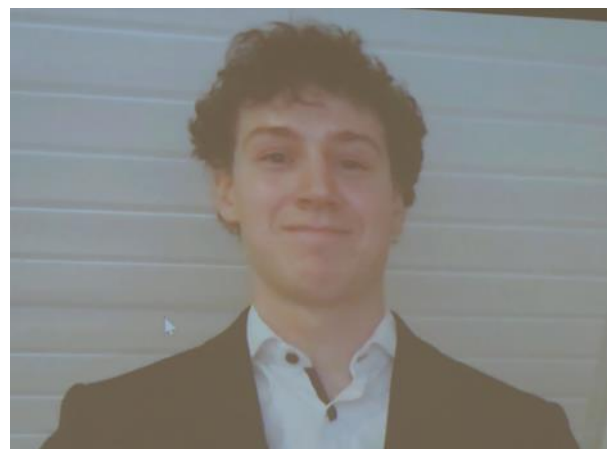


Abb. 4. Pandemiebedingt konnte 2020 die Verleihung des Friedrich-Hund-Dissertationspreises an Dr. Johannes Stock nur online stattfinden (hier ein Ausschnitt aus der ZOOM-Konferenz). Foto: Volker Helmig

## Institut für Festkörperphysik

Lehrstuhl für Festkörperphysik (Prof. Ronning)

**Stefanie Eckner:** Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Grundlagenforschung 2019; „Vibrational dynamics in semiconductor compounds and alloys“



Abb. 5. Dr. Stefanie Eckner bei ihrem Preisträger-Vortrag während der erstmaligen Verleihung des Friedrich-Hund-Dissertationspreises 2019.

Foto: JanBernert Photographie

Lehrstuhl für Festkörperphysik (Prof. Fritz)

**Roman Forker:** Lehrpreis der Fachschaft der PAF

## Institut für Festkörpertheorie und -optik

Lehrstuhl für Festkörpertheorie (Prof. Botti)

**Silvana Botti:** „Physik-Durchbruch des Jahres“ 2020 des Fachmagazins Physics World

**Michael Seifert:** Fakultätspreis für die beste Masterarbeit 2020, „Cul als potentielles p-leitendes transparentes Material: Ab-initio Berechnung optischer und elektronischer Eigenschaften“

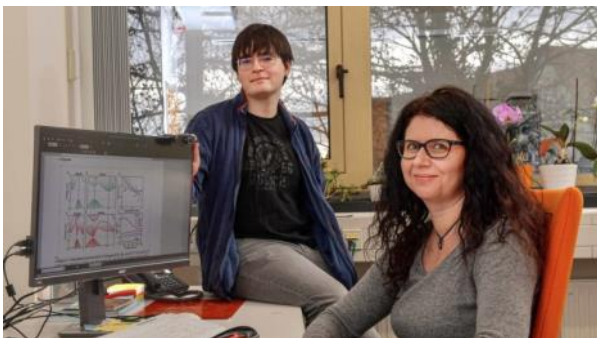


Abb. 6. Silvana Botti und Jens Renè Suckert, deren Forschung als Durchbruch des Jahres 2020 geehrt wurde. Foto: Jürgen Scheere (FSU Jena)

## Institut für Optik und Quantenelektronik

Lehrstuhl für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

**Max Möller,** Promotionspreis der FSU 2018, „Probing strong-field photoionization of atoms and diatomic molecules with short-wave infrared radiation“

**Gerhard G. Paulus:** Verleihung der Ehrendoktorwürde der Universität „Hl. Kliment Ohridski“ in Sofia/Bulgarien, 2018



**Philipp Wustelt:** Awardees of the 9<sup>th</sup> ISUILS Award for Young Researchers, 2018

**Silvio Fuchs:** Fakultätspreis (Rohde & Schwarz) beste Promotion, 2019, „Optische Kohärenztomographie mit extrem ultravioletter Strahlung“

**Silvio Fuchs:** Awardees of the 10<sup>th</sup> ISUILS Award for Young Researchers, 2019

**Felix Wiesner:** Preis für anwendungsnahe Abschlussarbeiten mit hohem Transpotenzial (Gründer- und Innovationstag 2019), 2019

**Gerhard G. Paulus:** Lehrpreis der Fachschaft der PAF Sommersemester 2019

**Felix Wiesner:** ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics, 2020, "Dreidimensional, materialaufgelöste Kohärenztomographie mit extrem ultravioletter Strahlung"

**Silvio Fuchs, Gerhard G. Paulus:** Lehrpreis des Dekanats der PAF, 2020

Lehrstuhl für Relativistische Laserphysik

**Issa Tamer:** Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Angewandte Physik, 2020, „Petawatt-class laser optimization and ultrashort probe pulse generation for relativistic laser-plasma interactions“

**Carola Zepter:** Jury Poster Preis bei Laser Plasma Accelerator Workshop in Split/Croatien, 2019

### Otto-Schott-Institut für Materialforschung

Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe

**Andreas Undisz:** Lehrpreis der Fachschaft der PAF Wintersemester 2018/19

**Markus Rettenmayr:** Lehrpreis der Fachschaft der PAF Sommersemester 2020

### Theoretisch –Physikalisches Institut

Lehrstuhl für Gravitationstheorie

**Bernd Brüggmann:** Elected Fellow of the American Physical Society 2020

Dozentur für Relativistische Astrophysik

**Reinhard Meinel:** Lehrpreis der Fachschaft der PAF Wintersemester 2017/18



Abb. 7. Verleihung des Lehrpreises an Prof. Meinel (rechts) während des Studenten-Professoren-Treffens im Juni 2018 Foto: Angela Unkroth

**Sebastian Ulbricht:** Examenspreis der FSU 2018, „Near-Horizon-Geometrien im Formalismus der Ernst-Gleichungen“

Professur für Raumzeit und Materie

**Martin Ammon:** Lehrpreis der Fachschaft der PAF, Sommersemester 2018



Abb.8. Die Fachschaftsratsvorsitzende Leonie Graf verleiht den Lehrpreis an Prof. Markus Rettenmayr. Foto: Volker Helmig

Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Gies)

**Holger Gies:** Ernennung zum Mitglied der Auswahlkommission des Bund-Länder-Programms zur Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchses 2019



Abb. 9. Der Examenspreis 2018 wurde im Rahmen der Feierlichen Immatrikulation an Sebastian Ulbricht (rechts) verliehen. Foto: Annegret Günther

### AG Didaktik des Physik- und Astronomieunterrichts

**Karl-Heinz Lotze:** Wilhelm und Else Heraeus-Seniorprofessur für innovative Ausbildungskonzepte im Fach Physik, 2. Förderphase 2019 – 2021

**Robert Lefler:** Examenspreis der FSU 2019, „Ein-satz eines Spektrometers im physikalischen Grundpraktikum“



## Mitgliedschaften und Funktionen

### Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

#### Lehrstuhl für Astrophysik

##### Prof. Dr. Ralph Neuhäuser:

- Mitglied Beirat Ethik-Zentrum FSU
- Mitglied Herausgebergremium der internat. referierten Zeitschrift "Astronomical Notes"
- Mitglied DPG, AG, IAU
- Co-Chair SOC Lorentz-Center Workshop „Historical Supernovae“, Okt. 2019
- Co-Chair SOC der internat. Konferenz Focus Meeting 5 "Understanding historical observations to study transient phenomena" bei der General Assembly Wien Aug. 2018 der International Astronomical Union
- Berufungsbeauftragter der PAF

#### Professur für Astronomie

##### Prof. Dr. Alexander Krivov:

- Mitglied der International Astronomical Union
- Mitglied der American Astronomical Society
- Mitglied des Wahlprüfungsausschusses der FSU
- Mitglied der Evaluierungskommission der PAF
- Sprecher der DFG-Forschungsgruppe „Debris Disks in Planetary Systems“

### Institut für Angewandte Optik und Biophysik

#### Lehrstuhl für Superresolution Microscopy

##### Prof. Dr. Christian Eggeling:

- Biophysical Society, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Deutsche Bunsengesellschaft, British Society of Immunology, British Biophysical Society
- *Editorial boards*: NanoBioimaging, Frontiers in Physiology, Journal of Physics D ( ab 2018 Chief Editor Biological Section), Scientific Reports, Instruments
- Mitglied in folgenden Komitees: Image Facility Weatherall Institute of Molecular Medicine (WIMM) University of Oxford (Chair); Health and Safety Committee WIMM; Postdoctoral Students Committee WIMM; Micron Oxford Advanced Bioimaging Unit Dep. Biochemistry University of Oxford; Nanoscopy Oxford Initiative (University of Oxford); Computational Biology Research Group (CBRG) Committee WIMM; Management Board EPSRC/MRC Oxford-Nottingham Centre for Doctoral Training in Biomedical Imaging; Lasers for Sci-

ence (LSF) Facility Access Committee Harwell; Volkswagen Stiftung "Life?" grant evaluation committee

- Mitglied des Fakultätsrates

### Institut für Angewandte Physik

#### Lehrstuhl für Angewandte Physik

##### Prof. Dr. Andreas Tünnermann:

- Mitglied des Fakultätsrates
- Rat der TU Bergakademie Freiberg
- Direktoriumsmitglied des Helmholtz-Instituts Jena
- Mitglied des Beirates des DFG Exzellenz-Clusters „Balance of the microverse“
- Sprecher der Fraunhofer Innovations-Cluster „Leistungszentrum Photonik“ und „Leitprojekt Quilt“
- Stellv. Sprecher des Fraunhofer Exzellenzclusters „Advanced photon source“
- Sprecher des BMBF Zentrums für Innovationskompetenz ZIK „ultra optics“
- Sprecher des BMBF Programms Zwanzig20 „3D sensation“
- Sprecher des 3Dsensation Graduiertenforschungskollegs
- Sprecher des Fraunhofer Graduiertenkollegs „Fraunhofer Graduate Research School Photonics“
- Sprecher der Max Planck School of Photonics
- Sprecher des Thüringer Innovationszentrums „Quantum optics and sensors“
- Programmausschuss "Quantensysteme" des BMBF
- Vorsitzender des Technischen Rats der Fraunhofer Gesellschaft
- Kuratorium des MPA, Heidelberg
- Kuratorium des MPQ, Garching
- Kuratorium der Leibinger Stiftung
- Vorsitzender "AG Naturwissenschaften", Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V.
- Mitglied der Geschäftsführung des Abbe Center of Photonics der FSU Jena
- Mitglied acatech "Deutsche Akademie der Technikwissenschaften"
- Mitglied des Vorstandes des OptoNet e.V.
- Mitglied des Technischen Rates von Doctor Optics
- Aufsichtsratsmitglied Jenoptik AG
- Aufsichtsratsmitglied der ARRI AG
- Stakeholder Photonics 21-Plattform
- OSA-Fellow – Optical Society of America



- SPIE-Fellow – International Society of Optics and Photonics
- Redaktionsbeirat von Lasers & Photonics Review
- Co-Editor der Zeitschrift Applied Physics B

**Dr. Stefan Heist**

- Member of the International Society for Optics and Photonics SPIE
- Member of the Conference Committee for SPIE DCS
- Member of Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO)

**Professur für Festkörperlaser**

**Prof. Dr. Jens Limpert:**

- Mitglied der Optical Society of America

**Dr. Jan Rothhardt:**

- Mitglied des erweiterten Direktoriums des Helmholtz Instituts Jena
- Programmkomitee der CLEO Europe conference
- Mitglied der Optical Society of America

**Professur für Laserphysik**

**Prof. Dr. Stefan Nolte:**

- Mitglied des Haushaltsausschusses des Senats
- Prodekan der PAF (bis 3/2020)
- Mitglied des Fakultätsrates
- Stellv. Institutsleiter des Fraunhofer Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik
- Geschäftsleitung der Abbe School of Photonics der FSU Jena
- Wissenschaftlicher Koordinator der internationalen Graduiertenschule GRK 2101 (DFG)
- Jurymitglied "Jugend forscht"
- Mitglied verschiedener Wissenschaftsausschüsse (Phot. West, BGPP,LANE, Lasertagung Jena)
- Fellow of the Optical Society of America
- Senior-Mitglied der International Society for Optics and Photonics SPIE

**Professur für Nanooptik**

**Prof. Dr. Thomas Pertsch:**

- Direktoriumsmitglied des Abbe Centers of Photonics der (ACP) FSU Jena
- Sprecher der Abbe School of Photonics der FSU Jena
- Kuratorium des Leistungszentrums Photonik der Fraunhofer Gesellschaft
- Mitglied der Studienkommission der PAF
- Studiengangsverantwortlicher für den M.Sc. Photonics

- Fellow der Max Planck School of Photonics
- Direktoriumsmitglied des Thüringer Innovationszentrums für Quantenoptik und Sensorik
- OSA-Fellow - Optical Society of America

**Dr. Frank Setzpfandt:**

- Geschäftsführer des Thüringer Innovationszentrums für Quantenoptik und Sensorik
- Mitglied der Studienkommission der PAF

**Lehrstuhl für Theorie optischer Systeme**

**Prof. Dr. Herbert Gross:**

- Mitglied im Expertenkomitee der Baden-Württemberg Stiftung für Optische Technologien
- Programmkomitee der Konferenz "European Society Annual Meeting"
- Expertenkommission des Dutch Research Council NOW
- Prüfungsausschuss M.Sc. Medical Photonics

**Professur für Technische Physik**

**Prof. Dr. Frank Wyrowski:**

- Visiting Professor an der Chinese Academy of Science, China
- Visiting Professor am Institute of Technology (HIT), China
- Co-Chair beim SPIE Workshop on Light Shaping, SPIE Meeting on Computational Optics und EOS Topical Meeting on Diffractive Optics
- Mitglied der technischen Programmkomitees der SPIE Konferenzen „Optics and Photonics for Information Processing“ und „Digital Optics for Immersive Displays“ sowie der OSA Konferenz "Digital Holography and 3D Imaging"
- Präsident der LightTrans GmbH und der Wyrowski Photonics GmbH
- Studienprodekan (seit 4/2020)

**Apl. Professur für Mikro- und Nanostrukturtechnik**

**Apl. Prof. Dr. Uwe D. Zeitner:** Programmkomitee für Microoptics Conference, MOC2018 und SPIE Advanced Lithography: Optical Microlithography XXXI

**Dr. Adrian Szeghalmi:** Seniorsmitglied der Optical Society of America (OSA)

**Dr. Falk Eilenberger:**

- Fellow der Max Planck School of Photonics
- Koordinator des Graduiertenkollegs „3D-Technologien in der Mensch-Maschine-Interaktion“

## Institut für Festkörperphysik

### Lehrstuhl für Festkörperphysik

#### Prof. Dr. Carsten Ronning:

- Fachkollegiat der DFG (Fachkollegium 307-01)
- Mitglied im Forschungsausschuss der FSU
- Mitglied des Fakultätsrates
- Mitglied des "Research College and Advisory Panel" der Dublin City University, Irland
- Editorial Board Member des Journals "Nano Energy"
- Honary Research Professor (2016-2019) an der Durban University of Technology, Südafrika
- Mitglied des BMBF-Gutachterausschusses „Erforschung kondensierter Materie an Großgeräten“

#### PD Dr. Claudia Schnorr: (bis 2019)

- Mitglied in der DPG und der International X-Ray Absorption Society
- Mitglied der Akademie für Lehrentwicklung an der FSU

### Lehrstuhl für Angew. Physik/Festkörperphysik

#### Prof. Dr. Torsten Fritz:

- Mitglied in DPG, DHV, Alexander-von-Humboldt-Club Deutschland
- Gutachter für DFG, FWF (Der Wissenschaftsfonds Österreichs), ANR (L'Agence nationale de la recherche; Frankreich)
- Studien-Koordinator für Experimentalphysik

#### PD Dr. Roman Forker:

- Mitglied der Studienkommission der PAF
- Mitglied der Evaluierungskommission der PAF

### Apl. Professur für Dünne Schichten

#### Apl. Prof. Dr. Frank Schmidl:

- Studiendekan, Vorsitzender des Prüfungsausschusses Physik und Vorsitzender der Studienkommission der PAF (bis 3/2020)
- Mitglied der Sachverständigenkommissionen beim Institut für medizinische und pharmazeutische Prüfungsfragen (IMPP) in Mainz
- Mitglied und stellv. Vorsitzender des gemeinsamen Ausschusses für die naturwissenschaftliche und die zahnärztliche Vorprüfung an der FSU
- Mitglied im Lehrerbildungsausschuss der FSU
- Mitglied der AG Physik in den Medizinisch-Pharmazeutischen Studiengängen (AGPM) in der DPG
- Mitglied des Fakultätsrates

### Professur für Photonische Nanomaterialien

#### Prof. Dr. Isabelle Staudé:

- Mitglied des Fakultätsrates

### Apl. Professur für Ionenstrahlphysik

#### Apl. Prof. Dr. Elke Wendler:

- Advisory Board der Zeitschrift Nuclear Instruments and Methods in Physics Research
- International Committee of the series of conferences on Ion Beam Modification of Materials (IBMM)
- International Committee of the series of conferences on Radiation Effects in Insulators (REI)

## Institut für Festkörpertheorie und –optik

### Lehrstuhl für Festkörpertheorie

#### Prof. Dr. Silvana Botti:

- Associated Editor des European Physics Journal B
- Research team leader of the European Theoretical Spectroscopy Facility (ETSF)
- Ordentliches Mitglied des Michael Stifel-Zentrums Jena für "Datengetriebene und Simulationsgestützte Wissenschaft"
- Studiendekanin, Vorsitzende des Prüfungsausschusses Physik und der Studienkommission der PAF (seit 4/2020)

### Lehrstuhl für Festkörperoptik

#### Prof. Dr. Ulf Peschel:

- Vorsitzender der Evaluierungskommission der PAF
- Mitglied des Prüfungsausschusses Physik
- Sprecher des SFB 1375–Nonlinear Optics Down to Atomic Scales (NOA)
- Mitglied des Fakultätsrates
- Vize-Direktor des Michael-Stifel-Zentrums Jena für "Datengetriebene und Simulationsgestützte Wissenschaft" Core area Simulation Science

## Institut für Optik und Quantenelektronik

### Lehrstuhl für Relativistische Laserphysik

#### Prof. Dr. Malte Kaluza:

- Mitglied des Senats der FSU
- Mitglied Prüfungsausschuss Physik
- Mitglied im Advisory Board des Bereichs „Matter and Technology“ am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

- Erasmus-Koordinator der PAF
- Mitglied des Editorial Boards von „Applied Sciences“ und „Methods and Protocols“

#### Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen

##### **Prof. Dr. Thomas Stöhlker**

- Gründungsdirektor des Helmholtz-Institut Jena
- Stellvertretender Forschungsdirektor, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Mitglied des BMBF Gutachtergremiums für „Physik kleinster Teilchen“
- Koordinator des Helmholtz-Programms „From Matter to Materials and Life“ des Forschungsbereichs Materie
- Mitglied des Wissenschaftlichen Rats „Helmholtz International Center for FAIR“
- Mitglied der NuPEEC Arbeitsgruppen „Fundamental Physics“ und „Applications and Societal Benefits“
- Editor „European Physical Journal D“
- Visiting Professor des IMP Lanzhou, Chinese Academy of Sciences
- International Advisory Committee, Lanzhou, China
- Leiter der Atomphysik-Abteilung der GSI Darmstadt

#### Lehrstuhl für Nichtlineare Optik

##### **Prof. Dr. Gerhard G. Paulus**

- Mitglied des Senats der FSU
- Mitglied des Fakultätsrates
- Mitglied des Scientific and Technical Advisory Committee of Centro des Laseres Pulsados (CLPU), Salamanca, Spanien
- Mitglied des Scientific Advisory Committee of ELI-ALPS, Ungarn
- Mitglied des International Scientific and Technical Advisory Committee of ELI-DC
- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Institutes Jena

##### **Thomas Weber:**

- Mitglied des Fakultätsrates

#### Lehrstuhl für Quantenelektronik

##### **Prof. Dr. Christian Spielmann:**

- Dekan der PAF (seit 10/2019)
- Koordinator für Experimentalphysik (2018 - 3/2020)
- Sprecher der Graduiertenschule RS-APS
- Mitglied des Direktoriums des ACP
- Mitglied des Sprecherrates der Abbe School of Photonics

##### **Burgard Beleites:**

- Mitglied des Fakultätsrates

#### Lehrstuhl für Röntgenphysik

##### **Prof. Dr. Ralf Röhlsberger:**

- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Institutes Jena

#### Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung

##### **Prof. Dr. Matt Zepf:**

- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Institutes Jena

### Otto-Schott-Institut für Materialforschung

#### Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe

##### **Prof. Dr. Markus Rettenmayr:**

- Editor von „Journal of Crystal Growth“
- Editorial Board von „Practical Metallography“
- Vorsitzender der Kommission zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der FSU
- Mitglied des Fakultätsrates

##### **Dr. Stephanie Lippmann:**

- Mitglied des Fakultätsrates

##### **Dr. Stephan Gräf:**

- Mitglied der Akademie für Lehrentwicklung der FSU (bis 2020)

#### Professur für Materialwissenschaft

##### **Prof. Dr. Klaus D. Jandt:**

- Mitglied des Vorstands der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM)
- Wissenschaftlicher Sprecher aller Fachausschüsse der DGM
- Leiter des DGM-Fachausschusses Biomaterialien sowie der DGM-Fortbildung Biomaterialien - Werkstoffe in der Medizintechnik
- Mitglied des Jena Center for Soft Matter
- Mitglied des Editorial Boards der internationalen Journale: Acta Biomaterialia, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, Dental Materials, Advanced Healthcare Materials, Advanced Engineering Materials
- Gutachtertätigkeiten: DFG, Alexander von Humboldt-Stiftung, ESF, EU Commission, ERC, BBSRC (GB), EPSRC (GB), NIH (USA), NSF (USA), Academy of Finland, la Caixa Foundation und viele weitere

##### **PD Dr. Jörg Boßert:**

- Prüfungsausschuss Werkstoffwissenschaft

#### Professur für Mechanik funktioneller Materialien

##### **Prof. Dr. Enrico Gnecco:**

- Mitglied in DFG und DGM
- Mitglied im Editorial Board von „Beilstein Journal of Nanotechnology“, Guest Editor

### Professur für Grenzflächen- und Oberflächentechnologien

#### Prof. Dr. Frank Müller:

- Mitglied im Editorial Board von „Materials“, „Journal of Biomaterials Applications“ und „Materials Research—Ibero-American Journal of Materials“
- Gasteditor der Spezialausgabe „Bioinspired and biomimetic materials“ des Journals „Materials“
- Mitglied der DGM, der Deutschen Gesellschaft für Biomaterialien (DGBM), der International Society for Ceramics in Medicine (ISCM) und der European Society for Biomaterials (ESB)
- Direktor des Otto-Schott-Instituts für Materialforschung
- Ordentliches Mitglied des Center for Energy and Environmental Chemistry Jena (CEEC) und des Jena Center for Soft Matter (JCSM)
- Prüfungsausschuss Werkstoffwissenschaft

### Professur für Computational Materials Science

#### Prof. Dr. Marek Sierka:

- Studiengangsverantwortlicher und Vorsitzenden des Prüfungsausschusses Werkstoffwissenschaft
- Mitglied der Studienkommission der PAF

## Theoretisch –Physikalisches Institut

### Lehrstuhl für Quantentheorie

#### Prof. Dr. Holger Gies:

- Mitglied des erweiterten Direktoriums des Helmholtz-Instituts Jena
- Berufene Ombudsperson der FSU Jena
- Berufenes Mitglied der Steuerungsgruppe Gleichstellung der FSU Jena
- Prodekan der PAF (seit 4/2020)
- Stellvertretender Senator (bis 2019)

### Lehrstuhl für Quantentheorie

#### Prof. Dr. Andreas Wipf:

- Dekan der PAF (bis 9/2019)
- Leiter des Fachverbands "Theoretische und Mathematische Grundlagen der Physik" der DPG, seit 2015
- Series-Editor von "Graduate Texts in Physics", Springer Verlag

### Lehrstuhl für Gravitationstheorie

#### Prof. Dr. Bernd Brügmann:

- Direktor des Michael-Stifel-Zentrums Jena für "Datengetriebene und Simulationsgestützte Wissenschaft" Core area Simulation Science
- Institutsdirektor

### Professur für Raumzeit & Materie

#### Prof. Dr. Martin Ammon:

- Mitglied des Studienausschusses des Senats
- Studiengangsverantwortlicher Physik
- Mitglied der Studienkommission der PAF
- Gutachter für ERC, DAAD, Humboldt-Stiftung, FWF, Research Foundation Flandern (FWO), NWO, Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wiss. Forschung (SNF)

#### M.Sc. Anna-Katharina Wölfl:

- Mitglied der Evaluierungskommission der PAF

### Lehrstuhl für Theorie korrelierter Quantensysteme in intensiven Feldern

#### Prof. Dr. Stephan Fritzsche:

- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Instituts Jena
- Mitglied im Project Review Panel (PRP) der Beamline P04 bei PETRA III, DESY Hamburg
- Mitherausgeber (Principal Editor) der Zeitschrift Computer Physics Communications
- Mitglied des International Advisory Boards des Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics

### Hochschuldozentur für Relativistische Astrophysik

#### Apl. Prof. Dr. Reinhard Meinel:

- Mitglied der Astronomischen Gesellschaft
- International Society on General Relativity and Gravitation (ISGRG)
- Mitglied des Prüfungsausschusses Physik

## AG Didaktik des Physik- und Astronomieunterrichts

### Professur für Physik und ihre Didaktik

#### Prof. Dr. Holger Cartarius:

- Mitglied der Studienkommission der PAF
- Mitglied Evaluierungskommission der PAF
- Mitglied im Lehrerbildungsausschuss der Friedrich-Schiller-Universität

#### Dr. Silvana Fischer:

- Stellv. Gleichstellungsbeauftragte der PAF
- Mitglied der Studienkommission der PAF



## Professoren A – Z



Foto: privat

Prof. Dr. Martin Ammon  
Professur für Raumzeit und  
Materie  
→ S. 118



Fotostudio Wilder Göttingen

Prof. Dr. Christian Eggeling  
Lehrstuhl für Superresolution  
Microscopy  
Institut für Angewandte Optik  
und Biophysik  
→ S. 36



Foto: privat

Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi  
Professur für Theoretische  
Physik/ Gravitationstheorie  
→ S. 120



Foto: privat

Jun.-Prof. Dr. Christian Franke  
tenure track Juniorprofessur  
für digitalisierte experimentel-  
le Mikroskopie  
Institut für Angewandte Optik  
und Biophysik



Foto: Annegret Günther

Prof. Dr. Silvana Botti  
Lehrstuhl für Theoretische  
Physik/Festkörperphysik  
→ S. 74



Foto: Annegret Günther

Prof. Dr. Torsten Fritz  
Lehrstuhl für Angewandte  
Physik/Festkörperphysik  
→ S. 60



Fotostudio Gebhardt Jena

Prof. Dr. Bernd Brügmann  
Lehrstuhl für Theoretische  
Physik/Gravitationstheorie  
→ S. 114



Foto: Jan-Peter Kasper

Prof. Dr. Stephan Fritzsche  
Lehrstuhl für Theorie korre-  
lierter Quantensysteme in  
intensiven Feldern  
→ S. 116



Foto: F. Eberhardt

Prof. Dr. Holger Cartarius  
Professur für Physik und ihre  
Didaktik  
→ S. 126



Foto: Annegret Günther

Prof. Dr. Holger Gies  
Lehrstuhl für Quantenfeld-  
theorie; ehemals Heisenberg-  
Professur  
→ S. 112



Foto: Sergey Turtaev

Prof. Dr. Tomáš Čížmár  
Lehrstuhl für Wellenleiterop-  
tik/Faseroptik  
Leibniz-Institut für  
Photonische Technologien  
→ S. 134



Foto: Annegret Günther

Prof. Dr. Enrico Gnecco  
Professur für Mechanik der  
funktionellen Materialien  
→ S. 102

Foto: FSU



Prof. Dr. Herbert Gross  
Lehrstuhl für Theorie  
optischer Systeme  
→ S. 44

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Timo Mappes  
Lehrstuhl für Geschichte der  
Physik mit Schwerpunkt Wis-  
senchaftskommunikation  
(Direktor des Deutschen Opti-  
schen Museums)  
→ S. 128

Foto: Christian Högner



Prof. Dr. Artie Hatzes  
Lehrstuhl für Astronomie,  
Thüringer Landessternwarte  
Tautenburg

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Frank Müller  
Professur für Oberflächen-  
und Grenzflächentechnolo-  
gien  
→ S. 104

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Klaus D. Jandt  
Lehrstuhl für Materialwissen-  
schaft  
→ S. 100

Foto: privat



Prof. Dr. Ralph Neuhäuser  
Lehrstuhl für Astrophysik  
→ S. 30

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Malte Kaluza  
Lehrstuhl für Experimental-  
physik/ Relativistische  
Laserphysik  
→ S. 80

Foto: Annegret Günther



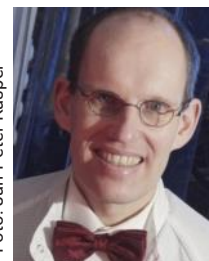
Prof. Dr. Stefan Nolte  
Professur für Experimental-  
physik/ Laserphysik  
→ S. 46

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Alexander Krivov  
Professur für Astronomie  
→ S. 32

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Gerhard G. Paulus  
Lehrstuhl für Experimental-  
physik/ Nichtlineare Optik  
→ S. 92

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Jens Limpert  
Professur für Experimental-  
physik/ Festkörperlaser  
→ S. 52

Foto: privat

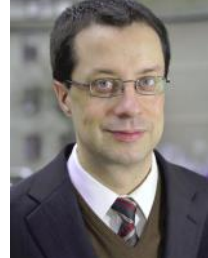


Prof. Dr. Thomas Pertsch  
Professur für Angewandte  
Physik/ Nanooptik  
→ S. 48

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Ulf Peschel  
Lehrstuhl für Theoretische  
Physik / Festkörperoptik  
→ S. 76



Prof. Dr. Marek Sierka  
Professur für Computational  
Materials Science  
→ S. 106

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Markus Rettenmayr  
Lehrstuhl für Metallische  
Werkstoffe  
→ S. 98

Foto: Annegret Günther



Jun.-Prof. Dr. Giancarlo Soavi  
tenure track Juniorprofessur  
für Optik zweidimensionaler  
Festkörper  
→ S. 68

Foto: UHH/Dingler



Prof. Dr. Ralf Röhlsberger  
Lehrstuhl für Röntgenphysik  
→ S. 88

Foto: privat



Prof. Dr. Christian Spielmann  
Lehrstuhl für Experimental-  
physik/ Quantenelektronik  
→ S. 82

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Carsten Ronning  
Lehrstuhl für Experimental-  
physik/Festkörperphysik  
→ S. 62

Foto: privat



Prof. Dr. Isabelle Staude  
Professur für Photonische  
Nanomaterialien,  
Institut für Festkörperphysik,  
bis März 2020 Institut für An-  
gewandte Physik  
→ S. 66

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Heidemarie Schmidt  
Lehrstuhl für Festkörperphy-  
sik/ Quantendetektion

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Thomas Stöhlker  
Lehrstuhl für Experimen-  
talphysik/Atomphysik hoch-  
geladener Ionen  
→ S. 84

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Markus Schmidt  
Lehrstuhl für Faseroptik und  
-sensorik  
→ S. 132

Fotostudio Arlene Knipper



Prof. Dr. Andreas Tünnermann  
Lehrstuhl für Angewandte  
Physik  
→ S. 42



Foto: Fotostudio Stein Jena



Prof. Dr. Frank Wyrowski  
Professur für Technische  
Physik  
→ S. 50

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Matt Zepf  
Lehrstuhl für Laserteilchen-  
beschleunigung  
→ S. 86

### Außerplanmäßige Professoren

Foto: Stefan Meinel



Prof. Dr. Reinhard Meinel  
Hochschuldozentur für Relati-  
vistische Astrophysik  
apl. Professur für Theoreti-  
sche Physik  
→ S. 122

Foto: privat



Prof. Dr. Elke Wendler  
apl. Professur für Ionen-  
strahlphysik  
Institut für Festkörperphysik

Foto: Regina Geiling



Prof. Dr. Frank Schmidl  
apl. Professur für dünne  
Schichten  
Institut für Festkörperphysik  
→ S. 64

Foto: FSU



Prof. Dr. Uwe Zeitner  
apl. Professur für Experimen-  
talphysik/ Mikro- und Nano-  
strukturtechnik  
→ S. 54

Fotostudio Gebhardt Jena



Prof. Dr. Katharina Schreyer  
apl. Professur für Physikali-  
sches Experimentieren  
Physikalisches Grundprakti-  
kum sowie AIU



## Seniorprofessoren



Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze  
apl. Professur für Physik und  
Didaktik  
Seniorprofessur der Wilhelm  
und Else Heraeus –Stiftung  
für innovative Ausbildungs-  
konzepte im Fach Physik



Prof. Dr. Andreas Wipf  
Lehrstuhl für Theoretische  
Physik/ Quantentheorie  
→ S. 110



Prof. Dr. Richard Kowarschik  
Lehrstuhl für Experimen-  
talphysik/Kohärenzoptik  
→ S. 38



Prof. Dr. Paul Seidel  
Professur für Angewandte  
Physik/Tiefemperaturphysik  
→ S. 64

## Professoren mit Zweitmitgliedschaft in der Physikalisch-Astronomischen Fakultät



Prof. Dr. Rainer Heintzmann  
Lehrstuhl für Physikalische  
Chemie I (Nanobiophotonik)  
Chemisch-Geowissen-  
schaftliche Fakultät



Prof. Dr. Jürgen Reichenbach  
Professur für Medizinische  
Physik/ Bildgebung  
Institut für Diagnostische und  
Interventionelle Radiologie



Prof. Dr. Stefanie Gräfe  
Professur für Theoretische  
Chemie  
Chemisch-Geowissen-  
schaftliche Fakultät  
→ S. 56

## Abkürzungen

ACP	Abbe Center of Photonics
AIU	Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte
ASP	Abbe School of Photonics
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DAAD	Deutscher Akademischer Austauschdienst
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGM	Deutsche Gesellschaft für Materialkunde
DPG	Deutsche Physikalische Gesellschaft
FSU	Friedrich-Schiller-Universität Jena
GRK	Graduiertenkolleg
HIJ	Helmholtz-Institut Jena
IAOB	Institut für Angewandte Optik und Biophysik
IAP	Institut für Angewandte Physik
IFK	Institut für Festkörperphysik
IFTO	Institut für Festkörpertheorie und –optik
IOF	Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena
IOQ	Institut für Optik und Quantenelektronik
IPC	Institut für Physikalische Chemie der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät
IPHT	Leibniz-Institut für Photonische Technologien
OSIM	Otto-Schott-Institut für Materialforschung
PAD	AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie
TAB	Thüringer Aufbaubank
TLS	Thüringer Landessternwarte
TPI	Theoretisch-Physikalisches Institut
ZAF	Zentrum für Angewandte Forschung

**[www.physik.uni-jena.de](http://www.physik.uni-jena.de)**