

FAKULTÄTSBERICHT 2021-2023

1.1.2021 - 31.12.2023



FRIEDRICH-SCHILLER-
UNIVERSITÄT
JENA

Impressum

Herausgeber:	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
Redaktion, Layout und Satz:	Dr. Angela Unkroth
Mitarbeit:	Dr. Agnes Sambale, Prof. Dr. Holger Cartarius
Druck:	Druckzentrum der FSU Jena
Redaktionsschluss:	26. Juni 2024
Auflage:	80 Stück
Titelfotos (Copyright):	Institut für Angewandte Physik (oben links), Marek Sierka (oben rechts), Miroslaw Druckmüller , Technische Universität Brno (links unten), Virgo, Pisa, Italien (rechts unten)

Für den Inhalt der Seiten über die einzelnen Arbeitsgruppen (S. 38 -151) sind die jeweiligen Lehrstuhlinhaber und Professoren zuständig. Wir danken Frau Claudia Hilbert von der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät für ihre Unterstützung beim Layout.

INHALT

Vorwort	2
Die Fakultät im Überblick	4
Forschung	6
Forschungsprofil	6
Drittmittel	7
Beteiligung an Forschungsförderprogrammen	8
Wissenschaftlicher Nachwuchs	12
Publikationen	16
Tagungen	26
Wirtschaft und Kooperationen	29
Die Fakultät und ihre Partner	29
Forschungsmarketing und Forschungstransfer	35
Forschungsberichte der Institute	38
Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte	38
Institut für Angewandte Optik und Biophysik	46
Institut für Angewandte Physik	54
Institut für Festkörperphysik	72
Institut für Festkörpertheorie und –optik	86
Institut für Optik und Quantenelektronik	94
Otto-Schott-Institut für Materialforschung	112
Theoretisch-Physikalisches Institut	126
Arbeitsgruppe Fachdidaktik der Physik und Astronomie	142
Abbe Center of Photonics	148
Wissenschaftliche Werkstätten/Werkstattverbund	150
Studium und Lehre	152
Studienangebot	152
Studienverlaufsmonitoring	158
Abbe School of Photonics	160
Der Fachschaftsrat der Physikalisch-Astronomischen Fakultät	162
Der Alumni der Physikalisch-Astronomischen Fakultät e.V.	164
Gleichstellung	166
Internationales	168
Gastwissenschaftler	168
Gastaufenthalte im Ausland	169
Internationale Studierende	170
Personalia	171
Berufungen und Pensionierungen	171
Personalstruktur	172
Preise und Ehrungen	173
Mitgliedschaften und Funktionen	182
Professoren A-Z	188
Abkürzungen	193

VORWORT

Wie bereits in den vergangenen Jahren haben sie hier einen neuen Bericht der Fakultät für Physik und Astronomie vor sich liegen, in dem Sie in komprimierter Form über Lehre und Forschung der Fakultät in den Jahren 2021 – 2023 informiert werden. Obwohl am Anfang die Corona-Pandemie noch alles überschattete, war dieser Zeitraum doch durch kontinuierliche Arbeit gekennzeichnet. Nach vollständiger Aufhebung der pandemiebedingten Beschränkungen konnten wir schnell wieder zum Normalbetrieb zurückzukehren, ohne jedoch positive Veränderungen in der Lehre, die in dieser Zeit erfolgten, wieder aufzugeben. So sind inzwischen Lehrveranstaltungen in einem Maße digital verfügbar, wie es vor der Pandemie undenkbar gewesen wäre. Alle Vorlesungen werden zwar in Präsenz gehalten, manche aber auch im Livestream übertragen und für eine spätere Verfügbarkeit, zum Beispiel bei der Prüfungsvorbereitung, aufgezeichnet.

Auch im Forschungsbereich konnte die Fakultät ihr Profil weiter schärfen, nicht zuletzt dadurch, dass acht neue Professoren und Professorinnen gewonnen und damit neue Themenfelder erschlossen wurden. Zu nennen wären hier vor allem zwei Professuren zur Theorie der Quanteninformation (Berufung Martin Gärtner) und zur Experimentellen Quantenoptik (Berufung Fabian Steinlechner), die das Forschungsportfolio der Fakultät im modernen Bereich der Quantenphysik erweitern. Gleichzeitig gelang es uns, das hohe Niveau in Lehre und Forschung zu halten, auch unterstützt durch in vier Fällen erfolgreichen Bleibeverhandlungen. In Richtung einer anderen Forschungseinrichtung hat uns nur eine Professorin verlassen (Wechsel von Prof. Silvana Botti zur Universität Bochum), aber drei junge Kollegen und Kolleginnen unserer Fakultät sind Erstrufen an andere Universitäten gefolgt.

Unsere Anstrengungen der letzten Jahre, mehr Studierende für ein Studium an unserer Fakultät zu gewinnen, haben sich ausgezahlt. Die Studienanfängerzahlen haben sich auf einem erfreulich hohen Niveau konsolidiert, wobei der Anteil weiblicher Studierender stetig gewachsen ist, ja im ersten Studienjahr auf inzwischen fast 25%. Auch die Zahl der Absolventen und Absolventinnen steigt kontinuierlich, was zum Beispiel dafür sorgt, dass immer mehr Lehramtsstudierende unsere Fakultät Richtung Schule verlassen. Gerade in der Forschung sind wir jedoch nach wie vor auf einen stetigen Zugang von neuem und interessiertem Nachwuchs angewiesen. Da dieser vor allem aus dem Ausland zu uns kommt, ist inzwischen weniger als die Hälfte unserer Doktoranden und Doktorandinnen deutschsprachig, weshalb sich Englisch als wissenschaftliche Kommunikationssprache in den Arbeitsgruppen weitestgehend durchgesetzt hat. Vor allem diesem unserem wissenschaftlichen Nachwuchs ist es zu verdanken, dass auch im aktuellen Berichtszeitraum wieder spektakuläre wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen und in den besten internationalen Journalen publiziert werden konnten, wie sie den folgenden Seiten des Berichtes entnehmen können. Damit geht einher, dass Drittmittel weiterhin in großem Ausmaß eingeworben werden konnten. Die Fakultät erreichte mit einer Einwerbung von fast einer Million Euro pro Professur und Jahr mehr als das Doppelte des nationalen Durchschnitts und damit deutlich mehr als jede andere Fakultät dieser Universität. Getragen wird diese Entwicklung durch Großprojekte wie den Sonderforschungsbereich SFB 1375 „NOA -Nonlinear Optics down to Atomic scales“, der 2023 erfolgreich in eine zweite Förderphase überführt werden konnte, und den Jenaer Exzellenzcluster „Balance of the Microverse“ an dem die Physika-



Foto: Annegret Günther (Universität Jena)

lich-Astronomische Fakultät signifikant beteiligt ist.

Neben dieser erfolgreichen Entwicklung sind im Berichtszeitraum jedoch auch erste Auswirkungen langfristiger Fehlentwicklungen der Universitätsstrukturen deutlich geworden. An erster Stelle wären hier finanzielle Engpässe zu nennen, die aus einem wachsenden Missverhältnis zwischen universitären Gesamtausgaben und Finanzzuwendungen des Landes resultieren. Die in Reaktion darauf veranlassten Einsparmaßnahmen betrafen auch unsere Fakultät. Neben einer in etwa zwanzigprozentigen Kürzung des Gesamtbudgets der Fakultäten wurde 2023 eine halbjährige Wiederbesetzungssperre für landesfinanzierte Stellen eingeführt, die nach heutigem Stand bis mindestens 2025 beibehalten werden wird und von der nur in Ausnahmefällen abgewichen wird. Weiterhin musste die Fakultät zentralen Vorgaben folgend die Einsparung von 9 ihrer 187,5 Haushaltsstellen bis 2028 zusichern. Ein entsprechender Plan, der ausschließlich auf der Nichtwiederbesetzung freierwerdender Stellen beruht, wurde daraufhin erarbeitet, im Rat der Fakultät einstimmig beschlossen und durch die Universitätsleitung bestätigt. Leider scheinen damit die Finanzprobleme der Friedrich-Schiller-Universität noch lange nicht gelöst zu sein, weshalb weitere Einsparungen in den nächsten Jahren erforderlich werden könnten.

Eine absehbare Konsequenz dieser Entwicklung ist die noch stärkere Verlagerung von Forschungs- und zum Teil auch Lehraktivitäten in den Drittmittelbereich. Darüber hinaus werden aber auch Prozesse innerhalb der Fakultät effektiver gestaltet werden müssen, um sie in Zukunft mit geringerem Aufwand an Materialien und Ressourcen mit gleichbleibender Qualität zu bewältigen. So wie in der Vergangenheit wird auch in der Zukunft die aktive Mitarbeit der gesamten Fakultät gefragt sein. Hier kann ich mich aber als Dekan auf unsere Studierenden und meine Kollegen in jedem Fall verlassen, wofür ich sehr dankbar bin. Trotzdem sind auch weiterhin konstruktive Hinweise von jeder Seite, so auch vom wissenschaftlichen Beirat, jederzeit willkommen.

Prof. Ulf Peschel
Dekan

DIE FAKULTÄT IM ÜBERBLICK

Dekanat

Dekan: Prof. Dr. Ulf Peschel
Prodekan: Prof. Dr. Malte Kaluza
Studiendekan: Prof. Dr. Holger Cartarius

Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte (AIU)

Direktor: Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

Institut für Angewandte Optik und Biophysik (IAO B)

Direktor: Prof. Dr. Christian Eggeling

Institut für Angewandte Physik (IAP)

Direktor: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Institut für Festkörperphysik (IFK)

Direktor: Prof. Dr. Carsten Ronning

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
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

Abbe Center of Photonics (ACP)

Sprecher: Prof. Dr. Jürgen Popp (Institut für Physikalische Chemie)

Abbe School of Photonics (ASP)

Sprecher: Prof. Dr. Thomas Pertsch

Wissenschaftliche Werkstätten/Werkstattverbund

Technischer Leiter: Andreas Winnefeld

Elektronik

Elektrotechnik

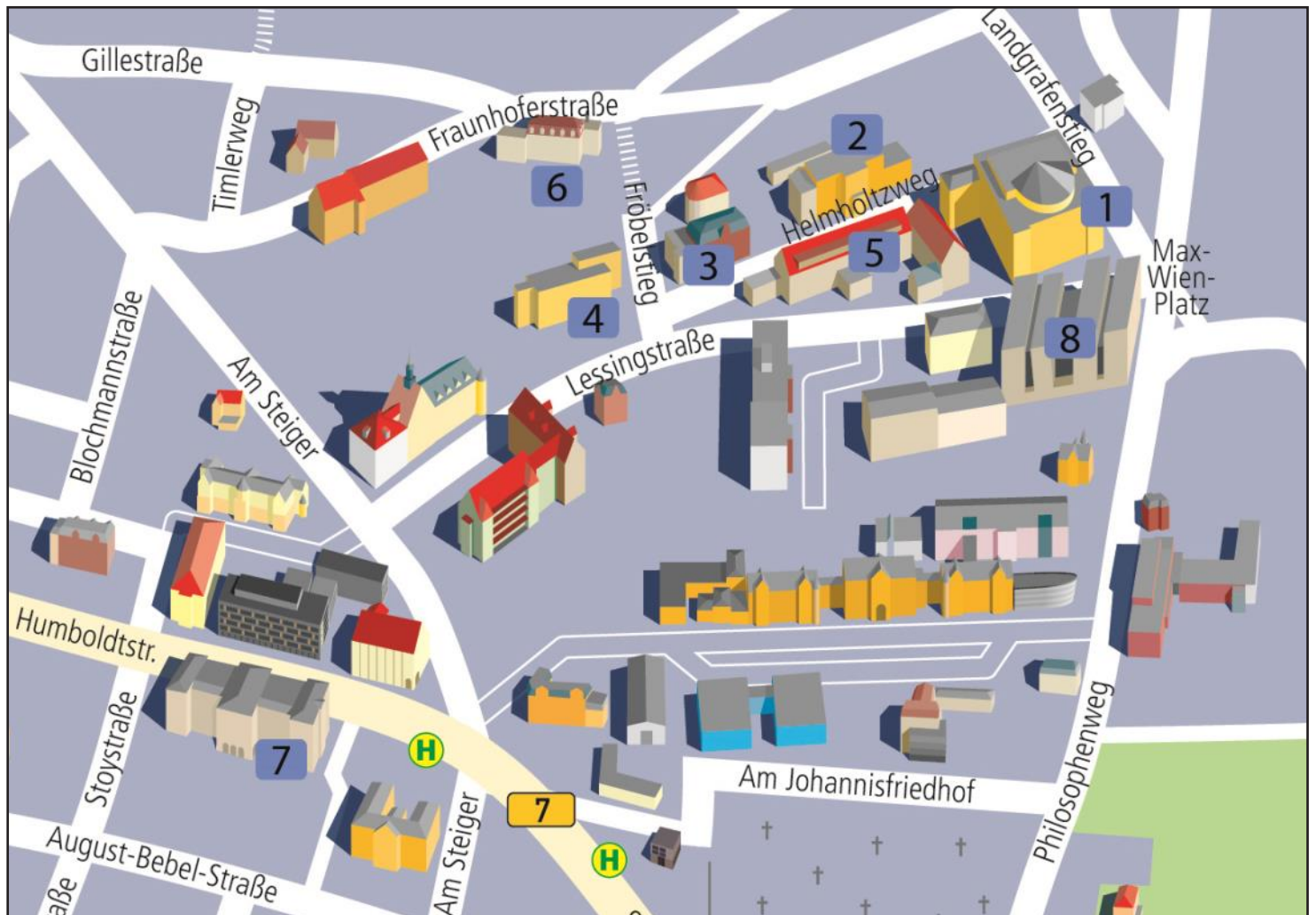
Feinwerktechnik 1

Feinwerktechnik 2 mit Lehrwerkstatt Industriemechaniker

Servicepunkt Mechanik (Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät)

Schlosserei/Schweißerei

Konstruktion



Karte DominoPlus Jena

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 (Abbeanum)

- Institut für Festkörpertheorie und -optik
- Theoretisch-Physikalisches Institut

5 Helmholtzweg 4

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

6 Fröbelstieg 3

- IOQ/ POLARIS - Labs
- Helmholtz-Institut Jena

7 August-Bebel-Str. 4

- AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie
- 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 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 und eine Vielzahl gemeinsamer Forschungsprojekte dokumentiert wird. Mit der lokalen Industrie und verschiedenen Fakultäten der Universität gibt es eine aktive Kooperation, die Anwendungsnähe und Interdisziplinarität sichert.

Eine immer wichtigere Rolle spielen die überregionalen Verbund- und Schwerpunktvorhaben, z.B. im Rahmen von Sonderforschungsbereichen und Forschergruppen, Innovationszentren sowie die internationale Kooperation z.B. in Form von EU-Projekten. (S. 9)

Insgesamt wurden in den Jahren 2021 bis 2023 etwa 69,3 Mio. Euro Drittmittel eingeworben. Das ist gegenüber dem Zeitraum 2018-2020 eine Steigerung um fast 23 %. Die PAF nimmt damit einen Spitzenplatz innerhalb der 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. Thomas Pertsch auch den aktuellen Sprecher stellt. Außer den Optik-Instituten (IAOB, IAP, IOQ, IFTO) tragen auch die anderen Institute zu dieser Profillinie bei. Zu nennen sind beispielsweise das IFK mit der IRTG 2675 International Research Training Group "Tailored metasurfaces - generating, programming and detecting light" (META-ACTIVE) 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 InfectoOptics, 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, siehe S. 148) und dem Zentrum für Medizinische Optik und Photonik (CeMOP).

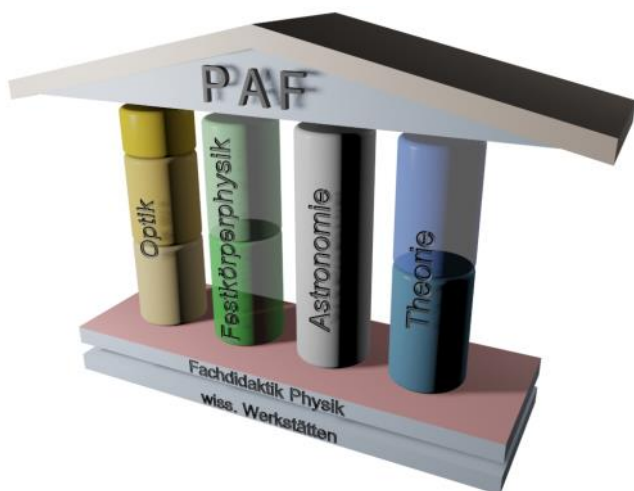
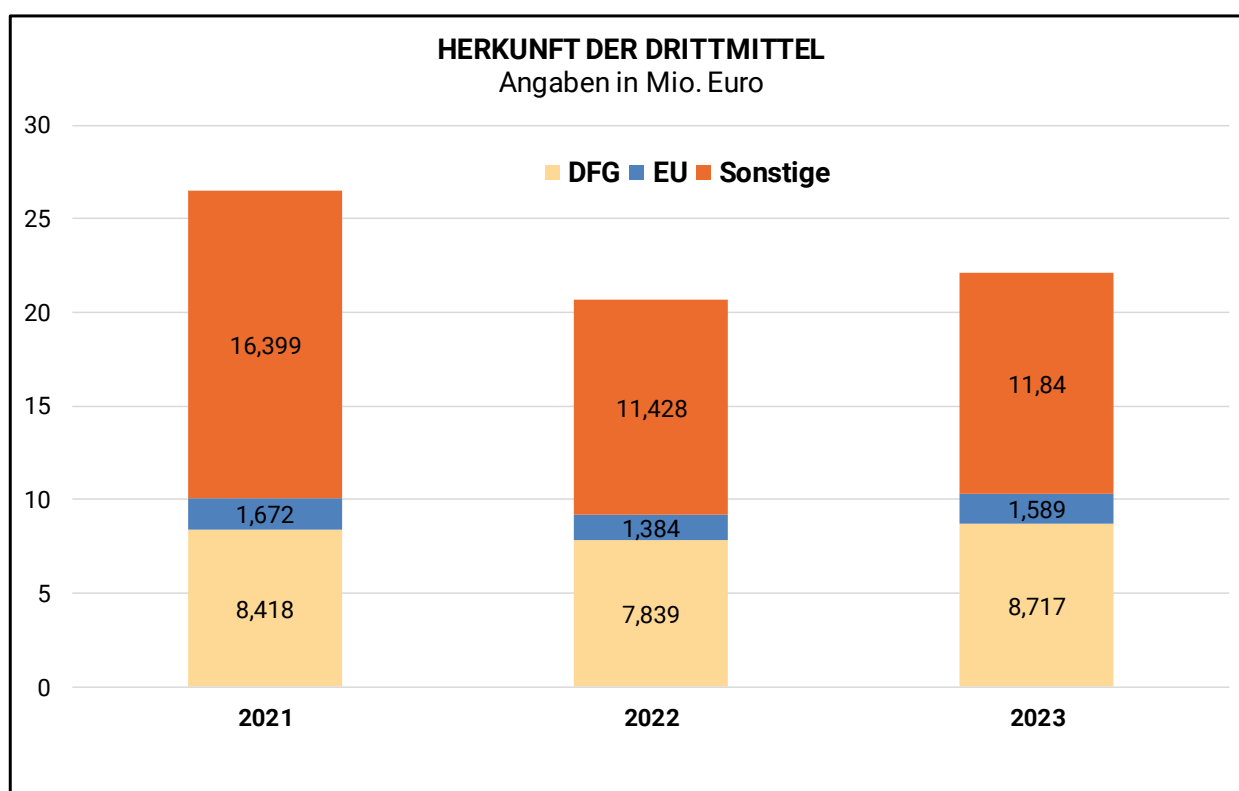
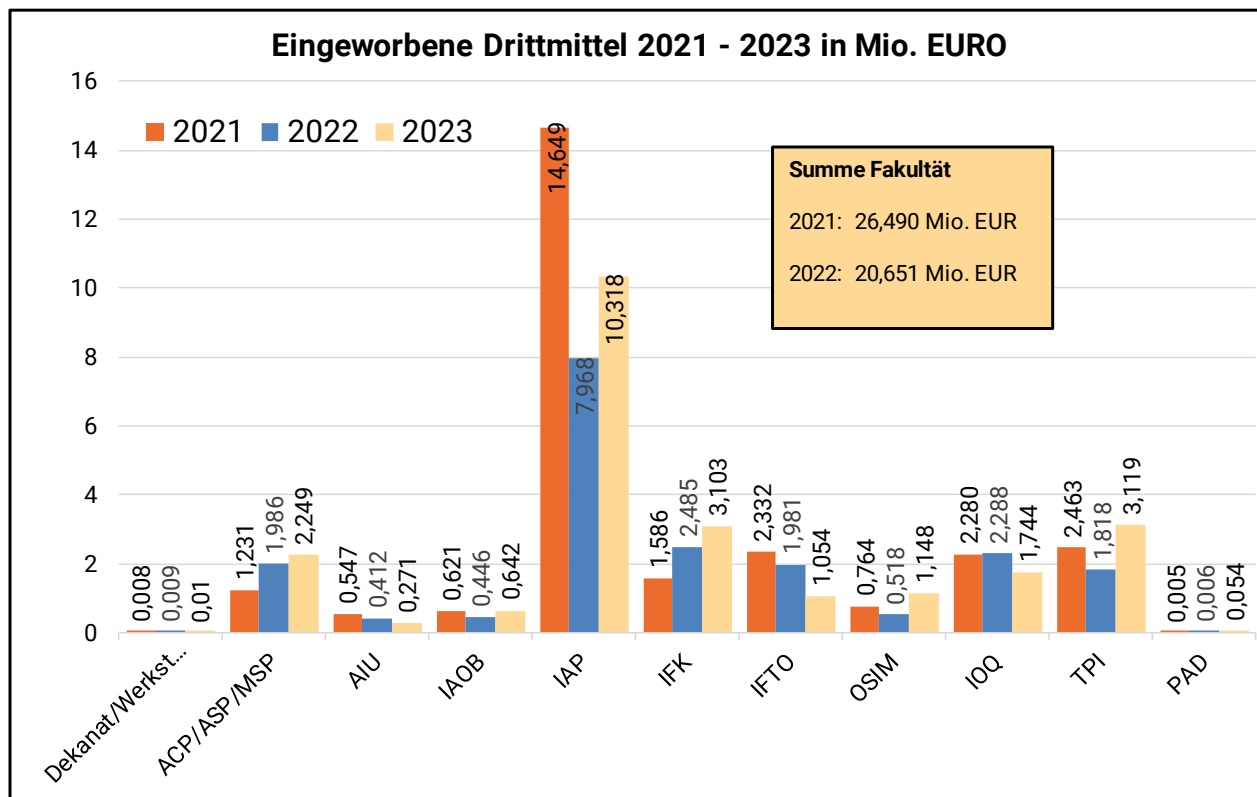


Abb.: Das Forschungs- und Lehrprofil der Physikalisch-Astronomischen Fakultät ruht auf den vier Säulen Optik, Festkörperphysik/Materialwissenschaft, Astrophysik und Theoretischer Physik. Die Fachdidaktik und die wissenschaftlichen Werkstätten wirken übergreifend und unterstützend.

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 2021 bis 2023 an der PAF gearbeitet haben und zum Teil auch von der PAF koordiniert wurden.

DFG – Exzellenzcluster

EXC 2051–Gleichgewicht im Mikroversum
Beteiligte Institute: IAP, IOQ, IAOb

DFG–Sonderforschungsbereich

SFB 1375–Nonlinear Optics Down to Atomic Scales (NOA)

07/2019–6/2027

Beteiligte Institute:

IFTO, IFK, IAP, OSIM, IOQ, PAD

Sprecher: Prof. Dr. Ulf Peschel (bis 2023)

Prof. Dr. Stefanie Gräfe (seit 2023)

SFB 1278 PolyTarget–Polymerbasierte Nanopartikel-Bibliotheken für die Entwicklung zielgerichteter anti-inflammatorischer Strategien

07/2017–06/2025

Beteiligte Institute: OSIM, IAOb

SFB/TR 306 Quantenkooperativität von Licht und Materie (QuCoLiMa), Erlangen, Saarbrücken, Mainz

1/2021 –12/2024

Beteiligte Institute: IOQ, HI Jena

DFG– Forschungsgruppen

FOR 2285 - Trümmerscheiben in Planetensystemen 2. Förderperiode 2019-2025

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

DFG– Heisenbergprogramm

Kontrolle von transversaler Modenwechselwirkung in hoch-Leistungs- Faserlasersysteme
beteiligte Institute: IAP (Dr. Cesar Jauregui)

DFG– Schwerpunktprogramme

SPP1839 Tailored Disorder–A science- and engineering-based approach to materials design for advanced photonic applications

beteiligte Institute: IAP, IFK

SPP 1840 - QUTIF

Quantum Dynamics in Tailored Intense Fields

beteiligte Institute: IOQ

SPP 1992 Exploring the diversity of extrasolar planets

beteiligte Institute: AIU, DLR, TU Berlin

SPP 2122

Neue Materialien hoher Steifigkeit für den Leichtbau durch additive Fertigung mit Ultrakurzpuls-Lasern

beteiligte Institute: IAP, OSIM

BMBF - Spitzenforschung

Mikroelektronik aus Deutschland-Innovations-treiber der Digitalisierung

Verbundprojekt: ForMikro-ERMI

beteiligte Institute: IFK, IPHT

BMBF - RUBIN Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation

UKPino – UltraKurzPuls-Innovationsplattform für maßgeschneiderte Anwendungen

beteiligte Institute: IAP (S. Nolte, J. Limpert)

BMBF - Nachwuchsförderung

Nachwuchswettbewerb Quantum Futur

beteiligte Institute: IAP (F. Setzpfandt, T. Vogl)

Nachwuchswettbewerb NanoMatFutur

2D Nanomaterialien für die Nanoskopie der Zukunft

beteiligte Institute: IAP (F. Eilenberger)

BMBF-Verbundforschung

Aufbau von APPA bei FAIR

beteiligte Institute: IOQ, IFK

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

beteiligte Institute: IAP (Prof. J. Limpert)

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

beteiligte Institute: IOQ (Prof. M. 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. M. Kaluza)

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

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

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

beteiligte Institute: IOQ (Prof. G. Paulus, M. Kaluza)

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

beteiligte Institute: IOQ (Dr. O. Forstner)

E-Cube: Plasma-Elektronenbeschleunigung mit extremer Emittanz - Realisierung des "Trojan Horse"- Injektorkonzepts und Simulation von Beschleunigung mit ultra-kleiner Emittanz.

beteiligte Institute: IOQ (Prof. M. Zepf)

FIMO: Femtosekunden-Bildgebung und Filme von dünnen Plasmen, Teilprojekt 1

beteiligte Institute: IOQ (Prof. M. Kaluza)

MACLIP: Verbesserung der Leistung von Hochintensitätslaser-getriebenen Sekundärquellen durch den Einsatz von maschinellem Lernen

beteiligte Institute: IOQ (Prof. M. Kaluza)

ELISEatIBC: Elise@IBC (Extended Laser Isobar Separator at IBC) – Implementierung der selektiven Filterung von Isobaren mittels Laser zur Erweiterung der Anwendbarkeit von Beschleuniger-Massenspektrometrie.

beteiligte Institute: IOQ (Dr. O. Forstner)

(OptoGaN) Hoch-integrierte mikroptonische Module in Nitrid-Technologie"

Vorprojekt (2023 – 2026)

beteiligte Institute: IFK

Silizium-/Siliziumnitridintegrierte Verschränkte-Strahlungsquellen (SINNER) (2023 – 2026),

beteiligte Institute: IFK, IAP, IPC,

Koordinator: Dr. F. Eilenberger

Erforschung von Universum und Materie – ErUM (streakXEOL), „Spatio-temporal dynamics of X-ray induced optical luminescence in functional nanomaterials“ (2018 – 2024),

beteiligte Institute: IFK (Prof. C. Ronning)

Quantenbasierte Anregungsquellen für die Zweiphotonenmikroskopie (LIVE2QMIC) (2021-2024)

beteiligte Institute: IAOb

Europäische Union: Forschungsrahmenprogramm, Horizon 2020, ERC–**ERC-2018-ADG: High-Flux Synchrotron Alternatives Driven by Powerful Long-Wavelength Fiber Lasers**

Beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Prof. J. Limpert

H2020-FET Open 964191 OptoSilicon

beteiligte Institute: IFTO

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

beteiligte Institute: IAOb, IPHT (Prof. T. Čížmár)

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

beteiligte Institute: TPI (Prof. S. Bernuzzi)

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

beteiligte Institute: TPI, HIJ (Prof. S. Fritzsche)

EU Graphene Flagship Core III

beteiligte Institute: IFK (Jun.-Prof. G. Soavi)

FET Open: Metasurfaces for ultrafast light structuring (METAFast)

beteiligte Institute: IAP (Prof. T. Pertsch)

FET Open: Fast quantum ghost microscopy in the mid-infrared

beteiligte Institute: IAP (Dr. F. Setzpfandt)

FET Open: Super-Resolving Quantum Imaging and Detection

beteiligte Institute: IAP (Dr. F. Steinlechner)

EMPIRE: Traceable metrology of soft X-ray to IR optical constants and nanofilms for advanced manufacturing (ATMOC)

beteiligte Institute: IAP (Dr. T. Siefke)

ERASMUS+: Erasmus Mundus on Innovative Microwave Electronics and Optics EMIMEO

beteiligte Institute: ACP

EMPIRE: Pushing boundaries of nano-dimensional metrology by light (POLight)

beteiligte Institute: IAP (Dr. T. Siefke)

Advanced Strategies for Development of Sustainable Semiconductors for Scalable Solar Cell Applications (SOLARUP)

beteiligte Institute: IFTO (Prof. Botti)

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

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ, IPHT

2019 FGI 0013: Anschaffung von Geräteinfrastruktur „HPC- und Datenmanagement Infrastruktur“

Beteiligte Institute: HI Jena, IAP, IOQ

Sprecher: Prof. T. Stöhlker

2019 FGI 0029: Anschaffung von Geräteinfrastruktur „Experiment-Vakuum-Kammer“

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ

Sprecher: Prof. M. Kaluza

2021 FGI 0043 und 0044: Quantum Hub Thüringen

Beteiligte Institute: HI Jena, IAP, IOQ, IFK, IFTO

Sprecher: Profs. A. Tünnermann, C. Spielmann

2021 FGI 0056 und 0058: Weiterentwicklung des Digital Innovation Hub Photonics (DIHP)

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ, Fraunhofer IOF, IPHT, Hans-Knöll-Institut, ACP

2022 FGI 0005: Beschaffung einer neuen Laser-Strahlformungs-Einheit

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ

Sprecher: Prof. M. Kaluza

2022 FGI 0008: Femtosekunden-Synchronisierung von Hochleistungslasern

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ

Sprecher: Prof. M. Zepf

2023 FGI 0022: Künstliche Intelligenz für Hochleistungslaser

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ

Sprecher: Prof. M. Zepf

2023 FGI 0023: Infrastruktur zur Erhöhung der Spitzenintensität der Hochleistungslasersysteme

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ

Sprecher: Prof. M. Kaluza

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

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ, IAP

Sprecher: Prof. M. Zepf

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

Beteiligte Institute: HI Jena, IOQ, IAP, IPHT

Sprecher: Prof. G. Paulus

2020 FGR 0048: Heterogene Elektronik-Photonik-Integration zur Realisierung quantenoptischer Komponenten

Beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Prof. S. Nolte, apl. Prof. U. Zeitner

2020 FGR 0052 SARS Rapid

Beteiligte Institute: IAOb, Universitätsklinikum

Sprecher: Prof. Dr. R. Mrowka (UKJ)

2022 FGR 0002: Dynamische Strahlformung ultrakurzgebundener Mehrkern-Faserlaser

Beteiligte Institute: IAP

Sprecher: Prof. S. Nolte, Prof. J. Limpert

2023 FGR 0053: Multimodale Nanoskalige XUV-Bildgebung

Beteiligte Institute: HI Jena, IAP, IOQ

Sprecher: Prof. G. Paulus

2023 FGR 0054 MULTI-XUV

Beteiligte Institute: IAOb, ACP

Sprecher: PD Dr. J. Rothhardt

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

Beteiligte Institute: IOQ (Prof. C. Spielmann)

Research Grants – Doctoral Programmes in Germany

Beteiligte Institute: IOQ (Prof. C. Spielmann)

Thüringer Innovationszentren

Thüringer Innovationszentrum für Quantenoptik und Sensorik (InQuoSens)

beteiligte Institute: IAP, ACP

ThürQuant -Erforschung und Entwicklung quantenoptischer und -sensorischer Komponenten und Systeme für die ressourcenschonende und sichere Informationsverarbeitung in Thüringen, am InQuoSens-Standort Jena

beteiligte Institute: IAP, ACP

Landesprogramm Aufbau Forschungsinfrastruktur

2019 FGI 0017 PhyClus - Photonic & Physik Cluster

beteiligte Institute: IFTO, IPC
Sprecher: Prof. U. Peschel

2021 FGI 0006 Graduiertenschule Leistungszentrum Photonik Imaging Labs

beteiligte Institute: IAP (Dr. F. Schrepel)

2021 FGI 0039 Quantenquellen und -gatter mittels 2D-Materialien (Qu²gate)

beteiligte Institute: IFK (Jun.-Prof. G. Soavi)

2022 FGI 0003 Erhöhung der Spitzenleistung des POLARIS-Lasers als neue Sekundärstrahlungsquelle

beteiligte Institute: IOQ (Prof. M. Kaluza)

2022 FGI 0004 Q-PHOC³ Quantum PHOtonics and Chemistry Computing Cluster

beteiligte Institute: IFTO, IPC
Sprecher: Prof. S. Gräfe

Land Thüringen Verbundprojekte

2021 FE 9136 Additive Fertigung hochwärmefähiger Bauteile mittels maßgeschneiderter Laserstrahlung

beteiligte Institute: IAP (Prof. S. Nolte)

2021 FE 9142 MULTIPASS - Grundlegende Betrachtungen zur Pulskompression in gasgefüllten Multipasszellen

beteiligte Institute: IAP (Prof. J. Limpert)

Weitere Verbundprojekte

BMBF-funded Leibniz Center for Photonics in Infection Research

Beteiligte Institute: IAOb (Prof. C. Eggeling)

ZIM: Entwicklung eines vollautomatisierten Impeanzmesssystems zur Echtzeit-Bestimmung der Legionellenmenge und -viabilität in Trinkwassersystemen sowie einer Auswertesystematik zur Erzielung einer proaktiven Handlungsstrategie; Beteiligte Institute: IFK

Leibniz ScienceCampus InfectoOptics

Beteiligte Institute: IAOb (Prof. C. Eggeling)

Leibniz Collaborative Excellence (SAW)

Beteiligte Institute: IAOb (Prof. C. Eggeling)

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

Beteiligte Institute: IFTO, FSU

Developing an e-lab for interfaces on demand (VW-Stiftung) DANDELION

Beteiligte Institute: IFTO (Prof. S. Botti)

Infrared single-photon detection via superconducting nanowires tailored by disorder, temperature, and magnetic field (CZS-QPhoton Joint Innovation Project)

Beteiligte Institute: IFK, IPHT (Prof. H. Schmidt)

Carl-Zeiss-Stiftung Nexus Programm „Smart Photonics“

Beteiligte Institute: IAOb, IPHT (Jun.-Prof. M. Chemnitz)

Joint Lab for Polymers Jena – Bayreuth

Beteiligte Institute: IAOb (Jun.-Prof. C. Franke)

Qphoton Carl-Zeiss-Stiftung Center for Quantum Photonics

Beteiligte Institute: IAP, PAD
Sprecher: Prof. A. Tünnermann

Datengetriebener Workflow für die beschleunigte Entwicklung von Glas

Beteiligte Institute: OSIM (Prof. M. Sierka), BAM, Fraunhofer-Inst. für Silicidforschung (ISC), Inst. für Nichtmetallische Werkstoffe TU Clausthal

Intelligente Substrate: Schaltbare Grenzflächen auf Basis multiresponsiver Hybridmaterialien (CZS „Durchbrüche“)

Beteiligte Institute: OSIM (Prof. M. Sierka), IPC, Inst. für Pharmazie (IP), Inst. für Organische Chemie und Makromolekulare Chemie (IOMC), IAP, Inst. für Geowissenschaften

Mehrfachkontaktreibung an laser-induzierten periodischen Oberflächenstrukturen (LIPSS)

Beteiligte Institute: OSIM (Prof. F. Müller), Jagiellonian University Krakow (Prof. E. Gnecco), TU Dresden

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, IAOb, IFK, IFTO, IOQ, OSIM, TPI

Sprecher: Prof. Dr. Thomas Pertsch

IRTG 2675 International Research Training Group "Tailored metasurfaces - generating, programming and detecting light" (META-ACTIVE)

in collaboration with The Australian National University, Canberra.

Beteiligte Institute: IAP, IFK, IFTO

Sprecherin: Prof. Dr. Isabelle Staude

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, IFK, IFTO, IOQ

Sprecher: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

GRK 2723 „Material-Mikroben-Mikroumgebungen (M-M-M): Antimikrobielle Biomaterialien mit maßgeschneiderten Strukturen und Eigenschaften“

Beteiligte Institute: IAOb, IPC, OSIM, Experimental Trauma Surgery, Inst. of Infectious Diseases and Infection Control, Inst. of Medical Microbiology, JUH/Waldkliniken Eisenberg

Sprecher: Prof. Dr. Klaus D. Jandt

Helmholtz Graduate School for Hadron and Iron Research (HGS-HIRE)

Beteiligte Institute: IOQ, HIJ, GSI Darmstadt, Universitäten Frankfurt/Main, Mainz, Gießen, Heidelberg und Darmstadt

Promotionsprogramm der Abbe School of Photonics (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:innen. Innerhalb des Programms werden daher bei Finanzierung, Aufnahme, Betreuung und Qualifizierung der Promovierenden zahlreiche Drittmittelprogramme und -konzepte zusammengeführt, 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 ASP wurde zuletzt 2020 durch die Graduierten-Akademie der Universität in einem Akkreditierungsverfahren hinsichtlich universitätsweit verbindlicher Qualitätsstandards evaluiert und hierin als exzellent bewertet.

Die Qualitätskontrolle zur Mitgliedschaft im Pro-

motionsprogramm der ASP erfolgt in stringenter Weise zunächst durch die an strenge Qualitätskriterien gebundene Mitgliedsaufnahme der ACP-Mitglieder, die auf Antrag und nach individueller Prüfung erfolgt. Bei konsistenter fachlicher Verortung im Themenkreis Photonik erfolgt daraufhin die Aufnahme 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 elektronisches System, in dem alle Bewerbungen für Promotoren in der Jenaer Photonik digital erfasst werden. Durch die Standardisierung des Bewerbungsprozesses können Bewerbungen verschiedener Nationalitäten objektiv verglichen sowie von einer großen Anzahl an Hochschullehrer:innen zeitnah, sehr individuell und vergleichend im Auswahlprozess evaluiert werden. Dieses Verfahren führt aufgrund der schnellen Bearbeitungsvorgänge zu einer hohen Akzeptanz bei den Bewerber:innen. Seit 2011 sind auf diese Weise mehr als 2.000 vollständige Promotionsbewerbungen zentral bei

der ASP eingegangen, dies entspricht bis zu 200 Bewerbungen pro Jahr. Hinzu kommt eine quantitativ äquivalente Anzahl an Bewerbungen durch individuelle Kanäle. Jährlich werden circa 50...80 Kandidat:innen in das ASP-Promotionsprogramm aufgenommen. Wesentliche Auswahlkriterien sind die nachgewiesene und zu erwartende wissenschaftliche Exzellenz der Bewerber:innen sowie die Passfähigkeit des 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 des eigenverantwortlich agierenden Nachwuchsforschers. 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 des/der jeweiligen Promovierenden im Dialog mit den Betreuer:innen. Abweichend davon ist nur die Teilnahme an einem Kurs zu guter wissenschaftlicher Praxis gleich zum Beginn jeder Promotion Pflicht.

Die fachliche Betreuung der Promovierenden wird durch die hohe Qualität der Forschungs- und Lehrtätigkeit der ASP-Hochschullehrer:innen unteretzt. Das strukturierte Betreuungskonzept orientiert sich hinsichtlich seiner Qualität, Interdisziplinarität und begleitenden extracurricularen Aktivitäten an den Leitlinien der DFG-Graduiertenkolllegs. In zunehmendem Maß erhält jede:r Promovierende neben dem ihn oder sie 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 Betreuenden ausge-

handelt 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:innen mit zahlreichen Forschungseinrichtungen weltweit erreicht. Zu nennen sind ebenso die langfristigen Forschungsk Kooperationen, die aus dem langjährigen ASP-Gastprofessorenprogramm (>70 Gastprofessor:innen aus über 25 Ländern) hervorgegangen sind. Internationalen Promovierenden erstattet die ASP die Kosten für bis zu zwei Deutschsprachkurse 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 57 % (Stand 11/2023), 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 Internationalisierung, 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-Promotionsprogramms liegt dabei speziell darin, Faktoren auszugleichen, die für die frühe Karriereentwicklung einer Frau nachteilig sind, indem direkte Unterstützung durch fachkundige Mentor:innen, professionelle Netzwerkverbesserung und die Ausbildung von Schlüsselkompetenzen bereitgestellt werden. Dazu werden ins-

besondere 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 Forschungsnahe 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.



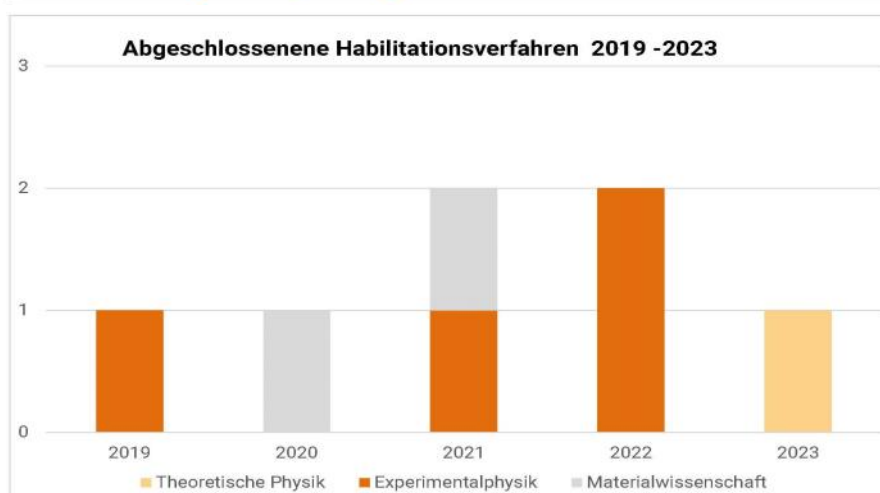
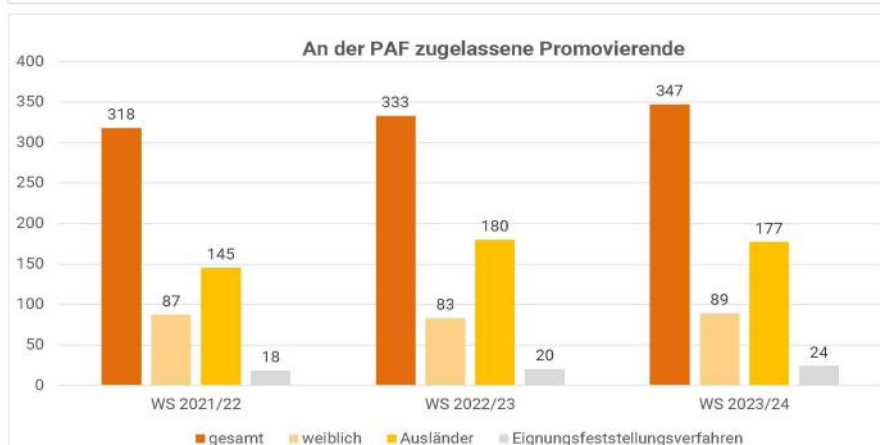
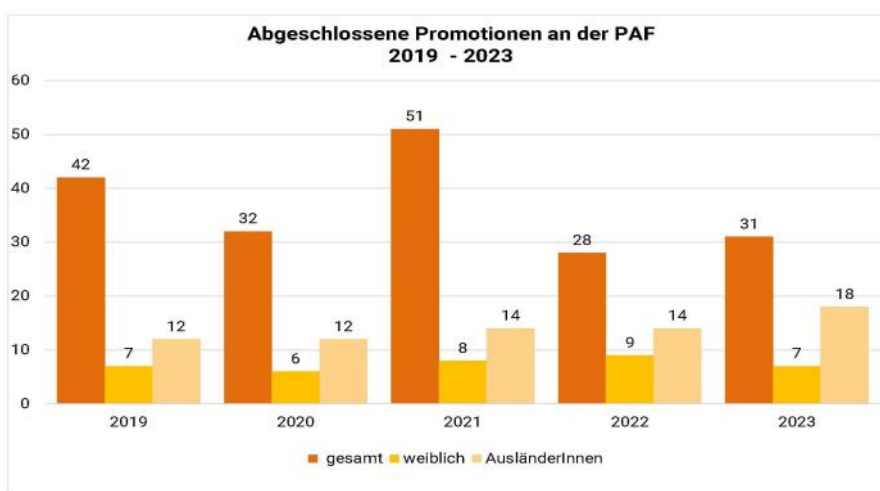
Abb. 1: Gruppenfoto der Konferenzteilnehmer der jährlichen, internationalen, von Promovenden für Promovenden organisierten Doktorandenkonferenz DokDok, hier 2022 in Arnstadt.

Promotion an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät

Die folgenden Diagramme geben einen Überblick über die Promotionen und Habilitationen an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät in den vergangenen fünf Jahren. Die Zahl der Habilitationen ist stabil bei ein bis zwei pro Jahr, während sich die Zahl der abgeschlossenen Promotionsverfahren bei ca. 30 pro Jahr eingependelt hat. Der Peak in 2021 ist auf den coronabedingten „Rückstau“ zurückzuführen.

An der PAF gibt es über 300 Promovierende, etwa die Hälfte davon kommt aus dem Ausland. Ein geringer Teil dieser Promovierenden sowie Absolventen von Fachhochschulen müssen sich einem Eignungsfeststellungsverfahren unterziehen und erhalten ggf. Auflagen.

Der Anteil der Doktorandinnen entspricht mit ca. 25% in etwa dem Anteil der Studentinnen (27%) 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

Professur für Astrophysik (Prof. Neuhäuser)

Neuhäuser, R., Torres, G., Mugrauer, M., Neuhäuser, D.L., Chapman, J., Luge, D. and Cosci, M. (2022): Colour evolution of Betelgeuse and Antares over two millennia, derived from historical records, as a new constraint on mass and age. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 516 (1), 693–719. doi: 10.1093/mnras/stac1969

Professur für Astronomie (Prof. Krivov)

Krivov A.V., M.C. Wyatt (2021): Solution to the debris disc mass problem: planetesimals are born small? *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 500 (1), 718–735 doi: 10.1093/mnras/staa2385

Institut für Angewandte Optik und Biophysik

Professur für Superaufgelöste Mikroskopie (Prof. Eggeling)

Urbancic, I., C. Eggeling, and E. Sezgin. "Do Lipids Tune B Cell Signaling?". *Nat Chem Biol* 19, no. 6 (Jun 2023): 669-70. <https://doi.org/10.1038/s41589-023-01303-8>. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36997648>.

Professur für Wellenleiteroptik/Faseroptik (Prof. Dr. Tomáš Čížmár)

Stibůrek, Miroslav, et al. "110 μm thin endo-microscope for deep-brain in vivo observations of neuronal connectivity, activity and blood flow dynamics." *Nature Communications* 14.1 (2023): 1897.

Juniorprofessur für intelligente photonische Systeme (Jun.-Prof. Dr. Mario Chemnitz)

Geilen, A., Popp, A., Das, D. et al. „Extreme thermodynamics in nanolitre volumes through stimulated Brillouin–Mandelstam scattering.“ *Nat. Phys.* 19, 1805–1812 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02205-1>

Institut für Angewandte Physik

Professur für Angewandte Physik (Prof. Dr. Andreas Tünnermann)

Paul, P., Schmitt, P., Sigurjonsdottir, V. V., Hanemann, K., Felde, N., Schröder, S., Otto, F., Grue newald, M., Fritz, T., Roddatis, V., Tünnermann, A., Szeghalmi, A., Atomically Thin Metal-Dielectric Heterostructures by Atomic Layer Deposition, *ACS Applied Materials & Interfaces* 15 (18), 22626–22636 (2023). <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.2c22590>

P. Paul, M. G. Hafiz, P. Schmitt, C. Patzig, F. Otto, T. Fritz, A. Tünnermann, A. Szeghalmi, Optical bandgap control in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ heterostructures by plasma enhanced atomic layer deposition: Toward quantizing structures and tailored binary oxides, *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 252, 119508 (2021). <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2021.119508>

P. Schmitt, S. Stempfhuber, N. Felde, A. V. Szeghalmi, N. Kaiser, A. Tünnermann, S. Schwinde, Influence of seed layers on the reflectance of sputtered aluminum thin films, *Optics Express* 29 (13), 19472–19485 (2021). <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2021.119508>

Ghazaryan, L., Handa, S., Schmitt, P., Beladiya, V., Roddatis, V., Tünnermann, A., Szeghalmi, A. Structural, optical, and mechanical properties of TiO_2 nanolaminates, *Nanotechnology* 32, 095709 (2021). <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/abcb1>

Palma-Vega, G., Hässner, D., Kuhn, S., Nold, J., Möller, F., Jáuregui, C., Tünnermann, A., Haarlammert, N., Schreiber, T., TMI and polarization static energy transfer in Yb-doped low-NA PM fibers, *Optics Express* 31 (15) 24730–24738 (2023). <https://doi.org/10.1364/oe.486341>

Professur für Festkörperplaser (Prof. J. Limpert)

Eschen, W. Loetgering, L., Schuster, V., Klas, R., Kirsche, A., Berthold, L., Steinert, M., Pertsch, T., Gross, H., Krause, M., Limpert, J., Rothhardt, J., Material-specific high-resolution table-top extreme ultraviolet microscopy, *Light-Science & Applications* 11 (1), 10 (2022). <http://dx.doi.org/10.1038/s41377-022-00797-6>

Liu, C., Eschen, W., Loetgering, L., Molina, D. S. P., Klas, R., Iliou, A., Steinert, M., Herkersdorf, S., Kirsche, A., Pertsch, T., Hillmann, F., Limpert, J., Rothhardt, J., Visualizing the ultra-structure of microorganisms using table-top extreme ultraviolet imaging, *Photonix* 4 (1), 15 (2023). <http://dx.doi.org/10.1186/s43074-023-00084-6>

Gebhardt, M., Heuermann, T., Klas, R., Liu, C., Kirsche, A., Lenski, M., Wang, Z., Gaida, C., Antonio-Lopez, J.E., Schulzgen, A., Amezcua-Correa, R., Rothhardt, J., Limpert, J., Bright, high-repetition-rate water window soft X-ray source enabled by nonlinear pulse self-compression in an antiresonant hollow-core fibre, *Light, Science & Applications* 10 (1), 36-36 (2021). <http://dx.doi.org/10.1038/s41377-021-00477-x>

A. Klenke, A., Jauregui, C., Steinkopff, A., Aleshire, C., Limpert, J., High-power multicore fiber laser systems, *Progress in Quantum Electronics*, 84 (18) 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100412>

Eschen, W., Wang, S.C., Liu, C., Klas, R., Steinert, M., Yulin, S., Meissner, H., Bussmann, M., Pertsch, T., Limpert, J., Rothhardt, J., Towards attosecond imaging at the nanoscale using broadband holography-assisted coherent imaging in the extreme ultraviolet, *Communications Physics* 4 (1) 7 (2021). <http://dx.doi.org/10.1038/s42005-021-00658-5>

Professur für Nanooptik (Prof. T. Pertsch)

Arslan, D., Rahimzadegan, A., Fasold, S., Falkner, M., Zhou, W.J., Kroychuk, M., Rockstuhl, C., Pertsch, T., Staude, I., Toward Perfect Optical Diffrusers: Dielectric Huygens' Metasurfaces with Critical Positional Disorder, *Advanced Materials* 34 (5), 18 (2022). <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202105868>

Eschen, W., Loetgering, L., Schuster, V., Klas, R., Kirsche, A., Berthold, L., Steinert, M., Pertsch, T., Gross, H., Krause, M., Limpert, J., Rothhardt, J., Material-specific high-resolution table-top extreme ultraviolet microscopy, *Light-Science & Applications* 11 (1), 10 (2022). <http://dx.doi.org/10.1038/s41377-022-00797-6>

Liu, C., Eschen, W., Loetgering, L., Molina, D. S. P., Klas, R., Iliou, A., Steinert, M., Herkersdorf, S., Kirsche, A., Pertsch, T., Hillmann, F., Limpert, J., Rothhardt, J., Visualizing the ultra-structure of microorganisms using table-top extreme ultraviolet imaging, *Photonix* 4 (1), 15 (2023). <http://dx.doi.org/10.1186/s43074-023-00084-6>

Shradha, S., Abtahi, F., Gan, Z., Knopf, H., Fedotova, A., Löchner, F., George, A., Pertsch, T., Turchanin, A., Eilenberger, F., Towards Double Resonant Cavity Enhanced Second Harmonic Generation in Monolayer MoS₂, *Advanced Optical Materials* 2300907 (2023). <https://doi.org/10.1002/adom.202300907>

Eschen, W., Wang, S.C., Liu, C., Klas, R., Steinert, M., Yulin, S., Meissner, H., Bussmann, M., Pertsch, T., Limpert, J., Rothhardt, J., Towards attosecond imaging at the nanoscale using broadband holography-assisted coherent imaging in the extreme ultraviolet, *Communications Physics* 4 (1)7(2021) <http://dx.doi.org/10.1038/s42005-021-00658-5>

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

Eschen, W., Loetgering, L., Schuster, V., Klas, R., Kirsche, A., Berthold, L., Steinert, M., Pertsch, T., Gross, H., Krause, M., Limpert, J., Rothhardt, J., Material-specific high-resolution table-top extreme ultraviolet microscopy, *Light-Science & Applications* 11 (1), 10 (2022). <http://dx.doi.org/10.1038/s41377-022-00797-6>

Tang, Z., Gross, H., Extended aberration analysis in symmetry-free optical systems - part I: method of calculation, *Optics Express* 29 (24), 39967-39982 (2021). <http://dx.doi.org/10.1364/oe.439862>

Tang, Z., Gross, H., Extended aberration analysis in symmetry-free optical systems - part II: evaluation and application, *Optics Express* 29 (25), 42020-42036 (2021). <http://dx.doi.org/10.1364/oe.439873>

Lu, X., H. Gross, H., Wigner function-based modeling and propagation of partially coherent light in optical systems with scattering surfaces, *Optics Express*, 29 (10), 14985-15000 (2021). <http://dx.doi.org/10.1364/oe.422393>

Stephan, B., Köhler, M., Müller, S., Zhang, Y., Gross, H. M., Notni, G., OHO: A Multi-Modal, Multi-Purpose Dataset for Human-Robot Object Hand-Over, *Sensors*, 23 (18), 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/s23187807>

Professur für Experimentalphysik/Laserphysik (Prof. Nolte)

Conlon, L.O., Vogl, T., Marciniak, C.D., Pogorelov, I., Yung, S.K., Eilenberger, F., Berry, D.W., Santana, F.S., Blatt, R., Monz, T., Lam, P.K., Assad, S.M., Approaching optimal entangling collective measurements on quantum computing platforms, Na-

ture Physics 19 (3), 351 (2023). <http://dx.doi.org/10.1038/s41567-022-01875-7>

Gan, Z.Y., Najafidehaghani, E., Han, S.H., Shradha, S., Abtahi, F., Neumann, C., Picker, J., Vogl, T., Hübner, U., Eilenberger, F., George, A., Turchanin, A., Patterned Growth of Transition Metal Dichalcogenide Monolayers and Multilayers for Electronic and Optoelectronic Device Applications, *Small Methods* 6 (9), 9 (2022). <http://dx.doi.org/10.1002/smt.202200300>

An, F., Klister, F., Ackermann, R., Guhl, S., Richter, A., Heat and mass transfer analysis of a high-pressure TGA with defined gas flow for single-particle studies, *Chemical Engineering Journal* 411, 11 (2021). <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2021.128503>

Jisha, C. P., Nolte, S., Alberucci, A., Geometric Phase in Optics: From Wavefront Manipulation to Waveguiding, *Laser & Photonics Reviews*, 15, 2100003 (2021). <http://dx.doi.org/10.1002/lpor.202100003>

Chambonneau, M., Grojo, D., Tokel, O., Ilday, F., Tzortzakis, S., Nolte, S., In-Volume Laser Direct Writing of Silicon-Challenges and Opportunities, *Photonics Reviews*, 15, 100140 (2021). <http://dx.doi.org/10.1002/lpor.202100140>

Professur für Technische Physik (Prof. Wyrowski)

Badar, I., Yang, L., Hellmann, C., Wyrowski, F., Free-form surface for light shaping by iterative design via Fourier domain, *Optics Express* 29 (20), 31270-31282 (2021). <https://doi.org/10.1364/OE.436303>

Wang, Z., Baladron-Zorita, O., Hellmann, C., Wyrowski, F., Generalized far-field integral, *Optics Express* 29 (2), 1774-1787 (2021). <http://dx.doi.org/10.1364/oe.414314>

Yang, L., Badar, I., Hellmann, C., Wyrowski, F., Light-shaping design by a fourier pair synthesis: the homeomorphic case, *Optics Express* 29 (3), 3621-3630 (2021). <http://dx.doi.org/10.1364/oe.415649>

Shi, R., Wang, Z., Hung, S., Hellmann, C., Wyrowski, F., Numerical analysis of tiny-focal-spot generation by focusing linearly, circularly, and radially polarized beams through a micro/nanoparticle, *Optics Express* 29 (2), 2332-2347(2021). <http://doi.org/10.1364/oe.415576>

Kühn, D., Treffer, A., Wyrowski, F., Grunwald, R., Simultaneous spatio-temporal focusing with pulse front symmetrization, *Optics Letters* 47 (4), 750-753 (2022). <http://dx.doi.org/10.1364/ol.449597>

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

Hanus, V., Fehér, B., Csajbók, V., Sándor, P., Pápa, Z., Budai, J., Wang, Z. L., Paul, P., Szeghalmi, A., Dombi, P., Carrier-envelope phase on-chip scanner and control of laser beams, *Nature Communications*, 14 (1), 8 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40802-z>

Hönicke, P., Kayser, Y., Nikolaev, K.V., Soltwisch, V., Scheerder, J.E., Fleischmann, C., Siefke, T., Andrie, A., Gwalt, G., Siewert, F., Davis, J., Huth, M., Veloso, A., Loo, R., Skroblin, D., Steinert, M., Undisz, A., Rettenmayr, M., Beckhoff, B., Analytical Characterization of Ordered Nanostructures, *Small* 18 (6), 2105776 (2021). <https://doi.org/10.1002/sml.202105776>

Hanus, V., Csajbok, V., Papa, Z., Budai, J., Marton, Z., Kiss, G.Z., Sandor, P., Paul, P., Szeghalmi, A., Wang, Z.L., Bergues, B., Kling, M.F., Molnar, G., Volk, J., Dombi, P., Light-field-driven current control in solids with pJ-level laser pulses at 80 MHz repetition rate, *Optica* 8 (4), 570-576 (2021). <http://dx.doi.org/10.1364/optica.420360>

Heusinger, M., Flügel-Paul, T., Grabowski, K., Michaelis, D., Risse, S., Zeitner, U.D., High-dispersion TIR-GRISMs with flattened angular dispersion profile, *Optica* 9 (4), 412-418 (2022). <http://dx.doi.org/10.1364/optica.427652>

Bücher:

L. Ghazaryan, K. Pfeiffer, P. Schmitt, V. Beladiya, S. Kund, A. Szeghalmi, *Atomic Layer Deposition*, P. Seidel, *Digital / Encyclopedia of Applied Physics* (2020), 1-43, Wiley VCH Verlag GmbH & KGaA, Weinheim, ISBN 978-3-527-40478-0 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/3527600434.eap813>

D. Grojo, M. Chambonneau, S. Lei, A. Mouskettaras, O. Utéza, A. Wang, *Internal Structuring of Semiconductors with Ultrafast Lasers: Opening a Route to Three-Dimensional Silicon Photonics*, R. Stoian, J. Bonse, *Ultrafast Laser Nanostructuring* (2023), 979-1018, Springer, Cham, ISBN 978-3-031-14751-7

Institut für Festkörperphysik

Professur für Angewandte Physik/ Festkörperphysik (Prof. Fritz)

J. Li, M. Chen, A. Samad, H. Dong, A. Ray, J. Zhang, X. Jiang, U. Schwingenschlögl, J. Domke, C. Chen, Y. Han, T. Fritz, R. S. Ruoff, B. Tian, X. Zhang; Wafer-scale single-crystal monolayer graphene grown on sapphire substrate; *Nature Materials* 21, 740 (2022)

Professur für Experimentalphysik/ Festkörperphysik (Prof. Ronning)

Y. Liu, Z. Qiu, X. Ji, J. He, J. Riemensberger, M. Hafermann, R. N. Wang, J. Liu, C. Ronning, T.J. Kippenberg; A photonic integrated circuit based erbium-doped amplifier; *Science* 376, 1309 (2022)

Professur für Experimentalphysik/ Nano- und Quantensysteme (Prof. Staude)

D. Arslan, A. Rahimzadegan, S. Fasold, M. Falkner, W. Zou, M. Kroychuk, C. Rockstuhl, T. Pertsch, I. Staude; Towards perfect optical diffrusers: Dielectric Huygens' metasurfaces with critical positional disorder; *Advanced Materials* 34, 2105868 (2022)

AG Laborastrophysik (PD Dr. Jäger)

S. A. Krasnokutski, K.-J. Chuang, C. Jäger, N. Ueberschaar, Th. Henning; A pathway to peptides in space through the condensation of atomic carbon; *Nature Astronomy* 6, 381 (2022)

Professur für Festkörperphysik/Quantendektion (Prof. H. Schmidt)

N. Du, H. Schmidt, I. Polian; Low-power emerging memristive designs towards secure hardware systems for applications in internet of things; *Nano Materials Science* 3, 186 (2021)

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

S. Klimmer, O. Ghaebi, Z. Gan, A. George, A. Turchanin, G. Cerullo, G. Soavi; All-optical polarization and amplitude modulation of second-harmonic generation in atomically thin semiconductors; *Nature Photonics* 15, 837 (2021)

Institut für Festkörpertheorie und -optik

Professur für Festkörpertheorie (Prof. Botti)

J. Schmidt, N. Hoffmann, H.C. Wang, P. Borlido, P.J.M.A. Carriço, T.F.T. Cerqueira, S. Botti, M.A.L. Marques, "Machine-Learning-Assisted Determination of the Global Zero-Temperature Phase Diagram of Materials", *Adv. Mater.* 35 (22), 2210788 (2023).

H. Kulik, T. Hammerschmidt, J. Schmidt, S. Botti, M.A.L. Marques, M. Boley, M. Scheffler, M. Todorović, P. Rinke, C. Oses, A. Smolyanyuk, S. Curtarolo, A. Tkatchenko, A. Bartok, S. Manzhos, M. Ihara, T. Carrington, J. Behler, O. Isayev, M. Veit, A. Grisafi, J. Nigam, M. Ceriotti, K.T. Schütt, J. Westermayr, M. Gastegger, R. Maurer, B. Kalita, K. Burke, R. Nagai, R. Akashi, O. Sugino, J. Hermann, F. Noé, S. Pilati, C. Draxl, M. Kuban, S. Rigamonti, M. Scheidgen, M. Esters, D. Hicks, C. Toher, P. Balachandran, I. Tamblyn, S. Whitlam, C. Bellinger, and L.M. Ghiringhelli, "Roadmap on Machine Learning in Electronic Structure", *Electron. Struct.* 4, 023004 (2022)

L. Sun, M.A.L. Marques, and S. Botti, "Direct insight into the structure-property relation of interfaces from constrained crystal structure prediction", *Nat. Comm.* 12, 811 (2021)

Professur für Festkörperoptik (Prof. Peschel)

P. Herrmann, S. Klimmer, T. Lettau, M. Monfared, I. Staude, I. Paradisanos, U. Peschel, and G. Soavi, "Nonlinear All-Optical Coherent Generation and Read-Out of Valleys in Atomically Thin Semiconductors", *Small* 2023, 2301126 (2023). <https://doi.org/10.1002/smll.202301126>

A. L. Marques Muniz, F. O. Wu, P. S. Jung, M. Khaavikhan, D. N. Christodoulides, and U. Peschel, "Observation of photon-photon thermodynamic processes under negative optical temperature conditions", *Science* 379, 6636 (2023). DOI: 10.1126/science.ade6523.

M. Wimmer, M. Monika, C. I. Carusotto, U. Peschel, H. M. Price, "Superfluidity of Light and its Breakdown in Optical Mesh Lattices", *Phys. Rev. Lett.* 127, 163901 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.163901

Institut für Optik und Quantenelektronik

Professur für Quantenelektronik (Prof. Spielmann)

T. Helk, E. Berger, S. Jamnuch, L. Hoffmann, A. Kabacinski, J. Gautier, F. Tissandier, J.-P. Goddet, H.-T. Chang, J. Oh, C. D. Pemmaraju, T. A. Pascal, S. Sebban, C. Spielmann, M. Zuerch; Table-top extreme ultraviolet second harmonic generation; *Science Advances* 7(21)eabe2265
DOI: 10.1126/sciadv.abe2265

Z. Sun, F. Tuitje, C. Spielmann; A review of high-resolution microscopic ghost imaging with a low-dose pseudothermal light (invited); *Journal of Microscopy* 284(1)3-11; DOI: 10.1111/jmi.13048

E. Eftekhari-Zadeh, M. S. Blümcke, Z. Samsonova, R. Loetzsch, I. Uschmann, M. Zapf, C. Ronning, O. N. Rosmej, D. Kartashov, C. Spielmann; Laser energy absorption and x-ray generation in nanowire arrays irradiated by relativistically intense ultrahigh contrast femtosecond laser pulses; *Physics of Plasmas* 29(1)013301 DOI: 10.1063/5.0064364

G. Zograf, K. Koshelev, A. Zalogina, V. Korolev, R. Hollinger, D.-Y. Choi, M. Zuerch, C. Spielmann, B. Luther-Davies, D. Kartashov, S. V. Makarov, S. S. Kruk, Y. Kivshar; High-harmonic generation from resonant dielectric metasurfaces empowered by bound states in the continuum; *ACS Photonics* 9(2) 567-574; DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c01511

L. Yue, R. Hollinger, C. B. Uzundal, B. Nebgen, Z. Gan, E. Najafidehaghani, A. George, C. Spielmann, D. Kartashov, A. Turchanin, D. Y. Qiu, M. B. Gaarde, M. Zuerch; Signatures of Multiband Effects in High-Harmonic Generation in Monolayer MoS₂; *Phys.Rev.Lett.* 129(14)147401
DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.147401

H. N. Gopalakrishna, R. Baruah, C. Hünecke, V. Korolev, M. Thümmel, A. Croy, M. Richter, F. Yahyaei, R. Hollinger, V. Shumakova, I. Uschmann, H. Marschner, ... C. Spielmann, U. Peschel, S. Gräfe, M. Wächtler, D. Kartashov; Tracing spatial confinement in semiconductor quantum dots by high-order harmonic generation; *Phys.Rev.Research* 5(1) 013128; DOI: 10.1103/PhysRevResearch.5.013128

Professur für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

P. Wustelt, F. Oppermann, S. Mhatre, M. Kübel, A. M. Saylor, A.M. et al; Laser-Driven Anharmonic Oscillator: Ground-State Dissociation of the Helium Hydride Molecular Ion by Midinfrared Pulses; *Phys.Rev.Lett.* 127(4)043202;
DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.043202

K. S. Schulze, B. Grabiger, R. Loetzsch, B. Marx-Glowna, A. T. Schmitt, A. L. Garcia, W. Hippler, L. G. Huang, F. Karbstein, Z. Konôpková, H. P. Schlenvoigt, J. P. Schwinkendorf, C. Strohm, T. Toncian, I. Uschmann, H. C. Wille, U. Zastra, R. Röhlberger, T. Stöhlker, T. E. Cowan, G. G. Paulus; Towards perfectly linearly polarized x-rays; *Phys.Rev.Research* 4(1)013220
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.013220

J. Reinhard, S. Kaleta, J. J. Abel, F. Wiesner, M. Wünsche, E. Seemann, M. Westermann, T. Weber, J. Nathanael, A. Iliou, H. Fiedorowicz, F. Hillmann, C. Eggeling, G. G. Paulus, S. Fuchs; Laboratory-Based Correlative Soft X-ray and Fluorescence Microscopy in an Integrated Setup; *Microscopy and Microanalysis*;
DOI: 10.1093/micmic/ozad123

Professur für Relativistische Laserphysik (Prof. Kaluza)

S. Keppler, N. Elkina, G. A. Becker, J. Hein, M. Horning, M. Mäusezahl, C. Rödel, I. Tamer, M. Zepf, M. C. Kaluza; Intensity scaling limitations of laser-driven proton acceleration in the TNSA-regime; *Phys. Rev. Research* 4(1)013065
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.013065

C. Zepf, A. Seidel, M. Zepf, M. C. Kaluza, A. Sävert; Role of spatiotemporal couplings in stimulated Raman side scattering; *Phys.Rev.Research* 5(1)L012023;
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.5.L012023

M. Kaluza; Unveiling the inner structure of electron pulses generated from a laser-wakefield accelerator; *Light: Science and Applications* 12(1) 225; DOI: 10.1038/s41377-023-01269-1

Professur für Laserteilchenbeschleunigung (Prof. Zepf)

H. Abramowicz, U. Acosta, M. Altarelli, R. Abmann, Z. Bai, T. Behnke, Y. Benhammou, T. Blackburn, S. Boogert, O. Borysov, et al.; Conceptual design report for the LUXE experiment; *European Physical Journal-Special Topics* 230(11)2445-2560; DOI: 10.1140/epjs/s11734-021-00249-z

B. Liu, M. Shi, M. Zepf, B. Lei, D. Seipt; Accelerating Ions by Crossing Two Ultraintense Lasers in a Near-Critical Relativistically Transparent Plasma; *Phys.Rev.Lett.* 129(27);
DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.274801

F. Karbstein, D. Ullmann, E. Mosman, M. Zepf; Direct accessibility of the fundamental constants governing light-by-light scattering;
arXiv:2207.09866

Professur für Atomphysik hochgeladener Ionen (Prof. Stöhlker)

W. Middents, G. Weber, U. Spillmann, T. Krings, M. Vockert, A. Volotka, A. Surzhykov, T. Stöhlker; Possible Polarization Measurements in Elastic Scattering at the Gamma Factory Utilizing a 2D Sensitive Strip Detector as Dedicated Compton Polarimeter; *Annalen der Physik* 534(3)2100285 DOI: 10.1002/andp.202100285

P. Pfäfflein, S. Allgeier, S. Bernitt, A. Fleischmann, M. Friedrich, C. Hahn, D. Hengstler, M.O. Herdrich, A. Kalinin, F.M. Kröger et al.; Integration of maXs-type microcalorimeter detectors for high-resolution x-ray spectroscopy into the experimental environment at the CRYRING@ESR electron cooler; *Physica Scripta* 97(11)114005 DOI: 10.1088/1402-4896/ac93be

S. Ringleb, M. Kiffer, J.K.C. Ballentin, T. Stöhlker, M. Vogel; Position-sensitive non-destructive detection of charged-particle bunches in low-energy beamlines; *Scientific Reports* vol. 13, 22669; DOI: 10.1038/s41598-023-45798-6

Professur für Röntgenphysik (Prof. Röhlberger)

L. Bocklage, J. Gollwitzer, C. Strohm, C. F. Adolff, K. Schlage, I. Sergeev, O. Leupold, H.-C. Wille, G. Meier, R. Röhlberger; Coherent control of collective nuclear quantum states via transient magnons; *Science Advances* 7(5)eabc3991 DOI: 10.1126/sciadv.abc3991

D. J. Erb, J. Perlich, S. V. Roth, R. Röhlberger, K. Schlage; Real-Time Observation of Temperature-Induced Surface Nanofaceting in M-Plane α -Al₂O₃; *ACS Appl. Materials Interfaces* 14, 31373-31384; DOI: 10.1021/acsmi.1c22029

Yu. Shvyd'ko, R. Röhlberger, O. Kocharovskaya, J. Evers, G. A. Geloni, P. Liu, D. Shu, A. Miceli, B. Stone, W. Hippler, B. Marx-Glowna, I. Uschmann, R. Loetzsch, O. Leupold, H.-C. Wille, I. Sergeev, M. Gerharz, X. Zhang, C. Grech, M. Guetg, V. Kocharyan, N. Kujala, S. Liu, W. Qin, A. Zozulya, J. Hallmann, U. Boesenberg, W. Jo, J. Möller, A. Rodriguez-Fernandez, M. Youssef, M.; A. Madsen, T. Kolodziej; Resonant X-ray excitation of the nuclear clock isomer ⁴⁵Sc; *Nature* 622, 471-475; DOI: 10.1038/s41586-023-06491-w

AG Attosekunden-Laserphysik (Dr. Pfeiffer)

J. Reislöhner, D. Kim, I. Babushkin, and A. N. Pfeiffer; Onset of Bloch oscillations in the almost-strong-field regime; *Nat. Commun.* 13,7716 DOI: 10.1038/s41467-022-35401-3

J. Reislöhner, X. Chen, D. Kim, S. Botti, and A. N. Pfeiffer; Dynamical Franz-Keldysh Effect in Diamond in the Deep Ultraviolet Probed by Transient Absorption and Dispersion Spectroscopy Using a Miniature Beamline; *Phys.Rev.Lett.* 131, 136902 DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.136902

M. Hazra, P. Paul, D. Kim, C. David, S. Gräfe, U. Peschel, M. Kübel, A. Szeghalmi and A. N. Pfeiffer; Nonlinear polarization holography of nanoscale iridium films; *New J.Phys.* 25, 123011 DOI: 10.1088/1367-2630/ad0c83

Emmy-Noether-Gruppe (Dr. Matthias Kübel)

M. Kübel, P. Wustelt, Y. Zhang, S. Skruszewicz, D. Hoff, D. Würzler, H. Kang, D. Zille, D. Adolph, G. G. Paulus, A. M. Sayler, M. Dumergue, A. Nayak, R. Flender, L. Haizer, M. Kurucz, B. Kiss, S. Kühn, B. Fetić, and D. B. Milošević; High-Order Phase-Dependent Asymmetry in the Above-Threshold Ionization Plateau; *Phys.Rev.Lett.* 106, 113201 DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.113201

A. Platz, S. Hell, Y. Zhang, B. Ying, G. G. Paulus, M. Kübel; Intensity-resolved measurement of above-threshold ionization of Ar-H₂O; *Phys.Rev A* 108,053106; DOI: 10.1103/PhysRevA.108.053106

Otto-Schott-Institut für Materialforschung

Professur für Materialwissenschaft (Prof. Jandt)

H. Cao, H. Qin, Y. Li, K. D. Jandt, The Action-Networks of Nanosilver: Bridging the Gap between Material and Biology, *Advanced Healthcare Materials*, 2021, 10, 2100619, <https://doi.org/10.1002/adhm.202100619>

H. Cao, T. Dauben, C. Helbing, Z. Jia, Y. Zhang, M. Huang, L. Müller, S. Gu, X. Zhang, H. Qin, K. Martin, J. Bossert, K.D. Jandt: The antimicrobial effect of calcium-doped titanium is activated by fibrinogen adsorption, *Materials horizons*, 2022, 9, 1962-1968, <https://doi.org/10.1039/D1MH02009A>

M. Struczynska, I. Firkowska-Boden, N. Levandovsky, R. Henschler, N. Kassir, K.D. Jandt: How Cry-

stallographic Orientation-Induced Fibrinogen Conformation Affects Platelet Adhesion and Activation on TiO₂, *Advanced Healthcare Materials*, **2023**, 12, 2202508.

<https://doi.org/10.1002/adhm.202202508>

Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien (Prof. Müller)

J. Bonse, S. Gräf "Ten Open Questions about Laser-Induced Periodic Surface Structures" *Nanomaterials* 11 (2021) 3326. DOI: 10.3390/nano11123326

J. Häusler, F.A. Müller, L. Müller, J. Grabow, C. Cleve, C. Lotz, M. Röschlau, P. Bittorf, R. Fromme, I. Kiebert, M. Grüne, S. Schweizer, S. Dembski "Preparation of phosphorescent Eu²⁺, Dy³⁺-doped strontium aluminate nanoparticles by laser vaporization for the modification of therapeutic contact lenses" *Adv. Photonics Res.* 3 (2022) 2200013. DOI: 10.1002/adpr.202200013

L. Müller, P. Hornig, J. Grabow, F.A. Müller "Preparation of SrTiO₃ nanocubes by CO₂ laser vaporization (LAVA) and hydrothermal maturation" *Nano-scale Adv.* 4 (2022) 182-189. DOI: 10.1039/d1na00685a

Professur für Computational Materials Science (Prof. Sierka)

Y. J. Franzke, C. Holzer, J. H. Andersen, T. Begušić, F. Bruder, S. Coriani, F. Della Sala, E. Fabiano, D. Fedotov, S. Fürst, S. Gillhuber, R. Grotjahn, M. Kaupp, M. Kehry, M. Krstić, F. Mack, S. Majumdar, B. D. Nguyen, S. M. Parker, F. Pauly, A. Pausch, E. Perlt, G. S. Phun, A. Rajabi, D. Rappoport, B. Samal, T. Schrader, M. Sharma, E. Tapavicza, R. S. Treß, V. Voora, A. Wodyński, J. M. Yu, B. Zerulla, F. Furche, C. Hättig, M. Sierka, D. P. Tew, F. Weigend „TURBOMOLE: Today and Tomorrow“ *J. Chem. Theory Comput.* **2023**, 19, 6859–6890, DOI: 10.1021/acs.jctc.3c00347.

W. Li, A. Saleh, M. Sharma, C. Hünecke, M. Sierka, M. Neuhaus, L. Hedewig, B. Bergues, M. Alharbi, H. ALQahtani, A. M. Azzeer, S. Gräfe, M. F. Kling, A. F. Alharbi, Z. Wang "Resonance Effect in Brunel Harmonic Generation in Thin Film Organic Semiconductors" *Adv. Optical Mater.* **2023**, 11, 2203070, DOI: 10.1002/adom.202203070.

M. Sharma, M. Sierka "Efficient Implementation of Density Functional Theory Based Embedding for Molecular and Periodic Systems Using Gaussian Basis Functions" *J. Chem. Theory Comput.* **2022**, 18, 6892-6904, DOI: 10.1021/acs.jctc.2c00380.

Professur für Metallische Werkstoffe (Prof. Rettenmayr /Dr. Lippmann)

A. Walnsch, A. Bauer, J. Freudenberger, K. Freiberg, C. Wüstefeld, M. Vollmer, S. Lippmann, T. Niendorf, A. Leineweber, M. J. Kriegel „Thermodynamically Guided Improvement of Fe–Mn–Al–Ni Shape-Memory Alloys“ *Advanced Materials* 36 (2023) 2306794. DOI: 10.1002/adma.202306794

P.K. Galenko, L.V. Toropova, D.V. Alexandrov, G. Phanikumar, H. Assadi, M. Reinartz, P. Paul, Y. Fang, S. Lippmann „Anomalous kinetics, patterns formation in recalescence, and final microstructure of rapidly solidified Al-rich Al-Ni alloys“ *Acta Materialia* 241 (2022) ISSN 1359-6454. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118384

T. Ullsperger, D. Liu, B. Yürekli, G. Matthäus, L. Schade, B. Seyfarth, H. Kohl, R. Ramm, M. Rettenmayr, S. Nolte „Ultra-short pulsed laser powder bed fusion of Al-Si alloys: Impact of pulse duration and energy in comparison to continuous wave excitation“ *Additive manufacturing* 46 (2021) 102085. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102085

Professur für Mechanik funktioneller Materialien (Prof. Gnecco)

A. Özoğul, B. R. Jany, F. Krok, E. Gnecco, M. Z. Baykara, "Influence of interfacial oxidation on friction in structural superlubricity": *Tribology Letters* (2021) 69:105. doi.org/10.1007/s11249-021-01475-1

A. Zambudio, E. Gnecco, J. Colchero, R. Perez, J. Gomez-Herrero, C. Gomez-Navarro: "Fine defect engineering of graphene friction": *Carbon* 182 (2021) 735-741. doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.064

V. Dovydaitis, L. Marcinauskas, P. Ayala, E. Gnecco, J. Chimborazo, H. Zhairabany and R. Zabels, "The influence of Cr and Ni doping on the microstructure of oxygen containing diamond-like carbon films": *Vacuum* 191 (2021) 110351. doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110351.

Theoretisch-Physikalisches Institut

Professur für Quantentheorie (Prof. Wipf)

J. Lenz, L. Pannullo, M. Wagner, B. Wellegehause, A. Wipf; Inhomogeneous phases in the Gross-Neveu model in 1+1 dimensions at finite number of flavors; *Phys.Rev.D* 101,094512
DOI: 10.1103/PhysRevD.101.094512

Professur für Quantentheorie (Prof. Gies)

H. Gies, A. S. Salek; Asymptotically safe Hilbert-Palatini gravity in an on-shell reduction scheme; *The European Physical Journal C* 83, 173(2023)
DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11324-1

A. Fedotov, A. Ilderton, F. Karbstein, B. King, D. Seipt, G. Torgrimsson; Advances in QED with intense background fields; *Physics Reports* 100, 1-138: DOI: 10.1016/j.physrep.2023.01.003

C. Deffayet, A. Held, S. Mukohyama, A. Vikman; Global and local stability for ghosts coupled to positive energy degrees of freedom; *J. of Cosmology and Astroparticle Physics*;
DOI: 10.1088/1475-7516/2023/11/031

Professur für Raumzeit und Materie (M. Ammon)

M. Ammon, D. Areal, M. Baggioli, S. Gray, S. Griener, Pseudo-spontaneous U(1) symmetry breaking in hydrodynamics and holography; *J. of High Energy Physics*. 15(2022)
DOI: 10.1007/JHEP03(2022)015

M. Ammon, S. Griener, J. Hernandez, M. Kaminski, et. al., Chiral hydrodynamics in strong external magnetic fields; arXiv:2012.09183
DOI:10.1007/JHEP04%282021%29078

F. Capone, P. Mitra, A. Poole, B. Tomova, Phase space renormalization and finite BMS charges in six dimensions; *J. of High Energy Physics* 34 (2023)
DOI: 10.1007/JHEP11(2023)034

Professur für Gravitationstheorie (B. Brügmann)

T. W. Baumgarte, B. Brügmann, D. Cors, C. Gundlach, D. Hilditch, A. Khirnov, T. Ledvinka, S. Renkhoff, I. Suárez Fernández; Critical Phenomena in the Collapse of Gravitational Waves; *Phys.Rev.Lett.* 131(2023)181401;
DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.181401

S. Renkhoff, D. Cors, D. Hilditch, B. Brügmann; Adaptive hp refinement for spectral elements in numerical relativity; *Phys.Rev.D* 107(2023)104043
DOI: 10.1103/PhysRevD.107.104043

M. B. Schäfer, O. Zelenka, A. H. Nitz, F. Ohme, B. Brügmann; Training strategies for deep learning gravitational-wave searches; *Phys.Rev. D* 105, (2022)043002;
DOI: 10.1103/PhysRevD.105.043002

Professur für Gravitationstheorie (Bernuzzi)

R. Gamba, M. Breschi, G. Carullo, S. Albanesi, P. Rettengo, S. Bernuzzi, A. Nagar; GW190521 as a dynamical capture of two nonspinning black holes; *nature astronomy* 7,11-17 (2023);
DOI: 10.1038/s41550-022-01813-w

M. Breschi, A. Perego, S. Bernuzzi, W. Del Pozzo, V. Nedora, D. Radice, D. Vescovi; AT2017gfo: Bayesian inference and model selection of multicomponent kilonovae and constraints on the neutron star equation of state; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 505(2)(2021)1661-1677;
DOI: 10.1093/mnras/stab1287

D. Radice, S. Bernuzzi, A. Perego, R. Haas; A new moment-based general-relativistic neutrino-radiation transport code: Methods and first applications to neutron star mergers; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 512(1)(2022)1499-1521; DOI: 10.1093/mnras/stac589

Dozentur für Relativistische Astrophysik (apl. Prof. Meinel)

D. Rumler, R. Meinel; Multipole moments of a charged rotating disc of dust in general relativity; *Phys.Rev.D* 108 (2023)064047;
DOI: 10.1103/PhysRevD.108.064047

Meinel R. (2024): *Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie für Bachelorstudenten*, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, in Druck



Professur für Quantenfeldtheorie (S. Flörchinger)

M. Tolosa-Simeón, Á. Parra-López, N. Sánchez-Kuntz, T. Haas, C. Viermann, M. Sparn, N. Liebster, M. Hans, E. Kath, H. Strobel, M. K. Oberthaler, S. Flörchinger; Curved and expanding spacetime geometries in Bose-Einstein condensates; *Phys.Rev.A* 106 (2022)033313; DOI: 10.1103/PhysRevA.106.033313

C. Viermann, M. Sparn, N. Liebster, M. Hans, E. Kath, Á. Parra-López, M. Tolosa-Simeón, N. Sánchez-Kuntz, T. Haas, H. Strobel, S. Flörchinger, M. K. Oberthaler; Quantum field simulator for dynamics in curved spacetime; *nature* 611, 260-264 (2022); DOI: 10.1038/s41586-022-05313-9

S. Flörchinger; Exact flow equation for the divergence functional; *Phys.Lett.B* 846(2023)138244; DOI: 10.1016/j.physletb.2023.138244

Professur für Theorie korrelierter Quantensysteme (Prof. Fritzsche)

Á. Koszorus, L. J. Vormawah, R. Beerwerth, M. L. Bissel, P. Campbell, B. Cheal, C. S.Devlin, T. Eronen, S. Fritzsche et al.; Proton-neutron pairing correlations in the self-conjugate nucleus ^{42}Sc ; *Phys.Lett.B* 819(2021,136439; DOI:10.1016/j.physletb.2021.136439

V. P. Kosheleva, A. V. Volotka, D. A. Glazov, D. V. Zinenko and S. Fritzsche; g Factor of Lithiumlike Silicon and Calcium: Resolving the Disagreement between Theory and Experiment; *Phys.Rev.Lett.* 128, 103001(2022); DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.103001

K. König, S. Fritzsche, G. Hagen, J. D. Holt, A. Klose, J. Lantis, Y. Liu, K. Minamisono, et al; Surprising Charge-Radius Kink in the Sc Isotopes at $N=20$; *Phys.Rev.Lett.* 131,102501 (2023); DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.102501

Heisenberg-Gruppe: Neue Quantenfeldtheorie auf dem Raum-Zeit-Gitter (Dr. Georg Bergner)

G. Bergner, N. Bodendorfer, M. Hanada, S. Pateloudis, E. Rinaldi, A. Schäfer, P. Vranas, H. Watanabe; Confinement/deconfinement transition in the D0-brane matrix model – A signature of M-theory?; *J of High Energy Physics* 96(2022); DOI: 10.1007/JHEP05(2022)096

C. Alexandrou, S. Bacchio, G. Bergner, M. Constantinou, M. Di Carlo, P. Dimopoulos, et al; Quark masses using twisted-mass fermion gauge ensembles; *Phys.Rev. D* 104 (2021)074515; DOI: 10.1103/PhysRevD.104.074515

G. Bergner, D. Schaich; Eigenvalue spectrum and scaling dimension of lattice $N=4$ supersymmetric Yang-Mills; *J of High Energy Physics* 260 (2021); DOI: 10.1007/JHEP04(2021)260

Freigeist-Fellowship: Gravitating Quantum Systems (Dr. André Großardt)

A. Großardt; Dephasing and inhibition of spin interference from semi-classical self-gravitation; *Class. Quantum Grav.* 38 (2021) 245009; DOI: 10.1088/1361-6382/ac36a6

M.K. Döner, A. Großardt; Is Gravitational Entanglement Evidence for the Quantization of Spacetime?; *Foundations of Physics* 52(2022) 101; DOI: 10.1007/s10701-022-00619-0

A. Großardt; Gravitational entanglement and the mass contribution of internal energy in nonrelativistic quantum systems; *International J. Modern Physics* 31(14)(2022)2242017; DOI: 10.1142/S0218271822420172

Emmy Noether Nachwuchsgruppe (Dr. Sebastian Steinhaus)

M. Ali, S. Steinhaus; Toward matter dynamics in spin foam quantum gravity; *Phys.Rev D* 106 (2022) 106106 ; DOI: 10.1103/PhysRevD.106.106016

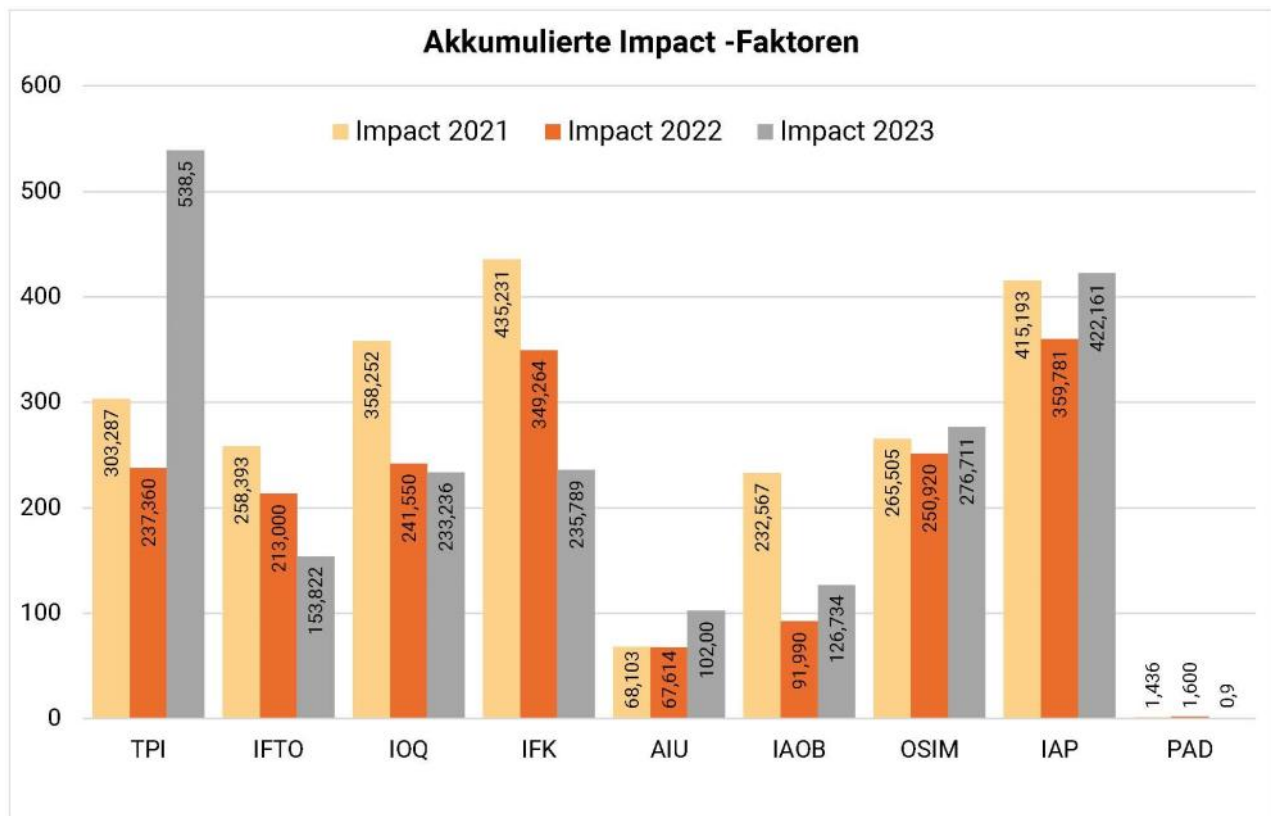
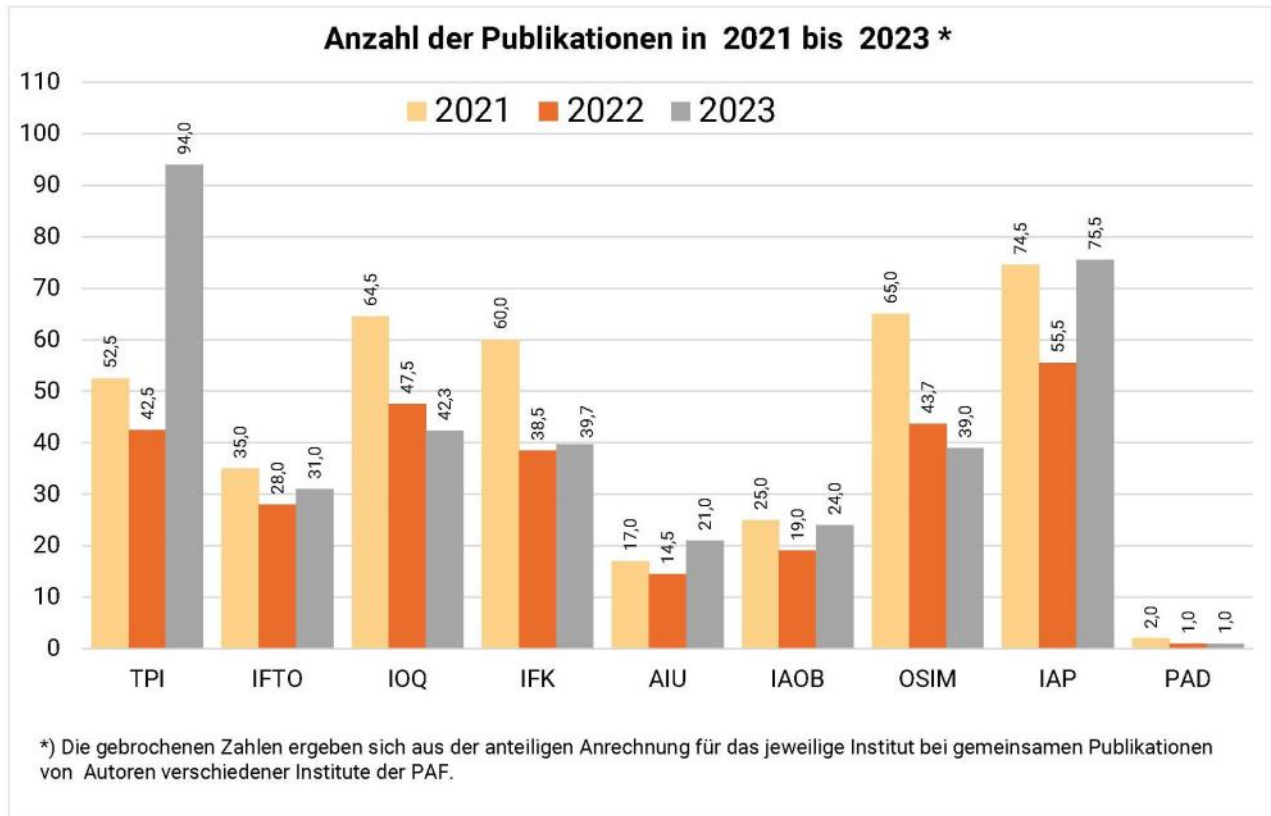
S. K. Asante, J. D. Simão, S. Steinhaus; Spin-foams as semiclassical vertices: Gluing constraints and a hybrid algorithm; *Phys.Rev.D* 107 (2023)046002; DOI: 10.1103/PhysRevD.107.046002

AG Physik- und Astronomiedidaktik

K.-H. Lotze and S. Simionato, "Henry Cavendish and the Effect of Gravity on Propagation of Light: A Postscript", *The European Physical Journal H* 46, 24 (2021)

S. Aehle, P. Scheiger, H. Cartarius, "An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments", *Physics* 4, 1241 (2022)

P. Scheiger, H. Cartarius, R. Nawrodt, "Why and how to implement worked examples in upper division theoretical physics", *American Journal of Physics* 91, 764 (2023)



Tagungen

Die nachfolgende Auflistung enthält Tagungen und Konferenzen, die in den Jahren 2021 bis 2023 von Arbeitsgruppen der PAF (mit)-organisiert und (mit)-veranstaltet wurden.

Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

Professur für Astrophysik (Prof. Neuhäuser)

R. Neuhäuser als SOC-chair der Lunch Session LS9 zu "Betelgeuse and other runaway stars" bei **Annual Meeting 2023 der European Astronomical Society** (10.-14. Juli 2023 in Kraków, Polen)

Link: <https://eas.unige.ch/EAS2023/session.jsp?id=LS9>

Professur für Astronomie (Prof. Krivov)

International Workshop "**Debris Disks at Home and Abroad**", Jena, Deutschland, 29. August - 2. September 2022, SOC- and LOC-Chair: A. Krivov; Organisation / Mitorganisation: Mehrere Mitarbeiter (innen) der Arbeitsgruppe

Full Meetings der DFG FOR 2285:

- virtual, March 2021;
 - virtual, September 2021;
 - virtual, March 2022;
- Organisation: A. Krivov

International Workshop "Planet Formation and Evolution", Berlin, 12. - 14. September 2022, SOC-Mitglieder: A. Krivov und R. Neuhäuser

Institut für Angewandte Optik und Biophysik

Professur für Superaufgelöste Mikroskopie (Prof. Eggeling)

International Conference on Nanoscopy ICON-Europe 2022, online; Organisator: Eggeling

International Conference on Nanoscopy ICON-Europe 2024, Jena, Organisator: Eggeling

Professur für Wellenleiteroptik/Faseroptik (Prof. Čížmár)

Programme committee member of "**Adaptive Optics and Wavefront Control for Biological Systems IX**", Bios, Photonics (Čížmár)

Workshop **GATES IV on complex media photonics and neuromer photonics** (Telc, 24.-25. 8. 2023) (Čížmár)

Juniorprofessur für digitalisierte experimentelle Mikroskopie (Jun.-Prof. Franke)

Co-Organizer of the "EMBO Practical Course on Super-Resolution in Light Microscopy" 2023, Prague, CZ. (6 days, 20 on site participants, 25 online participants, 20 invited speakers)

Institut für Angewandte Physik

Professur für Angewandte Physik

(Prof. Tünnermann)

Photonic Days, Jena, 2021, 2022, 2023

ODF'24 Member Advisory Board, Tucson Arizona, USA, 2023

Professur für Theorie optischer Systeme (Prof. Gross)

European Optical Society Annual Meeting, Rom, 2021.

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

26th Microoptics Conference, MOC2021, online, 2021

27th Microoptics Conference, MOC2022, Jena, 2022

28th Microoptics Conference, MOC2023, Japan, 2023

SPIE Advanced Lithography: Optical Microlithography XXXIV, San Jose, USA, 2021.

Professur für Technische Physik (Prof. Wyrowski)

SPIE Computational Optics, Madrid, 2021

SPIE Conference on Digital Optics for Immersive Displays, München, 2021.

EOS Topical Meeting on Diffractive Optics, Jena, 2021.

SPIE Workshop on Light Shaping, 2021

SPIE Conference on Optics and Photonics for Information Processing, USA 2021

OSA Conference on Digital Holography and 3D Imaging, online, 2021

Dr. Adriana Szeghalmi

V2021 Vakuum & Plasma, Dresden, 2021

Professur für Experimentalphysik / Laserphysik
(Prof. Dr. Stefan Nolte)

SPIE Photonics West, San Francisco USA, 2021, 2022, 2023

12th Cirp Conference on Photonic Technologies LANE 2022, Fürth, 2022

40th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), USA, 2021

41st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), USA, 2023

Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO, USA, 2021, 2022, 2023

Lasers in Manufacturing LiM, online/München, 2021, 2022, 2023

Lasertagung Jena, online/Jena, 2021, 2022, 2023

Workshop on Structured Light and its Applications, Jena, 2022

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

Molecular Plasmonics, Jena, 2023

ETOP - Education and Training in Optics & Photonics, Florida, 2023

DoKDoK 2022

Dr. Tobias Vogl

INSQT International Network in Space Quantum Technologies-Workshop 2.1, Jena, 2023

Dr. Jan Rothhardt

Conference on Computational Optical Sensing and Imaging (COSI), online 2021

Ultrafast Optics conference (UFO XIII), Argentinien, 2023

The European Optical Society Annual meeting (EOSAM), Rom, 2021

Dr. Thomas Siefke

SPIE Modeling Aspects in Optical Metrology, München, 2023

NANO-FAME 2023 Micro and Nano fabrication technology meets Nano metrology, Berlin, 2023

Institut für Festkörperphysik

Professur für Festkörperphysik (Prof. Ronning)

Ion Beam Workshop 2021, virtuelles Treffen, 24.-25. März 2021

Ion Beam Workshop 2022, 31.3.-1.4.2022, Jena

Professur für Nano- und Quantnsysteme (Prof. Staude) und Juniorprofessur für Optik zweidimensionaler Festkörper (Jun.-Prof. Soavi)

The International Conference of Quantum, Non-linear & Nanophotonics (ICQNN) 2022, 5.-9. September 2022, Jena

AG Laborastrophysik (PD Dr. Cornelia Jäger)

International Laboratory Astrophysics Workshop „**Dust, Ice, Complex and Prebiotic Molecules in the ISM, Disks, and Exoplanet Atmospheres**“, 22.-24. November 2021, 70 Teilnehmer

Institut für Optik und Quantenelektronik

Professur für Laserteilchenbeschleunigung
(Prof. Zepf)

EXHILP Conference 2021, Scientific Advisory Committee, 13.-17.09.2021, Jena

Professur für Relativistische Laserphysik
(Prof. Kaluza)

High-Power and High-Energy Laser Technology
SPIE Optics+Optoelectronics
19.-22.04.2021, Prag, Tschechien (Dr. J. Hein)

High-Power and High-Energy Lasers and Ultrafast Optical Technologies
SPIE Optics+Optoelectronics
24.-27.04.2023, Prag, Tschechien (Dr. J. Hein)

Professur für Röntgenphysik (Prof. Röhlberger)

R. Röhlberger, A. Madsen, Th. Tschentscher,
Workshop on Cavity based X-ray free-electron lasers (CBXFEL) 24.-26.03.2021, online

R. Röhlberger, **Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE)**, 10.-14. 01.2022, Snowbird, Utah, USA

R. Röhlberger, S. Sadashivaiah, K.-S. Schulze, A. Negi, K. Schlage, L. Bocklage, **HI-Jena/DESY Science Meeting**, 29.-31.08.2022, Jena

R. Röhlberger, **Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE)**, 09.-13.01.2023, Snowbird, Utah, USA

Lehrstuhl für Atomphysik hochgeladener Ionen
(Prof. Stöhlker)

Th. Stöhlker, C. Hahn, A. Gumberidze, A. Bräuning-Demian, L. Wunderlich, R. Schuch, Y. Litvinov, **18th SPARC Topical Workshop**, 06.09.-09.09.2021, online

Th. Stöhlker, V. Bagnoud, A. Bräuning-Demian, S. Schippers, C. Trautmann, L. Wunderlich, **APPA R&D Collaboration Meeting**, 20.01.-21.01.2022, online

Th. Stöhlker, F. Herfurth, M. Vogel, R. Schuch, W. Quint, Z. Anelkovic, **HITRAP Facility and Experiments – Status and Future Perspectives**, 17.07.-20.07.2022, Eisenach

T. Stöhlker, C. Hahn, A. Gumberidze, A. Bräuning-Demian, L. Wunderlich, R. Schuch, Y. Litvinov, **19th SPARC Topical Workshop**, 06.09.-09.09.2022, Jena

Th. Stöhlker, C. Bruno, J. Marsh, R. Singh Sidhu, R. Schuch, A. Gumberidze, **20th SPARC Topical Workshop** 05.09.-08.09.2023, Edinburgh, UK

Th. Stöhlker, C. Hahn, M. Vogel, L. Wunderlich, L. Hönig, J. Flegel, A. Hahn, R. Märtin, **4th Science Workshop of the Program MML**, 27.-29.09.2023, Jena

Otto-Schott-Institut für Materialforschung

Professur für Materialwissenschaft (Prof. Jandt)

6th Euro BioMAT 2021 - European Symposium on Biomaterials and Related Areas

7th Euro BioMAT 2023 - European Symposium on Biomaterials and Related Areas

Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien (Prof. Müller)

98. DKG-Jahrestagung – Keramik 2023, Jena / Hermsdorf (27.03.2023 - 30.03.2023)

Professur für Metallische Werkstoffe

Kupfer-Symposium (24.-25.11.2021), Jena

French/German meeting on thermodynamics and kinetics of materials (2.-3. Februar 2023), Karlsruhe

Workshop “Solidification of Containerless Undercooled Melts” (25.-26.5.2023)

Kupfer-Symposium (29.-30.11.2023), Jena

Theoretisch-Physikalisches Institut

Professur für Quantentheorie (Prof. Gies)

Physik-Combo, RTG Monitoring Workshop, Web Meeting, 22 - 24 März 2021

Physik-Combo, RTG Monitoring Workshop, Leipzig, 27 - 29 September 2021

Physik-Combo, RTG Monitoring Workshop, Jena 29 - 31 März 2022

Physik-Combo, RTG Monitoring Workshop, Leipzig, 5 -7 Oktober 2022

Physik-Combo, RTG Monitoring Workshop, Jena 27 - 28 März 2023

ExHILP 2021, Extremely High Intensity Laser Physics Conference, Jena, 13 - 17 September 2021

ERG 2022, 11th International Conference on the Exact Renormalization Group 2022, Berlin, 25 - 29 July 2022

EMMI Collaboration Meeting, Jena, 26 - 28 Oktober 2023

Professuren für Gravitationstheorie (Prof. Brügmann und Prof. Bernuzzi)

EoB@Work 2023, EoB at Work 2023, Jena, 22 - 24 May 2023

FNR 2022, Frontiers in Numerical Relativity 2020, Jena, 25 - 29 July 2022

AG Physik- und Astronomiedidaktik

Heraeus Summer School „Astronomy from 4 perspectives”, online, 30. August-2.September 2021

Heraeus Summer School „Astronomy from 4 perspectives”, Heidelberg, 5.-8. September 2022

Heraeus Summer School „Astronomy from 4 perspectives”, Asiago, Italien, 4. -7. September 2023

Bundesweite Lehrerfortbildung ASTRONOMIE, online, 26.-27. Juli 2011

Bundesweite Lehrerfortbildung ASTRONOMIE, Jena, 18.-22. Juli 2022

Bundesweite Lehrerfortbildung ASTRONOMIE, Jena, 10.-12. Juli 2023

QuBIT EDU-Konferenz: Didaktik der Quantenphysik und Quantentechnologien, Online, 4.-5. Oktober 2021

QuBIT EDU-Konferenz: Didaktik der Quantenphysik und Quantentechnologien, Jena, 21.-23. September 2022

QuBIT EDU-Konferenz: Didaktik der Quantenphysik und Quantentechnologien, Stuttgart, 12.-13. Oktober 2023

Kolloquium der mitteldeutschen Fachdidaktiken Physik, Jena, 18. September 2023

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, Matt Zepf und Ralf Röhlsberger), das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (mit dem Direktor Prof. Andreas Tünnermann und den Professoren Stefan Nolte, Jens Limpert und apl. Prof. Uwe Zeitner), das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Abteilungsleiter: Prof. Heidemarie Schmidt, Prof. Markus Schmidt, Prof. Tomáš Čížmár, Prof. Christian Egge-ling), die Thüringer Landessternwarte in Tautenburg (Direktor: Prof. Artie Hatzes, seit 2023 Prof. Markus Roth) das Deutsche Optische Museum, dessen Direktor Timo Mappes auch 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 vor allem im Rahmen von Zentren, SFB 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 JEN-OPTIK AG sowie zahlreiche kleinere Firmen auf dem Gebiet der Optik. Diese fruchtbare, enge Zusammenarbeit zwischen universitärer naturwissenschaftlicher Forschung und industrieller Produktion auf hohem technologischem 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

Terra-Astronomie (Prof. Neuhäuser)

- Jesse Chapman, U California, LA, USA
- Rainer Arlt, AIP Potsdam
- Amir Harrak, U Toronto, Canada
- Guillermo Torres, CfA Harvard, USA
- Matteo Cosci, U Ca'Foscari Venezia, Italien
- Pouyan Rezvani, Project PAL, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

Stern- und Planetenentstehung (Prof. Neuhäuser, Dr. Mugrauer)

- Christian Adam, Centro de Astronomía de la Universidad de Antofagasta, Chile
- Matilde Fernández Hernández, IAA-CSIC, Granada, Spanien
- Christian Ginski, Anton Pannekoek Institute for Astronomy, Amsterdam, Niederlande
- Nikolaus Vogt, U de Valparaíso, Chile
- Sven Buder, Australian National University, Canberra, Australien

Laborastrophysik (Dr. Mutschke)

- PD Dr. Cornelia Jäger und Dr. Alexey Potapov, MPIA Heidelberg und IFK, FSU Jena
- Prof. Jürgen Blum, IGEP, TU Braunschweig
- Prof. Falko Langenhorst und Dr. Dennis Harries, Inst. Für Geowissenschaften, FSU Jena
- Dr. Elisa Costantini, SRON Netherlands Institut of Space Research Leiden, Niederlande

Theorie (Prof. Krivov, PD Dr. Löhne)

- Herve Beust, IPAG Grenoble, France
- Jürgen Blum, TU Braunschweig
- Steve Ertel, Virginie Faramaz, Steward Observatory, Arizona, USA
- Antonio Hales, ALMA, Chile
- Florian Kirchsclager, Sterrenkundig Observatorium, Ghent University, Belgium
- Ralf Launhardt, MPIA Heidelberg
- Luca Matra, Trinity College Dublin, Ireland
- Sebastian Wolf, Thomas Stuber, U Kiel
- Mark C. Wyatt, Cambridge University, UK
- Sebastian Marino, University of Exeter, UK

Institut für Angewandte Optik und Biophysik

Professur für Superaufgelöste Mikroskopie (Prof. Eggeling)

- Abberior Instruments Göttingen
- Carl Zeiss Microscopy Jena
- Andrey Klymchenko (Strassbourg)
- Delphine Mureau (CNRS Montpellier)
- Ralf Erdmann, Ruhr-Universität Bochum
- Martin Booth, University of Oxford, GB
- Helge Ewers (HU Berlin)
- Markus Sauer (Würzburg)
- Thomas Gutsman (Leibniz Lungenzentrum Borstel)
- Rainer Böckmanns (Uni Erlangen)
- Ilpo Vattulainen (Uni Helsinki)
- Erdinc Sezgin (Karolinska Stockholm)
- Thilo Figge, Axel Brakhage und Bernhard Hubbe (HKI Jena)
- Gerhard Paulus und Benjamin Dietzek (FSU Jena)

Junioprofessur für digitalisierte experimentelle Mikroskopie (Jun.-Prof. Christian Fanke)

- Carl Zeiss Microscopy (Jena)
- Prof. Dr. Christian Geis, Prof. Dr. Christian Huebner und Prof. Dr. Knut Holthoff (Universitätsklinikum Jena, UKJ)
- Prof. Dr. Gunther Notni (TU Ilmenau & IOF Fraunhofer)
- Dr. Peter Kuehmstedt (IOF Fraunhofer)
- Prof. Dr. Markus Sauer (Würzburg University)
- Prof. Dr. Ulrike Endesfelder (Bonn University)
- Prof. Dr. Ignacio Izeddin (ESPCI Paris/CNRS, France)

Professur für Wellenleiteroptik/Faseroptik (Prof. Dr. Tomáš Čižmár)

- Institute of Scientific Instruments of the Czech Academy of Science, Brno, Czech Republic
- Leibniz Institute of Neurobiology Magdeburg, Germany

Junioprofessur für Intelligente Photonische Systeme (Jun.-Prof. Dr. Mario Chemnitz)

- Markus Schmidt (IPHT Jena)

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
- Universität Stuttgart, Germany
- 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
- Universität Paderborn
- Center for Quantum Technology, National University of Singapore, Singapore
- Center for Soft Nanoscience (SoN), Westfälische Wilhelms-Universität-Münster, Germany
- University of Waterloo, Canada
- Universität Ulm, Germany
- Institute of Photonic Sciences, Barcelona, Spain

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
- Helmholtz-Institut Jena, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Jena
- Institut für Optik und Quantenelektronik, FSU Jena

- DESY, Helmholtz Gesellschaft, Hamburg
- Institute of Photonics and Electronics, Czech Academy of Sciences, Prag, Czech Republic
- Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern, Germany

Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)

- ANU Quantum Optics Group, Australian National University, Canberra, Australia
- CELIA, University of Bordeaux, France
- Centre d'Optique, Photonique et Laser (COPL), Université Laval, Québec City, Canada
- 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
- Department of Physics and Technology, University of Bergen, Norway
- Énergie, Matériaux et Télécommunications Research Center, Institut national de la recherche scientifique (INRS), Varennes, Canada
- Fachbereich SciTec, University of Applied Sciences Jena (EAH), Jena, Germany
- Ferdinand-Braun-Institute, Humboldt-Universität zu Berlin, Germany
- innoFSPEC, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam
- Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, TU Bergakademie Freiberg, Germany
- Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Austria
- Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhni Novgorod, Russia
- Institute of Electronic Structure and Laser (IESL), Foundation for Research and Technology–Hellas (FORTH), Heraklion, Greece
- 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, Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Menlo Park, USA
- University of Gdansk, Poland
- Mahidol's Quantum Lab, Department of Physics, Mahidol University, Bangkok, Thailand
- Otto Schott Institute of Materials Research, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Germany
- Photonik und Medizintechnik, University of Applied Sciences and Arts (HAWK), Göttingen, Germany
- Quantum Optical Materials and Systems, University of Cambridge, Great Britain
- Space Technology, Technical University of Berlin, Germany
- Technical Chemistry I, Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE), University of Duisburg, Germany
- The SpooQy Lab, National University of Singapore, Singapore
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland
- Photonics and Nanotechnology Institute (CNR-IFN), Milano, Italy

Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)

- Nonlinear Physics Center, Australian National University, Canberra
- Department of Optics and Photonics, National Central University, Zhongli, Taiwan
- Laboratory of Quantum Materials and Phenomena, University Paris Diderot, Paris, France
- Institute of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia
- Department of Physics, Koç University, Istanbul, Turkey
- Electromagnetic Fields and Photonics Group, University of Brescia, Italy
- Institute for complex quantum systems, Universität Ulm, Germany
- Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology (USST), Shanghai, China
- LENS - European Laboratory for Non-Linear Spectroscopy, Istituto Nazionale di Ottica, Florence, Italy
- Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter & Institut für Laserphysik, Universität Hamburg, Germany
- Max-Planck Institute for the Science of Light, Erlangen, Germany
- Research School of Physics, Electronic Materials Engineering, Australian National University, Canberra, Australia
- School of Engineering & Applied Science, School of Life & Health Sciences, Aston University, Birmingham, Great Britain

Professur für Theorie optischer Systeme (Prof. Gross)

- Optical and Electronical Information, Huazhong University, Wuhan, China
- GrinTech GmbH, Jena, Germany
- Institut für Quantenoptik, Garching, Germany
- Institut für Biomedizinische Optik, Universität Lübeck, Germany
- Physikalisches Institut, Universität Tübingen, Germany
- Engineering Science, University of Oxford, Great Britain

Professur für Technische Physik (Prof. Wyrowski)

- Carl Zeiss AG, Oberkochen
- Datalogic, Bologna, Italy
- KLA-Tencor, Milpitas, California, USA
- 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
- 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)

- Cesky Meteorologicky Institut (CMI), Brno, Czech Republic
- Dept. of Applied Physics, Eindhoven Univ. of Technology, Eindhoven
- Layertec GmbH, Mellingen
- Institut für Halbleitertechnik LENA, TU Braunschweig, Germany
- VSL - Dutch Metrology Institute, Delft, The Netherlands
- Department of Applied Mathematics and Computer Science, Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Kongens Lyngby, Denmark
- Dansk Fundamental Metrologi (DFM), Hørsholm, Denmark
- Applied Physics, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands
- Quantum Engineering of Light, Fundacio Institut de Ciencies Fotoniques (ICFO), Castelldefels, Spain
- Quantum Optics, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Torino, Italy

- JCMwave GmbH (JCM), Berlin, Germany
- Leibnitz-Institut für Photonische Technologien, Jena, Germany
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin, Germany
- School of Engineering and Applied Sciences, Swansea University, Swansea, Great Britain
- Department of Physics, Università degli Studi di Torino (UNITO), Torino, Italy
- Rhy Search, Buchs, Schweiz

Institut für Festkörperphysik

Professur für Festkörperphysik (Prof. Fritz)

- Prof. Dr. Oliver Monti, University of Arizona, Tucson, USA
- Prof. Dr. Hiroyuki Yoshida, Chiba University, Japan
- Prof. Dr. Satoshi Kera, Institute of Molecular Science Okazaki, Japan
- Prof. Oliver Hofmann, TU Graz, Institut für Festkörperphysik, Graz, Österreich

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

- Prof. Dr. Dragomir Neshev, Australian National University, Australien
- Prof. Giulio Cerullo, Politecnico di Milano, Italien
- Prof. Andrea C. Ferrari, University of Cambridge (UK)
- Prof. B. Yao (Chengdu University, China)
- Prof. H. Rostami (University of Bath, UK)
- Prof. K. Tielrooij (ICN2 and Eindhoven University of Technology)

Professur für Festkörperphysik (Prof. Ronning)

- Prof. H.H. Tan, Prof. Lan Fu, Prof. C. Jagadish (all ANU, Canberra, Australia)
- Prof. Marko Loncar (Harvard U, USA)
- Dr. Rupert Oulton, Imperial College London, UK
- Prof. M.A. Kats, U Wisconsin@Madison, USA
- Prof. K. Bharuth-Ram, Durban University of Technology, South Africa
- Prof. A. Lugstein, TU Wien, Österreich
- Prof. Tobias Kippenberg, EPFL, Switzerland
- Prof. Andreas Waag (TU Braunschweig)
- Dr. Gema Martinez-Criado (ESRF Grenoble, France)
- Prof. Wolfram Pernice (U Heidelberg)

Professur für Nano- und Quantensysteme (Prof. Isabelle Staude)

- Australian National University Canberra, Australia
- Centre for Integrated Nanotechnologies, Sandia National Laboratories, USA
- National Research Council, Ottawa, Canada
- KIT Karlsruhe

AG Laborastrophysik (PD Dr. Cornelia Jäger)

- 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
- Prof. Dr. Elisabetta Palumbo, Istituto Nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astrofisico di Catania, Catania, Italy
- Prof. Yu-Jung Chen (National Central University, Taiwan)
- Dr. Murthy S. Gudipati (Jet Propulsion Laboratory, Caltech USA)
- Dr. Lisseth Gavilan (NASA Ames Research Center, USA)
- Prof. Liv Hornekær (Aarhus University and Center for Interstellar Catalysis, Aarhus University, Denmark)

Institut für Festkörpertheorie und -optik**Professur für Festkörpertheorie (Prof. Botti)**

- O. Pulci, University of Rome Tor Vergata
- Prof. Dr. Giancarlo Cappellini, University of Cagliari, Italy
- Prof. Dr. Erik Bakkers, Prof. Dr. Jos Haverkort, TU Eindhoven, Niederlande
- Prof. Dr. Michael Johnston, University of Oxford, UK
- Dr. S. Pittalis (University of Modena-Reggio Emilia)
- Prof. J. Shi (Jiangsu Normal University)
- Prof. W. Cui (Jiangsu Normal University)

Professur für Festkörperoptik (Prof. Peschel)

- Sebastian Klembt (Universität Würzburg)
- Christian Schneider (Universität Oldenburg)
- Demetri Christodoulides, CREOL, University of Central Florida, Orlando, USA
- Roberto Morandotti, INRS, University Montreal, Canada
- Prof. Kurt Busch Humboldt Universität Berlin

Institut für Optik und Quantenelektronik**Professur 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

Professur für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Military University of Technology, Warschau, Polen
- Sofia University, Bulgarien

Professur für Röntgenphysik (Prof. Röhlsberger)

- DESY Hamburg (Deutsches Elektronen-Synchrotron)
- ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) Grenoble/Frankreich
- European XFEL, Schenefeld
- Friedrich-Alexander Universität Erlangen
- Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
- Universität Göttingen
- TU Kaiserslautern
- Argonne National Laboratory, USA
- Deutsches Röntgenmuseum, Remscheid-Lennep

Professur für Laserteilchenbeschleunigung (Prof. Zepf)

- Stanford University
- Queen's University Belfast
- Michigan University, USA
- Centre for Advanced Laser Applications (CALA), München
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- CEA Saclay, France

Professur für Quantenelektronik (Prof. Spielmann)

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Goethe Universität Frankfurt, Germany
- TU Braunschweig
- Technische Universität Wien, Österreich
- Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- University of California Berkeley, Berkeley, USA

Professur 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

Professur für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
- Military University of Technology, Warschau, Polen
- Sofia University, Bulgarien

Professur für Röntgenphysik (Prof. Röhlberger)

- DESY Hamburg (Deutsches Elektronen-Synchrotron)
- ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) Grenoble/Frankreich
- European XFEL, Schenefeld
- Friedrich-Alexander Universität Erlangen
- Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
- Universität Göttingen
- TU Kaiserslautern
- Argonne National Laboratory, USA
- Deutsches Röntgenmuseum, Remscheid-Lennep

Professur für Laserteilchenbeschleunigung (Prof. Zepf)

- Stanford University
- Queen's University Belfast
- Michigan University, USA
- Centre for Advanced Laser Applications (CALA), München
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- CEA Saclay, France

Professur für Quantenelektronik (Prof. Spielmann)

- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

AG Physik- und Astronomiedidaktik

- Prof. Dr. Ronny Nawrodt, Physik und ihre Didaktik, Universität Stuttgart

Otto-Schott-Institut für Materialforschung

Professur für Oberflächen– und Grenzflächentechnologien (Prof. Müller)

- Dr. Bonse, BAM Berlin
- Dr. Dembski, Uniklinikum Würzburg
- Dr. Fuchs, asphericon GmbH, Jena
- Prof. Gbureck, Universität Würzburg
- Prof. Kern, Universität Stuttgart
- Dr. Oberbach, Mathys Orthopädie GmbH Hermsdorf
- Hr. Störzner, LCP Laser-Cut-Processing GmbH Hermsdorf
- Prof. Undisz, Technische Universität Chemnitz
- Prof. Voigt, Fraunhofer IKTS Hermsdorf

Professur für Mechanik funktioneller Materialien (Prof. Gnecco)

- Universität Basel, Schweiz
- Justus-Liebig-Universität Giessen
- Jagiellonian University Krakow, Polen
- University of Zaragoza, Spanien

Professur für Metallische Werkstoffe (Prof. Rettenmayr, Dr. Lippmann)

- Prof. Dmitry Alexandrov, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russland

Theoretisch –Physikalisches Institut

Lehrstuhl für Gravitationstheorie (Prof. Brügmann)

- Michael Stifel Center an der FSU Jena

Professur für Gravitationstheorie (Prof. Bernuzzi)

- CoRe Collaboration
- Einstein Telescope

Lehrstuhl für Quantentheorie (Prof. Gies)

- Helmholtz Institut Jena
- Institut 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)

Forschungsmarketing und Forschungstransfer

Erteilte und angemeldete Patente

Patentanmeldungen 2021

H. Schmidt, D. Born, N. Du, U. Hübner

Labelfreies 3D-Imaging mit langgestreckten supraleitenden Nanodraht-Einzelphotonendetektoren (s-SNSPD, sSNSPD, (DE 10 2021 133 714.3)

Hänschke, A. Ihring, H. Schmidt, S.E. Stanca, G. Zieger

Verfahren zur Herstellung hochgenau lokalisierter Breitbandabsorber für 2D- und 3D-Oberflächen, (DE102021113985A1)

M. Blothe, M. Chambonneau, S. Nolte, M. Kumkar
Verfahren zum Zerteilen eines transparenten Werkstücks (DE102021100675.9)

J. Rothhardt, G.K. Tadesse, W. Eschen, J. Limpert

Verfahren und Vorrichtung zur Charakterisierung eines kohärenten Lichtfelds in Amplitude und Phase (PCT/EP2021/051457)

J. Rothhardt, G.K. Tadesse, W. Eschen, J. Limpert

Verfahren und Vorrichtung zur linsenlosen Bildgebung mittels Fourier-Transformations-Holographie (PCT/EP2021/051463)

G. Notni, E.-B. Kley, S. Heist

Verfahren und System zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche (PCT/EP2021/ 052887)

M.A. Schmidt, F. Eilenberger, A. George, A. Turchanin

Anordnung und Verfahren zur effizienten nichtlinearen Lichtkonversion (EP 21736957.8)

M.A. Schmidt, F. Eilenberger, A. George, A. Turchanin

Arrangement and method for efficient non-linear light conversion (US 17/996,4354)

M.A. Schmidt, F. Eilenberger, A. George, A. Turchanin

Bauteil und Verfahren zur effizienten nichtlinearen Lichtkonversion basierend auf dem direkten Wachstum von atomar dünnen Übergangsmetall-dichalkogenen (TMDCs) auf dem wellenleitenden Bereich optischer Fasern oder vergleichbarer optischer Wellenleiter (PCT/DE2021/ 100383)

S. Nolte, Q. Li, M. Chambonneau

Method and system for laser welding of a semi-

conductor material (PCT/EP2021/066129)

S. Nolte, Q. Li, M. Chambonneau

Verfahren und System zum Laserschweißen eines Halbleitermaterials (EP21737344.8)

F. Eilenberger, T. Vogl

Erzeugung von Einzelphotonen (CN202180070261.9)

F. Eilenberger, T. Vogl

Erzeugung von Einzelphotonen (US18/032,013)

S. Schwinde, S. Shestaeva, S. Yulin, R. Schlegel, S. Schröder, P. Schmidt

Silberbasierte Schichtsysteme mit dünnen Ru-Ir-Haftsichten für optische Elemente (DE102021122874.3)

Brenner, L. Pongratz, A. Gillner, T. Dallmann, T. Freialdenhoven, K. Täschner, T. Preußner, P. Schreiber, D. Stefanidi, J. Ruskowski, S. Grollius

Multi-Sensor-integriertes adaptives Scheinwerfersystem für robuste und störungsminimierte Fahrerassistenz-Systeme zur Steigerung des Automatisierungsgrads von Fahrzeugen (DE102021129622.6)

Patentanmeldungen 2022

M. Blothe, M. Chambonneau, S. Nolte, M. Kumkar

Verfahren zum Zerteilen eines transparenten Werkstücks (PCT/EP2022/050305)

J. Limpert, J. Rothhardt, W. Eschen

Ptychographisches Bildgebungsverfahren und -system (DE 102022112789.3)

P. Schreiber, D. Michaelis, R. Kundu

Maskenloser Zeichenprojektor (DE 102022210090.5)

D. Stefanidi, P. Schreiber, L.M. Wilhelm

Abblendlichtscheinwerfer mit mikrooptischer Strahlformung (DE 102022210092.1)

D. Stefanidi, P. Schreiber, L.M. Wilhelm

Optical beam shaper for complex far-field distributions (DE 102022210091.3)

A. Klenke, C. Jáuregui, J. Limpert

Faseroptischer Hochleistungslaser basierend auf inkohärenter Überlagerung einer Mehrkernemission (DE 102022126964.7)

Patentanmeldungen 2023

S. Nolte, H.P. Kohl

Laserbasiertes Pulverbettsschmelzen (DE102023122761.0)

B. Fischer, P. Roztock, M. Chemnitz, C. Rimoldi, B. Maclellan, L.R. Cortes, ... (Cizmar)

Nonlinear optical system and method for optical information processing; US Patent App.

18/014,871 2023

J. Limpert, J. Rothhardt, W. Eschen

Ptychographisches Bildgebungsverfahren und -system (PCT/EP2023/063474)

J. Limpert, T. Schreiber, J. Nold, A. Klenke

Mehrkern-Lichtwellenleiter mit Polarisationserhaltung (DE102023102052.8)

Klenke, C. Jáuregui-Misas, J. Limpert

Faseroptischer Hochleistungslaser basierend auf inkohärenter Überlagerung einer Mehrkernemission (PCT/EP2023/078322)

J. Limpert, A. Klenke, C. Jáuregui-Misas, C.E. Ale-shire

Lichtquelle zum optischen Pumpen eines laseraktiven Mediums (DE102023102807.3)

P. Schreiber, O. Jeschonnek, R. Kundu, C. Dach-roth

Direct-view lightfield device for 3D displays (DE102023206923.7)

S. Nolte, H.P. Kohl

Laserbasiertes Pulverbettenschmelzen (DE102023117222.0)

T. Pertsch, F. Eilenberger, F. Setzpfandt, M. Weiß-flog

Durchstimbare Quelle verschränkter Photonenpaare basierend auf einem nichtlinearen Kristall mit spezieller Symmetrie (DE102023127530.5)

Schutzrechtserteilungen 2021

Brahm, A. Willms, G. Notni, S. Nolte, S. Döring

Verfahren und Vorrichtung zum Entspiegeln eines optischen Elements (DE102014200742B4)

C. Stihler, C. Jauregui Misas, J. Limpert, H.-J. Otto, A. Tünnermann

Aktivstabilisierung von Modeninstabilität in einem Lichtwellenleiter (EP3270473B1)

D. Nodop, J. Limpert, A. Tünnermann

Faserverstärkersystem (EP2647090B1)

J. Petschulat, M. Rahm, M. Dichtl, M. Heim, T.

Pertsch, E.-B. Kley, T. Kämpfe

Sicherheitselement (EP2225110B1)

M. Müller, M. Kienel, A. Klenke, A. Tünnermann, J. Limpert

Optical arrangement (US11,043,783B2)

J. Popp, M. Schmitt, T. Meyer, S. Nolte, R. Ackermann, J. Limpert

Lasermikroskop mit Ablationsfunktion (EP3458841B1)

M. Goy, C. Reinlein, N. Leonhard, M. Appelfelder

Verfahren zur Formgebung und /oder Formkorrektur mindestens eines optischen Elements (DE102015106184B4)

M. Steglich, M. Zilk, K. Fuchsel, A. Tünnermann, E.-B. Kley

Strahlungsdetektierendes Halbleiterbauelement (DE102012109243B4)

S. Schröder, N. Felde, L. Coriand, M. Trost, G. Notni

Kontaminationsabweisender Spiegel und Verfahren zu dessen Herstellung (DE102018110251B4)

S. Schröder, N. Felde, L. Coriand, M. Trost, G. Notni

Antifouling mirror and method for producing the same (JP6896785B2)

Schutzrechtserteilungen 2022

M. Blothe, M. Chambonneau, S. Nolte, M. Kumkar

Verfahren zum Zerteilen eines transparenten Werkstücks (DE 102021100675.9)

C. Jauregui Misas, A. Tünnermann, J. Limpert, C. Gaida

Lichtwellenleiter (EP 15785059.5)

H. v. Lukowicz, J. Hartung, M. Beier, S. Risse

Halterung zur Fixierung und Referenzierung von mit einer Messvorrichtung an mehreren, nicht in einer gemeinsamen Ebene angeordneten Oberflächen in einer Einspannung zu vermessenden Bauteilen (DE 102018209017B4)

S. Nolte, R. Steinkopf, A. Szameit, H. Gross, C. Vetter, M. Ornigotti

Arrangement for Producing a Bessel Beam (US11,372,254B2)

S. Nolte, K. Bergner

Laserbearbeitung eines transparenten Werkstücks (EP 3676045B1)

J. Popp, M. Schmitt, T. Meyer, S. Nolte, R. Ackermann, J. Limpert

Laser microscope with ablation function (US 16/303,558)

C. Schenk, S. Risse

Verfahren zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit von mittels Gaslager-elementen geführten

Tischen und Verwendung von Luftlager-elementen mit Dichtsystemen für in Umgebungsatmosphäre geführten Tischsystemen (DE 102009019773B4)

F. Setzpfandt, F. Eilenberger, M. Gräfe, T. Pertsch

Optical assembly for the hyperspectral illumination and evaluation of an object (US 11,371,932B2)

F. Setzpfandt, F. Eilenberger, M. Gräfe, T. Pertsch

Optische Anordnung zur hyperspektralen Beleuchtung und Auswertung eines Objektes (EP 19734763.6)

A. Tünnermann, C. Stihler, C. Jáuregui Misas, J. Limpert

Avoiding mode instability in an optical amplifier fiber (US 11,381,054B2)

A. Tünnermann, A. Klenke, J. Limpert, H.-J. Otto

Optische Anordnung mit Strahlaufteilung, Optical Array Comprising a Beam Splitter (EP 15707047.5)

Schutzrechtserteilungen 2023

A. Tünnermann, J. Limpert, T. Gottschall

Device and Method for Generating Laser Pulses (US11,579,512B2)

A. Tünnermann, J. Limpert, T. Gottschall

Vorrichtung und Verfahren zur Erzeugung von Laserpulsen (EP3411754B1)

A. Tünnermann, C. Stihler, C. Jauregui Misas, J. Limpert

Vermeidung von Modeninstabilität in einer optischen Verstärkerfaser (EP3656024B1)

S. Nolte, M.P. Siems, T.A. Goebel, R. Krämer, D. Richter

Method and device for machining by means of interfering laser radiation (US11,590,607B2)

J. Limpert, J. Rothhardt, W. Eschen

Verfahren und Vorrichtung zur linsenlosen Bildgebung mittels Fourier-Transformations-Holographie (DE102020101994B4)

A. Turchanin, F. Eilenberger, M.A. Schmidt, A. George,

Anordnung und Verfahren zur effizienten nichtlinearen Lichtkonversion (DE 102020118780.7)

Ausgründungen

DeepEn (wird ab 2024 als Gmbh gegründet sein), Prof. Čížmar

TECHiFAB GmbH, 07/2021 (Gründer: Prof. Heidemarie Schmidt, Stephan Krüger) HRB 41771, Amtsgericht Dresden

Xsight Optics GmbH, 2021 J. Sperrhake, S. Steinert, M. Nisser: <https://xsightoptics.com>



Abb. 1: Das Team der Xsight Optics GmbH, rechts: Dr. Jan Sperrhake, Absolvent des IAP

Foto: Xsight Optics

Messebeteiligungen

Schülermesse „Traumberuf IT & Technik“ 2021, 08.012.2021, Berlin

Schülermesse „Traumberuf IT & Technik“ 2022, 07.12.2022, Berlin



Abb. 2: Stand der FSU Jena auf der Schülermesse „Traumberuf IT & Technik“ 2022 in Berlin
Das Messteam Carolin Thiel (CGF), Dr. Agnes Sambale (PAF), Claudia Hilbert (CGF) und Julien Klaus (Fakultät für Mathematik und Informatik)

Fotos: Claudia Hilbert

FORSCHUNGSBERICHTE DER INSTITUTE

Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte (AIU)



Institutsdirektor: Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

Professur für Astrophysik

Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

Professur für Astronomie

Prof. Dr. Alexander Krivov

Professur für Astrophysik (an der Thüringer Landessternwarte
Tautenburg)

Prof. Dr. Artie Hatzes (bis 30. September 2023)

Prof. Dr. Markus Roth (ab 1. April 2022)

Adresse: Schillergässchen 2 –3, 07745 Jena

Homepage: www.astro.uni-jena.de

Professur für Beobachtende Astrophysik

Prof. Dr. Ralph Neuhäuser

Forschungsschwerpunkte

- Planetenentstehung bei multiplen Sternen: Wir untersuchen seit Jahren empirisch die Rolle von stellaren Begleitern bei der Entstehung und Entwicklung von Planeten, insbesondere durch direct imaging und Eigenbewegungsanalyse von Mehrfachsternsystemen mit ein oder mehreren Planeten.
- Terra-Astronomie (oder: Angewandte historische Astronomie): Wir verwenden historische Himmelsbeobachtungen als epistemischen Schlüssel für aktuelle Fragen der Astrophysik wie Rekonstruktion der früheren Sonnenaktivität, historische galaktische Novae und Supernovae, Orbit-Bestimmung bei Kometen und die schnelle Entwicklung von Riesensternen durch die Hertzsprung-Lücke (Beispiel Beteigeuze).

Planetenentstehung bei multiplen Sternen

Wir studierten die stellare Multiplizität bei 2200 Planeten-Muttersternen durch Suche nach Begleitern dieser Planeten-Muttersternen per direct imaging und Eigenbewegungsanalyse sowie mit Gaia-Daten. Die aktuellen Ergebnisse und Statistiken wurden nun publiziert (Michel & Mugrauer 2024):

Nur etwa 16% der Muttersterne der extrasolaren Planeten sind multiple Sterne, während bei allen sonnennahen, sonnenähnlichen Sternen mindestens 50% multiple sind. Es gibt zudem signifikante Unterschiede in den Eigenschaften der Planeten, wenn man solche in Einzelsternen und in Mehrfachsternen vergleicht: Massen und Exzentrizitäten der Planeten hängen signifikant von der Gravitationswirkung der stellaren Begleiter ab, z.B. höhere Massen bei Planeten sowie Muttersternen in Mehrfachsternen im Vergleich zu Einzelstern-Planeten.

Michel K.U., Mugrauer M. (2024): Gaia search for (sub)stellar companions of exoplanet hosts. Monthly Notices Royal Astronomical Society 527, 3183, doi.org/10.1093/mnras/stad3196

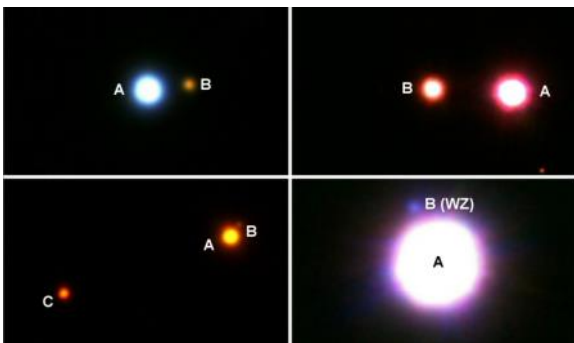


Abb. 1. Beispiele für neue Mehrfachsterne mit Planeten, darunter rechts unten mit einem Weißen Zwerg als Begleiter (PanSTARRS yig-Band).

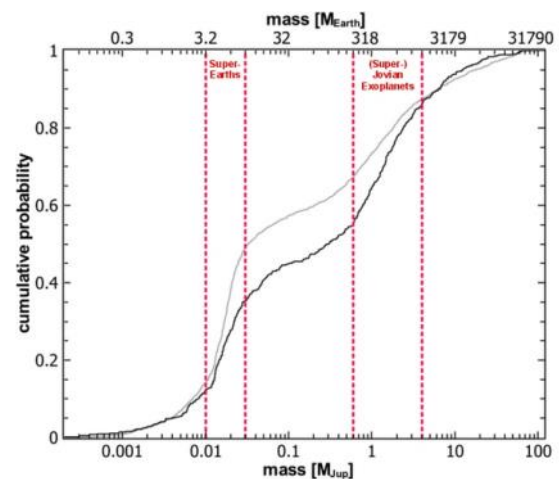


Abb. 2: Massenfunktionen für Mehrfach- (dunkel) und Einzelsternstern-Planeten (grau) sind signifikant verschieden.

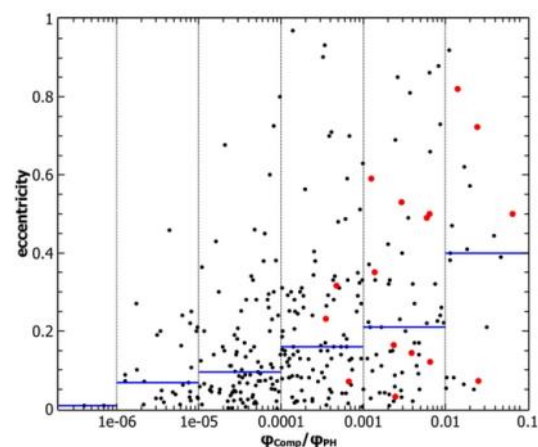


Abb. 3: Exzentrizität der Mehrfachstern-Planeten versus gravitative Störung durch den Begleiterstern sowie Braune Zwerge als rote Punkte (Mediane in blau).

Terra-Astronomie (oder: Angewandte historische Astronomie): Historische Himmelsbeobachtungen als epistemischer Schlüssel für aktuelle Fragen der Astrophysik

Rasche, säkulare Entwicklung der Farbe von Beteigeuze durch die Hertzprung-Lücke

Während der rote Überriese Beteigeuze heute einen Farbindex von $B-V=1.84 \pm 0.5$ mag hat (rot), so wurde er vor ca. zwei Jahrtausenden sowohl in China (Sima Qian, um BC 100: in Farbe zwischen Sirius/Bellatrix und Mirach/Antares) sowie Rom (Hygienus, 1. Jh. AD: in Farbe wie Saturn, d.h. $B-V=1.09 \pm 0.16$ mag) noch als gelb beschrieben. Diese rasche, starke Änderung des Farbindexes ist konsistent mit theoretischen Entwicklungsmodellen von Überriesen: Für die aktuelle Position von Beteigeuze im Farb-Helligkeits-Diagramm auf dem 14-Sonnenmassen-Track am Ende der Hertzprung-Lücke erwarten die MESA-Modelle, dass er vor ca. 2000 Jahren signifikant weniger rot war. Diese historischen Beobachtungen sind somit ein weiterer Test (und Einschränkung/Eichung) für Sternentwicklungsrechnungen und zeigen erstmals empirisch die *Alterung* eines hellen Sterns in historischer Zeit.

Neuhäuser, R., Torres, G., Mugrauer, M., et al. (2022): Colour evolution of Betelgeuse and Antares over two millennia, derived from historical records, as a new constraint on mass and age. Monthly Notices Royal Astronomical Society 516, 693, doi.org/10.1093/stac1969

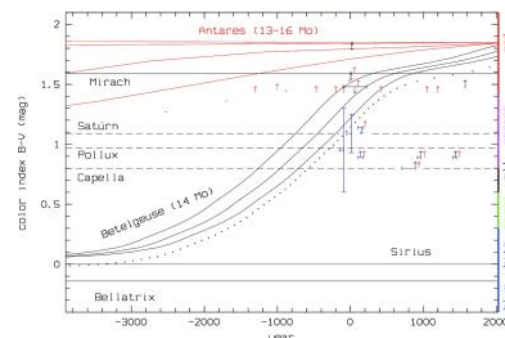
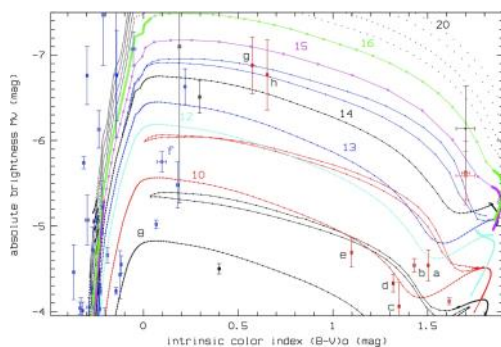


Abb. 4. Beteigeuze im H-R-Diagramm (rechts oben). Nur bei 14 Sonnenmassen erwartet MESA eine Farbänderung in historischer Zeit (Neuhäuser et al. 2022 MNRAS).

Abb. 5. Farbänderung von Beteigeuze (schwarz) nach MESA Track für 14 Sonnenmassen, während Antares (rot) immer als rot beschrieben wurde (Neuhäuser et al. 2022 MNRAS).

Orbit-Bestimmung für Komet Halley beim Perihel im Jahre AD 760 nur aus historischen Beobachtungen

Wir haben historische Beobachtungen des Kometen Halley im Jahre AD 760 verwendet, um dessen Orbit zu bestimmen. Chinesische Hofastronomen und die alt-syrische Chronik von Zuqin liefern hinreichend viele und genaue Augenzeugenberichte mit mehr, mindestens sechs datierten Himmelspositionen, so dass man daraus auf den best-passenden Kepler-Orbit mit seinen sechs Orbit-Elementen schließen kann. Es war u.a. notwendig, aus den alten Prosa-Berichten korrekt auf Himmelskoordinaten zu schließen. Dies ist der erste Fall, bei dem für einen vor-teleskopischen Kometen die Bahnelemente *nur* aus historischen Berichten bestimmt wurden. Durch Analyse weiterer Perihelia kann man dann aus Orbit-Änderungen erstmals nicht-gravitativ Kräfte (outgassing) quantifizieren.

Neuhäuser, D.L., Neuhäuser, R., Mugrauer M., HARRAK A., Chapman J. (2021): Orbit determination just from historical observations? Test case: The comet of 760 CE is identified as 1P/Halley, Icarus 364, 114278, doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114278

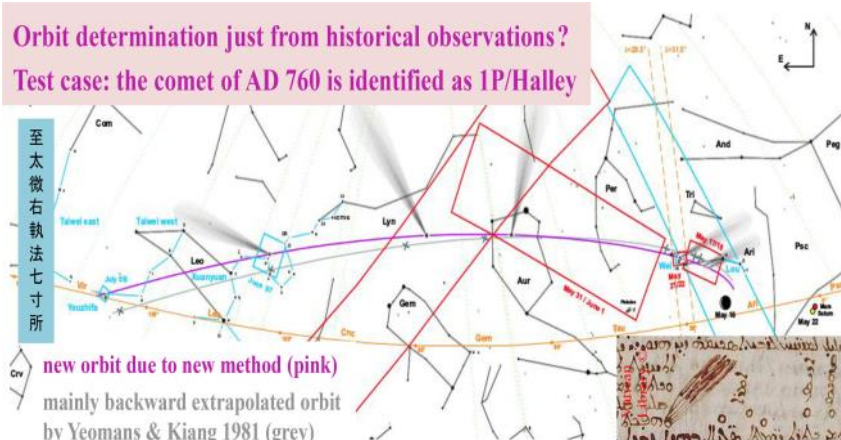


Abb. 6: Orbit von Komet Halley in AD 760 wie in China und Zuqin beobachtet, woraus wir den Orbit (pink) bestimmt haben. Rechts unten: Älteste Zeichnung von Komet Halley in der verwendeten Chronik von Zuqin von AD 775 – korrekt neben den drei hellen Sternen von Aries sowie Mars und Saturn (graphischer Abstrakt aus Neuhäuser et al. 2021, Icarus).

Professur für Astronomie Prof. Dr. Alexander Krivov

Forschungsschwerpunkte

Der Schwerpunkt der Forschung unserer Arbeitsgruppe liegt auf den vielseitigen (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.

Beobachtung und Modellierung der Planeten-Scheiben-Wechselwirkung

Die Suche nach und Charakterisierung von Planeten um andere Sterne stellt seit drei Jahrzehnten ein wichtiges Forschungsgebiet dar. Eine Möglichkeit zur Planetenfindung bieten die Trümmerscheiben. Die noch unentdeckten Planeten wechselwirken mit Scheiben und verursachen Strukturen verschiedener Art (Verschiebungen, Verkrümmungen, Klumpen, Lücken etc.). Solche Strukturen können unter Umständen leichter beobachtet werden als die Planeten selbst. Aus Theorie und Simulation dieser Wechselwirkung können gezielte Vorhersagen getroffen werden, welche Planeten auf welchen Bahnen die beobachteten Strukturen hervorgerufen haben könnten.

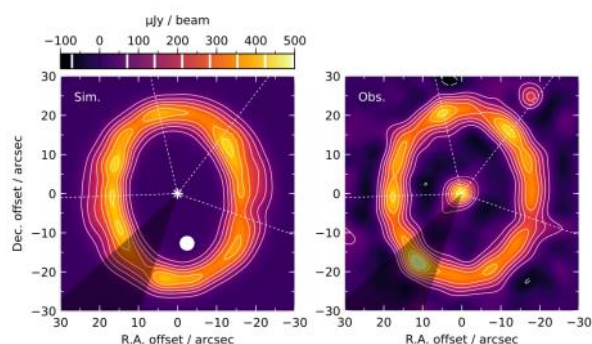


Abb. 1. Der Trümmerring um den Stern ϵ Eri. Links: Simuliertes Bild der Scheibe mit den Strukturen, die ein gegen Uhrzeigersinn umkreisender hypothetischer Planet (weißer Kreis) verursachen würde. Rechts: Die tatsächlich beobachtete Scheibe. Gepunktete Linien markieren jeweils signifikante Strukturen. Im schattierten südöstlichen Bereich befindet sich höchstwahrscheinlich eine Hintergrundgalaxie. Quelle: Booth u. a. (2023).

Zusammen mit unseren internationalen Partnern haben wir die mutmaßlichen Planetensysteme mit Trümmerscheiben sowohl beobachtend als auch theoretisch untersucht. Unsere jüngsten Beobachtungen von Trümmerscheiben wurden vorwiegend mit dem Atacama Large Millimetre/Submillimetre Array (ALMA) durchgeführt. Die eigentliche Suche nach Planeten ermöglicht derzeit unter anderem das James Webb Space Telescope bei kürzeren Wellenlängen, im nahen und mittleren Infrarot. Parallel dazu haben wir die Planeten-Scheiben-Wechselwirkung numerisch und analytisch untersucht. Diese Forschung umfasste sowohl große Stichproben von Systemen (Musso Barucci u.a. 2021, Hinkley u.a. 2022, Pearce u.a. 2022, Cugno u.a. 2023) als auch ausgewählte individuelle Systeme wie HD 38206 (Booth u.a. 2021), Fomalhaut (Pearce u.a. 2021), HR 8799 (Faramaz u.a. 2021), q^1 Eri (Lovell u.a. 2021) und ϵ Eri (Booth u.a. 2023, s. Abb. 1). Auch die direkte Abbildung der Planeten um AF Lep (Franson u.a. 2023) und HIP 65426 (Carter u.a. 2023) wurde erfolgreich durchgeführt und das Spektrum eines Planeten im System VHS 1256–1257 aufgenommen (Miles u.a. 2023).

M. Booth, M. Schulz, A.V. Krivov, ... T.D. Pearce, ... (2021): MNRAS **500**, 1604
 T.D. Pearce, ... Booth, Krivov, Löhne, Poblete (2021): MNRAS **503**, 4767
 V. Faramaz, ... M. Booth, ... (2021): AJ **161**, 271
 J.B. Lovell, ... T.D. Pearce, ... (2021): MNRAS **506**, 1978
 A. Musso Barucci, ... T.D. Pearce, ... (2021): A&A **645**, A88
 S. Hinkley, ... M. Booth, ... (2022): PASP **134**, 95003
 T.D. Pearce, ... M. Booth, A.V. Krivov, ... (2022): A&A **659**, A135
 G. Cugno, T.D. Pearce, ... (2023): A&A **669**, A145
 B.E. Miles, ... M. Booth, ... (2023): ApJL **946**, L6
 K. Franson, ... T.D. Pearce, ... (2023): ApJL **950**, L19
 A.L. Carter, ... M. Booth, ... (2023): ApJL **951**, L20
 M. Booth, T.D. Pearce, A.V. Krivov, ... T. Löhne, ... (2023): MNRAS **521**, 6180

Massen von Trümmerscheiben

Eines der Hauptziele der Trümmerscheibenforschung besteht darin, ein detaillierteres Verständnis der Ursprünge von Trümmerscheiben zu erlangen und den Zusammenhang zwischen sichtbarem Staub und unsichtbaren Planetesimalen nachzuvollziehen. Bereits zuvor haben wir dabei das Scheibenmassen-Problem aufgedeckt: Die Gesamtmassen, die nötig sind, um helle Trümmerscheiben mit Kollisionsmodellen zu beschreiben, übersteigen die verfügbare Masse aus der protoplanetaren Phase deutlich (Abb. 2). Nun haben wir eine Reihe von Lösungsmöglichkeiten zu diesem Problem untersucht (Krivov und Wyatt 2021). Die größten Planetesimale könnten z.B. kleiner sein als bisher angenommen, was die Gesamtmasse der Scheiben auf etwa 10–100 Erdmassen reduzieren würde und direkten Einfluss auf unser Verständnis der Planetesimalentstehung hätte.

Die andere Schlüsselfrage ist die nach der Rolle der Scheibenmassen bei der Wechselwirkung zwischen Scheiben und Planeten. Und tatsächlich haben wir gezeigt, dass die Planetenmigration und die Lückenbildung in den Trüm-

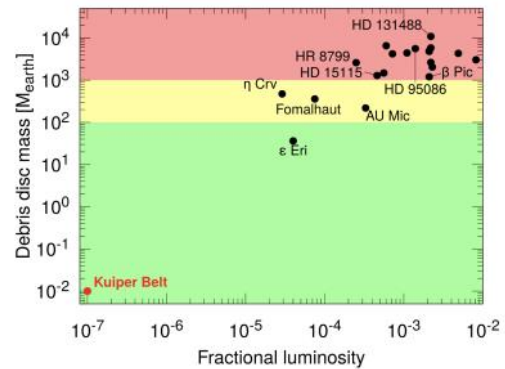


Abb. 2. Gesamtmasse bekannter, heller Trümmerscheiben, unter der Annahme, dass große Planetesimale (bis 200 km) vorhanden sind. Die meisten Trümmerscheiben befinden sich im „verbotenen“ roten Bereich, was das sogenannte Massenproblem illustriert. Quelle: Krivov und Wyatt 2021.

merscheiben von deren Massen entscheidend beeinflusst wird (Friebe u.a. 2022, Sefilian u.a. 2023). Ebenso wichtig sind die Scheibenmassen für die Dynamik von inklinierten Planeten, falls solche in den jeweiligen Systemen vorhanden sind (Poblete u.a. 2023).

A.V. Krivov, M.C. Wyatt (2021): MNRAS **500**, 718
M.F. Friebe, T.D. Pearce, T. Löhne (2022): MNRAS **512**, 4441
A.A. Sefilian, ... (2023): ApJ **954**, 100

Exozodiakaler Staub

Interferometriedaten offenbaren bei ca. einem Fünftel naher Hauptreihensterne einen Überschuss im nahen Infrarot, was als Feinstaub nah am Stern gedeutet wird (die sog. „exozodiakalen Staubwolken“). Es bleibt unklar, woher dieser Staub kommt und wie er sich trotz eigentlich kurzer Verweildauer ausreichend lange halten kann. Das Phänomen untersuchen wir in unserer Arbeitsgruppe seit Jahren theoretisch und beobachtend. Im Berichtszeitraum haben wir u.a. gezeigt, dass die häufig vorgeschlagene kometare Staubproduktion allein nicht ausreicht, um die Beobachtungen zu erklären (Pearce u. a. 2022, s. Abb. 3). In Stuber u.a. (2023) wurde dann festgestellt, dass der Anteil größerer Staubteilchen deutlich größer sein kann, als bisher gedacht. Diese Erkenntnis könnte helfen, künftig eine Erklärung des Phänomens zu finden.

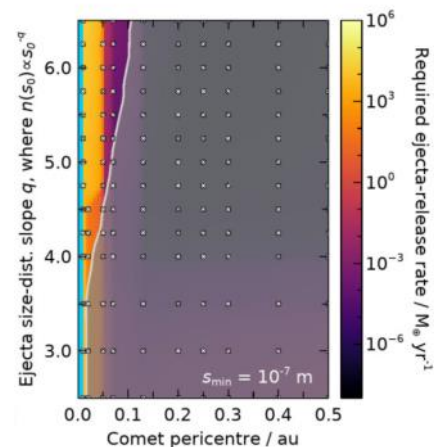


Abb. 3. Benötigte Produktionsraten heißen Staubs, erzeugt durch Kometen um einen A0V-Stern (grauer Bereich: inkompatibel mit Beobachtungen): unrealistisch viele Kometen sind nötig. Quelle: Pearce u. a. (2022).

T.D. Pearce, ...A.V. Krivov, M. Booth, ... (2022): MNRAS **517**, 1436
T.A. Stuber, ... T.D. Pearce, ... A.V. Krivov, ... (2023): A&A, **678**, A121

DFG-Forschungsgruppe „Trümmerscheiben in Planetensystemen“

Einen großen Teil unserer Arbeit 2019–2025, Gesamtvolumen: 4,3 Mio. €). An diesem koordinierten Großprojekt nahmen im Berichtszeitraum 7 ProjektleiterInnen teil (darunter drei vom AIU). Involviert sind drei Phase I: 2015–2019, Phase II: Institute zweier Fakultäten der FSU Jena sowie die Universitäten Braunschweig und Kiel. Geforscht wurde außerdem gemeinsam mit mehreren weiteren Gruppen in anderen europäischen Ländern, USA, Kanada und Chile.

Professur für Astrophysik

Prof. Dr. Artie Hatzes (bis 30. September 2023)

Prof. Dr. Markus Roth (ab 01. April 2022)

Forschungsschwerpunkte

- Instrumentierungsprojekte für die Suche und Charakterisierung von extra-solaren Planeten (Prof. Dr. Artie Hatzes)
- Helio- und Asteroseismologie: Physik des inneren Aufbaus der Sonne und der Sterne und die Untersuchung der dynamischen Prozesse auf der Sonne und den Sternen (Prof. Dr. Markus Roth)
- Aufbau des Tautenburger Sonnenlabors (Prof. Dr. Markus Roth)

Instrumentierungsprojekte für die Suche und Charakterisierung von extra-solaren Planeten

Der Schwerpunkt der Forschungsgruppe von Prof. Dr. Artie Hatzes ist die Charakterisierung von Exoplaneten. In den Jahren 2021 bis 2023 lag der Fokus auf der Messung der Massen von durch Raumfahrtmissionen entdeckten transitierenden Exoplaneten, zum Beispiel des *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS) der NASA. Außerdem ist die Forschungsgruppe von Prof. Dr. Artie Hatzes an mehreren Konsortien für den Bau von Instrumenten für die Beobachtung von Exoplaneten beteiligt, zum Beispiel *CRIRES⁺* und *PLATOSpec*.

CRIRES⁺ ist 2021 am Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Betrieb gegangen. Der hochauflösende Infrarot-Spektrograf wurde von einem internationalen Forschungskonsortium unter der Leitung von Prof.

Dr. Artie Hatzes gebaut. *CRIRES⁺* soll erdähnliche Planeten außerhalb unseres Sonnensystems finden, die in der habitablen Zone um ihren Stern kreisen.

PLATOSpec ist ein hochauflösender Spektrograph für den Nachweis von kleinen Exoplaneten. Er ergänzt die Beobachtungsdaten der Satellitenmission PLATO der europäischen Raumfahrtagentur European Space Agency (ESA) mit bodenbasierten Beobachtungen. *PLATOSpec* wird an ein 1,5-Meter-Teleskop der Europäischen Südsternwarte (ESO) in La Silla, Chile, montiert. Die Thüringer Landessternwarte hat die Kalibrierungseinheit für *PLATOSpec* und die Verbindung des Instruments mit dem Teleskop (im Frontend) entwickelt.

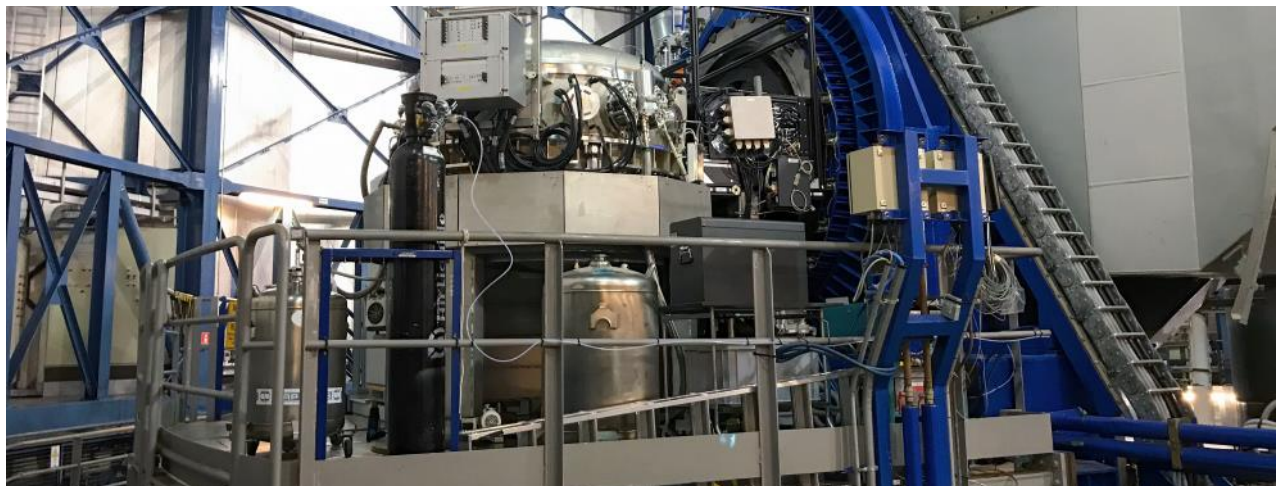


Abb. 1: *CRIRES⁺* (CRyogenic high-resolution InfraRed Echelle Spectrograph+) ist ein am VLT der ESO installiertes Instrument, das nach potenziell bewohnbaren Supererde-Exoplaneten suchen soll. Das Instrument, das Anfang 2021 das erste Licht gesehen hat, baut auf seinem Vorgänger, *CRIRES*, auf, der 2006 am VLT installiert wurde (Quelle: ESO).

Synoptische Sonnenphysik–Helio- & Asteroseismologie

Die synoptische Beobachtung der Sonne ist ein Forschungsschwerpunkt von Prof. Dr. Markus Roth, seit April 2022 Professor für Astronomie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und seit Oktober 2023 Direktor der Thüringer Landessternwarte. Die Sonne ist der Stern, der der Erde am nächsten ist. Daher werden astrophysikalische Studien, einschließlich der Helioseismologie an diesem Stern, zu einem besseren Verständnis der Ursprünge der magnetischen Aktivität im Sterninneren und ihrer Erscheinungsformen in der Sonnenatmosphäre führen. Darüber hinaus werden die Konzepte der Asteroseismologie, das heißt, der Untersuchung des Sterninneren durch akustische Wellen, als weiteres Forschungsthema aufgegriffen.



Abb. 2. Aufnahme des NASA Solar Dynamics Observatory vom 7. Juni 2011. In Falschfarben dargestellt ist ein koronaler Massenauswurf in drei Spektralbereichen bei 30.4 nm, 17.1 nm und 21.1 nm (Quelle: Miroslav Druckmüller, Technische Universität Brno)

Aufbau des Tautenburger Sonnenlabors TauSoL

An der Thüringer Landessternwarte entsteht das *Tautenburger Sonnenlabor*, abgekürzt „TauSoL“. In diesem Labor wird der Prototyp für Teleskope entwickelt, mit deren Daten das Innere der Sonne erforscht werden kann. Das Labor befindet sich in einem zwölf Meter langen und knapp 2,5 Meter breiten, klimatisierten Container. Es wird mit einem Heliostat ausgestattet. Im Container befindet sich ein fest installiertes Teleskop, mit dem das Bild der gesamten sichtbaren

Sonnenscheibe erzeugt wird. Die Abbildung 3 zeigt eine Computergrafik des zukünftigen Sonnenlabors.

Das langfristige Ziel ist, den Prototypen eines automatisierten Teleskops für die kontinuierliche Beobachtung der Sonne zu entwickeln. Diese automatisierten Teleskope könnten dann weltweit verteilt die Sonne überwachen, um deren magnetische Aktivität und die Prozesse im Inneren der Sonne weiter zu erforschen.

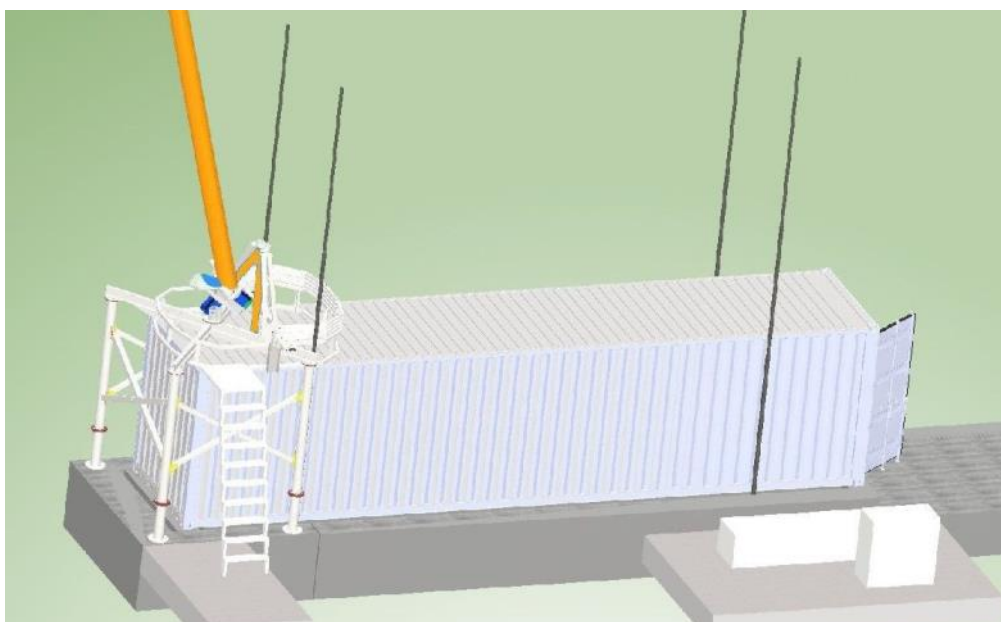


Abb. 3: Computergrafik des Tautenburger Sonnenlabors. Über ein Spiegelsystem (Heliostat) wird das Sonnenlicht kontinuierlich in das Sonnenlabor gelenkt, wo ein Sonnenteleskop ein Bild der Sonne erzeugt. (Quelle: Thüringer Landessternwarte/Astelco)

Institut für Angewandte Optik und Biophysik (IAOB)



Institutsdirektor:

Prof. Dr. Christian Eggeling

Professur für Superaufgelöste Mikroskopie

Prof. Dr. Christian Eggeling (seit 2022 IPHT)

Juniorprofessur mit tenure track für digitalisierte experimentelle Mikroskopie

Jun.-Prof. Dr. Christian Franke

Professur für Wellenleiteroptik/Faseroptik

Prof. Dr. Tomáš Čižmár (IPHT)

Juniorprofessur für Intelligente Photonische Systeme

Jun.-Prof. Dr. Mario Chemnitz (IPHT, seit 12/2023)

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 (wie Viren (HIV, SARS), Bakterien, Pilzen,...), Untersuchung des Einflusses des Mikrobioms auf Infektionen (Jena Exzellenzcluster „Balance of the Microverse“, Leibniz ScienceCampus InfectoOptics) und Optimierung zellulärer Nanopartikelaufnahme zur Wirkstoffbereitstellung (SFB 1278 „Polytarget“).

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 für den Aufbau und das Management der Microverse Mikroskopie-Facility des Jena Exzellenzclusters verantwortlich.

Urbancic, I., C. Eggeling, E. Sezgin. (2023): Do lipids tune B cell signaling? *Nat Chem Biol.* 19:669-670. DOI:10.1038/s41589-023-01303-8.

Galiani, S., C. Eggeling, K. Reglinski (2023): Super-resolution microscopy and studies of peroxisomes. *Biol Chem.* 404:87-106. DOI:10.1515/hsz-2022-0314.

Urbancic, I., L. Schiffelers, E. Jenkins, W. Gong, A.M. Santos, F. Schneider, C. O'Brien-Ball, M.T. Vuong, N. Ashman, E. Sezgin, C. Eggeling. (2021): Aggregation and mobility of membrane proteins interplay with local lipid order in the plasma membrane of T cells. *FEBS Lett.* DOI:10.1002/1873-3468.14153.



Abb. 1. Die AG Eggeling zusammen mit der AG Franke beim letztjährigen gemeinsamen Retreat.

Optimierte Bildgebung in Zellschichten und Geweben zur Untersuchung von Infektionen

Hauptziel dieses Projekts ist es, die erwähnten mikroskopischen Lösungen für Beobachtungen von Infektionen 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 Probenstärke über Aberrationen 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 maschinellem Lernen).



Abb. 2. Fluoreszenzmikroskopie Bildaufnahmen von einem invasivem Pilz (*Candida Albicans*, magenta) in eine Epithelzelle (grün). Skalierung: 5 µm. Foto: Gaukhar Zhurgenbayeva

Anwendung finden diese Verfahren bei der Untersuchung des Einflusses des Mikrobioms auf Infektionen wie Pilzen im Darm, welches den Einsatz von Zellschichtsystemen bedingt.

Ebrahimi, V., T. Stephan, J. Kim, P. Carravilla, C. Eggeling, S. Jakobs, and K.Y. Han. (2023): Deep learning enables fast, gentle STED microscopy. *Commun Biol.* 6:674. DOI:10.1038/s42003-023-05054-z

Galiani, S., K. Reglinski, P. Carravilla, A. Barbotin, I. Urbancic, J. Ott, J. Sehr, E. Sezgin, F. Schneider, D. Waithe, P. Hublitz, W. Schliebs, R. Erdmann, C. Eggeling. (2022): Diffusion and interaction dynamics of the cytosolic peroxisomal import receptor PEX5. *Biophysical Reports.*

Mikroskopieuntersuchungen von viralen Ausbreitungsprozessen

Viren sind üblicherweise < 200 nm große Partikel, deren Ausbreitungsprozesse sich am besten in lebenden Zellen untersuchen lassen, wofür supraaufgelöste 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.

Insausti, S., M. García-Porras, J. Torralba, I. Morillo, A. Ramos-Caballero, I. de la Arada, B. Apellaniz, J.M.M. Caaveiro, P. Carravilla, C. Eggeling, E. Rujas, J.L. Nieva. (2022): Functional Delineation of a Protein-Membrane Interaction Hotspot Site on the HIV-1 Neutralizing Antibody 10E8. *Int J Mol Sci.* DOI:10.3390/ijms231810767.

Carravilla, P., A. Dasgupta, G. Zhurgenbayeva, D.I. Danylchuk, A.S. Klymchenko, E. Sezgin, C. Eggeling. (2021): Long-term STED imaging of membrane packing and dynamics by exchangeable polarity-sensitive dyes. *Biophysical Reports.* 1: 100023.

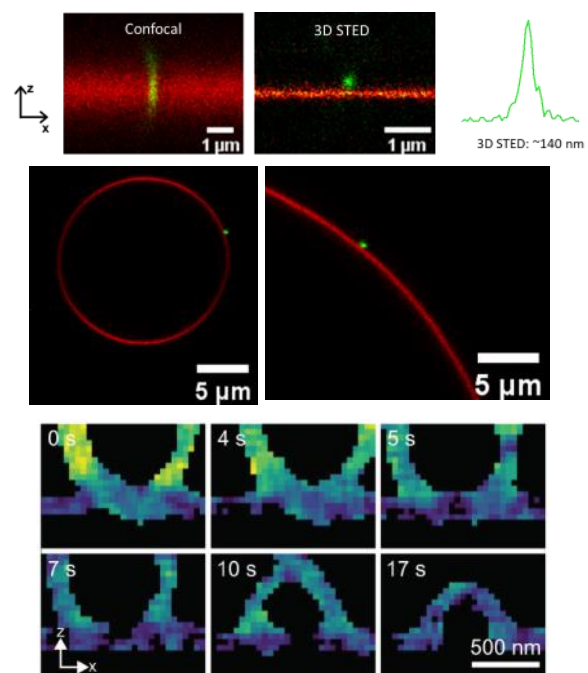


Abb. 3. Einsatz von modernsten (superaufgelösten) Mikroskopiemethoden zur Beobachtung von Interaktion von Viren (grün) mit Membranen (rot). Fotos: P. Carravilla, Z. Zhao.

Junior-Professur für Digitalisierte Experimentelle Mikroskopie Jun.-Prof. Dr. Christian Franke

Forschungsschwerpunkte

- Schwerpunkt 1: Entwicklung von Hard- und Software Werkzeugen für die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie, insbesondere auf den Prinzipien der Einzelmolekül-Lokalisation und strukturierter Beleuchtung, sowie deren Anwendung in klinisch relevanten Kontexten. KI-basierte Werkzeuge für computational-multiplexing und -phenotyping von Krankheitsbildern.
- Schwerpunkt 2: Weiterentwicklung von optischen 3D Messverfahren, z.B. Stereophotogrammetrie mit strukturierter Beleuchtung und deren Translation hinzu biologischen & klinischen Anwendungen.
- Schwerpunkt 3: Holistische, multi-modale quantitative Bildgebung über 8 Skalen, i.e. von nm bis dm; KI-basierte Datenfusion und Modellierung.

Schnelle 3D Super-Resolution Mikroskopie mit statistischen Mustern

Eine Nanometer-genaue 3D-Darstellung lebender Zellen oder größerer Organismen in Echtzeit ist derzeit mit keiner fluoreszenzbasierten hochauflösenden Mikroskopiertechnik möglich. In NanoSpeck3D, welches ein Joint Venture des IAOb (AG Franke) und des UKJ (AG Geis) ist, wird gemeinsam mit insgesamt 15 Industriepartnern, z.B. ZEISS, ein kostengünstiges Mikroskopiemodul für eine Echtzeit-Intravitalmikroskopie mit < 50 nm lateraler, < 100 nm axialer sowie mit einer zeitlichen Auflösung von 100 Millisekunden in

einem ausgedehnten Volumen entwickelt. Grundlage ist die strukturierte Beleuchtung der Probe mit mehreren und streng-wiederholbaren überlagerten statistischen Mustern (Speckles) verschiedener Wellenlänge sowie die nichtlineare Antwort von speziellen Fluorophoren. Das Projekt wird finanziell über das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.

D. Weigel, R. Kowarschik, A. Stark, L. Schmidl, C. Geis, „Method and Device for high-resolution fluorescence microscopy“; US Patent App. 17284348, European Patent Application Granted & Pending (EUR 2024).

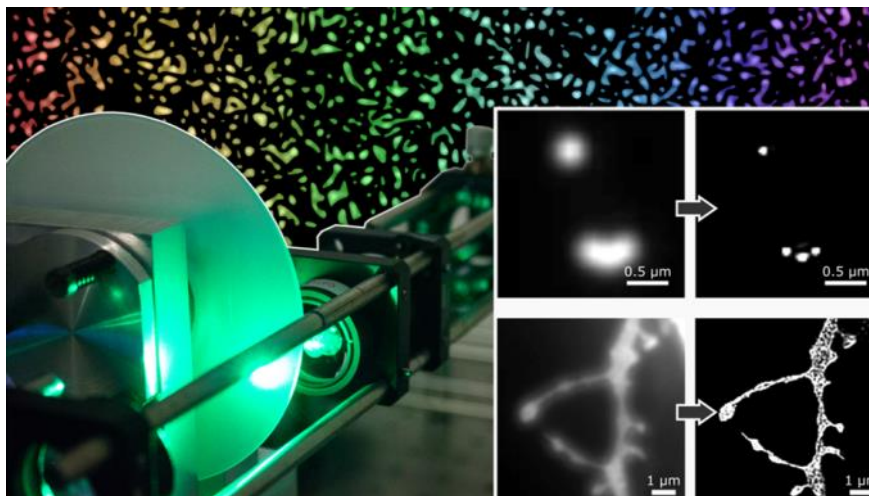


Abb. 1. Schematische Darstellung der Erzeugung von drei-dimensionalen statistischen Mustern (farbiger Hintergrund) durch die Transmission eines Lasers durch eine Streuscheibe (Vordergrund) mit anschließender Kollimation. Durch das (beliebig) schnelle Drehen der Scheibe werden statistische Musterwechsel erzeugt. Diese sind robust gegenüber Probenbedingten Störungen, z.B. Streuung, was ein wesentlicher Vorteil im Vergleich mit klassischer SIM darstellt, und können durch raum-zeitliche Korrelation zur Auflösungsverbesserung verwendet werden. So wurden neuronale Feinstrukturen mit ca. 100 nm aufgenommen – rechts unten.

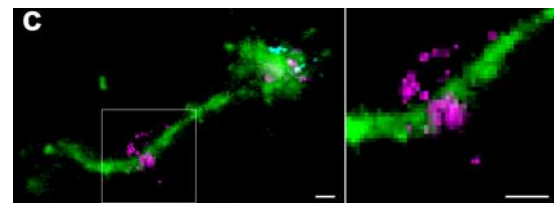
Nanometer-genaue Lokalisationsmikroskopie an polymerischen Nanopartikeln (NPs)

Dieses Projekt, welches über den SFB 1278 Polytarget gefördert wird, konzentriert sich darauf, das Verständnis und die Optimierung von Nanopartikelsystemen, insbesondere für therapeutische Anwendungen, voranzutreiben. Es zielt darauf ab, ein Vorhersagemodell für Struktur-Funktions- und Struktur-Aktivitäts-Korrelationen auf Nanometerebene zu entwickeln, um die gezielte Verabreichung von NPs und ihrer Ladung zu verbessern und eine hohe Wirksamkeit bei minimaler Dosierung und reduzierter Zytotoxizität zu gewährleisten.

Um diese Ziele zu erreichen, werden fortschrittliche Mikroskopietechniken, wie z. B. mehrfarben und 3D dSTORM angewendet, um den intrazellulären Transport von NPs und ihren Ladungen auf der Nanoskala quantitativ zu analysieren. Dazu gehört die Untersuchung der Lokalisierung und Quantifizierung der zytosolischen Freisetzung von NP-Ladungen mit Einzelmolekül-Empfindlichkeit, wobei der Schwerpunkt auf endosomal

keit, wobei der Schwerpunkt auf endosomal Kompartimenten liegt, die eine effiziente zytosolische Freisetzung bei gleichzeitiger Minimierung der zytotoxischen Auswirkungen ermöglichen. Mit diesem umfassenden Ansatz sollen allgemeine Mechanismen für die zytosolische Freisetzung von NP-Ladungen aufgedeckt werden, was zur künftigen Entwicklung von NP-Transportsys-

Abb. 2: Mehrfarben dSTORM Aufnahme eines Endosomes mit Nanometer Auflösung. Das Endosom wird durch die Cargomoleküle Tfn (grün) und EGF (cyan) markiert. Nanopartikel (magenta) konnten erstmalig in



Hochgenau optische Messungen von Krankheitsmodellen mit Stereophotogrammetrie

Dieses Projekt, welches über den SFB 1278 Polytarget gefördert wird, konzentriert sich darauf, das Verständnis und die Optimierung von Nanopartikelsystemen, insbesondere für therapeutische Anwendungen, voranzutreiben. In Zusammenarbeit mit der AG Holthoff (UKJ) konnte erstmals hochspezialisierte Stereophotogrammetrie mit aktiver Beleuchtung für die hochauflösende dreidimensionale (3D) Kartierung der Schnurrhaare von Mäusen angewandt werden und überwindet damit die Grenzen bisheriger Bildgebungsverfahren. Durch die Integration von taktilen und visuellen Sinnesdaten konnte das räumliche Bewusstsein und die sensorische Integration bei Mäusen erforscht und dabei die Rolle der Schnurrhaare bei der Wahrnehmung der Umwelt aufgedeckt werden. Die Schnurrhaare, die unterschiedlich lang sind und einen Durchmesser von weniger als 50 μm haben, wurden sorgfältig vermessen, um ihre räumliche Positionierung und ihre Interaktion mit

visuellen Eingaben zu verstehen, wobei sich erhebliche Überschneidungen ergaben, die auf eine multisensorische Konvergenz in bestimmten Hirnarealen hindeuten. Der optimierte SPG-Aufbau ermöglicht weltweit einzigartig die präzise 3D-Rekonstruktion des Whisker-Arrays. Diese Methode ermöglichte eine detaillierte Untersuchung der Morphologie der Schnurrhaare und ihrer sensorischen Integration, die Aufschluss darüber gibt, wie Mäuse ihre Umgebung wahrnehmen. Dieses Projekt unterstreicht das Potenzial der SPG für biologische und klinische Studien und ebnet den Weg für eine holistische, optische Bildgebungstechnik auf Basis von strukturierter Beleuchtung auf 8 Skalen.

S. Weiler, V. Rahmati, M. Isstas, J. Wutke, A.W. Stark, C. Franke, C. Geis, O.W. Witte, M. Hübener, J. Bolz, T.W. Margrie, K. Holthoff, M. Teichert, "A primary sensory cortical interareal feedforward inhibitory circuit for tacto-visual integration", 515161, bioRxiv 2022.11.04.515161, (accepted for publication in Nature Communications), 2023

A. Stark, J. Wutke, S. Weiler, O.W. Witte, K. Holthoff, R. Kowarschik, M. Teichert, C. Franke, "Stereo-photogrammetry with active structured illumination for measuring mouse whiskers in 3D", Proceedings of the German Society for Applied Optics (DGAO), ISSN: 1614-8436, urn:nbn:de:0287-2023-A029-7, 2023

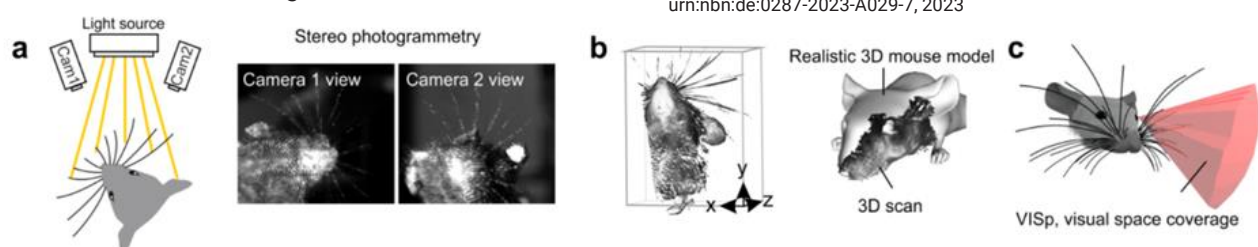


Abb. 3. Spezialisierte Stereophotogrammetrie mit strukturierter Beleuchtung (a) konnte erstmals dazu angewandt werden, um die Geometrie und Morphologie von Maus-Tasthaaren quantitativ und vollständig zu vermessen (b). In der Folge konnte ein einzigartiges 3D Modell der Sinneswahrnehmung von Mäusen erstellt werden (c).

Professur für Wellenleiteroptik/Faseroptik

Prof. Dr. Tomáš Čižmár

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.
- **Technologietransfer von holografischen Multimode-Faserendoscopen**
Das Transferprojekt DeepEn stellt Laboratorien leistungsstarke Instrumente zur Untersuchung der tiefsten Regionen des Gehirns zur Verfügung. Unser Ziel ist es, Forscher bei der Entdeckung, Entwicklung und Anwendung von Instrumenten zur Prävention, Diagnose und Behandlung von Hirnleistungsstörungen zu unterstützen.

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

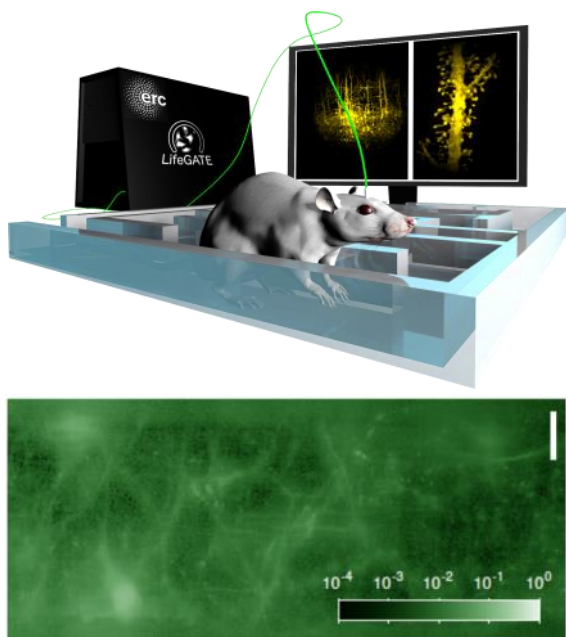


Abb. 1. Illustration eines haarfeinen Endoskops in der Anwendung für Tiefenhirn-Bildgebung am Tiermodell und Beispiel einer Gehirnaufnahme der Amygdala-Grenze. Maßstab: 20 μm . Bildquelle: Tomas Cizmar und Optica Publishing Group

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.

Als Ergebnis des ERC-Projekts LIFE GATE ("Holographic super-resolution micro-endoscopy for in-vivo applications") erreichen wir die fundamentalen und technologischen Grenzen des Grundprinzips - holographische Kontrolle der Lichtausbreitung in Multimode-Fasern. Auf der Grundlage dieses neuen Ansatzes haben wir ein kompaktes System für die Fluoreszenzbildgebung an der Spitze einer Faser entwickelt, das im Vergleich zu herkömmlichen Endoscopen, die auf Faserbündeln oder Gradientenindexlinsen basieren, eine wesentlich geringere Stellfläche und eine höhere Auflösung bietet.

Das Ziel ist nun, mögliche Anwendungen im Bereich der Neurobiologie zu erforschen, insbesondere im Bereich der neurodegenerativen Erkrankungen. In diesem Zusammenhang sind wichtige neue Kooperationen entstanden, wie z.B. aktuell mit dem Leibniz-Institut für Neurobiologie in Magdeburg, das unsere Forschungsergebnisse nutzen kann, um mehr über die verborgenen Geheimnisse des lebenden Gehirns zu erfahren.

Minimalinvasive Endoskope für die Überwachung der neuronalen Aktivität und optogenetische Stimulation tief im Inneren des Gehirns

Um unser Verständnis des Gehirns zu verbessern und neurologische Krankheiten zu bekämpfen, müssen Forscher tiefe Gehirnstrukturen in lebenden Tiermodellen präzise abbilden, überwachen und manipulieren können. Als Erweiterung des LIFEGATE-Projekts zielt das ERC-Proof-of-Concept-Projekt WOKEGATE darauf ab, den Anwendungsbereich minimal-invasiver holografischer Multimode-Faserendoskope zu erweitern.

Im Rahmen des Projekts werden spezielle Multicore-Multimode-Faserendoskope erforscht, die nicht nur für die hochauflösende Bildgebung von Tiefenhirnregionen, sondern auch für die Überwachung und Stimulation der Aktivität einzelner Neuronen in tiefen Hirnstrukturen frei beweglicher Tiermodelle geeignet sind.

In der Anfangsphase wird die hochauflösende Bildgebungsmodalität, die mit der Verformung der Fasern nicht vereinbar ist, für die geführte Implantation der Faseronde in immobilisierte und betäubte Tiere verwendet. Nach der Erholungsphase ist die präzise Adressierung einzelner Neuronen mit optogenen und Kalzium-Imaging-Techniken in wachen und sich frei bewegenden Tieren trotz Faserdeformationen unter Verwendung des

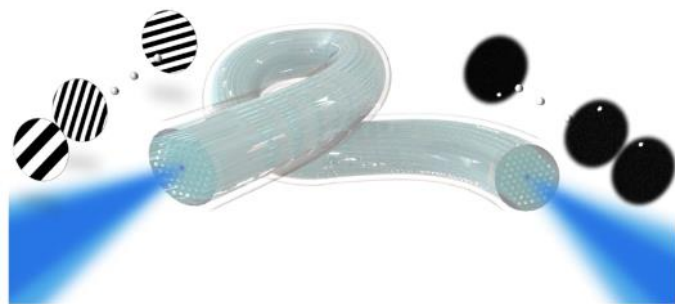


Abb.2. Illustration of special multicore-multimode fibre endoscope Bildquelle: Yang Du

Multicore-Regimes möglich.

Im Rahmen des Projekts werden auch alternative Möglichkeiten der Bildgebung bei sich frei bewegenden Tieren untersucht, z. B. durch Erforschung der Biegeelastizität von Multimode-Fasern.

Du, Y., Turtaev, S., Leite, I., Lorenz, A., Kobelke, Wondraczek, K., Čižmár T. (2022): Hybrid multimode-multicore fibre based holographic endoscope for deep-tissue neurophotonics. *Light: Advanced Manufacturing* DOI: 10.37188/lam.2022.029

Cao, H., Čižmár T., Turtaev, S., Tyc, T., Rotter, S. (2023): Controlling light propagation in multimode fibers for imaging, spectroscopy, and beyond. *Advances in Optics and Photonics*. DOI: 10.1364/AOP.484298

DeepEn—Haardünne Endoskope für Neurowissenschaften und Medizin

Aus dem LIFEGATE-Projekt ist ein Start-up hervorgegangen - die DeepEn GmbH, ein Forschungstransfer-Spin-off des Leibniz-Instituts für Photonische Technologien. Angetrieben von der Vision, hochleistungsfähige haarfeine Endoskope für Anwender in den Neurowissenschaften, der Biomedizin und der Industrie verfügbar zu machen, wurde das Startup im Jahr 2021 initiiert und als EXIST-Forschungstransferprojekt gefördert. DeepEn baut auf Errungenschaften des ERC-Projekts LifeGate und über 10 Jahren engagierter Forschung in der Gruppe von Prof. Dr. Tomáš Čižmár auf den Gebieten der Faserphotonik und der Neurobildgebung auf. Während des Spin-off wurde das Team vom K1-Startup Service der Friedrich-Schiller-Universität unterstützt.

DeepEn will im kommenden Jahr sein erstes holografisches Endoskop auf den Markt bringen, das NeuroDeep 1.0 genannt wird. Dieses Gerät ermöglicht die Fluoreszenzbildgebung mit Laserabtastung an der Spitze einer haardünnen (< 100µm) Faseronde in beliebiger Tiefe im lebenden Gewebe mit minimaler Gewebeschädigung und somit mit minimalen Auswirkungen auf die physiologische Funktion. Dank der fortschrittli-

chen holografischen Technologie ist das Gerät in der Lage, zufällige Beobachtungen über ein Sichtfeld von 100 µm Durchmesser mit submikrometrischer lateraler Auflösung und fließender Anpassung des Fokusabstandes zu realisieren. Das Gerät ist ein leistungsfähiges Instrument für die Neurowissenschaften, die biomedizinische Forschung und pharmazeutische Laboratorien für den Zugang zu tief liegenden Geweben.

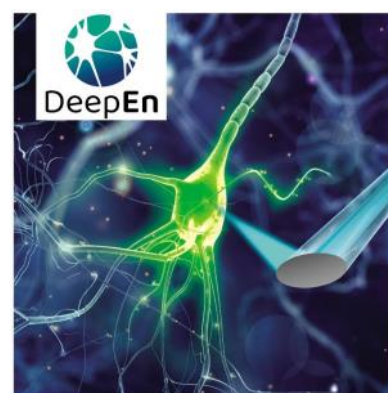


Abb. 3. Das Konzept: Bildgebung des Gehirns dünnen Multimode-Faserendoskop Bildquelle: www.deepen-imaging.com

Institut für Angewandte Physik (IAP)



Institutsdirektor: Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Professur für Angewandte Physik

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Professur für Theorie optischer Systeme

Prof. Dr. Herbert Gross (bis 3/2022)

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 (bis 2022)

Professur für Theoretische Chemie

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

AG Quantenoptik

PD Dr. Frank Setzpfandt

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

Homepage: www.iap.uni-jena.de

Professur für Angewandte Physik Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Forschungsschwerpunkte

- Optische Quantentechnologien
- Photonik und deren Anwendungen
- Nichtlineare Optik
- Mikro- und nanostrukturierte Optik

Die QuNET-Initiative – Hochsichere Kommunikation durch Quantenphysik

QuNET entwickelt hochsichere Kommunikationssysteme basierend auf modernster Quantentechnologie mit Fokus auf zwischenbehördliche Kommunikation auf Bundesebene zur Gewährleistung langfristiger Datensicherheit. Als eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsinitiative trägt



Abb. 1: 300 m Luftlinie trennen das BMBF und das BSI. Die Übertragung der Quantenschlüssel fand über zwei Freistrahlsowie eine Glasfaser-Verbindung statt.

QuNET dazu bei, die Basis für sichere und robuste IT-Netze zu schaffen, die schon heute gegen Cyberangriffe von morgen gewappnet sind.

Im Zentrum der Initiative steht die Forschung zur sogenannten »Quantenschlüsselverteilung« (QKD). QuNET ist eine gemeinsame Initiative bestehend aus sechs Kerninstituten (Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Friedrich-Alexander-Universität, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt) unter Leitung des Fraunhofer IOF. Seit dem Start 2019 hat die Initiative durch sogenannte QuNET+Projekte weitere Partner aus dem Quanten-Ökosystem von Industrie und Forschung hinzugewonnen.

Nach der ersten Demonstration verschiedener QKD-Entwicklungen in einem Kommunikationsszenario zwischen Bundesbehörden im Mai 2021 befindet sich QuNET in der zweiten Projektphase. Der aktuelle Schwerpunkt liegt auf der Zusammenarbeit zwischen Industrie, Forschungs- und Technologieorganisationen sowie der Wissenschaft, um den Transfer von QKD-Laboraebauten in zertifizierte Soft- und Hardware zu ermöglichen. Das erste Schlüsselexperiment unter Nutzung eines Freistrahllinks wurde im Juni 2023 erfolgreich in Jena durchgeführt. QuNET wird seine Entwicklungen bis Ende 2026 in weiteren öffentlichen Experimenten demonstrieren. Dabei werden verschiedene Anwendungsszenarien vorgestellt, die von glasfaserbasierten sta-



Abb. 2: Technikaufbau zur Demonstration einer quantenverschlüsselten Videokonferenz zwischen BMBF und BSI mit HHI-QKD-System im Rack und Teleskop.

tionären Kommunikationsszenarien bis hin zur Verbindung eines Flugzeugs mit einer stationären Bodenstation reichen.

- [1] A. Kržič, *et al.* Towards metropolitan free-space quantum networks. *npj Quantum Inf* 9, 95 (2023). DOI 1038/s41534-023-00754-0

Max Planck School of Photonics (MPSP)

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

Danach können die Promovierenden ihre Forschungsphase an einer von neunzehn Partnerinstitutionen an elf Standorten in Deutschland beginnen.

Anschließend beginnen sie ihre Forschungsphase an einer von neunzehn Partnerinstitutionen an elf Standorten in Deutschland. Diese Partner umfassen führende deutsche Universitäten und Institute renommierter Forschungseinrichtungen. Die MPSP vernetzt so Spitzenwissenschaftler:innen auf dem Gebiet der Photonik in ganz Deutschland und bietet ihnen nicht nur exzellente Betreuung, sondern auch wertvolle Kontakte

und Forschungsunterstützung.

In einer Evaluation 2023 bewerteten fünf internationale Evaluator:innen das MPSP-Programms als großen Mehrwert für die deutsche Graduiertenförderung und empfahlen seine Fortführung.



Abb. 3: Netzwerk MPSP [Quelle: MPSP]

Professur 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.
- Design und Simulation symmetriefreier Systeme. Optische Flächen dieser Art 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, Polarisierung, Kohärenzeffekte, Kurzpulseffekte oder Thermik.

Design von Freiformsystemen

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 neu-

en Herausforderungen umgestellt, verallgemeinerte Methoden entwickelt und grundlegende Fragen beantwortet.

Im optischen Systemdesign sind neuartige Aberrationsbeschreibungen entwickelt worden, insbesondere ist es außerordentlich hilfreich, eine tiefergehende Analyse der Systeme zu ermöglichen, die das Grundverständnis verbessert, die Entwicklungsprozesse beschleunigt und die Limitierungen transparenter macht. Es wurden Methoden und Tools zur Qualitätsbewertung erstellt (Abb. 1) und

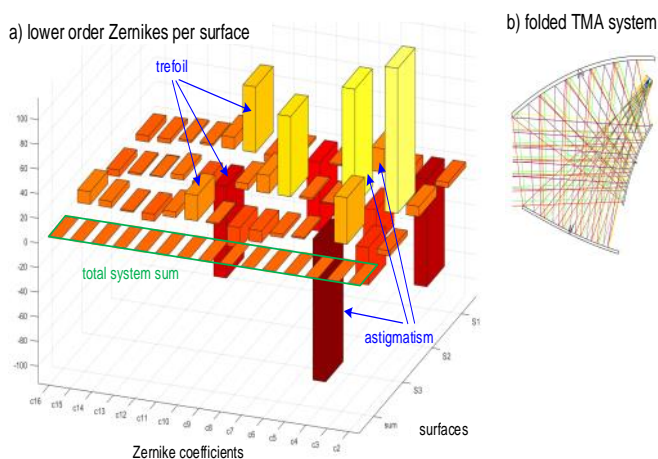
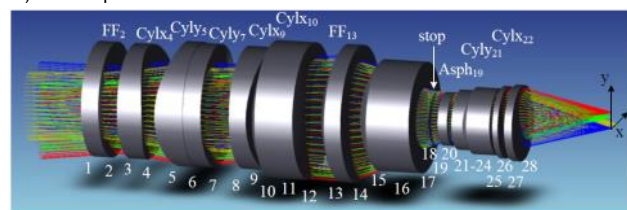
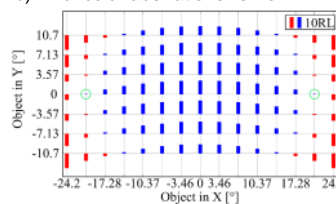


Abb. 1: Analyse der Zernike-Aberrationen pro Fläche eines gefalteten Drei-Spiegel-Teleskops.

a) Anamorphic camera lens



b) Axial color aberrations vs FoV



c) Lateral color surface contributions

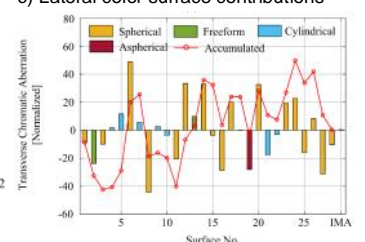


Abb. 2: Axialer und lateraler Farbfehler eines anamorphischen Kamerasystems.

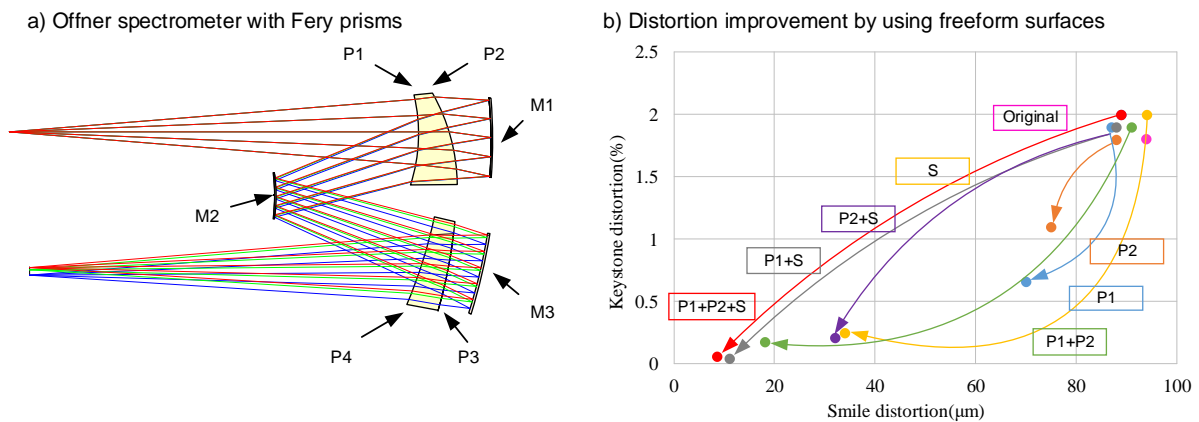


Abb. 3: Verbesserung eines Fery-Prismen-Offner Spektrometers durch Freiformflächen bzgl. Verzeichnungsfehlern (smile und keystone).

in zahlreichen Fallstudien und Projektbeispielen getestet und weiterentwickelt. Diese erlauben es erstmals, die Beiträge aller Systemflächen zu trennen und somit den inneren Aufbau der Flächenfolgen transparent zu machen. Eine neuartige Definition und Berechnungsalgorithmik für Farbfehler in Freiformsystemen kann zur Untersuchung refraktiver Freiformsysteme dienen (Abb. 2). Eine besondere Bedeutung kommt auch den Konzepten und Startsystemen zu, die für eine erfolgreiche Umsetzung der Berechnungsergebnisse in reale Systeme kostengünstig herstellbar sein sollen (Abb. 3).

Es wurde erstmals eine technologieangepasste Tolerierung umgesetzt, die den Gegebenheiten des Diamantdrehens Rechnung trägt

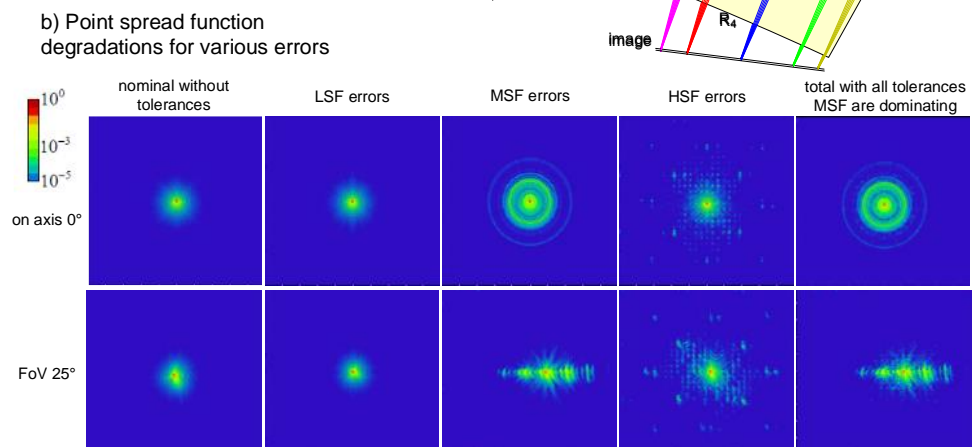


Abb. 4: Tolerierung eines Head-Mounted Systems mit Trennung der verschiedenen Fehlereinflüsse auf der Achse und im Bildfeld.

Ergebnisse weiterer Themenstellungen

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, z.B. in Endomikroskopischen Optiksystemen. Ferner wurde eine Berechnungsmethode zur Simulation von Autofluoreszenz-Falschlicht in Mikroskopobjektiven entwickelt,

die gegenüber dem herkömmlichen Verfahren um den Faktor 10^4 schneller ist und es damit erlaubt, diese direkt in der Optimierung zu berücksichtigen.

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, Kristallen und Halbleitern: nichtlineare Absorption im Innern von transparenten Materialien erlaubt die Modifikation der Ausbreitungseigenschaften von Licht; Anwendungsbeispiele umfassen Faser- und Volumen-Bragg-Gitter sowie Wellenleitersysteme
- Spektroskopische Methoden für Gasanalyse: Nichtlineare Spektroskopiemethoden werden zur Analyse von Gasen unter extremen Bedingungen entwickelt

Mikrostrukturierung von Silizium mit infraroten ultrakurzen Laserpulsen

Ultrakurzpuls-laser haben sich in den vergangenen Jahren zu einem leistungsfähigen Werkzeug für die Bearbeitung von Gläsern etabliert. Anwendungen betreffen das Schneiden und Schweißen, aber auch die Realisierung optischer Funktionalitäten wie Wellenleiter, Bragg-Strukturen oder künstliche Doppelbrechung.

Die Übertragung dieser Technologie auf Halbleitermaterialien, insbesondere Silizium als Rückgrat der Halbleiterindustrie, ist schwierig. Ursache ist neben dem hohen Brechungsindex insbesondere die wesentlich höhere Nichtlinearität, die eine präzise lokalisierte Energiedeposition im Inneren des Materials verhindert [1].

Eine detaillierte numerische und experimen-

telle Analyse der Ausbreitung von infraroten ultrakurzen Laserpulsen in Silizium hat zu einem deutlich verbesserten Verständnis der fundamentalen Effekte geführt. Dadurch gelang es uns mit ultrakurzen Laserpulsen erstmals, innenliegende Modifikationen in Silizium transversal über große Längen zu erzeugen [2] und diese so anzuordnen, dass wellenleitende Strukturen entstanden [3]. Weiterhin konnten wir beim Durchstrahlen von Silizium die Energiedichte an der Rückseite so weit erhöhen, dass ein Fügeprozess ermöglicht wurde. Dies erlaubt dauerhafte Verbindungen z.B. von Silizium-Metall [4] als auch Silizium-Silizium [5]. Bei beiden Materialkombinationen wurden Scherfestigkeiten von mehreren MPa erreicht.

Aktuell werden die Arbeiten zur Mikrostrukturierung mit infraroten ultrakurzen Laserpulsen im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens RUBIN UKPiño weiter vorangetrieben.

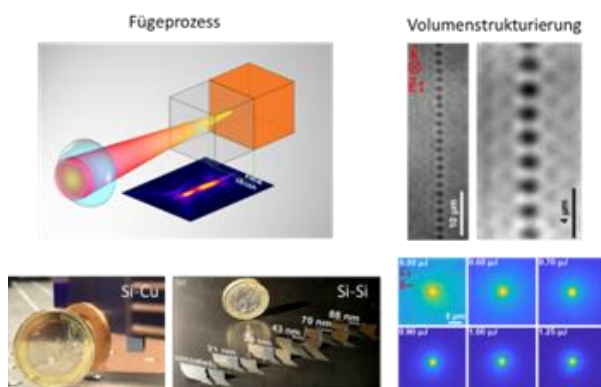


Abb. 1. Siliziumbearbeitung mit infraroten ultrakurzen Laserpulsen.

- [1] M. Chambonneau, et al., *Laser & Photonics Rev.* 15, 2100140 (2021). DOI 10.1002/lpor.202100140
- [2] M. Chambonneau, et al., *Phys. Rev. Res.* 3, 043037 (2021). DOI 10.1103/PhysRevResearch.3.043037
- [3] M. Blothe, et al., *Inscription and Characterization of Transversely Written Waveguides in Silicon with Picosecond Laser Pulses*, CLEO/Europe-EQEC (2023). DOI 10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10232608.
- [4] M. Chambonneau, et al., *Laser & Photonics Rev.* 15, 2000433 (2021). DOI 10.1002/lpor.202000433
- [5] M. Chambonneau, et al., *Adv. Photonics Res.*, 2200300 (2023). DOI 10.1002/adpr.202200300

Integrierte dispersive Spiegel mittels maßgeschneiderter Faser-Bragg-Gitter

Für faserintegrierte Kommunikationssysteme sind Faser-Bragg-Gitter (FBG) als Spektralfilter und Reflektoren essentiell. FBG bestehen aus einer periodischen Brechzahlmodifikation im Faserkern, die durch nahinfrarote ultrakurze Laserpulse flexibel in unterschiedlichste Fasern eingebracht werden können. Mit konstanten Gitterperioden lassen sich schmalbandige Spiegel realisieren. Verändert sich die Gitterperiode über die Faserlänge (gechirptes FBG), so werden unterschiedliche spektrale Komponenten an unterschiedlichen räumlichen Positionen im Gitter reflektiert. Die entstehende zeitliche Verzögerung der jeweiligen spektralen Komponenten führt zu einem Chirp des reflektierten Pulses mit den gewünschten dispersiven Eigenschaften. Dies ist z.B. für eine effiziente Anregung von Halbleiterquantenpunkten wichtig [6,7]. Gechirpte FBG (CFBG) bieten eine hervorragende Plattform, die anregenden Laserpulse robust und kompakt maßzuschneidern. Es wurden CFBG mit unterschiedlichen Dispersionsparametern von 10 ps^2 bis zu 45 ps^2 realisiert, mit denen der Einfluss auf die Anregung von Quantenpunkten untersucht wurde. Abb. 2 zeigt das gemessene Spektrum sowie die berechnete zeitliche Verzögerung der spektralen Komponenten eines reflektierten Pulses.

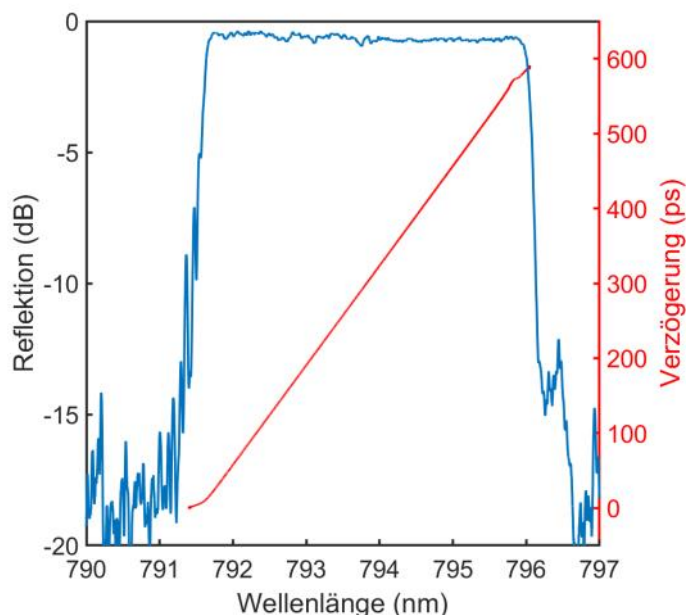


Abb. 2. Spektrale Reflektionsmessung sowie berechnete Verzögerung eines CFBG.

[1] V. Remesh et al., APL Photonics 8, 101301 (2023). DOI 10.1063/5.0164222.

[2] F. Kappe et al., Adv. Quantum Technol. 2300352 (2024). DOI 10.1002/qute.202300352.

Nichtlineare Optik in plasmonischen Metaoberflächen

Die Kopplung von Licht mit der kollektiven Bewegung von Leitungselektronen in metallischen Nanostrukturen (Plasmon), erlaubt die Konzentration elektromagnetischer Felder auf Sub-Wellenlängen-Dimensionen. Die damit einhergehende lokale Feldverstärkung ermöglicht die Verstärkung nichtlinear optischer Effekte. Zudem kommt es bei wenig Nanometer breiten Lücken zwischen zwei metallischen Oberflächen zu interessanten Effekten, wie z.B. optisch induziertem Elektronentunneln. Während diese Effekte i.d.R. bisher an Einzelstrukturen untersucht wurden, erlauben fortschrittliche Fabrikationstechniken wie Elektronenstrahlolithographie und Atomlagenabscheidung, solche plasmonischen Nanostrukturen mit deutlich unter 5 nm breiten Lücken reproduzierbar auf einer großen Fläche herzustellen [8]. Durch die periodische Anordnung identischer Strukturen kommt es zur Fernfeldkopplung und damit zu makroskopischen Signalstärken [9,10]. Die Skalierung der Fläche der Nanostrukturen erlaubt uns



Abb. 3. Charakterisierung von plasmonischen Nanostrukturen mithilfe eines fs-Lasers.

die Nutzung leistungsstarker Ultrakurzpuls laser zur Untersuchung der nichtlinearen optischen Eigenschaften.

[8] J. Gour, et al., Large-Area Sub-5nm Plasmonic Nanogap Arrays: Advanced Fabrication, Characterization and Applications, CLEO Europe (2023). DOI: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10231966

[9] S. Beer, et al., Opt. Express 30, 40884 (2022). DOI: 10.1364/OE.470578

[10] J. Gour, et al., Opt. Lett. 15, 6025 (2022). DOI: 10.1364/OL.474896

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 Grundlagenforschung zu erzielen, z.B. ultraschnelle Modifikation des Gütefaktors von Resonanzen in Halbleitermetaoberflächen, Erzeugung von Bell-Zuständen in nichtlinearen Nanoresonatoren, Quanten-Bildgebung mittels SPAD-Arrays, dielektrische Huygens-Metawellenleiter, Laseremission von hybriden-Metallgitter-Halbleiternanodrähten. Unsere grundlegende Expertise zu optischen Eigenschaften von Nanostrukturen erlaubt uns auch, anwendungsorientierte interdisziplinäre Forschung mit Partnern anderer Wis-

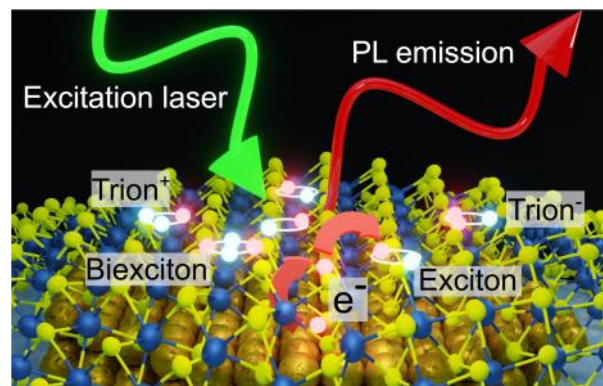


Abb. 1. Hybride Systeme aus Nanostrukturen, hier Au-Nanodisks, und atomar dünnen Materialien, hier WS₂, zeigen vielfältige Wechselwirkung zwischen Photonen, Plasmonen, Phononen und Exzitonen. [1]

senschaftsdisziplinen auf der Basis gemeinsamer Promotionsprojekte zu betreiben. Jüngste Ergebnisse dieser Kooperationen sind u.a.: Hybridisierung von Metaoberflächen mit optisch responsiven Polymeren, Auflösung des synaptischen Netzwerks im Riechzentrum von *Drosophila melanogaster* mit FIB-SEM-Nanoskopie, EUV-Bildgebung von Mikroorganismen auf der Basis muster-generierenden Nanostrukturen, photothermomechanische Nanopumpen in plasmonischen Fasersensoren.

[1] Tugchin B., et al., Photoluminescence enhancement of monolayer WS₂ by n-doping with an optically excited gold disk. Nano Lett. (2023). DOI 10.1021/acs.nanolett.3c03053.

Ultraschnelles Schalten von Gütefaktoren photonischer Nanoresonatoren in Halbleitermetaoberflächen

Die optische Durchstimmbarkeit von Halbleiter-Metasurfaces bietet einzigartige Möglichkeiten für neuartige zeitvariable Effekte, wie z.B. Frequenzumwandlung und Light-Trapping. Allerdings führen optisch induzierte resonante Prozesse häufig zu optischer Absorption, was die mögliche dynamische Erhöhung ihres Qualitätsfaktors (Q-Boosting) grundlegend einschränkt. Zusammen mit Forschern der Australian National University in Canberra haben wir deshalb das Konzept einer großen Q-Steigerung in einer Metaoberfläche aus einem einzigen Material entwickelt, indem die strukturelle Anisotropie der Nanostrukturen auf einer Femtosekunden-Zeitskala dynamisch reduziert wird. Dies wird durch die Anregung mit einer strukturierten Pumpe erreicht und nutzt den Bandfüllungseffekt in einem GaAs-Halbleiter mit direkter Bandlücke, um den durch freie Träger verursachten Verlust zu eliminieren (Abb. 2). Wir konnten zeigen, dass dieser Ansatz eine dynamische Steigerung des Resonanzqualitätsfaktors um Größenordnungen ermöglicht, was nur durch die Relaxationsprozesse der freien Ladungsträger begrenzt ist. Der vorgeschlagene Ansatz bietet eine vollständige dynamische Kontrolle über die Resonanzbandbreite und eröffnet

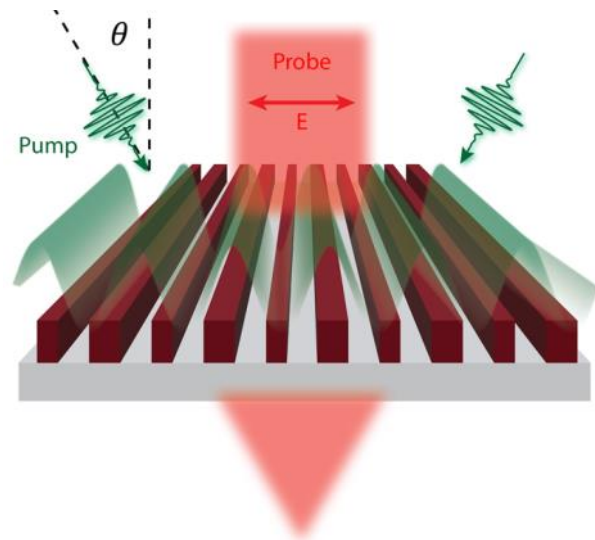


Abb. 2. Schema einer Q-verstärkenden zeitvariablen Metasurface mit durch strukturiertes Pumpen gesteuerter Resonanzbandbreite. [2]

Anwendungen in der Lichterzeugung und ultraschnellen optischen Signalverarbeitung.

- [2] Yang Z., et al., Ultrafast Q-boosting in semiconductor metasurfaces. *Nanophotonics* (2023). DOI 10.1515/nanoph-2023-0718

Visualisierung der Ultra-Struktur von Mikroorganismen mittels kombinierter EUV-IR-Bildgebung

Mikroskopie mit extrem-ultraviolettem Licht (EUV) bietet einzigartige Möglichkeiten für die labelfreie Untersuchung biologischer Proben. Zusammen mit Forschern der AG Festkörperlaser des Instituts für Angewandte Physik und des Hans Knöll Instituts (HKI) konnten wir die ortskorrelierte Ptychographische EUV- und IR-Bildgebung von zwei getrockneten, ungefärbten Modellproben, Keimlinge eines Pilzes (*Aspergillus nidulans*) und Bakterienzellen (*Escherichia coli*), bei einer EUV-Wellenlänge von 13,5 nm demonstrieren (Abb. 3). Der EUV-Spektralbereich zeigte eine ausreichende Eindringtiefe für die Identifizierung intrazellulärer Merkmale und der starke Elementkontrast im EUV ermöglichte die Identifizierung der nanoskaligen Materialzusammensetzung im Inneren der Proben. Unsere Arbeit wird Bildgebungsanwendungen im EUV voranbringen und insbesondere neue Möglichkeiten in den Biowissenschaften eröffnen.

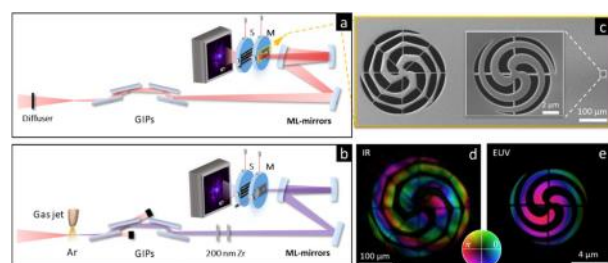


Abb. 3. Schematischer Aufbau des positionskorrelierten EUV/IR-Ptychographiemikroskops (a IR, b EUV). (c) SEM-Aufnahmen der Amplitudenmasken für die Strukturierung des IR- bzw. EUV-Strahls. d,e Rekonstruierte komplexe Proben, die im IR-Scan (d) und im EUV-Scan (e) in die Maskenebene zurückverfolgt werden.[3]

- [3] Liu C., et al., Visualizing the ultra-structure of microorganisms using table-top extreme ultraviolet imaging. *PhotonIX* (2023). DOI 10.1186/s43074-023-00084-6

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

Nichtlineare Pulscompression in Multipasszellen bei höchsten Leistungen

Immer anspruchsvollere Anwendungen in der Wissenschaft erfordern hochrepetierende Lasersysteme mit immer höheren Pulsspitzenleistungen. Dabei erlauben Nachkompressionsverfahren eine Verkürzung der Pulsdauer jenseits der vom Laser-Verstärkungsmedium unterstützten Werte. Die notwendige spektrale Verbreiterung gelingt durch nichtlineare Wechselwirkung während der Ausbreitung der Pulse in einer quasi-wellenleitenden Struktur, um die neu erzeugten Spektralanteile homogen über die räumliche Ausdehnung des Laserstrahls zu verteilen. Neben etablierten faserbasierten Ansätzen haben sich in den letzten Jahren Edelgas-gefüllte Multipasszellen als vielversprechende Architektur durchgesetzt und, neben

Vorteilen in der Handhabbarkeit, neue Leistungsrekordwerte hervorgebracht.

Experimentell wurden hochenergetische Laserpulse mit Dauern von ca. 30fs bei mittleren Leistungen von mehr als 1kW demonstriert [1], ebenso Pulsdauern von wenigen optischen Zyklen bei höchsten Leistungen realisiert [2]. Des Weiteren wurde der Multipasszellenansatz auf den Wellenlängenbereich um $2\mu\text{m}$ [3] und in den sichtbaren Spektralbereich übertragen [4].

Die entwickelten Kenndaten werden eine Vielzahl von neuen Ansätzen insbesondere zur Frequenzkonversion in den THz- und den mittleren Infrarot-Bereich sowie den XUV- und Röntgenbereich ermöglichen.

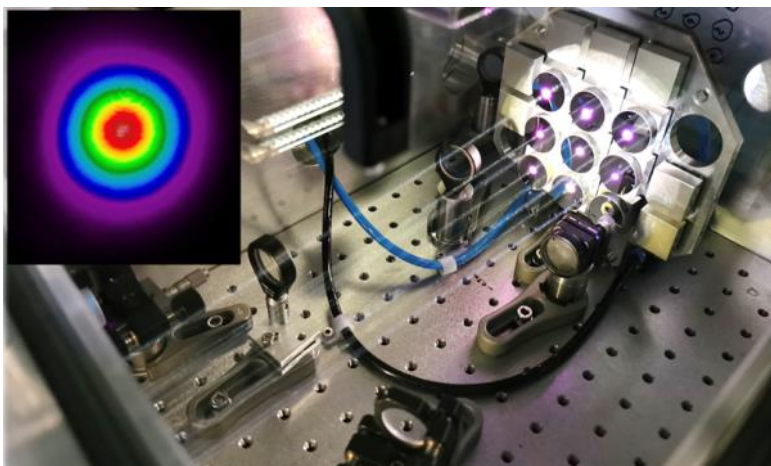


Abb. 1. Einblick in eine gas-gefüllte Multipasszelle zur Erzeugung von few-cycle Pulsen höchster Leistung

[1] C. Grebing, et al., *Opt. Lett.* 45, 6250-6253 (2020). DOI 10.1364/ol.408998

[2] M. Müller, et al., *Opt. Lett.* 46, 2678-2681 (2021). DOI 10.1364/OL.425872

[3] P. Gierschke, et al., *Opt. Lett.* 47, 3511-3514 (2022). DOI 10.1364/ol.462647

[4] M. Karst, et al., *Opt. Lett.* 48, 1300-1303 (2023). DOI 10.1364/ol.482600

Erweiterung des Emissionsspektrums von ultrakurzgepulsten Hochleistungslasern

Laserquellen sind als „enabling technology“ als Werkzeug etabliert, ein Großteil davon emittiert um $1\mu\text{m}$ Wellenlänge. Neue Emissionswellenlängen ermöglichen neue Applikationsfelder. Zum Bsp. erlauben Wellenlängen um $2\mu\text{m}$ neue Ansätze in der Medizin und bei Materialmodifikation von Kunststoffen. Sie haben auch entscheidende Vorteile bei der Frequenzkonversion in applikationsrelevante Röntgen- und THz-Spektralbereiche. Thulium-dotierte Quarzglasfasern ermöglichen Hochleistungslaser bei etwa $2\mu\text{m}$, was hohes Skalierungs- und Applikationspotential birgt.

Innovative Faser- und Verstärkerkonzepte wurden auf $2\mu\text{m}$ übertragen und erreichten Rekordwerte hinsichtlich faserbasierter UKP-Systeme höchster mittlerer Leistung im kW-Bereich und höchster Pulsenergie. Realisiert wurde ein 4-Kanal Tm-Faserverstärker mit $>150\text{W}$ mittlerer Leistung bei 100kHz und $<100\text{fs}$ [5]. Nichtlineare Pulskompression in einer gas-gefüllten Hohlkernfaser komprimierte die Pulsdauer auf 10fs [6] und

ermöglichte hochinteressante Experimente zur Frequenzkonversion. Ein wegweisendes Experiment zeigte eine signifikante Steigerung der Konversionseffizienz einer plasma-getriebenen THz-Emission beim Übergang von $1\mu\text{m}$ zu $2\mu\text{m}$ Treiberwellenlänge [7] und erzeugte mittlere Leistun-

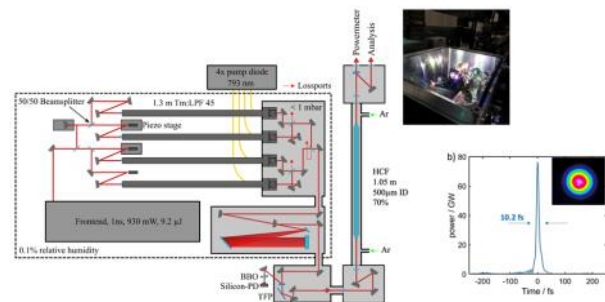


Abb. 2. Schematischer Aufbau eines 4-Kanal Thulium-

- [1] T. Heuermann, et al., Opt. Lett. 47, 3095-3098 (2022). DOI 10.1364/ol.459385
- [2] Z. Wang, et al., Opt. Lett. 48, 2647-2650 (2023). DOI 10.1364/ol.487587
- [3] J. Buldt, et al., Opt. Lett. 48, 3403-3406 (2023). DOI 10.1364/ol.492511
- [4] J. Buldt, et al., Opt. Lett. 46, 5256-5259 (2021). DOI 10.1364/ol.442374

Material-spezifische EUV-Bildgebung

EUV- und Röntgenmikroskopie bieten hohe Auflösung, ausgezeichneten Materialkontrast und Eindringtiefen im Mikrometerbereich. Bisher waren solche Bildgebungsexperimente überwiegend auf Großforschungseinrichtungen aufgrund fehlender kompakter EUV Quellen beschränkt. Unsere Forschungsgruppe entwickelt fortschrittliche EUV-Quellen, basierend auf leistungsstarken Faserlasern, kombiniert mit Ptychographie in Labormaßstab [9].

Mit neuen Bildauswertungsmethoden und speziell strukturierten EUV-Strahlen erreichte unser Mikroskop eine Rekordauflösung von 16 nm (s. Abb. a). Es war auch möglich, die Materialzusammensetzung von Halbleiterstrukturen direkt aus den aufgenommenen Bildern zu bestimmen (s. Abb. b), ein bisher unerreichtes Ergebnis [10]. Dies eröffnet vielfältige industrielle und wissenschaftliche Anwendungen, darunter Charakterisierung von Halbleiterstrukturen und die Untersuchung neuester Batteriematerialien.

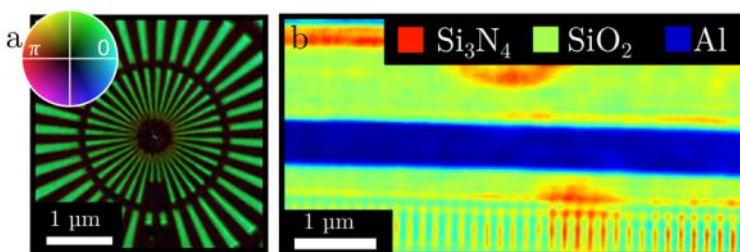


Abb. 3. a) Hochaufgelöster Siemensstern mit 16 nm Auflösung. b) Rekonstruierter hochintegrierter Schaltkreis an den wichtigen Materialien wie Si_3N_4 , SiO_2 und Al identifiziert werden konnten.

- [1] L. Loetgering, et al., [Invited]. Opt. Express 30, 4133-4164 (2022). DOI 10.1364/oe.443622
- [2] W. Eschen, et al., Light Sci Appl 11, 117 (2022). DOI 10.1038/s41377-022-00797-6

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 LiNbO₃ für die Quanten-technologie

Schaltbare Metamaterialien basierend auf Vanadiumdioxid

Metamaterialien ermöglichen die gezielte Manipulation der Licht-Materie-Wechselwirkung und damit die Kontrolle nahezu aller Lichteigenschaften in hochkompakten Elementen. Viele optische Systeme sollen die Eigenschaften durch externe Signale gezielt steuern können, wofür u.a. Flüssigkristalle, mikromechanische und akustisch-optische Systeme sowie elektro- oder thermochrome Materialien eingesetzt werden.

Vanadiumdioxid ist aufgrund seiner thermochromen Eigenschaften vielversprechend. Durch reaktive Ionenstrahlabscheidung ist es gelungen, Vanadiumdioxid-Dünnschichten mit der richtigen Stöchiometrie und Phase herzustellen. Untersuchungen mittels spektroskopischer Ellipsometrie, Raman-Spektroskopie sowie Transmissions- und Reflexionsmessungen bestätigten die thermochromen Eigenschaften – bei Erwärmung auf über 68°C ändern sich Brechungsindex und Extinktionskoeffizient deutlich. Die Schichten wurden anschließend lithographisch strukturiert, um resonante Wellenleitergitter zu erzeugen, was den Schaltkontrast gegenüber bisherigen Elementen deutlich erhöht.

Zusätzlich wurden diese Elemente mit elektrischen Isolations- und Heizschichten zu einem Gesamtsystem integriert.

[1] Walther, M. et al., Switchable optics based on guided mode resonance in lithographically patterned vanadium dioxide with integrated heating layer, *J. Eur. Opt. Society-Rapid Publ.* 19 (1) (2023). DOI 10.1051/jeos/2023019

[2] Gour, J. et al., Enhancement of third harmonic generation induced by surface lattice resonances in plasmonic metasurfaces, *Optics Letters*, 47, 6025–6028 (2022). DOI 10.1364/OL.474896

Metallische Bow-Tie Strukturen mit 2 nm Gap-Breite

In Zusammenarbeit mit Partnern des Sonderforschungsbereichs “Nonlinear Optics down to Atomic Scales” wurden metallische Bow-Tie-Strukturen mit Spaltbreiten von bis zu 2 nm hergestellt und verschiedene optische Effekte daran nachgewiesen. Die Gruppe Mikrostrukturtechnik entwickelte die entsprechende Prozesskette, bestehend aus drei Hauptprozessschritten: (I) Erzeugung von 1D/2D-Gittern mittels Elektronenstrahlolithographie, (II) Definition des Gap-Abstandes mittels ALD und (III) Beschichtung und Planarisierung basierend auf Ionenstrahlätzen. Dabei wird die Spaltgröße über die Dicke der ALD-Schicht definiert, was eine laterale Auflösung im Subnanometerbereich ermöglicht. Das überschüssige Gold außerhalb der gewünschten Bow-Tie-Struktur wird durch erneute Lithographie und Ionenstrahlätzen entfernt. Optische Messungen an diesen Strukturen bestätigen das Auftreten von SHG und THG [2].

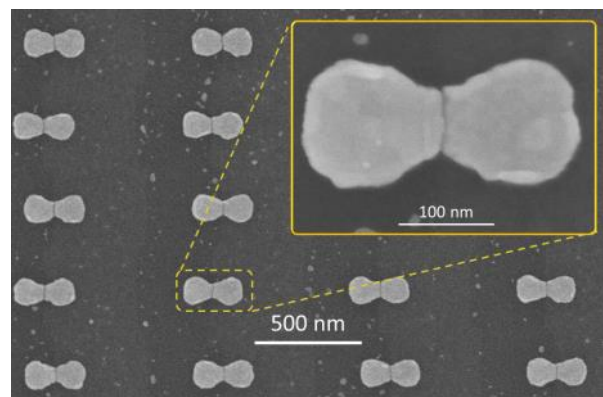


Abb. 1. REM Aufnahme von Bow-Tie-Strukturen mit Spaltbreiten von 2 nm.

Rauscharme mikrostrukturierte Spiegel

Hochpräzise optische Messinstrumente, wie in der Gravitationswellenastronomie oder für optische Atomuhren erfordern äußerst stabile Laser. Aktuelle externe Resonatoren verwenden einkristallines Silizium mit hochreflektierenden Bragg-Spiegeln und erreichen eine Frequenzstabilität von 4×10^{-17} bei einer Temperatur von 124 K. Diese Systeme sind durch das Braunsche-Rauschen begrenzt, Verbesserungen darüber hinaus waren bisher kaum möglich.

In einer Kooperation, u.a. mit der Technischen Universität Braunschweig und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, wurde ein neuartiges Konzept entwickelt, um diese Herausforderung zu überwinden. Es kombiniert Metamaterialien und Bragg-Spiegel in einem antiresonanten Etalon zu einem rauscharmen und gleichzeitig hochreflektierenden Spiegel (Abb. 2). Der Großteil der Intensität wird rauscharm an der Metastruktur reflektiert, während die transmittierte Restintensität an einem nachgeschalteten Bragg-Schichtsystem reflektiert wird. Dadurch konnte die fundamentale Frequenzstabilität um eine Größenordnung auf 5×10^{-18} verbessert werden.

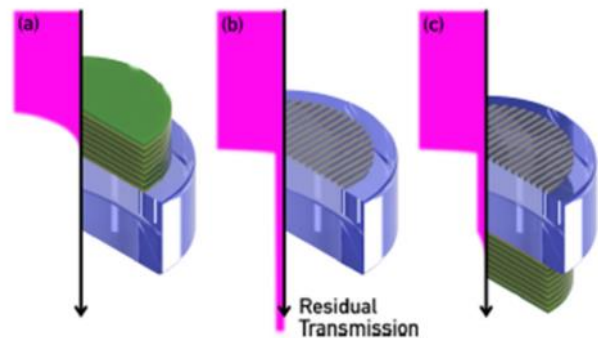


Abb. 2. Schema der verschiedenen Spiegeltechnologien. a) Konventioneller Bragg-Spiegel, b) Metamaterial-Spiegel und c) Kombination aus Metamaterial- und Bragg-Spiegel in einem antiresonanten Etalon. Die rosa Farbe zeigt die Intensität innerhalb des Elementes.

- [3] Dickmann, J. et al., Experimental realization of a 12,000-finesse laser cavity based on a low-noise microstructured mirror, *Commun Phys* 6, 16 (2023). DOI 10.1038/s42005-023-01131-1

Nanostrukturtechnik

Wir verfügen über jahrzehntelange Erfahrungen und modernste Fertigungstechnologien, die kritische Dimensionen bis in den Nanometerbereich ermöglichen. Wir arbeiten auf über 1500 m² in gemeinsamen Reinräumen (ISO4) mit dem IPHT und dem Fraunhofer IOF zusammen, um die gesamte Prozesskette für Wafergrößen bis 300 mm anzubieten. Mit

diesen Kompetenzen konnten wir in zahlreichen Kooperationen aus dem universitären Umfeld und der Industrie unterschiedliche Forschungsfragen bearbeiten. Dabei sind u.a. großskalige Demonstratoren auf hochkomplexen, vorprozessierten 200mm-Wafern aus der Halbleiterindustrie sowie verschiedene Metrologienormale entstanden [4-6].

- [4] Rahman, A. et al., Design and fabrication of a novel phase mask to inscribe fiber Bragg gratings for astronomical applications, *CLEO* (2023). DOI 10.1364/CLEO_SI.2023.SF1H.3
- [5] Hönicke, P. et al., Simultaneous Dimensional and Analytical Characterization of Ordered Nanostructures, *Small*, 18 (6) (2022). DOI 10.1002/sml.202105776
- [6] Käseberg T. et al., Mueller Matrix Ellipsometric Approach on the Imaging of Sub-Wavelength Nanostructures, *Frontiers in Physics*, 9 (2022). DOI 10.3389/fphy.2021.814559

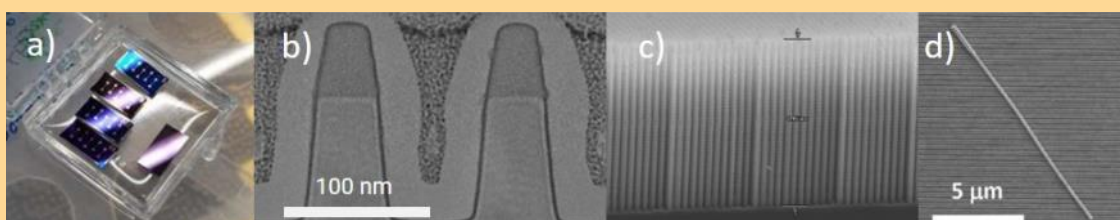


Abb. 3. a) Goldelektroden für Experimente mit TMDs b) HR-TEM Aufnahme für Metrologische Referenzstrukturen, c) Deterministische Nanodrähte mit $D=150$ nm und $H=8$ µm d) Nanodraht auf einem Gitter.

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

Forschungsschwerpunkte

- Modellierung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie mit Hilfe quantenchemischer und dynamischer Methoden
- Atom- und Molekülphysik in starken Laserfeldern:
- Quantenoptische Aspekte in der Starkfeldphysik
- Attosekunden-Physik und Innerschalen-Spektroskopie
- Elektronische und spektroskopische Eigenschaften verschiedener Quantensysteme
- Zeitaufgelöste Spektroskopie – Femtosekunden-Chemie

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 Nano- 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.

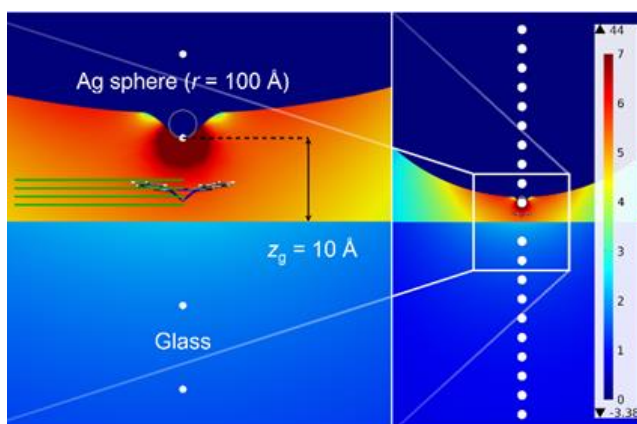


Abb. 1: Nahfeld in der Nähe einer 10 nm Silberkugel mit simulierter „atomarer Rauigkeit“. In räumlicher Nähe befindet sich ein Molekül (hier auf einer Glasoberfläche,) welches mit diesem räumlich und zeitlich inhomogenen Feld wechselwirkt [1].

In unserer Arbeitsgruppe entwickeln wir für derartige plasmonisch-molekulare Hybridsysteme im Rahmen des ERC Consolidator-Grants „QUEM-CHEM“ neuartige Methoden (Abb. 1). Diese wenden wir in enger Zusammenarbeit mit lokalen und anderen international führenden Arbeitsgruppen an, um beispielweise die anfangs erwähnte Auflösungsfrage, aber auch mechanistische Fragen (z.B. im Hinblick auf sog. Plasmon-induzierte Katalyse) zu klären.

Lokale Kollaborationen bestehen u.a. im Rahmen des SFB NOA mit den Arbeitsgruppen von Prof. Dr. Jürgen Popp (Chemie) und international mit Prof. Javier Aizpurua (San Sebastian), Prof. Dr. Raul Rodriguez (Tomsk) und Prof. Dmitry Kurovski (Texas A&M).

[1] K. Fiederling, M. Abasifard, M. Richter, V. Deckert, S. Kupfer, S. Gräfe, „A Full Quantum Mechanical Approach Assessing the Chemical and Electromagnetic Effect in TERS“, ACS Nano 17, 13137 – 13146 (2023).

[2] Z. Li, J. Rigor, E. Ehtesabi, S. Gojare, S. Kupfer, S. Gräfe, N. Large, D. Kurovski, „The role of plasmonic antennae in hot-carrier-driven reactions on bimetallic nanostructures“, J. Phys. Chem. C, 127, 22635 – 22645 (2023).

[3] Z. Li, S. Ehtesabi, S. Gojare, M. Richter, S. Kupfer, S. Gräfe, D. Kurovski, „Plasmon-determined selectivity in photocatalytic transformations on gold and gold-palladium nanostructures“, ACS Photonics 10, 3390 – 3400 (2023).

[4] X. Yao, S. Ehtesabi, C. Höppener, T. Deckert-Gaudig, H. Schneidewind, S. Kupfer, S. Gräfe, V. Deckert, „Mechanism of plasmon-induced catalysis of thiols and the impact of reaction conditions“, J. Am. Chem. Soc. 146, 3031 – 3042 (2024).

Forschungsprojekt 2: Starkfeld-Physik

Während die Starkfeldphysik in den letzten Jahrzehnten vor allem auf Atome und kleine zweiatomige Moleküle fokussiert war, werden nun verstärkt größere Moleküle, Festkörper und andere Quantensysteme untersucht.

Es ist für die theoretische Modellierung eine große Herausforderung, die Wechselwirkung derartiger Systeme mit intensivem Laserfeldern vollständig numerisch zu beschreiben, da viele Freiheitsgrade auf vielen verschiedenen Zeitskalen beteiligt sind.

Wir verfolgen in der theoretischen Beschreibung verschiedene Ansätze, von Multi-Physik-Ansätzen zu (semi-)klassischer Dynamik [5, 8]. Damit können wir für atomare und molekulare Systeme die komplexe Starkfelddynamik (Rotation, Vibration und elektronische Anregung bzw. Ionisation) beschreiben. Zur Beschreibung der

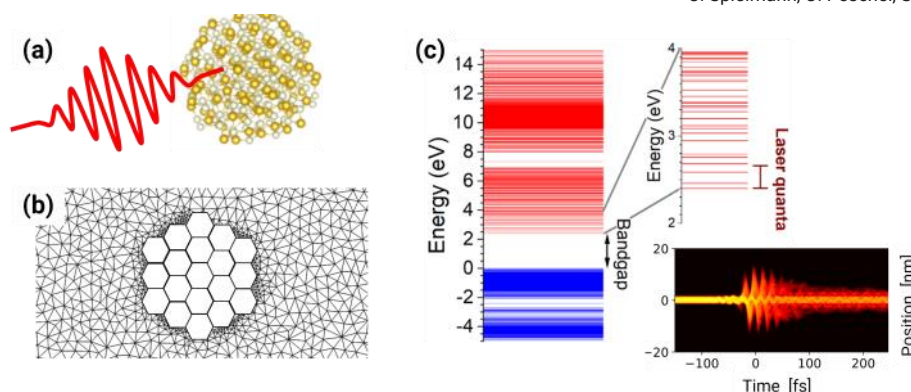


Abb. 2.: (a) Wechselwirkung intensiver Laserpulse mit Quantenpunkten. (b) Schematische Darstellung des Realraum-Tight-Binding Modells [7] (c) (Diskrete) energetische Struktur eines typischen Quantenpunktes, und starkfeld-induzierte Elektronendynamik in einem Quantenpunkt [6].

starkfeldinduzierten Dynamik in Quantenpunkten und Festkörpersystemen entwickelten wir gemeinsam mit Prof. Ulf Peschel und Prof. Kurt Busch (HU Berlin) im Rahmen des SFB NOA ein tight-binding Modell im Realraum (Abb. 2) [7], welches die experimentell gefundenen Abhängigkeit der HHG-Spektren von der Größe der Quantenpunkte erklären kann [6].

In diesem Bereich arbeitet unser Lehrstuhl oft eng mit experimentell arbeitenden Gruppen zusammen. Lokal arbeiten wir u.a. mit Prof. Gerhard Paulus zusammen, international u.a. mit Prof. Jens Biegert (ICFO Barcelona) und Prof. Matthias Kling (SLAC, Stanford).

[5] W. Li, A. Saleh, M. Sharma, C. Hünecke, M. Sierka, M. Neuhaus, L. Hedewig, B. Bergues, M. Alharbi, H. AlQahtani, A. M. Azzeer, S. Gräfe, M. F. Kling, A. F. Alharbi, Z. Wang, "Resonance effects in Brunel harmonic generation in thin film organic semiconductors", *Adv. Opt. Mater.*, 2203070 (2023).

[6] H. N. Gopalakrishna, R. Baruah, C. Hünecke, V. Korolev, M. Thümmeler, A. Croy, M. Richter, R. Hollinger, V. Shumakova, I. Uschmann, H. Marschner, C. Reichardt, A. Undisz, J. Dellith A. Pugžlys, A. Baltuška, C. Spielmann, U. Peschel, S. Gräfe, M. Wächtler, D. Kartashov, "Tracing spatial confinement in semiconductor quantum dots by high-order harmonic generation", *Phys. Rev. Research* 5, 013128 (2023).

[7] U. Peschel, M. Thümmeler, T. Lettau, S. Gräfe, K. Busch, "Two-particle tight-binding description of higher harmonic generation in semiconductor nanostructures", *Phys. Rev. B* 106, 245307 (2022).

[8] A. Sanchez, K. Amini, S.-J. Wang, T. Steinle, B. Belsa, A.T. Le, X. Liu, R. Moshammer, T. Pfeiffer, M. Richter, J. Ullrich, S. Gräfe, C.D. Lin, J. Biegert, "Molecular structure retrieval directly from laboratory-frame photoelectron spectra in laser-induced electron rescattering", *Nature Comm.* 12, 1520 (2021).

SFB: NOA – Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen

(2. Phase 2023-2027)

Sprecherteam: Prof. Stefanie Gräfe und Prof. Ulf Peschel)

Der Sonderforschungsbereich SFB 1375 "NOA - Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen" wurde im Juli 2019 an der Friedrich-Schiller-Universität eingerichtet und 2023 für eine zweite Förderphase verlängert.

Das Forschungsprogramm konzentriert sich auf die Erforschung grundlegender nichtlinearer Prozesse der Licht-Materie-Wechselwirkung in nie-

drigdimensionalen Nanostrukturen, wie atomar dünne Schichten, Nanopartikel und -drähte, und nanostrukturierte Oberflächen.

NOA untersucht Quantenphänomene wie das lichtinduzierte Tunneln von Elektronen durch metallische Nanospalten und die feldgetriebene Trägerbeschleunigung in plasmonischen Nanostrukturen, Atom-



gittern und 2D-Materialien. Dazu gehört die Untersuchung der resultierenden Rückwirkung auf das elektromagnetische Feld, die zur Erzeugung höherer Oberwellen (HHG) und Informationen über die an der Wechselwirkung beteiligten elektronischen Wellenfunktionen führt.

Professur für Angewandte Physik / Nanooptik - Arbeitsgruppe Quantenoptik PD Dr. Frank Setzpfandt

Forschungsschwerpunkte

- Quantenbildgebung und Quantenmessverfahren unter Nutzung korrelierter oder verschränkter Photonenpaare zur Verbesserung der Bildeigenschaften, der Sensitivität oder zur Erschließung schlecht detektierbarer Spektralbereiche
- nichtlineare Optik in Mikro- und Nanostrukturen zur Erlangung eines fundamentalen Verständnisses für den Einfluss der Strukturgeometrie auf die nichtlineare Wechselwirkung und zur Kontrolle der dabei generierten Lichtfelder
- Erzeugung von nichtklassischen Quantenzuständen des Lichts durch nichtlineare Frequenzkonversion in Mikro- und Nanostrukturen
- integrierte Optik in Lithiumniobat als Plattform für die nichtlineare Optik sowie die optische Signalverarbeitung

Quantenbildgebung und -sensorik

Eines unserer Hauptarbeitsfelder ist die Untersuchung von Bildgebungs- und Messverfahren, die korrelierte Photonenpaare zur Beleuchtung und Auswertung der untersuchten Objekte nutzen. Es ist bereits lange bekannt, dass nichtklassische Quantenzustände des Lichts Vorteile bei Messungen zugänglich machen, wie z.B. die Erhöhung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses über die durch das klassische Schrotrauschen ermöglichte Grenze. Wir untersuchen, ob sich auf Basis dieser grundlegend bekannten Vorteile praktisch relevante Messverfahren realisieren lassen.

Eine der wesentlichen technischen Herausforderungen ist die Notwendigkeit, Korrelationen zwischen den einzelnen Photonen eines Paares orts aufgelöst und mit einer hohen Geschwindigkeit detektieren zu können. Dafür wurden in den letzten Jahren zwei verschiedene Lösungen entwickelt. Gemeinsam mit europäischen Partnern wurde einerseits ein Messsystem realisiert, welches als zentrales Element eine spezielle Kamera für sichtbares Licht enthält, die aus vielen individuellen Einzelphotonendetektoren besteht. Damit wurde das sogenannte „Ghost Imaging“ implementiert, welches die Untersuchung von Objekten im infraroten Spektralbereich unter Nutzung von Kameras für sichtbare Photonen erlaubt [1]. Der zweite implementierte Messansatz beruht auf der Nutzung eines konventionellen scannenden Mikroskops [2]. In diesem wird eines der Photonen eines Photonenpaares injiziert und als

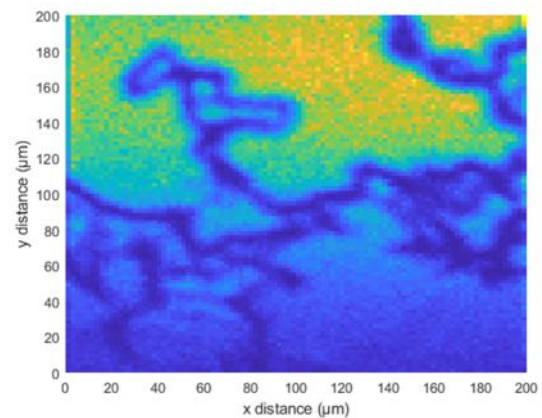


Abb. 1. Bild von Zellstrukturen in Nierengewebe, gemessen mit dem Quantenmikroskop bei einer Wellenlänge von 1740 nm.

Anregungslicht für die Untersuchung der Probe verwendet. Das zweite Photon wird als Referenzphoton außerhalb des Mikroskops detektiert. Mittels dieses Quantenmikroskops können Objekte im Wellenlängenbereich bis zu 2 µm vermessen werden.

Neben diesen Ansätzen zur Bildgebung werden auch Quantenpolarimetrieverfahren unter Nutzung von verschränkten Photonenpaaren und die Anwendung aller entwickelten Verfahren für die Charakterisierung biologischer Proben untersucht.

[1] V. F. Gili et al., „Quantum Ghost Imaging based on a "looking back" 2D SPAD array," *Applied Optics* 62, 3093 (2023)

[2] V. F. Gili, et al., „Experimental realization of Scanning Quantum Microscopy," *Appl. Phys. Lett.* 121, 104002 (2022)

Photonenpaarerzeugung in nanoskaligen Strukturen

Verschränkte Photonenpaare sind die Grundlage für viele Anwendungen der Quantentechnologien. Sie können durch spontane nichtlineare Konversion (SPDC) in Materialien erzeugt werden, die über eine Nichtlinearität 2. Ordnung verfügen. Dabei zerfällt ein kurzwelliges Pumpphoton in zwei Photonen mit längerer Wellenlänge: Signal und Idler. Die Eigenschaften der Photonenpaare müssen dabei an die Anforderungen der jeweiligen Anwendungen angepasst werden und können durch die Geometrie des genutzten nichtlinearen Mediums eingestellt werden.

Eine besonders vielseitige Methode zur Beeinflussung des Lichts in allen seinen Freiheitsgraden sind sogenannte Metaoberflächen, deterministische flächige Anordnungen vieler einzelner Nanostrukturen, welche lokalisierte Resonanzen aufweisen. Wir konnten zeigen, dass nichtlineare Metaoberflächen als Quellen für Photonenpaare eingesetzt werden können, und die Resonanzen eine weitreichende Kontrolle über die spektralen Eigenschaften der erzeugten Paare ermöglichen [3].

Eine bereits etablierte Geometrie für Photonenpaarquellen sind nichtlineare Wellenleiter. Auch hier eröffnen nanoskalige Wellenleitersysteme

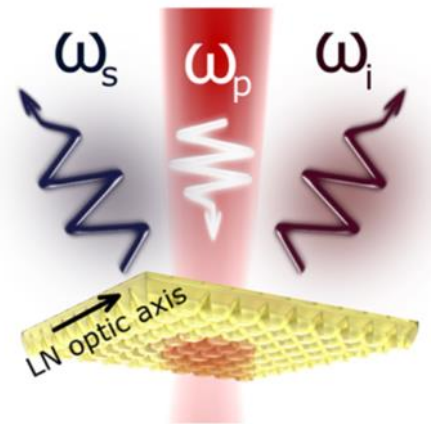


Abb. 2. Schematische Darstellung der Photonenpaarerzeugung in einer nichtlinearen Metaoberfläche aus Lithiumniobat.

neue Freiheitsgrade. In nichtlinearen Wellenleitern aus Lithiumniobat konnten wir zeigen, dass die Wellenleitergeometrie eine Kontrolle der spektralen Korrelationen in den erzeugten Photonenpaaren erlaubt [4].

[3] T. Santiago-Cruz et al., „Photon Pairs from Resonant Metasurfaces,” *Nano Letters* 21, 4423 (2021)

[4] P. Kumar et al., „Group index matched frequency conversion in lithium niobate on insulator waveguides,” *Frontiers in Photonics* (2022), DOI: <https://doi.org/10.3389/fphot.2022.951949>

Theoretische Beschreibung nichtlinearer Licht-Materie Wechselwirkung auf der Quantenebene

Für das Verständnis der Photonenpaarerzeugung in nichtlinearen Nanostrukturen sind theoretische Modelle zu deren Beschreibung unverzichtbar. Die normalerweise in der Quantenoptik eingesetzten Methoden sind für Nanostrukturen, bei der optische Eigenschaften in erheblichem Maße durch Absorption, Streuung, und evaneszente Felder charakterisiert sind, aber nur bedingt tauglich.

Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, haben wir Modelle für die nichtlineare Quantenoptik in Nanostrukturen entwickelt, die als Basis der Beschreibung Greensche Funktionen benutzen. Damit konnten wir zeigen, dass mittels sehr dünner Photonenpaarquellen als Lichtquelle durch Nutzung evaneszenter Felder eine Erhöhung der Auflösung bei der Bildgebung möglich ist [5]. Diese Modelle ermöglichen auch die genaue Beschreibung der Photonenpaarerzeugung in Nanoresonatoren. Es zeigte sich, dass bereits ein einziger derartiger Resonator als Quelle für verschiedene verschränkte Quantenzustände dienen kann [6].

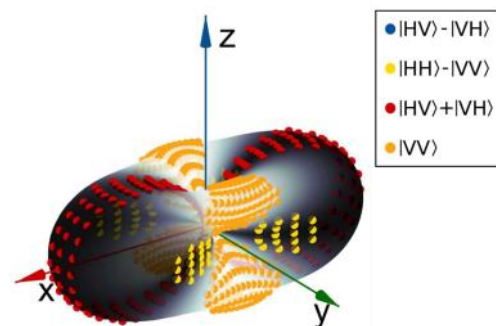


Abb. 3. Numerische Simulation der Emission verschiedener Photonpaarzustände, welche durch SPDC in einem einzelnen Nanoresonator erzeugt werden.

[5] E. A. Santos et al., „Subdiffraction Quantum Imaging with Undetected Photons,” *Phys. Rev. Lett.* 128, 173601 (2022)

[6] M. A. Weissflog et al., „Nonlinear Nanoresonators are Natural Sources of Bell States,” *Appl. Phys. Rev.* 11, 011403 (2024)

Institut für Festkörperphysik (IFK)



Institutsdirektor: Prof. Dr. Carsten Ronning

Professur für Angewandte Physik/Festkörperphysik
Prof. Dr. Torsten Fritz

Professur für Experimentalphysik/Festkörperphysik
Prof. Dr. Carsten Ronning

Professur für Tieftemperaturphysik
(ab Oktober 2019 Seniorprofessor)
Prof. Dr. Paul Seidel

Professur für Experimentalphysik/Nano- und Quantensysteme
Prof. Dr. Isabelle Staude

**Juniorprofessur mit tenure track 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 (bis 9/2021)

Max-Planck-Arbeitsgruppe Laborastrophysik
PD Dr. Cornelia Jäger

Professur für Innovative Nanostrukturen
Prof. Dr. Andrey Turchanin (Zweitmitgliedschaft in Physikalisch-
Astronomischer Fakultät)

Adresse: Helmholtzweg 3 und 5, 07743 Jena

Homepage: www.ifk.uni-jena.de

Professur 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 Bauelementen.
- 2D-Materialien: Epitaktisches Graphen, hexagonales Bornitrid (h-BN), Übergangsmetalldichalcogenide, Phosphorene und Antimone. Charakterisierung und Anwendung als Substratmodifikator.
- Strukturaufklärung mittels STM, CO-AFM und abbildungskorrigiertem LEED. Photoelektronenspektroskopien (UPS, XPS, ARPES, POT, AES).
- Optische *in situ* Spektroskopie: Die von uns eingesetzte 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: Konsistente Interpretation von spektroskopischen Ergebnissen

Die Forschung zu organischen Dünnschichten wird weitgehend durch potenzielle (opto-)elektronische Anwendungen vorangetrieben und erweist sich aus Sicht der Grundlagenforschung als nicht weniger faszinierend. Zahlreiche Studien machen deutlich, dass das Verständnis von bauelementerelevanten molekularen Dünnschichtarchitekturen eine große Herausforderung darstellt, die oft durch unzureichende spektroskopische Daten und das Fehlen einer konsistenten Interpretation der verfügbaren Datensätze behindert wird.

Folglich überwiegen spekulative Aspekte bei der Diskussion von Energieniveaus in Verbindung mit den optischen Eigenschaften organischer Dünnschichten. Geeignete spektroskopische Techniken für dünne Schichten organischer Moleküle (die für Bauelemente erforderlichen typischen Dicken liegen im Nanometerbereich) mit den erforderlichen Empfindlichkeiten sind sehr anspruchsvoll. Einige dieser Methoden wurden erst in der jüngsten Vergangenheit entwickelt oder erheblich verbessert.

In der unten zitierten Arbeit wird ein kurzer Überblick über die jetzt verfügbaren zueinander komplementären Spektroskopieverfahren gegeben, wobei der Schwerpunkt auf Techniken liegt, die noch nicht zu allgemein verbreiteten Standards geworden sind, und es wird eine Reihe von Beispielen für gewonnene experimentelle Ergebnisse diskutiert. Für eine konsistente Interpretation der letzteren werden die in der Literatur vorgeschlagenen Konzepte zur Rolle der Anfangs- und Endzustände spektroskopischer Prozesse skizziert, mit wichtigen Konsequenzen für quantitativ korrekte Energiediagramme.

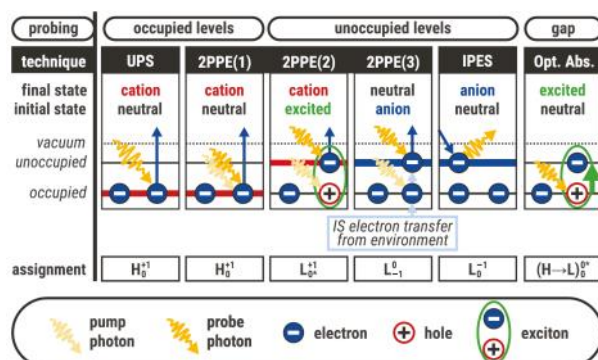


Abb. 1. Schematischer Überblick über wichtige optische und elektronische Spektroskopien, die zur Charakterisierung dünner Molekülfilme verwendet werden. Der Einfachheit halber werden nur die höchsten besetzten und die niedrigsten unbesetzten Molekülorbitale (abgekürzt H bzw. L) dargestellt.

Quelle: Roman Forker.

R. Forker, M. Gruenewald, T. Kirchhübel, and T. Fritz (2021): Recent Progress in the Consistent Interpretation of Complementary Spectroscopic Results Obtained on Molecular Systems (Invited Perspective). Adv. Optical Mater., DOI: 10.1002/adom.202100200.

Forschungsprojekt 2: Blaues Phosphoren (BlueP) auf Au(111) als Entkopplungsschicht

Zweidimensionale (2D) Materialien ziehen zunehmend die Aufmerksamkeit auf sich, was zu raschen Fortschritten bei der Synthese und Charakterisierung für verschiedene Systeme führt. Mit zahlreichen bisher berichteten elementaren Zusammensetzungen sind 2D-Materialien auf Phosphorbasis kürzlich in den Mittelpunkt gerückt. Unter den bekannten schichtförmigen Allotropen zeichnen sich schwarzes Phosphoren (BlackP) und blaues Phosphoren (BlueP) durch vielversprechende elektronische Eigenschaften wie eine einstellbare Bandlücke oder eine hohe Ladungsträgermobilität aus. Diese Eigenschaften können für künftige Anwendungen in Sensoren, Detektoren oder anderen (opto-)elektronischen Bauelementen von Nutzen sein. Insbesondere die Herstellung von BlueP auf Au(111) hat großes Interesse an der mikroskopischen Struktur geweckt. In unserer Arbeit zeigen wir klare Beweise dafür, dass Au-Linker-Atome zwischen kleinen BlueP-Untereinheiten eingebaut sind.

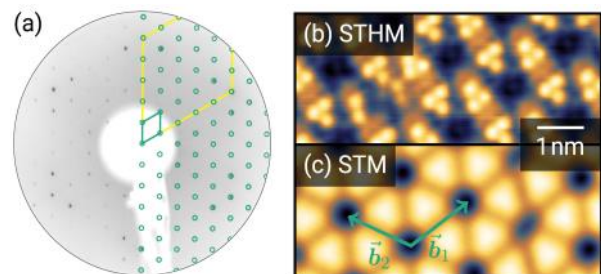


Abb. 2. (a) LEED-Daten von BlueP auf Au(111), aufgenommen bei einer Elektronenenergie von 140 eV. Die Hälfte des Bildes ist durch eine angepasste Gittersimulation überlagert.

(b) STHM-Bild ($I = 1 \text{ nA}$, $V = -2 \text{ mV}$, $T = 1,1 \text{ K}$) und (c) STM-Bild ($I = 50 \text{ pA}$, $V = 100 \text{ mV}$, $T = 4,5 \text{ K}$) von BlueP auf Au(111).

Quelle: Maximilian Schaal.

M. Gruenewald, M. Schaal, I. Karadzhov, L. Brill, J. Domke, P. Grimm, F. Otto, J. Picker, P. M. Simon, H. Tamm, T. Fritz und R. Forker (2022): Blue Phosphorene on Au(111) as a Decoupling Layer for Organic Epitaxially Grown Films. *Phys. Rev. Mater.*, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.015601.

Forschungsprojekt 3: Supraleitfähigkeit von K-interkaliertem epitaktischem Doppelschicht-Graphen

Materialien auf Graphenbasis gehören zu den vielversprechendsten Kandidaten für die Untersuchung der Supraleitung, die sich aus der reduzierten Dimensionalität ergibt. Neben der Dotierung durch verdrehtes Stapeln kann Supraleitung auch durch Metallinterkalation von Graphenlagen erreicht werden, wobei die Eigenschaften von der Wahl der Metallatome und der Anzahl der Graphenschichten abhängen. Hier wird gezeigt, dass kaliuminterkaliertes epitaktisches zweischichtiges Graphen ein Supraleiter mit einer kritischen Temperatur von $T_c = 3,6 \pm 0,1 \text{ K}$ ist. Mittels Rastertunnelmikroskopie und winkelaufgelöster Photoelektronenspektroskopie werden die physikalischen Mechanismen sehr detailliert analysiert. Die Daten zeigen, dass die Elektron-Phonon-Kopplung die treibende Kraft ist, die die Supraleitung ermöglicht.

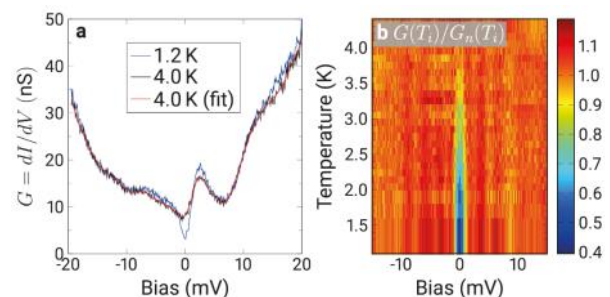


Abb. 3. Analyse der temperaturabhängigen Energie-lücke um das Fermi-Niveau. a) Tunnelspektren bei 1,2 K (blau), 4,0 K (schwarz) und Fit der 4,0 K Daten (rot). b) Temperaturabhängige normierte dI/dV -Spektren. Deutlich erkennbar ist das Schließen der Tunnellücke mit ansteigender Temperatur.

Quelle: Tobias Hümpfner.

Professur für experimentelle Physik / Festkörperphysik

Prof. Dr. Carsten Ronning

Forschungsschwerpunkte

- **Halbleiternanodrähte: Synthese durch chemische Gasphasenabscheidung (VLS-Mechanismus), Funktionalisierung durch Ionenimplantation, Lasing-Eigenschaften von hybriden Systemen mit Metallen, 2D-Materialien oder Farbstoffmolekülen, kombinatorische Röntgenanalyse von einzelnen Nanodrähten (XRF, XANES, XEOL)**
- **Metaoberflächen: Synthese durch maskierte Ionenbestrahlung oder einem fokussierten Ionenstrahl, Phasenwechsel- und Phasenübergangs-Materialien, Silizium**
- **Photonik und Quantentechnologien: Ionenstrahldotierung von photonisch integrierten Systemen (PICs), Verstärker und Laser, Ionenstrahlsynthese von Defektzentren und Einzelphotonen-Emittern**
- **Ionen-Festkörper-Wechselwirkungen: Ionenstrahlsynthese und -modifikation von Materialien, Nanostruktur-Effekte, Monte-Carlo-Simulationen**

Halbleiternanodrähte

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.

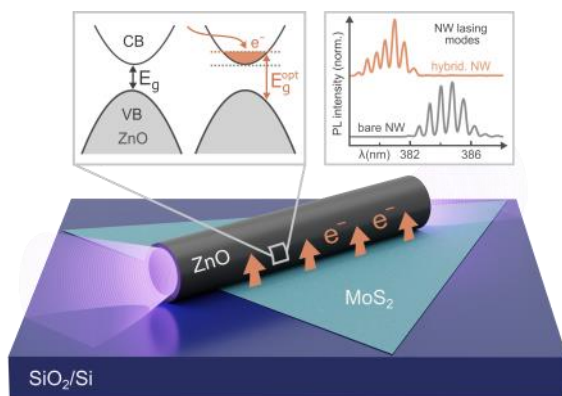


Abb. 1: Schematische Darstellung, Lasing-Eigenschaften und Ladungstransfermechanismus eines hybriden ZnO-Nanodraht / MoS₂-Monolagen Systems.

Um die Drähte herzustellen nutzen wir ein etabliertes Verfahren: wir bringen feine Partikel – meist Goldnanopartikel – auf ein Substrat auf und bedampfen die Oberfläche dann mit Zinkoxid. An den Nanopartikeln lagert sich dieses an und die winzigen Drähte wachsen in die Höhe.

Die optischen Eigenschaften der kleinen Laser haben wir im vergangenen Jahrzehnt ausführlich studiert, sowohl in welcher Weise und wie schnell diese Licht ausstrahlen.

Um das volle Potential der kleinen Laser für on-Chip Anwendungen auszuschöpfen, ist es jetzt besonders wichtig, herauszufinden, wie sich die Lasing-Eigenschaften der Nanodrähte in Kontakt mit anderen Materialien verhalten. Im Rahmen des Sonderforschungsbereich 1375 „NOA“ hybridisieren wir die Halbleiternanodrähte mit metallischen, plasmonischen Strukturen als auch mit 2D-Materialien und Farbstoffmolekülen. Die optischen und Lasing-Eigenschaften der Nanodrähte werden dann durch photonische als auch elektronische Kopplungen, wie z.B. Ladungstransfermechanismen, beeinflusst.

E. Eobaldt, et al. „Tuning nanowire lasers via hybridization with two-dimensional materials“, *Nanoscale* 14, 6822 (2022)

F. Vitale, et al. „Tailoring Nanowire Lasing Modes via Coupling to Metal Gratings“, *Applied Physics Letters* 112, 101104 (2023)

Quanten und photonisch integrierte Systeme

Die Ionenimplantation von Fremdatome in Materialien ist eine Methode, die in der Halbleiterindustrie zur Dotierung von Silizium genutzt wird. Selektive Bereiche eines Chips werden dabei durch Bestrahlung mit Bor oder Phosphor elektrisch p- oder n-leitend. Die Prozessoren in jedem mobilen Telefon benötigen bis zu 20 solcher Implantationsschritte. Während die Ionenimplantation schon lange ein Standardprozess in der Elektronik ist, so steht die Photonik erst am Anfang komplexe integrierte photonische Systeme (PICs) auf einem einzigen Chip zu realisieren.

In Zusammenarbeit mit weltweit führenden Forschungsgruppen aus dem Bereich der photonischen Bauelementen führen wir Implantationsexperimente durch, um die photonischen Systeme selektiv mit aktiven Leuchtzentren zu dotieren. Dies sind einerseits Lanthanide für Wellenleiterverstärker oder –laser, und andererseits Defektkomplex-Zentren in Diamant, die als Einzelphotonenemitter in der Quantenkommunikation eingesetzt werden können.

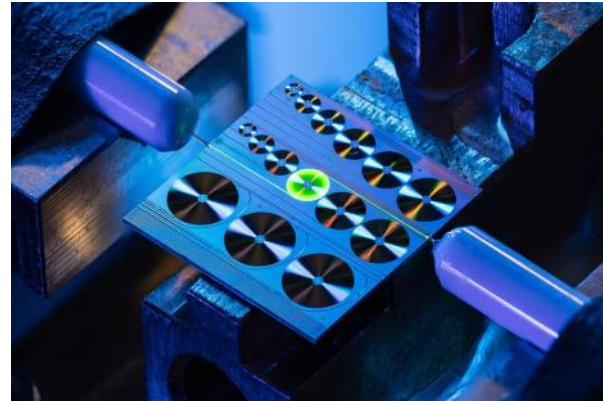


Abb. 2. Ein mit Erbium dotierter Wellenleiterverstärker auf einem photonischen integrierten Chip (PIC).

© Niels Ackermann, EPFL

Y. Liu, et al. „A photonic integrated circuit based erbium-doped amplifier“, *Science* 376, 1309 (2022)

N.A. GÜsken, et al. „Emission enhancement of erbium in a reverse nanofocusing waveguide“, *Nature Communications* 14, 2719 (2023)

K. Kuruma, et al. „Coupling of a Single Tin-vacancy Center to a Photonic Crystal Cavity in Diamond“, *Applied Physics Letters* 118, 230601 (2021)

Metaoberflächen

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 unseren Projekten realisieren wir Metaoberflächen indem wir entweder durch Masken selektiv dotieren oder Defekte einbringen, bzw. wir nutzen einen fokussierten Ionenstrahl und können Metaoberflächen „direkt schreiben“. Geeignet sind hierfür Materialien, die durch die Ionenstrahlmodifikation einen hohen optischen Kontrast liefern. Ein Beispiel sind Phasenwechselmaterialien, wie $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (kurz GST, siehe Abb. 3), die bei Raumtemperatur sowohl in ihrer kristallinen als auch amorphen Phase stabil und dabei entweder metallisch oder isolierend sind.

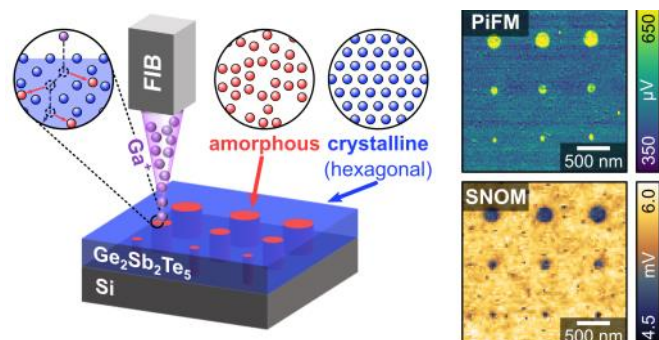


Abb. 3. Lokale Amorphisierung von kristallinem GST durch einen fokussierten Ionenstrahl. PiFM- und SNOM-Karten, die einen hohen optischen Kontrast zwischen amorpher und kristalliner Phase zeigen.

A. Koch, et al. „Heavily doped zinc oxide with plasma frequencies in the telecommunication wavelength range“, *Advanced Photonics Research* 4, 2200181 (2023)

M. Hafermann, et al. „Fast recovery of ion-irradiation-induced defects in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films at room temperature“, *Optical Materials Express* 11, 3535 (2021)

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)

Professur für Experimentalphysik/Nano- und Quantensysteme

Prof. Dr. Isabelle Staude

Forschungsschwerpunkte

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

Hochresonante Nanostrukturen zur gezielten Manipulation von magnetischen Dipolübergängen

Im optischen Frequenzbereich wird die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie durch die elektrischen Felder des Lichts dominiert. Zum Beispiel sind magnetische Dipolübergänge normalerweise mehrere Größenordnungen schwächer als elektrische und werden daher in der Optik häufig vernachlässigt.

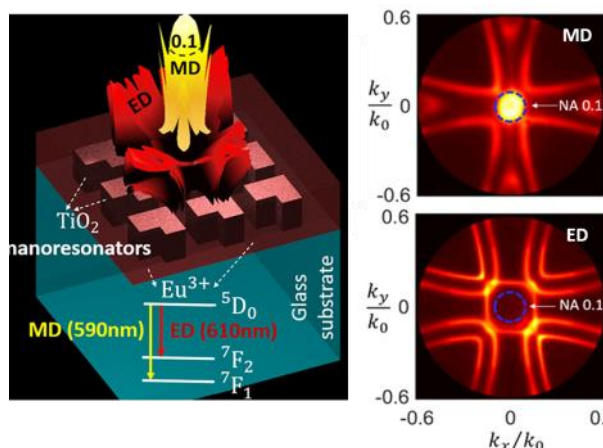


Abb. 1: Schemazeichnung einer hochresonanten Tiandioxid-Nanostruktur, die elektrische und magnetische Dipolstrahlung von trivalentem Europium räumlich trennen kann (links). Gemessene räumliche Abstrahlcharakteristik der magnetischen (rechts oben) und der elektrischen (rechts unten) Dipolstrahlung.

Dennoch weisen bestimmte Quantenemitter, wie z.B. dreiwertige Lanthanide, starke magnetische Dipolübergänge auf. Die gezielte Manipulation dieser magnetischen Dipolemission mittels resonanter photonischer Nanostrukturen ist sowohl für die Grundlagenforschung als auch für Anwendungen von großem Interesse. Die selektive Kontrolle der Emissionseigenschaften magnetischer Dipolübergänge ist jedoch eine Herausforderung, da diese normalerweise innerhalb eines Multipletts von spektral nahe beieinander liegenden Emissionslinien auftreten. In unserer Forschung gelang es uns mithilfe hochresonanter photonischer Nanostrukturen die magnetische Dipolstrahlung räumlich von der elektrischen Dipolstrahlung zu trennen [1]. Unsere Ergebnisse untermauern die Bedeutung magnetischer Licht-Materie-Wechselwirkungen als zusätzlichen Freiheitsgrad in photonischen und optoelektronischen Systemen. Darüber hinaus ergeben sich interessante Ansatzpunkte für die Entwicklung hochintegrierter, spektrometerfreier nano-photonischer Anwendungen in der Sensorik

[1] A. Bashiri, A. Vaskin, K. Tanaka, M. Steinert, T. Pertsch, and I. Staude, "Colour routing of magnetic and electric dipole emission from Eu^{3+} by broken-symmetry TiO_2 metasurfaces", ACS Nano 18, 506–514 (2023).

Meta-optische Wellenleiter für die integrierte Quantenoptik

Die Kombination photonischer Wellenleitertechnologie mit Ansätzen aus dem Bereich photonischer Metamaterialien eröffnet neue Wege für photonische integrierte Schaltkreise. Konkret erforschen wir in unserer Arbeitsgruppe meta-optische Wellenleiter, die aus einer Kette von resonant vorwärts streuenden Nanopartikeln bestehen [2]. Solche Wellenleiter weisen sehr geringe Verluste auf und besitzen eine Reihe von ungewöhnlichen Eigenschaften. Insbesondere ist die Rückstreuung stark unterdrückt. Die entwickelten meta-optischen Wellenleiter adressieren grundlegende Herausforderungen der Miniaturisierung in der integrierten Photonik und eröffnen neue Perspektiven für die Verstärkung von Licht-Materie Wechselwirkungen und für die integrierte Quantenoptik.

[2] Y. Sirmaci, A. Barreda Gomez, T. Pertsch, J. Schmid, P. Cheben, and I. Staude, „All-dielectric Huygens’ meta-waveguides for resonant integrated photonics”, *Laser & Photonics Reviews* 17, 2200860 (2023).

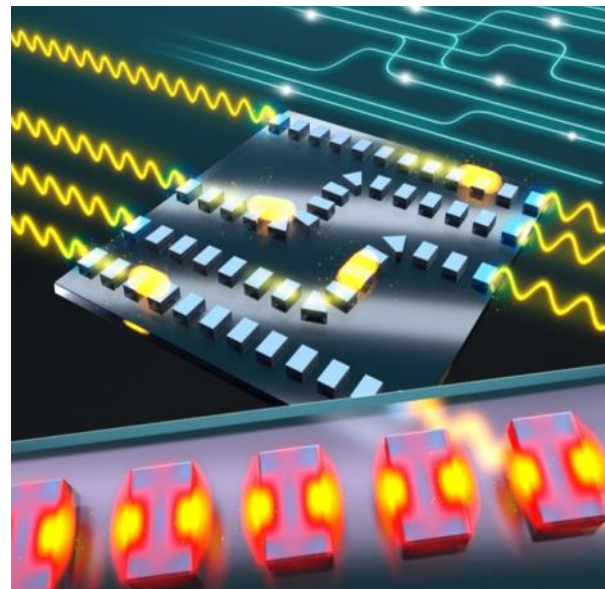


Abb. 2: Illustration photonischer integrierter Schaltkreise aus meta-optischen Wellenleitern (Bild: Johannes Kretzschmar).

Multiresponsive photonische Nanostrukturen

In den letzten Jahren wurden enorme Anstrengungen zur Entwicklung von Systemen unternommen, die in der Lage sind in Echtzeit auf äußere Stimuli zu reagieren und sich so an unsere Bedürfnisse und Anforderungen anzupassen. Systeme, die auf zwei oder mehrere Stimuli reagieren, ermöglichen dabei eine höhere Komplexität als Systeme, die nur auf einen einzigen Stimulus ansprechen. In unserer Forschung ist es uns gelungen, auf Basis von Flüssigkristallen [3] bzw. multiresponsiven Polymeren [4] photonische Nanostrukturen zu realisieren, deren optische Antwort sich als Funktion von Temperatur, angelegter Spannung und/oder Bestrahlung mit Licht in definierter Weise ändert. So konnten z.B. logische Gatter und zuvor unzugängliche optische Schalteigenschaften erzielt werden.

[3] C. Zou, C. Amaya, S. Fasold, A. A. Muravsky, A. A. Murauski, T. Pertsch, and I. Staude, “Multi-responsive dielectric metasurfaces”, *ACS Photonics* 8, 1775–1783 (2021).

[4] C. Zou, P. Poudel, S. L. Walden, K. Tanaka, A. Minovich, T. Pertsch, F. H. Schacher, I. Staude, “Multiresponsive Dielectric Metasurfaces Based on Dual Light- and Temperature-Responsive Copolymers”, *Adv. Opt. Mater.* 11, 2202187 (2022).

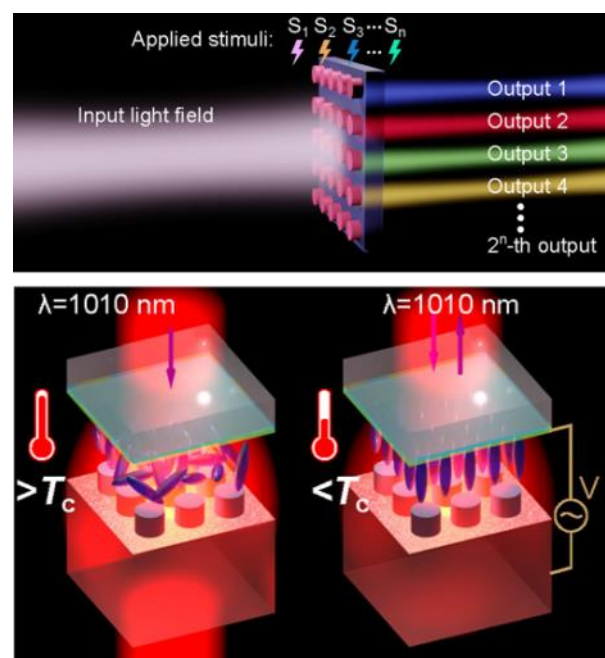


Abb. 3: Konzept einer multiresponsiven photonischen Nanostruktur: in Abhängigkeit von einem oder mehreren externen Stimuli kann die optische Antwort moduliert werden (oben). Implementierung des Konzepts durch Einbettung der Nanostruktur in Flüssigkristalle (unten).

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

Forschungsschwerpunkte

- Optische Eigenschaften von quanteneingeschlossenen Systemen: nichtlineare optische Spektroskopie von geschichteten Materialien (Graphen, TMDs), geschichteten Heterostrukturen und neu auftretenden Materialien wie Janus TMDs, geschichteten Magneten (CrSBr) und TMD Legierungen.
- Integrierte und hybride Devices: Kopplung von geschichteten Materialien mit photonischen Plattformen (Wellenleiter, Fasern), Metaoberflächen und anderen quanteneingeschlossenen Systemen (Nanodrähte, organische Moleküle).
- Nichtlineare optische Modulatoren: elektrisches und rein-optisches Regeln von Nichtlinearitäten in atomar dünnen Materialien.
- Nichtlineare Valleytronik und rein-optische Messung von gebrochener Zeitumkehr-Symmetrie.

Integrierte nichtlineare optische Devices und hybride Strukturen

Graphen und Übergangsmetall-Dichalcogenide (TMDs) haben den klaren Vorteil, leicht in photonische Plattformen integrierbar zu sein und zu hybriden Strukturen gefertigt werden zu können. Zusammen mit ihren elektronisch-einstellbaren optischen Eigenschaften bieten sie einen erfolgsversprechenden Weg hin zu technologisch fortgeschrittenen Devices. In meiner Gruppe werden verschiedene Arten von hybriden opto-elektronischen Devices hergestellt und untersucht, darunter Graphen und TMDs auf Fasern, Wellenleitern und Mikro-Resonatoren, wie auch hybride nieder-

dimensionale Systeme in denen geschichtete Materialien mit 1D Nanodrähten und 0D organischen Molekülen (Perylene Farbstoffe) zusammengebracht werden. In diesem Kontext haben wir jüngst folgendes untersucht und gezeigt:

(i) Deterministische Herstellung von hybriden Nanodraht-TMD-Strukturen mit kontrollierter räumlicher Überlappung und resultierender Einstellbarkeit der Lasingschwelle und Emissionswellenlänge (Moss-Burstein Effekt) eines ZnO Nanodrahtlasers durch Kopplung und Elektronentransfer zu einer MoS₂ Monolage [1];

(ii) Erzeugung von Plasmonen in opto-elektronischen Graphen-Devices (Abb. 1) basierend auf dem nichtlinearen Prozess der Differenzfrequenzbildung [2]. Diese können durch elektrostatisches Doping geregelt und nach spektraler Filterung zum Ausführen von Logikoperationen genutzt werden (AND, OR, NOR).

(iii) Integration von TMD Monolagen auf dielektrische Metaoberflächen für das Erhellern und räumliche Ausrichten von Spin-Verbotenen dunklen Excitonen [3].

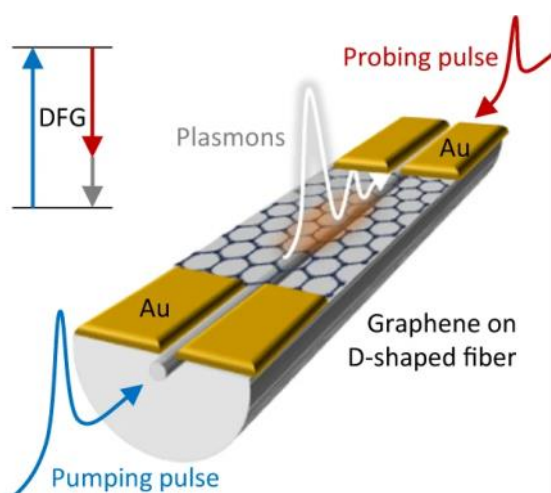


Abb. 1. Skizze eines integrierten photonischen Devices zur ultraschnellen Ausführung von Logikoperationen, basierend auf Graphen [2].

[1] E. Eobaldt *et al.* (2022): Tuning nanowire lasers via hybridization with two-dimensional materials. *Nanoscale*, 10.1039/D1NR07931J.

[2] Y. Li *et al.* (2022): Nonlinear co-generation of graphene plasmons for optoelectronic logic operations. *Nature Communications*, 10.1038/s41467-022-30901-8.

[3] S. Klimmer *et al.* (2022): Brightening and Directionality Control of Dark Excitons through Quasi-Bound States in the Continuum. *Nanomaterials*, 10.3390/nano13233028.

Gate-regelbare nichtlineare Optik und heiße Elektronen in Graphen

Heiße Elektronen, *i.e.* Ladungsträger fernab des thermodynamischen Gleichgewichts, spielen eine fundamentale Rolle in der Ausbildung der optischen und elektrischen Eigenschaften von Graphen (Abb. 2). Sie bieten eine mächtige Plattform für technologische photonische und optoelektronische Devices und Anwendungen wie ultraschnelle und breitbandige Photodetektoren, Lichtquellen und Frequenzwandler [4]. Zum Beispiel kann Lichtemission von heißen Elektronen in Graphen gezielt durch Integration auf einem photonischen Resonator, oder durch Einkapselung in hexagonales Bornitrid, was einen zusätzlichen Weg für ultraschnellen Wärmetransport aus der Ebene raus bietet, verändert werden [5]. Zusätzlich haben wir kürzlich gezeigt, dass die ultraschnelle Rekombinationsdynamik von heißen Elektronen in Graphen, welche letztendlich mit Stoßprozessen mit Phononen und Defekten verknüpft ist, durch elektrostatisches Doping, *d.h.* das Auffüllen des Phasenraums und dem Auslösen der optischen Phononenemission, stark beeinflusst werden kann [6].

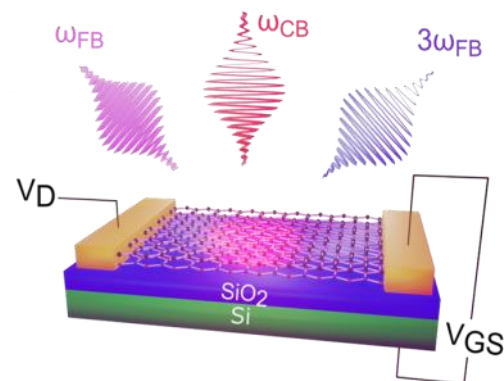


Abb. 2. Skizze von einem Graphen Feld-Effekt-Transistor, an dem die elektrischen und optischen Eigenschaften durch die Gate-Spannung und die Elektronentemperatur moduliert werden können.

[4] M. Massicotte *et al.* (2021): Hot carriers in graphene – fundamentals and applications. *Nanoscale*, 10.1039/D0NR09166A.

[5] L. Ghirardini *et al.* (2021): Tunable broadband light emission from graphene. *2D Materials*, 10.1088/2053-1583/abf08d.

[6] E. Pogna *et al.* (2022): Electrically Tunable Nonequilibrium Optical Response of Graphene. *ACS Nano*, 10.1021/acsnano.1c04937.

Nonlinear optics and valleytronics in atomically thin semiconductors

Geschichtete Materialien und verwandte Heterostrukturen haben auf dem Feld der nichtlinearen Optik dank ihrer großen nichtlinearen Suszeptibilität und der Einfachheit sie auf photonische Plattformen zu integrieren, ein enormes Potenzial [7]. Jüngst haben wir ultraschnelles Schalten der Polarisation und Modulation der Amplitude der zweiten Harmonischen (SH) in atomar dünnen Halbleitern gezeigt (Abb. 3a). Unser rein-optischer Ansatz erlaubt es, Modulationsgeschwindigkeiten von wenigen fs zu erzielen, Größenordnungen schneller als elektronische Devices [8]. Zusätzlich konnten wir kürzlich rein-optisches Anregen und Abfragen von gebrochener Zeitumkehr-Symmetrie und Valley-Ungleichgewicht in TMDs mit SH- Erzeugung zeigen [9] (Abb. 3b). Dies bietet einen mächtigen Ansatz zur Konzipierung von valleytronischen Devices.

[7] O. Dogadov *et al.* (2022): Parametric Nonlinear Optics with Layered Materials and Related Heterostructures. *Laser & Photonics Reviews*, 10.1002/lpor.202100726.

[8] S. Klimmer *et al.* (2021): All-optical polarization and amplitude modulation of second-harmonic generation in atomically thin semiconductors. *Nature Photonics*, 10.1038/s41566-021-00859-y.

[9] P. Herrmann *et al.* (2023): Nonlinear all-optical coherent generation and read-out of valleys in atomically thin semiconductors. *Small*, 10.1002/sml.202301126.

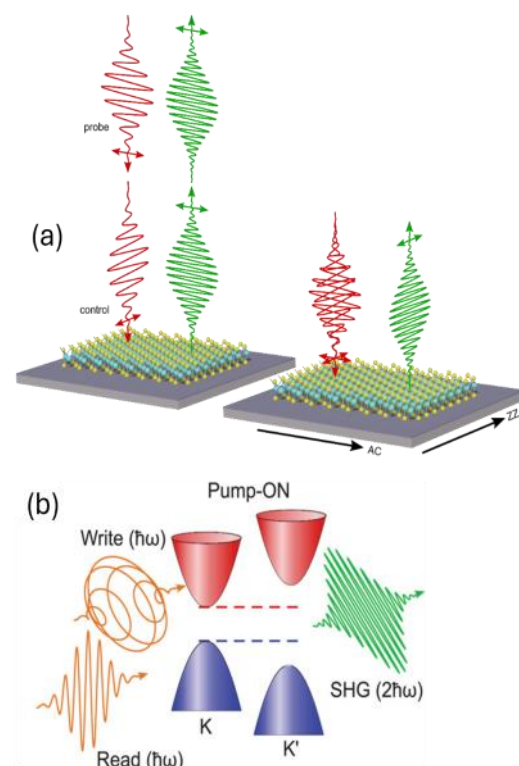


Abb. 3. (a) Operationsprinzip von rein-optischem SH Schalten der Polarisation [8].

(b) Schema für ultra-schnelles Anregen und Abfragen von Valleys in TMDs [9].

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 molekularer 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

Ein Reaktionsweg zu Peptiden im Weltraum

Kohlenstoffatome sollten in den Tieftemperaturregionen des interstellaren Mediums mit nahezu allen Molekülen in interstellaren Eisschichten auf kosmischen Staubpartikeln ohne Aktivierungsenergie reagieren. Deshalb sollte die Anreicherung von C-Atomen in den Eismänteln auf Staubkörnern zur Bildung einer Vielzahl an komplexen organischen sowie prebiotischen Molekülen führen. Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass die Reaktion von C-Atomen mit Kohlenmonoxid (CO) und Ammoniak (NH₃) in interstellaren Eisschichten zur Bildung von Aminoketonen NH₂CH=C=O Molekülen führt, die in einem zweiten Schritt polymerisieren und Peptide verschiedener Länge produzieren können. Die Experimente wurden in einer UHV Anlage durchgeführt, in der die vorherrschenden Bedingungen des interstellaren Mediums und protoplanetarer Scheiben simuliert werden können. Das heißt, dass die Experimente bei Temperaturen von 6 bis 200 K und Drücken von $\sim 10^{-11}$ mbar, durchgeführt wurden. Die Bildung von Aminoketonen Zwischenstufen wurde in situ über temperaturgesteuerte Desorption (TPD) und Analyse in einem Quadrupolmassenspektrometer nachgewiesen. Die Identifizierung der gebildeten Peptide erfolgte ex situ in einem Orbitrap Massenspektrometer kombiniert mit Tandem Massenspektrometrie (MS).

[1] S. A. Krasnokutski, K.-J. Chuang, C. Jäger, N. Ueberschaar, and Th. Henning (2022): *A pathway to peptides in space through the condensation of atomic carbon*, Nat Astron **6**, 381-386, 10.1038/s41550-021-01577-9

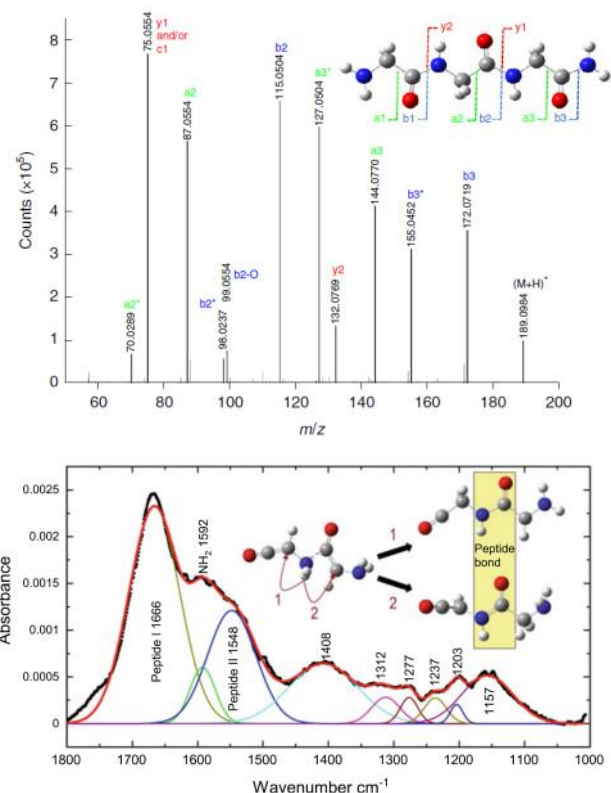


Abb. 1. Oben: Die C-Trap Dissoziation des 189.0983 u Ions. Der Graph zeigt die Peptidfragmente und ist damit ein zusätzlicher Beweis für die Identifizierung von Peptiden. Der Verlust eines NH₃ Moleküls ist mit einem Stern markiert. Unten: Das IR Spektrum zeigt das Peptidspektrum nach Aufheizen auf 300 K.

Bildung von Formamide und Derivaten in H₂O und CO-reichen interstellaren Eisanaloga unter VUV-Bestrahlung

Astronomische Beobachtungen des Moleküls Formamid, NH₂CHO, in Sternentstehungsgebieten und Kometen impliziert, dass dieses Molekül einen frühen Ursprung in dunklen Molekülwolken hat und bei sehr tiefen Temperaturen im interstellaren Eis gebildet werden kann. Kohlenmonoxid, Ammoniak NH₃ und H₂O sind Hauptkomponenten des Eises. Chemische Reaktionen in solchen CO:NH₃ bzw. CO:NH₃:H₂O Eismischungen können durch Lyman- α -Photonen getriggert werden. Unsere Laborexperimente zielten darauf ab, die Bildung von Formamid und anderen wichtigen prebiotischen Molekülen unter interstellaren Bedingungen zu untersuchen. Die Experimente wurden in der in unserem Labor entwickelten UHV Kammer durchgeführt. Die Bildung der Reaktionsprodukte bei 10 K konnten mittels Fourier-Transform Infrarotspektroskopie verfolgt werden. Der Nachweis der End- und Zwischenprodukte erfolgte durch TPD kombiniert mit MS. Die Kinetik der Bildung von Formamid wurde für verschiedene Eismischungen abgeleitet. Die höchsten Bildungsrate von NH₂CHO wurden in H₂O-reichen Eismischungen gefunden.

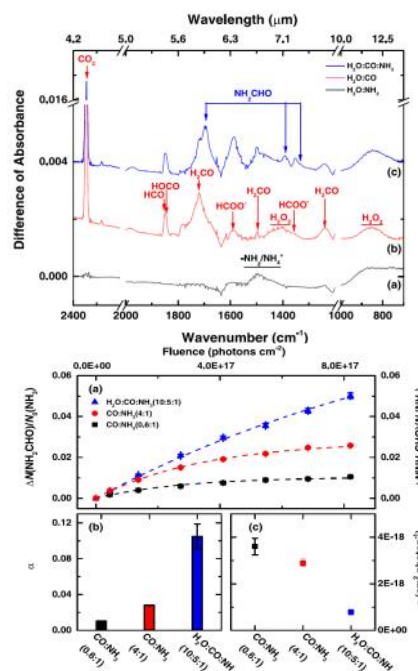


Abb. 2. Oben: IR-Differenzspektren vor und nach VUV-Bestrahlung von Eismischungen (a) H₂O:NH₃ (10:1), (b) H₂O:CO (1:1) und (c) H₂O:CO:NH₃ (10:5:1). Unten: Bildung von NH₂CHO und abgeleitete Werte für

[1] K.-J. Chuang, C. Jäger, S. A. Krasnokutski, D. Fulvio, and Th. Henning (2022): Formation of the simplest amide in molecular clouds: Formamide (NH₂CHO) and its derivatives in H₂O-rich and CO-rich interstellar ice analogs upon VUV irradiation, *Astrophys. J.* **933**, 107,10.3847/1538-4357/ac7320

Interstellare Astrochemie in Eisschichten auf kosmischen Staubkörnern

Das interstellare Medium enthält sehr kalte Staub/Eis Partikel. Die Eishüllen bestehen hauptsächlich aus Molekülen wie H₂O, CO, CO₂, NH₃, CH₃OH und O₂, die bei tiefen Temperaturen auf kosmischem Staub (Silikate oder Kohlenstoff), kondensieren. In den Eisschichten entstehen komplexe organische Moleküle. Das Eis kann aber auch zu Erosion oder Wachstum des Staubes führen. Die Bildung von kerogenartigem Kohlenstoff durch UV-Bestrahlung interstellarer Eismischungen auf Silikaten, konnte experimentell nachgewiesen werden. Die IR-Spektren der finalen Staubmaterialien sind denen extraterrestrischer Materialien sehr ähnlich [1]. In weiteren Experimenten wurde die Kinetik der Erosion von amorphen Kohlenstoffpartikeln, hergestellt über Laserablation, durch H₂O oder O₂ Eis untersucht. Die Proben wurden am National Synchrotron Center in Taiwan mit weichen Röntgenphotonen bis zu einer Fluenz von $8 \cdot 10^{18}$ ph cm⁻² bestrahlt, die dem Strahlungsniveau in protoplanetaren Scheiben entspricht. Erosionsraten sowie chemische Reaktionswege wurden bestimmt. Diese Daten sind relevant für astrophysikalische Modellierungen.

Induced by X-Ray Irradiation of Water Ice in Star-forming Regions, *ApJ* **956**, 57 10.3847/1538-4357/acf31e

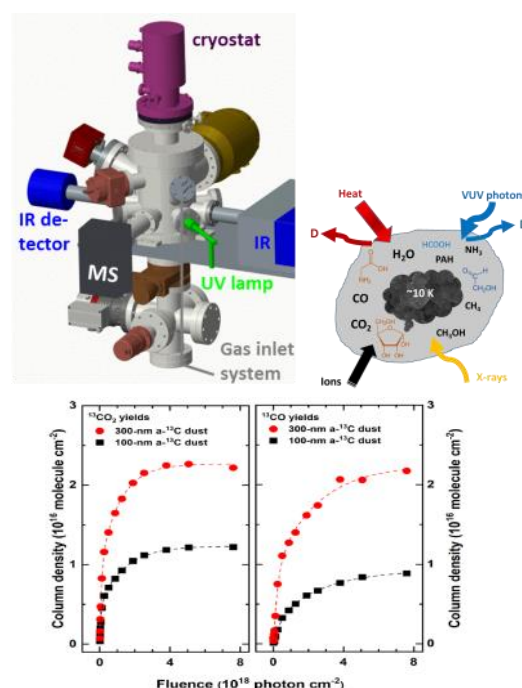


Abb. 3. oben: UHV Experiment zur Untersuchung von molekularem Eis auf kosmischen Staubpartikeln. Unten: ¹³CO₂ und ¹³CO Bildung an der Grenzfläche O₂-Eis und ¹³C-Partikel unter X-Ray Bestrahlung für zwei verschiedene Dicken von Kohlenstoff. Die gestrichelten Linien zeigen die Fitresultate.

[1] A. Potapov, M. E. Palumbo, Z. Dionnet, A. Longobardo, C. Jäger, G. Baratta, A. Rotundi, Th. Henning (2022): Exploring refractory organics in extraterrestrial particles, *Astrophys. J.* **935**, 158, 10.3847/1538-4357/ac7f32

[2] K.-J. Chuang, C. Jäger, N.-E. Sie, C.-H. Huang, C.-Y. Lee, Y.-Y. Hsu, Th. Henning, Y.-J. Chen (2023): Interstellar Carbonaceous Dust Erosion

Professur für Innovative Nanostrukturen Prof. Dr. Andrey Turchanin

Forschungsschwerpunkte

- Maßgeschneiderte Synthese von neuartigen zweidimensionalen (2D) Materialien: organische Monolagen und Dünnschichten, Graphen, Kohlenstoffnanomembranen, Übergangsmetall-Dichalkogenide, laterale Heterostrukturen, van-der-Waals-Heterostrukturen, biofunktionale Ober- und Grenzflächen
- Spektroskopische und mikroskopische Charakterisierung von organischen und anorganischen 2D-Materialien bis in den Nanometerbereich zur Untersuchung ihrer Wachstumsmechanismen sowie ihrer elektronischen, optischen und optoelektronischen Eigenschaften und ihrer Biokompatibilität
- Verwendung von 2D-Funktionsmaterialien in neuartigen Bauteilen: Sensoren für die hochspezifische und hochsensitive Detektion von Biomarkern, neuartige photonische, elektronische und optoelektronische Bauteile, biofunktionale Nanomembranen für die hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie von Proteinen und ihrer Trennung, Nanomembranen für die künstliche Photosynthese, Nanomembranen für Anwendungen in Energiespeicherung und Wasserstofftechnologien

Elektronenstrahl-induzierte Synthese von photoaktiven molekularen 2D-Materialien

Die elektronenstrahl-induzierte Synthese von molekularen zweidimensionalen (2D) Materialien ist eine flexible physikalische Methode zur Herstellung von funktionalen Nanomaterialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften. Basierend auf komplementären spektroskopischen und mikroskopischen Techniken untersuchen wir die elektronen-induzierten Reaktionsmechanismen in organischen Monolagen bis in den Nanometerbereich [1]. Da die verwendeten Elektronen in der Regel eine Energie im Bereich von 10 bis 100 eV haben, können durch sie nahezu beliebig chemische Bindungen aktiviert und dadurch Reaktionen induziert werden, welche mit den traditionellen Methoden der chemische Synthese sehr schwierig oder überhaupt nicht realisierbar sind. Wir setzen diese Methode für die großflächige Synthese

von molekularen kohlenstoffbasierten Nanoblättern mit nur 1 nm Dicke. Im Rahmen des TRR 234 „CataLight“ entwickeln wir ein neues Verfahren zur Herstellung photoaktiver 2D-Materialien für die Wasserspaltung und Wasserstoffherzeugung [2, 3].

- [1] Neumann C., Wilhelm R. A., Küllmer M., Turchanin A. (2021): Low-energy electron irradiation induced synthesis of molecular nanosheets: An influence of the electron beam energy. *Faraday Discuss.*, DOI: 10.1039/C9FD00119K.
- [2] Tang Z., Winter A., Dietzek B., Schubert U. S., Turchanin A., et al. (2021): Photoactive ultrathin molecular nanosheets with reversibly lanthanide binding terpyridine centers. *Nanoscale*, DOI: 10.1039/D1NR05430A.
- [3] Küllmer M., Herrmann-Westendorf F., Schubert U. S., Dietzek B., Turchanin A. (2022): Molecular photosensitizer nanosheets via low-energy electron beam induced conversion of self-assembled Ru(II) polypyridine complexes. *Angew. Chem. Int. Ed.*, DOI: 10.1002/anie.202204953

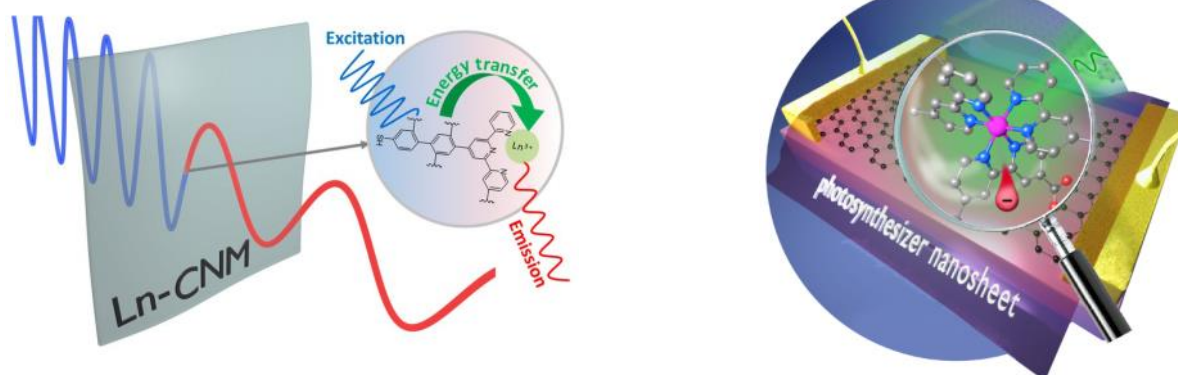


Abb. 1. Elektronenstrahl-induzierte Synthese von photoaktiven Kohlenstoffnanomembranen mit ~1 nm Schichtdicke (AG Turchanin).

Nanoporöse 2D-Kohlenstoffnanomembranen für Anwendungen in Li-Batterien und Nanofiltration

Molekulare 2D-Kohlenstoffnanomembranen, die durch elektronenstrahl-induzierte Synthese hergestellt wurden, sind nanoporös und durchlässig für Li-Ionen. Durch die Funktionalisierung von konventionell in Li-Metall-Batterien verwendeten Celgard-Separator-Membranen wird der Ionenfluss reguliert und so die Bildung von Li-Dendriten verhindert [4, 5]. Dies resultiert in einer erhöhten Lebensdauer. Darüber hinaus agieren diese 1 nm Dicke Nanomembranen als hochselektive und energieeffiziente Barrieren für Nanofiltration von H_2O , H_2 , O_2 und CO_2 [6].

[4] Rajendran S., Turchanin A., Arava L. M. R., et al. (2021): Inhibition of lithium dendrite formation in lithium metal batteries via regulated cation transport through ultrathin sub-nanometer porous carbon nanomembranes. *Adv. Energy Mater.*, DOI: 10.1002/aenm.202100666.

[5] Rajendran S., Turchanin A., Arava L. M. R., et al. (2023): Regulating Li-ion Transport through ultrathin molecular membrane to enable high-performance all-solid-state-battery. *Small*, DOI: 10.1002/sml.202303625.

[6] Stroganov V., Turchanin A. et al. (2023), Gas transport mechanisms through molecularly thin membranes. *Small*, DOI: 10.1002/sml.202300282

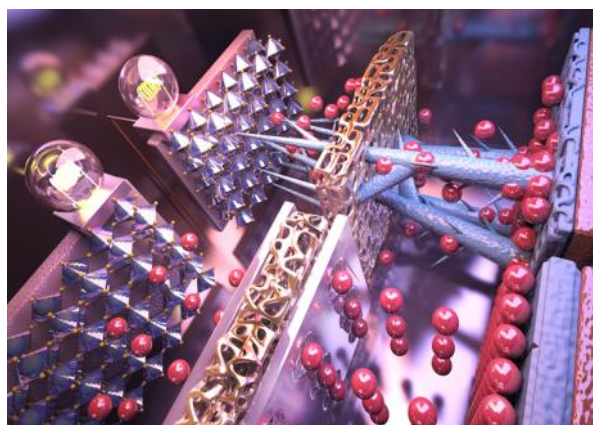


Abb. 2. Die Funktionalisierung des Separators in Li-Metall-Batterien mit Kohlenstoffnanomembranen verhindert die Dendritenbildung und erhöht die Lebensdauer signifikant [4].

Maßgeschneiderte Herstellung von Halbleiter 2D-Materialien für Photonik und Optoelektronik

In der Arbeitsgruppe wurden mehrere Methoden zur maßgeschneiderten Synthese von 2D-Übergangsmetall-Dichalkogenid-Monolagen (MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2 , etc.) und ihrer Heterostrukturen mittels Gasphasenabscheidung (CVD) entwickelt und hinsichtlich ihrer strukturellen, elektronischen und optischen Eigenschaften optimiert [7-9]. Diese hochqualitativen Monolagen dienen in einer Vielzahl von Projekten als Basis für die Untersuchung von neuen photonischen und optoelektronischen Phänomenen (u.a. in Graphene Flagship, SFB1375 „NOA“).

[7] Ngo G. Q., Peschel U., Turchanin A., Eilenberger F. et al., In-fiber second-harmonic generation with embedded two-dimensional materials. (2022): *Nat. Photonics*, DOI: 10.1038/s41566-022-01067-y.

[8] Gan Z., Urbaszek B., Turchanin A. et al., Chemical vapor deposition of high-optical quality large-area monolayer Janus transition metal dichalcogenides. (2022): *Adv. Mater.* DOI: 10.1002/adma.202205226.

[9] Rosati R., Turchanin A., Urbaszek B., Malic E. et al., Interface engineering of charge-transfer excitons in 2D lateral heterostructures. (2023): *Nat. Commun.* DOI: 10.1038/s41467-023-37889-9.

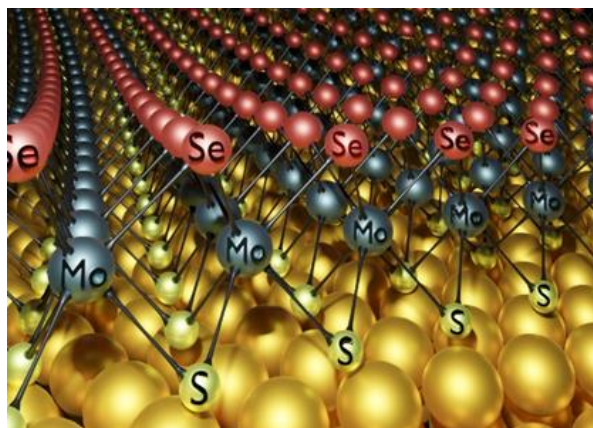


Abb. 3. Janus SeMoS Monolage, die durch die CVD auf Au-Substrat hergestellt wurde [8]. Dieses neue 2D-Material zeichnet sich durch Vielzahl von einzigartigen photonischen und elektronischen Eigenschaften aus.

Integration von 2D-Materialien in Bauelementen

Die in der Arbeitsgruppe hergestellten maßgeschneiderten 2D-Materialien werden in verschiedensten neuartigen photonischen und elektronischen Bauelementen sowie in Sensoren verwendet [10-12].

[10] Kalkan S. B., Najafidehaghani, George A., Turchanin A. et al., High-performance monolayer MoS_2 field-effect transistors on cyclic olefin copolymer-passivated SiO_2 gate dielectric. (2023): *Adv. Optical Mater.* DOI: 10.1002/adom.202201653

[11] H. R. Rasouli H.R., D. Kaiser D., C. Neumann C., Turchanin A. et al., Critical point drying of graphene field-effect transistors improves their electric transport characteristics. (2023): *Small Methods*, DOI: 10.1002/smt.202300288.

[12] Hoque A. Md., George A., Turchanin A., Dash S. P. et al., Spin-valley coupling and spin-relaxation anisotropy in all-CVD Graphene- MoS_2 van der Waals heterostructure. (2023): *Phys. Rev. Mater.*, DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.7.044005.

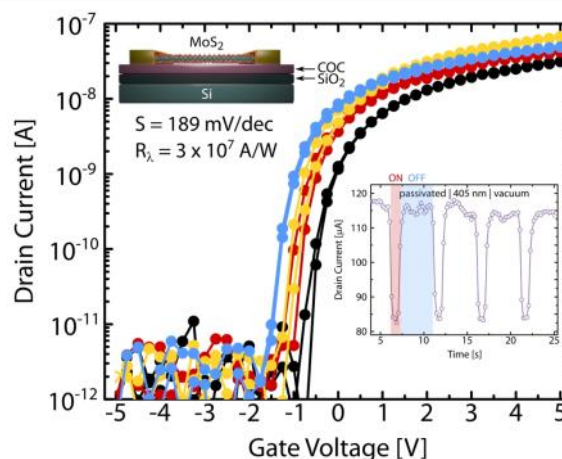


Abb. 4. MoS_2 feldeffektbasierter Photodetektor mit Rekordwerten von Photoresponsivität [10].

Institut für Festkörpertheorie und -optik (IFT0)



Institutsdirektor: Prof. Dr. Ulf Peschel

Professur für Theoretische Physik/Festkörperphysik

Prof. Dr. Silvana Botti (bis 3/2023)

Professur für Theoretische Physik/Festkörperoptik

Prof. Dr. Ulf Peschel

Professur für Theorie der Quanteninformation

Prof. Dr. Martin Gärttner (seit 9/2023)

Professur für Materialinformatik

Prof. Dr. Janine George (an Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, seit 9/2023)

Adresse: Fröbelstieg 1 (Abbeanum), 07743 Jena

Homepage: www.ifto.uni-jena.de

Professur für Theoretische Physik / Festkörperphysik

Prof. Dr. Silvana Botti

Forschungsschwerpunkte

Der Lehrstuhl für "Theoretische Festkörperphysik" arbeitet eng mit experimentellen Gruppen an innovativen Themen der Physik kondensierter Materie und der Optoelektronik zusammen. Die Gruppe entwickelt datengetriebene Methoden unter Verwendung von maschinellem Lernen für das Materialdesign und stützt sich dabei auf eine eigene große Datenbank mit Dichtefunktionaltheorieberechnungen. Die Forschungsschwerpunkte von Prof. Botti liegen derzeit auf der rechnergestützten Entwicklung von funktionalen Grenzflächen und der Optimierung der Dotierung und Legierung von Materialien für Anwendungen im Bereich der Energieerzeugung, -speicherung und -einsparung.

Forschungsprojekt 1: Design von funktionalen Grenzflächen für Energieanwendungen

Die Entwicklung theoretischer und rechnerischer Methoden zum Verständnis und zur Kontrolle elektronischer Anregungen an funktionalen Grenzflächen ist entscheidend für den technologischen Fortschritt und die Optimierung der Funktionalität elektronischer Geräte. Die Beherrschung der komplizierten Physik von Grenzflächen stellt jedoch nach wie vor eine große Herausforderung dar, sowohl in experimenteller als auch in theoretischer Hinsicht. Was die Theorie betrifft, so können moderne Methoden, die sich auf die Dichtefunktionaltheorie (DFT) stützen, entweder unzuverlässig oder zu rechenintensiv sein, um die elektronischen Bandstrukturen komplexer Grenzflächen in Bauelementen zu bewerten. Wir haben unser Meta-GGA-Dichtefunktional für Grenzflächen validiert, indem wir es auf eine Vielzahl von zweidimensionalen Strukturen angewendet haben [1-3]. Als Beispiel zeigen wir in Abb.1 die Untersuchung der Eignung einer epitaktischen Schicht aus Strontiumgermanat (SGO) auf einer Silizium (Si)-Oberfläche mit (100)-Orientierung als Photokathode [4]. Die photokatalytische Wasserspaltung ist eine vielversprechende Strategie für die Erzeugung sauberer Energie in großem Maßstab. Unsere Berechnungen bestätigen eine Typ-III-Banddiskontinuität von Energieniveaus an der Grenzfläche (siehe Abb. 1b). Wir beobachten, dass die Redoxpotentiale innerhalb der lokalen Bandlücke von SGO und unterhalb der Fermi-Energie der Superzelle liegen. Es ist daher zu erwarten, dass photogenerierte Elektronen aus dem Si-Bulk, die die SGO-bedeckte Oberfläche erreichen, die Grenzfläche durchqueren und an der Wasserreduktion teilnehmen. Wir kommen zu dem Schluss, dass die dünne SGO-Schicht mit einem teilweise besetzten untersten Leitungsband in diesem System als metallische Elektrode fungieren würde.

In Zusammenarbeit mit experimentellen Partnern arbeiten wir derzeit an mehreren Projekten, die umfangreiche Berechnungen für verschiedene Arten von Grenzflächen beinhalten. Um den Wert dieser Bemühungen zu maximieren, fassen wir die daraus resultierenden nützlichen Daten in einer frei zugänglichen Materialdatenbank zusammen, dem NOMAD Lab, das vom FAIRmat NFDI-Konsortium entwickelt wurde. In naher Zukunft wollen wir die künstliche Intelligenz nutzen, um diese Daten sorgfältig zu analysieren und kritische Muster zu extrahieren. Diese Analyse wird uns in die Lage versetzen, Vorhersagemodelle für die Gestaltung von Grenzflächen zu erstellen, die bei der Identifizierung wesentlicher struktureller und chemischer Merkmale für spezifische Funktionalitäten an der Grenzfläche helfen.

Die Forschungslinie zu Schnittstellen wird durch das Projekt "Dandelion - Developing an e-lab for interfaces on demand" im Rahmen des Programms "Momentum - Förderung für neuberufene Professoren" der VolkswagenStiftung (2019-2025) gefördert.

- [1] T. Rauch, M.A.L. Marques, and S. Botti (2021), "Electronic structure of molecules, surfaces, and molecules on surfaces with the local modified Becke-Johnson exchange-correlation potential", *J. Chem. Theor. Comput.*, <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.1c00255>
- [2] T. Rauch, F. Munoz, M.A.L. Marques, and S. Botti (2021), "Defect levels from SCAN and MBJ meta-GGA exchange-correlation potentials", *Phys. Rev. B*, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.064105>
- [3] A. Ghosh, S. Jana, T. Rauch, F. Tran, M.A.L. Marques, S. Botti, L.A. Constantin, M.K. Niranjan, and P. Samal (2022), "Efficient and improved prediction of the band offsets at semiconductor heterojunctions from meta-GGA density functionals: a benchmark study", *J. Chem. Phys.*, <https://doi.org/10.1063/5.0111693>
- [4] T. Rauch, P. Marton, S. Botti, and J. Hlinka (2023), "Band alignment at the strontium germanate interface with silicon", *Phys. Rev. B*, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.107.115303>

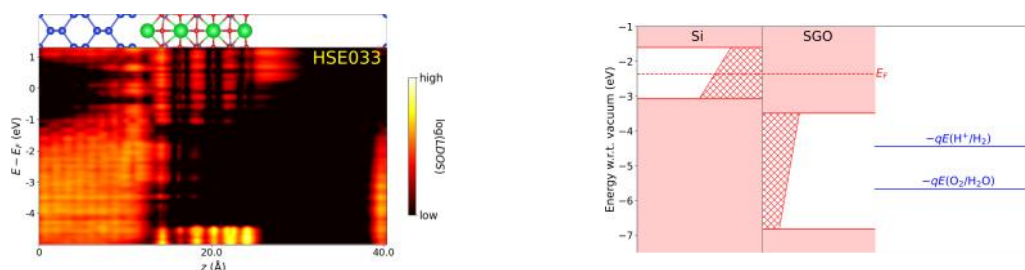


Abb. 1. (a) Atomare Struktur und lokale Dichte der elektronischen Zustände von SGO auf einem Si-Substrat, berechnet mit einem modifizierten Hybrid-Dichtefunktional. (b) Schematische Darstellung der Bandkanten des SGO/Si-Systems, extrahiert aus der lokalen Zustandsdichte von (a), aufgetragen zusammen mit den Redoxpotentialen der Wasserspaltungsreaktionen. Aus Ref. [4].

Forschungsprojekt 2: KI-beschleunigtes datengesteuertes computergestütztes Materialdesign

Wir haben Pionierarbeit bei der Anwendung von Techniken des maschinellen Lernens in Kombination mit großen Materialdatenbanken geleistet, um die Entdeckung neuer stabiler Materialien zu beschleunigen und verbesserte elektronische Eigenschaften vorherzusagen [5-9]. Wir haben selbst mit unseren Partnern eine große Materialdatenbank mit Berechnungen der Dichtefunktionaltheorie aufgebaut. Neuronale Graphennetze für Kristallstrukturen verwenden in der Regel die Atompositionen und die Atomspezies als Eingabe. Leider stehen diese Informationen nicht zur Verfügung, wenn neue Materialien vorhergesagt werden sollen, für die die genauen geometrischen Informationen unbekannt sind. Wir haben dieses Problem umgangen, indem wir die genauen Bindungsabstände durch "Embeddings" von Graphenabständen ersetzt haben [6]. Dadurch können unsere neuronalen Netze direkt in High-throughput-Studien eingesetzt werden, die sowohl auf der Zusammensetzung als auch auf dem Kristallstrukturprototyp basieren, ohne optimierte Strukturen als Eingabe zu verwenden. Um diese Netze zu trainieren, haben wir einen Datensatz kuratiert, der mittlerweile über 3 Millionen Dichtefunktionsberechnungen von Kristallen mit konsistenten Berechnungsparametern enthält. Wir haben bewiesen, dass starke Verzerrungen durch die Inhomogenität der Trainingsdaten verursacht werden können [8]. Wir haben daher unseren Datensatz verbessert, um ein besseres

Gleichgewicht zwischen dem chemischen und dem Kristallsymmetrie-Raum zu schaffen.

Das auf diesem Datensatz trainierte neuronale Netz für Kristallgraphen zeigte eine noch nie dagewesene Parametergenauigkeit.

Wir haben dann das neuronale Netz eingesetzt, um mit Hilfe des maschinellen Lernens eine High-throughput-Suche nach stabilen Materialien durchzuführen, die 1 Milliarde Kandidaten umfasst. Auf diese Weise konnte die Anzahl der Eckpunkte des universellen Phasendiagramms um 30% erhöht werden. Wir finden mehr als $\approx 150\,000$ neue Verbindungen mit einem Abstand zur konvexen Hülle der Stabilität von weniger als 50 meV per Atom. Die entdeckten Materialien werden auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht, wobei Verbindungen mit extremen Werten einiger Eigenschaften wie Supraleitung, Superhärte und Riesenlücken-Verformungspotenziale identifiziert werden [7-9].

[5] H.-C. Wang, S. Botti, and M.A.L. Marques (2021), "Finding new crystalline compounds using chemical similarity", npj Computational Materials, <https://doi.org/10.1038/s41524-020-00481-6>

[6] J. Schmidt, L. Pettersson, C. Verdozzi, S. Botti, and M.A.L. Marques (2021), "Crystal-graph attention networks for the prediction of stable materials", Sci. Adv., DOI: 10.1126/sciadv.abi7948

[7] P. Borlido, J. Schmidt, H.-C. Wang, S. Botti, and M.A.L. Marques (2022), "Computational screening of materials with extreme gap deformation potentials", npj Comput. Mater., <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00811-w>

[8] J. Schmidt, N. Hoffmann, H.-C. Wang, P. Borlido, P.J.M.A. Carriço, T.F.T. Cerqueira, S. Botti, and M.A.L. Marques (2023), "Machine-Learning-Assisted Determination of the Global Zero-Temperature Phase Diagram of Materials", Adv. Mater., <https://doi.org/10.1002/adma.202210788>

[9] N. Hoffmann, J. Schmidt, S. Botti, and M.A.L. Marques (2023), "Transfer learning on large datasets for the accurate prediction of material properties", <https://doi.org/10.1039/D3DD00030C>

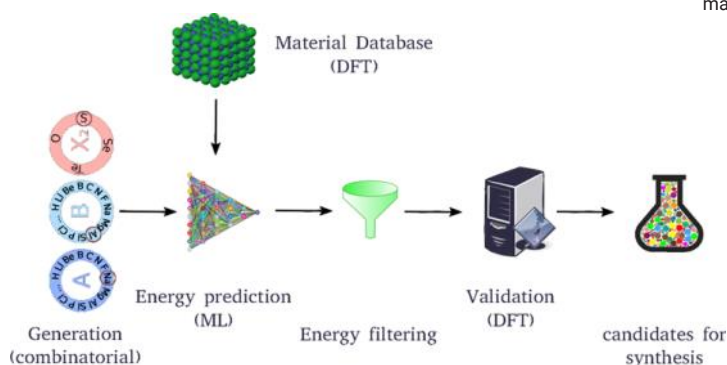


Abb. 2. Arbeitsablauf für ML-unterstütztes datengesteuertes Materialdesign

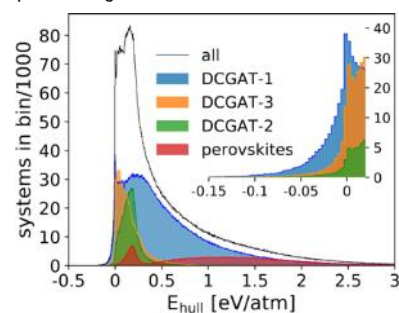


Abb. 3. Entwicklung der Datenbank-einträge: DCGAT-1 aus Ref. [6], DCGAT-2 und DCGAT-3 aus Ref. [8].

Professur für Theoretische Physik / Festkörperoptik

Prof. Dr. Ulf Peschel

Forschungsschwerpunkte

- Schwerpunkt 1: Theoretische Analyse und numerische Simulation von Feldausbreitung und Licht-Materie, besonders im Rahmen des SFB 1375 Nonlinear Optics down to Atomic Scales (NOA), dessen Sprecher Prof. Ulf Peschel bis Juni 2023 war.
- Schwerpunkt 2: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation von Licht in optischen Systemen: Modulationsinstabilitäten und optische Solitonen; Dynamik von Exziton-Polariton-Quasiteilchen in hochresonanten Halbleiterkavitäten
- Schwerpunkt 3: Nichtlineare Licht-Materie-Wechselwirkung in angeregten Halbleitern, zweidimensionalen Materialien, metallischen Kompositen und Nanostrukturen: Berechnung effektiver optischer Nichtlinearitäten und der Generation hoher Harmonischer mit Halbleiter-Maxwell-Bloch-Gleichungen und Tight-Binding Ansätzen.
- Schwerpunkt 4: Lineare, nichtlineare und quantenoptische Effekte in Photonischen Gittern: Zeitabhängige effektive Potentiale, Superfluidität und Thermalisierung von Licht und Ausbreitung korrelierter Photonen

Forschungsprojekt 1: Thermische Prozesse in Lichtfeldern

Mit steigender Dichte übertragener optischer Signale steigt deren Wechselwirkung, was zu Datenverlust führt, aber auch eine universelle Dynamik induziert, was in entsprechenden Experimente in zwei gekoppelten, leicht unterschiedlich langen Faserschleifen untersucht wurde. In das so gebildete photonische Gitter wurde ein Ensemble optischer Pulse injiziert die sich schon nach etwa hundert Kilometern Ausbreitung durch die Glasfaser zu organisieren begannen, wobei sie den Gesetzen der Thermodynamik gehorchten. Obwohl sich alle Pulse in etwa gemeinsam durch die Faser bewegen, fluktuieren ihre Geschwindigkeiten mit einer Verteilung, der eine effektive Temperatur zugeordnet werden kann. Wie wir erstmalig nachweisen konnten, kann man dieses Photonengas durch adiabatische Expansion abkühlen und dabei die Geschwindigkeitsunterschiede der Pulse verkleinern, wodurch die Ordnung in der Signalfolge zunimmt.

Bei dem umgekehrten Prozess einer Erhitzung wachsen die Geschwindigkeitsunterschiede bis die Unordnung maximal und die Temperatur unendlich wird – ein Zustand, der in realen Gasen nicht erreicht werden kann. Im Gegensatz dazu ist im untersuchten System der Bereich möglicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten beschränkt, so dass alle verfügbaren Geschwindigkeiten gleich besetzt werden können, was einer unendlichen Temperatur entspricht. Wird noch mehr Energie zugeführt, werden Zustände hoher Geschwindigkeit präferiert und die Ordnung nimmt wieder zu. Das Photonengas wird heißer als unendlich heiß, was formal einer negativen Temperatur entspricht, ein Zustand, den wir erstmalig experimentell demonstrieren konnten.

A. L. Marques Muniz, F. O. Wu, P. S. Jung, M. Khajavikhan, D. N. Christodoulides, U. Peschel (2023), „Observation of photon-photon thermodynamic processes under negative optical temperature conditions,” Science, DOI: 10.1126/science.ade6523

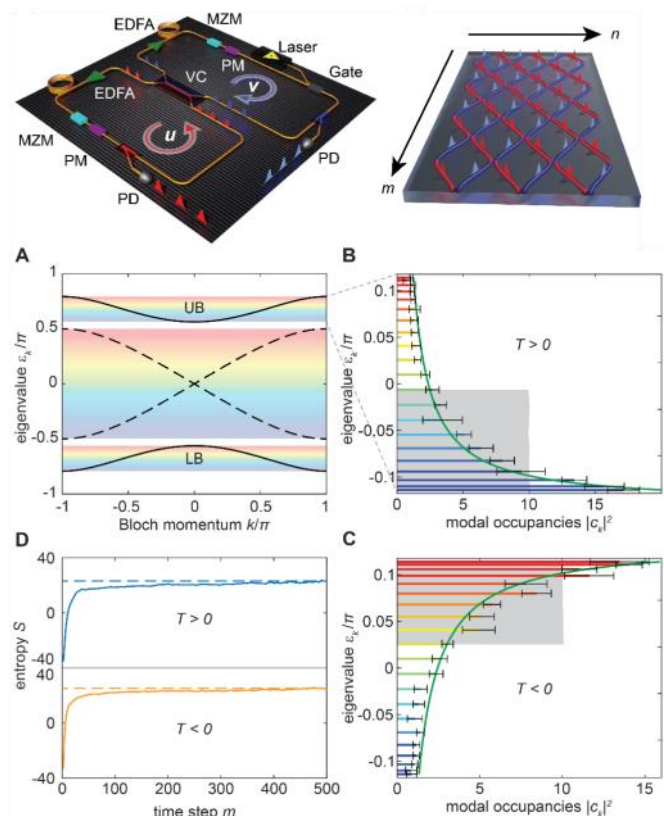


Abb.1: Die Experimente wurden in zwei gekoppelten Faserschleifen (oben links), die ein photonisches Gitter für die Pulsausbreitung generieren (oben rechts) durchgeführt. Die Besetzung der Energiezustände des Gitters (A) thermalisiert schnell (D), was zu positiven (B) und negativen (C) Temperaturen führen kann.

Forschungsprojekt 2: Generation von höheren Harmonischen in Halbleiternanostrukturen

Während die Generation Höherer Harmonischer in Volumenhalbleitern gut modelliert werden kann, fehlte bisher eine Beschreibung dieses Phänomens in Nanostrukturen, die sowohl die Halbleitereigenschaften konsistent berücksichtigt als auch zu numerisch handhabbaren Lösungsverfahren führt. Basierend auf einem Tight-Binding-Ansatz konnten wir die aus Bandstrukturrechnungen bekannten Halbleiterparameter auf eine raumabhängige Beschreibung übertragen und so die optische Response von Quantumdots effizient modellieren. Im Besonderen gelang es uns, das experimentell beobachtete Verschwinden der Generation von Höheren Harmonischen bei kleinen Dot-Radien zu modellieren und auf durch die Oberfläche induzierte Dephasierungseffekte zurückzuführen.

U. Peschel, M. Thümmeler, T. Lettau, S. Gräfe, and K. Busch (2022), "Two-particle tight-binding description of higher-harmonic generation in semiconductor nanostructures," Phys. Rev., <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.245307>

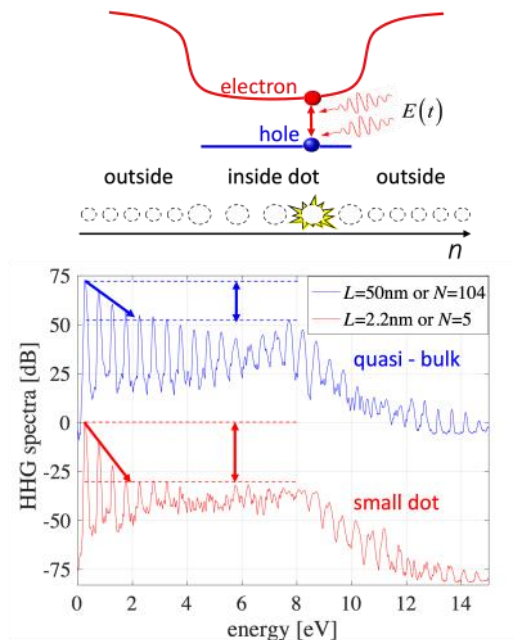


Abb.2 Bei der Modellierung der Halbleiternanostrukturen wird sowohl die Generation von Elektronen und Löchern, als auch ein feldinduziertes Austreten von Elektronen aus dem Halbleiter berücksichtigt. Die Generation Höherer Harmonischer (HHG) in Dots ist auf die Atomzahl bezogen gegenüber dem Volumenmaterial deutlich abgeschwächt.

Forschungsprojekt 2: Elektromagnetische Modellierung Nanophotonischer Strukturen

Die numerische Modellierung der Ausbreitung von Licht in nanophotonischen Strukturen spielt am Lehrstuhl eine wichtige Rolle. Wir simulieren z.B. die Einkopplung, Führung und resonante Überhöhung von Licht in nanostrukturierten Wellenleitern und Gittern und dessen Wechselwirkung mit zweidimensionalen Halbleitermaterialien.

Verwendet wird dazu eine Vielzahl numerischer Algorithmen, wie auf dem Finite Difference Time Domain (FDTD) Verfahren oder der Beam Propagati-

on Method (BPM) beruhende Ausbreitungscode oder unterschiedlichste Eigenmodenlöser in selbstgeschriebenen, frei verfügbaren oder kommerziellen Softwarepaketen. Ziel ist neben der Überprüfung theoretischer Voraussagen die enge Zusammenarbeit mit dem Experiment.

S. Khazaei and U. Peschel (2024), "Enhanced second harmonic generation by an atomically thin MoS₂ sheet attached to a resonant metasurface", Optics Express, <https://doi.org/10.1364/OE.506357>

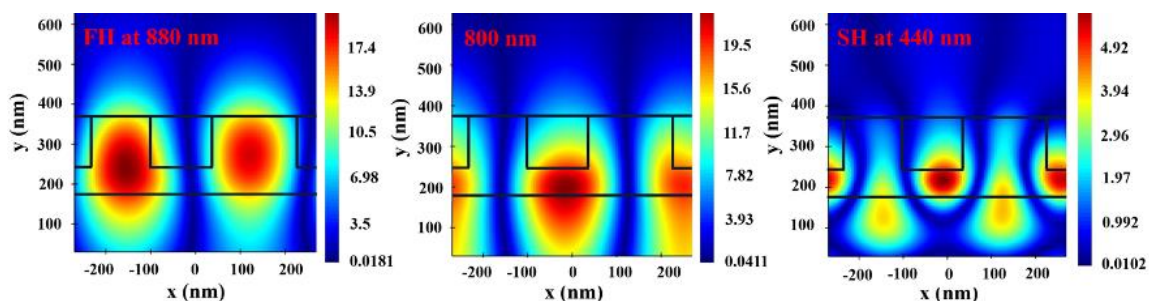


Abb.3 Resonanzen in einer Gitterstruktur, auf der ein zweidimensionaler Halbleiter aufliegt. Die Struktur ist sowohl bei der Wellenlänge 880nm (a) als auch bei 440nm (c) resonant, was die Erzeugung einer zweiten Harmonischen auf das 4600fache verstärkt.

Professur für Theorie der Quanteninformation

Prof. Dr. Martin Gärtner

Forschungsschwerpunkte

- Charakterisierung von Quantenzuständen: Detektion von Verschränkung in kontinuierlichen Quantensystemen, Extraktion von Verschränkungszeugen aus messbaren Phasenraumverteilungen, Detektion hochdimensionaler Verschränkung, Adaptive Zustandstomographie und Entwicklung von Methoden zur Mitigation von Auslesefehlern
- Variationsmethoden für Vielteilchen-Quantensysteme: Entwicklung von Variationsätzen auf Basis neuronaler Netze, Anwendung auf Simulation von offenen Quantensystemen, Grundzustandssuche in 2D-Quantenspinsystemen, Dynamik von dissipativen klassischen Systemen (Fokker-Planck Gleichung)
- Nichtgleichgewichtsdynamik stark korrelierter Quantensysteme: Untersuchung von Lokalisierungseffekten in abgeschlossenen Quantensystemen, Numerische Simulationen von Vielteilchen Quantenspinsystemen, Entwicklung von semiklassischen Simulationsmethoden und effektiven Modellen, Zusammenarbeit mit Experimenten zu stark wechselwirkenden Ensembles von Rydbergatomen

Forschungsprojekt 1: Nachweis von Verschränkung in Quantensystemen kontinuierlicher Variablen

Verschränkung ist eine Eigenschaft von Quantensystemen, die es in der klassischen Mechanik nicht gibt und die Quantentechnologien wie Quantencomputer und Quantensensoren nutzen um einen Quantenvorteil zu erlangen. Der experimentelle Nachweis von Verschränkung, insbesondere in Systemen kontinuierlicher Variablen ist schwierig, da präzise Messungen in verschiedenen Basen nötig sind.

In diesem Forschungsprojekt geht es um die Frage wie Verschränkung auf Basis von messbaren Phasenraumverteilungen effizient nachgewiesen werden kann. Insbesondere fokussieren wir uns hier auf die sogenannte Husimi-Q-Verteilung,

die unter allen Phasenraumverteilungen am direktesten messbar ist. Wir nutzen entropische Unschärferelationen um in Systemen von zwei bosonischen Moden Kriterien zum Nachweis von Verschränkung herzuleiten. Motiviert durch die mögliche Anwendung dieser Kriterien auf ultrakalte Quantengase wurde in ein solches Kriterium aufgestellt und hinsichtlich seiner Eignung für Verschränkungsdetektion in Spinor Bose-Einstein Kondensate untersucht [1]. In [2] und [3] wurde dieses Kriterium deutlich verallgemeinert, was es extrem flexibel und vielseitig macht. Für Gaußsche Zustände wurde die Optimalität des Kriteriums gezeigt (siehe Abb. 1). Außerdem konnten wir zeigen, dass das Kriterium in experimentell realistischen Szenarien mit endlicher Detektorauflösung und endlicher Messstatistik anwendbar ist und gewisse Vorteile bringt. Experimente mit kalten Atome, die unser Kriterium verwenden, werden derzeit durchgeführt. In Jena sollen solche Kriterien für den Nachweis von Verschränkung in photonischen Systemen angewendet werden.

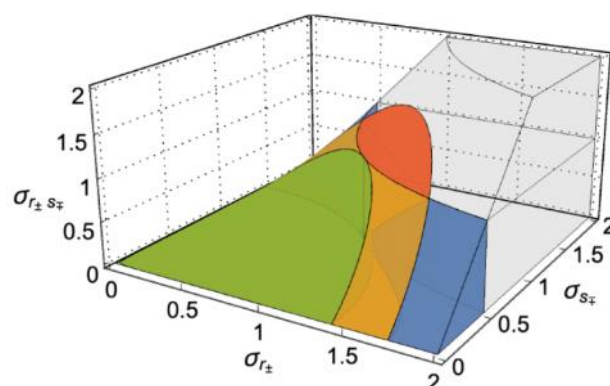


Abb. 1. Verschränkte Gaußsche Zweimoden-Zustände. Im blauen Bereich wird Verschränkung nur durch unser Kriterium detektiert. Quelle: AG Gärtner

[1] S. Floerchinger, M. Gärtner, T. Haas, O. Stockdale, „Entropic entanglement criteria in phase space“, Phys. Rev. A 105, 012409 (2022)

[2] M. Gärtner, T. Haas, J. Noll, „General Class of Continuous Variable Entanglement Criteria“, Phys. Rev. Lett. 131, 150201 (2023).

[3] M. Gärtner, T. Haas, J. Noll, „Detecting continuous-variable entanglement in phase space with the Q-distribution“, Phys. Rev. A 108, 042410 (2023)

Forschungsprojekt 2: Detektion hochdimensionaler Verschränkung

Atome verfügen über eine Vielzahl von Freiheitsgraden, in denen sie miteinander verschränkt sein können. Hier betrachten wir die räumliche Position der Atome auf einem Gitter (Abb. 2). Bei attraktiver Wechselwirkung sitzen beide Atome mit hoher Wahrscheinlichkeit auf dem selben Gitterplatz, aber die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Pairs ist über das Gitter verteilt. Ein solcher Zustand ist hochdimensional verschränkt, eine Eigenschaft, die bei rauschresistenten Quantenkommunikationsprotokollen Anwendung findet.

In dieser Arbeit entwickeln wir ein Protokoll zum experimentellen Nachweis hochdimensionaler Verschränkung von Atomen, das mit Messungen in zwei verschiedenen Messbasen auskommt. Das Schema wurde verallgemeinert um auch multipartite Verschränkung zwischen mehr als zwei Atomsorten detektieren zu können, sowie auf Fälle mit mehreren Atomen pro Spezies. Wir untersuchen die Robustheit des Nachweises gegenüber experimentellem Rauschen und den

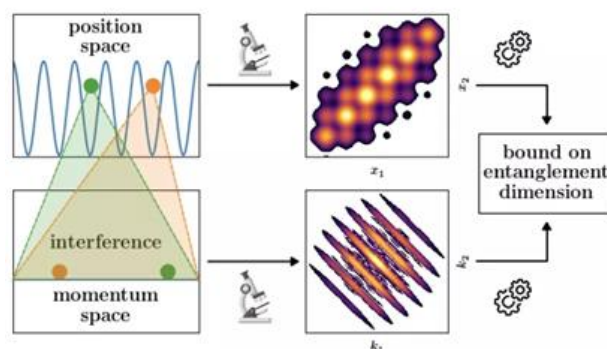


Abb. 2. Messschema zum Nachweis von hochdimensionaler Verschränkung von Atompaaren in Gittergeometrien. Quelle: AG Gärtner

Aufwand im Sinne der nötigen Wiederholungen des Experiments für einen statistisch signifikanten Verschränkungsnachweis.

N. Euler, M. Gärtner, „Detecting High-Dimensional Entanglement in Cold-Atom Quantum Simulators“, PRX Quantum 4, 040338 (2023)

Forschungsprojekt 3: Quantifizierung von Quanten-Korrelationen mittels überwachtem Lernen

Während der bloße Nachweis des Vorhandenseins von Verschränkung experimentell verhältnismäßig einfach ist, gilt es im Kontext von Quantensimulations-Anwendungen Verschränkung auch quantitativ messen zu können. In Quanten-Vielteilchen-Systemen stellt dies eine große Herausforderung dar, weil beispielsweise zur Bestimmung der Verschränkungsentropie, einem Maß für Verschränkung von reinen Zuständen, der Zustand des Systems im Allgemeinen voll rekonstruiert werden muss. Dies führt dazu, dass eine solche Messung nur bis zu einer Größenordnung von 10 Qubits funktioniert ohne dass man zusätzliche Annahmen trifft.

In dieser Arbeit nutzen wir Methoden des maschinellen Lernens um die Schätzung der Verschränkungsentropie aus experimentellen Daten möglichst effizient zu machen, ohne dabei den Quantenzustand rekonstruieren zu müssen. Dazu generieren wir Trainingsdaten in Simulationen auf klassischen Computern, für Zustände, für die wir die Verschränkungsentropie berechnen kön-

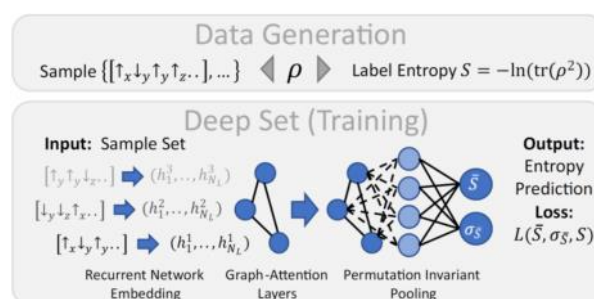


Abb. 3. Schema für überwachtes Lernen zur effizienten Schätzung der Verschränkungsentropie aus Messdaten. Quelle: AG Gärtner

nen, und nutzen diese um ein neuronales Netzwerk zu trainieren, diese richtig vorherzusagen (Abb. 3). Das trainierte Modell kann dann verwendet werden um die Verschränkungsentropie aus experimentellen Daten zu schätzen.

M. Rieger, M. Reh, M. Gärtner, „Sample-efficient estimation of entanglement entropy through supervised learning“, Phys. Rev. A 109, 012403 (2024)

Institut für Optik und Quantenelektronik (IOQ)



Foto: Jan Nathanael

Institutsdirektor: Prof. Dr. Malte Kaluza

Professur für Experimentalphysik/Relativistische Laserphysik

Prof. Dr. Malte Kaluza

Professur für Experimentalphysik/Nichtlineare Optik

Prof. Dr. Gerhard G. Paulus

Professur für Experimentalphysik/Quantenelektronik

Prof. Dr. Christian Spielmann

Professur für Atomphysik hochgeladener Ionen (am HI Jena)

Prof. Dr. Thomas Stöhlker

Professur für Laserteilchenbeschleunigung (am HI Jena)

Prof. Dr. Matt Zepf

Professur für Röntgenphysik (am HI Jena)

Prof. Dr. Ralf Röhlsberger

AG für Attosekunden-Laserphysik

Dr. Adrian Pfeiffer

Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe „Molekulare Movies“

Dr. Matthias Kübel

Adresse: Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

Homepage: www.ioq.uni-jena.de

Professur 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 nahen bis mittleren Infrarotbereich

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 seit vielen Jahren weltweit 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.

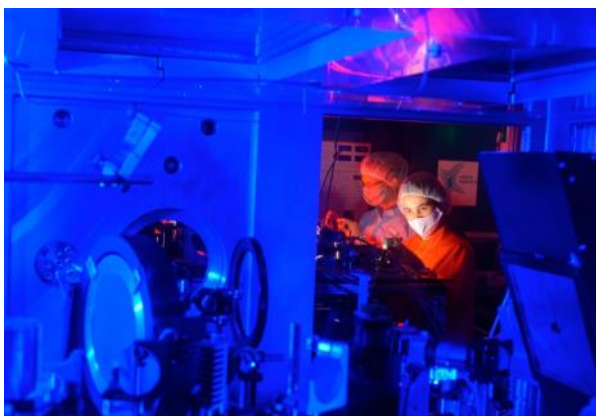


Abb. 1. Justierarbeiten an der Targetkammer von POLARIS Foto: Jens Meyer, FSU.

Weiterhin wurden die experimentellen Möglichkeiten von POLARIS durch die Installation eines synchronisierten, few-cycle Probe-Pulses erweitert [1]. 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.

Um die Parameter eines solchen Lasersystems – aber prinzipiell auch anderer Dioden-gepumpter Systeme – anzupassen und zu optimieren, führen wir auch umfangreiche Untersuchungen im Zusammenhang mit den aktiven Lasermedien durch, die je nach Anwendungsziel z.T. sehr unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Weiterhin stehen u.a. auch der Test neuer Verstärkergeometrien [2] aber auch die Erweiterung des Wellenlängenspektrums in den mittleren IR-Bereich [3] im Fokus unserer Forschung.

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

[2] Körner J. et al. (2021): Compact, diode-pumped, unstable cavity Yb:YAG laser and its application in laser shock peening, *Opt. Express* 29, 15724(2021)

[3] Körner J. et al. (2021): Diode pulse pumped, electro-optically q-switched, cryogenic Tm:YAG laser operating at 1.88 μm , *High Power Laser Science and Engineering* 9, e11 (2021)

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 unserer Professur 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 einer genauen Kontrolle und Variation der Laserparameter konnte unser Wissen über die Details der Beschleunigungsmechanismen deutlich erweitert

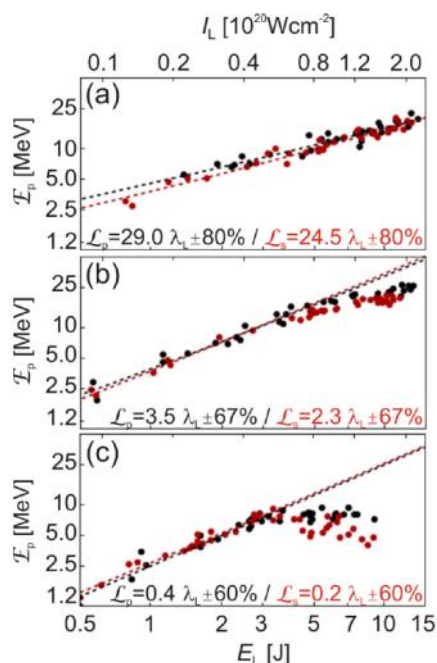


Abb. 2. Maximale Protonenenergien als Funktion der Laser-Pulsenergie bei unterschiedlichen Laserpuls-Kontrasten bzw. Vorplasma-Skalenlängen. Die Abweichung der gemessenen von den analytisch vorhergesagten Werten konnte auf genaue Details der Elektronenbeschleunigung zurückgeführt werden (aus [4]).

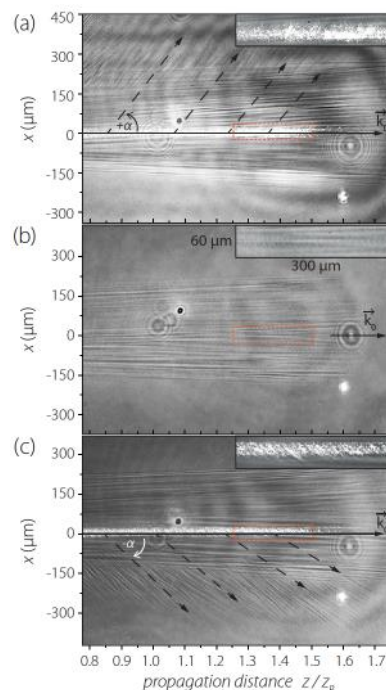


Abb. 3. Messung der Raman-Seitstreuung während der Laser-Elektronenbeschleunigung in Abhängigkeit von einem sog. Pulse-Front-Tilt des Hauptpulses. (Abb. aus

Durch die Verwendung von zum Hauptpuls synchronisierten Probepulsen, die nur wenige fs lang sind, sind uns erstmals detaillierte Einblicke in die Beschleunigung von Elektronen in sog. Lasererzeugten Plasmawellen gelungen. So konnte auch der Einfluss nicht perfekter Laserpulse auf die Beschleunigung der Elektronen im Detail studiert werden [5]. Durch die Verwendung von Elektronenpulsen als Probe-Puls können zudem Informationen über die innere Struktur der Elektronenpulse aber auch die Feldverteilung der Plasmawelle selbst gewonnen werden [6]. Unser ultimatives Ziel ist es, 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.

[4] Keppler S. et al., (2022): Intensity scaling limitations of laser-driven proton acceleration in the TNSA-regime. *Physical Review Research* 4, 013065 (2022)

[5] Zepter, C. et al. (2023): Role of spatiotemporal couplings in stimulated Raman side scattering. *Physical Review Research* 5, L012023 (2023).

[6] Kaluza, M. C. (2023): Unveiling the inner structure of electron pulses generated from a laser-wakefield accelerator. *Light: Science and Applications* 12, 032801 (2023).

Professur für Nichtlineare Optik

Prof. Dr. Gerhard G. Paulus

Forschungsschwerpunkte

- **Starkfeld- und Attosekunden-Laserphysik:** Untersuchung der Wechselwirkung intensiver Laserstrahlung mit Materie, insbesondere atomare Ionen und kleine Moleküle von fundamentaler Bedeutung.
- **Nanoskalige Bildgebung mit XUV-Strahlung.** Dazu setzen wir sowohl die breitbandige Kohärenztomographie als auch Zonenplatten-Mikroskopie korrelativ mit Fluoreszenzmikroskopie ein.
- **Röntgenspektroskopie und Röntgenpolarimetrie** mit Polarisationsreinheiten bis zu 10^{-11} .

Atomare und molekulare Ionen in starken Laserfeldern

Die Attosekunden- und Starkfeld-Laserphysik sind sehr eng verbundene Felder, wie am Nobelpreis für Anne L'Huillier und ihrer Entdeckung der Hohen Harmonischen erkennbar. Tatsächlich hatte der Lehrstuhlinhaber 1994 einen entscheidenden Beitrag zu deren Verständnis geleistet. Gleichwohl bestehen nach wie vor erhebliche Lücken im Verständnis des Verhaltens von Materie in intensiven Laserfeldern. Der Schwerpunkt unserer Forschung in diesem Gebiet liegt auf Experimenten mit kalten Ionenstrahlen, wobei die Messung der Impulse der Fragmente die z.T. vollständige Rekonstruktion der Kinematik ermöglicht.

Hierbei arbeiten wir eng mit Dr. Kübels Emmy-Noether-Gruppe zusammen.

Ein zentrales Thema war in den vergangenen Jahren das HeH^+ -Ion, dessen Starkfeld-Verhalten wir als weltweit Erste untersucht haben. HeH^+ war nicht nur das erste Molekül nach dem Urknall, es ist zugleich das Molekül mit dem stärksten Dipolmoment und somit das entgegengesetzte Extrem des H_2^+ , das in Tausenden Artikeln behandelt wurde. Eine hübsche Erkenntnis war, dass der Dissoziationsprozess weitgehend klassisch als getriebener anharmonischer Oszillator verstanden werden kann.

Derzeit arbeiten wir an einer neuartigen Flüssigmetall-Ionenquelle, die noch deutlich kältere Ionenstrahlen und damit höhere Impulsaufösungen ermöglichen wird. Zugleich macht sie eine Vielzahl von Ionen und damit eine Vielzahl von Zugängen zu neuen Fragestellungen zugänglich. Dies bezieht sich insbesondere auf das Verhalten schwerer Ionen. Erste Experimente mit einer AuSi-Quelle sind uns bereits geglückt.

Wustelt, Philipp, et al., Phys. Rev. Lett. 127, 043202 (2021)
Bo Ying et al., J. Phys. B 54, 174002 (2021)

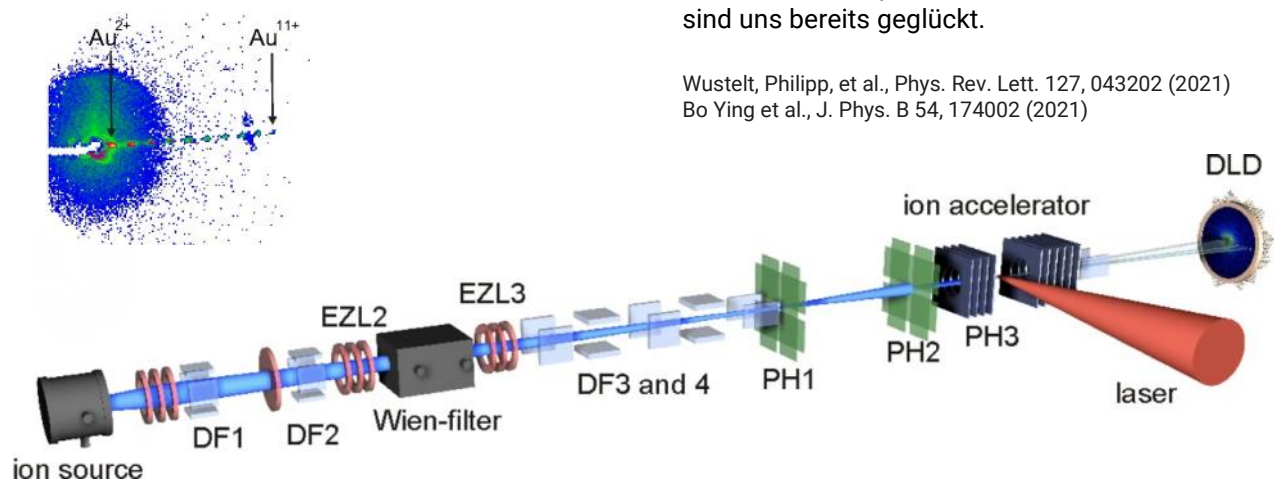


Abb. 1: Ionenstrahl-Apparatur. Der Ionenstrahl (blau) interagiert mit intensiven Laserpulsen und die Fragmente werden orts- und zeitaufgelöst auf dem Detektor (DLD) registriert. Das Teilbild links oben zeigt die Detektion von Goldionen aus der neuen Gold-Silizium-Ionenquelle, die durch den Laser bis zum Ladungszustand 11 weiterionisiert wurden.

Nanoskalige XUV-Bildgebung

Die AG arbeitet an zwei Verfahren, der XUV-Kohärenztomographie (XCT) und der korrelativen Röntgen-Fluoreszenzmikroskopie. Erstere wurde hier erfunden und eignet sich hervorragend zur Identifizierung und Analyse kleinster vergrabener Strukturen. Sie ermöglicht die präzise, zerstörungsfreie Bestimmung von Schichtdicken, Materialzusammensetzungen [1] und Reflektivitäten [2].

Das zweite Mikroskopieverfahren ist die korrelative Mikroskopie. Sie kombiniert Röntgen- und Fluoreszenzmikroskopie, um strukturelle und funktionelle Informationen aus Proben, insbesondere biologischen Zellen, zu gewinnen [3]. Dieses Verfahren vereint die Vorteile beider Techniken in einem kompakten Gerät für die in-situ-Bildgebung.

[1] Wiesner et al., *Optica* 8, 230-238 (2021).

[2] Abel et al., *Opt. Express* 30, 35671 (2022).

[3] Reinhard et al., *Microscopy and Microanalysis* 29, 2014 (2023).

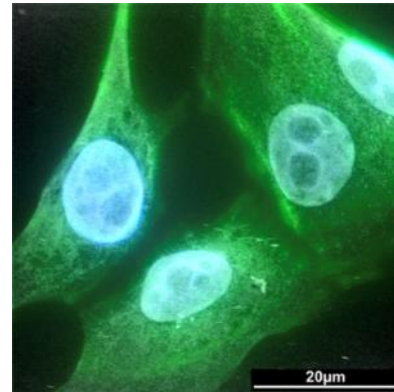


Abb. 2: Die korrelative Röntgen-Fluoreszenzmikroskopie kombiniert Fluoreszenz- und Röntgenmikroskopie, wie hier an 3T3-Zellen gezeigt. Der SXR-Kontrast wurde zur besseren Sichtbarkeit des Fluoreszenzbildes invertiert [3].

Röntgenpolarimetrie und -spektroskopie

Die Röntgengruppe des Lehrstuhls ist in den vergangenen Jahren v.a. mit einer Reihe von Durchbrüchen in der Präzisions-Röntgenpolarimetrie, bei der Polarisationsreinheiten bis hinab zu 10^{-11} (!) erreicht wurden, hervorgetreten. Hier berichten wir von einem Erfolg in der Spektroskopie: Die Quantenelektrodynamik (QED) ist die am genauesten verifizierte physikalische Theorie – nicht jedoch in starken Feldern, wie sie in den Coulombfeldern hochgeladener Ionen herrschen. Mit Röntgenspektrometern, die auf in der Arbeitsgruppe gefertigten gebogenen Kristallen basieren, wurden Übergänge innerhalb der L-Schale heliumartiger Uranionen (also U^{90+}) vermessen und mit Berechnungen der QED verglichen. Nach vielen Jahren Arbeit wurde nun eine Genauigkeit erreicht, die es erstmals erlaubt, verschiedene theoretische Beschreibungen höherer Ordnungen der Wechselwirkung (sog. 2-loop Effekte) in starken Feldern zu testen.

Lötzsch et al., *Nature* 625, 673 (2024).

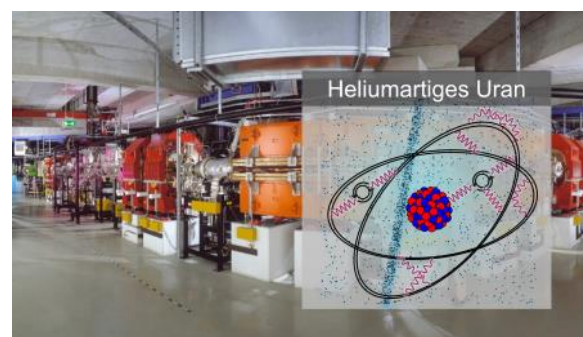


Abb. 3: Röntgenspektroskopie hochgeladener Uranionen an Speicherringen wie dem ESR der GSI in Darmstadt erlaubt präzise Tests unseres Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen Elektronen untereinander und mit den Atomkernen.

Professur 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** zur i) Generation Hoher Harmonischer in Monolagen und Quantenpunkten zur zeitlichen Verfolgung elektronischer Prozesse; ii) Erzeugung und Charakterisierung dichter und heißer Plasmen durch Anregung nanostrukturierter Proben mit intensiven Laserpulsen
- **Zeitaufgelöste XUV Absorptionsspektroskopie** zur Untersuchung der elementspezifischen 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

Linsenlose XUV Mikroskopie

In den letzten Jahren haben wir enorme Fortschritte in der optischen Mikroskopie erlebt, die auf die Entwicklung neuer Techniken und einer Ausweitung des Spektralbereichs zurückzuführen sind. So wurde unter anderem im kurzwelligem XUV Bereich die 3D Rekonstruktion von Proben und/oder hochauflösende elementspezifische Bildgebung mit einem Setup ohne Linsen demonstriert. Viele dieser fortschrittlichen Bildgebungsmethoden haben jedoch schwerwiegende Nachteile, wie die Notwendigkeit von Beleuchtungsquellen mit hohem Fluss, irreversible Strahlungsschäden der Probe sowie begrenzten Zugang zu den erforderlichen Hochleistungslichtquellen. Abhilfe kann dabei Ghost Imaging (GI) bringen, das im Rahmen der Quantenbildgebung entwickelt wurde.

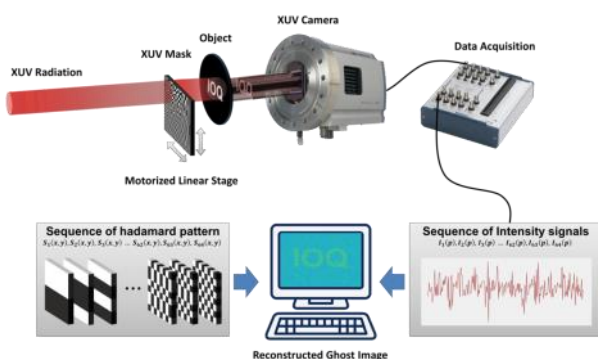


Abb. 1. GI im XUV: eine Maske moduliert den XUV Strahl und aus der gemessenen Transmission kann die Probe am Computer rekonstruiert werden.

Sowohl verschränkte Photonenpaare als auch klassische Intensitätsfluktuationskorrelationen könnten für GI genutzt werden. GI Bilder werden rekonstruiert, indem die Intensität von durch ein Objekt transmittiertem Licht mit der ortsaufgelösten Intensitätsverteilung eines Referenzstrahls korreliert wird. Daher kann eine Strahlenschädigung der Probe durch Variation der Intensitätsverhältnisse zwischen Objekt- und Referenzstrahl reduziert werden, was die größte Einschränkung für die Verbesserung der Auflösung in der biologischen Nanobildgebung mit XUV- und Röntgenstrahlung darstellt. Hier konnte aber auch gezeigt werden, dass durch Einsatz von gut definierten Masken, die Erzeugung und Vermessung des Referenzstrahles nicht mehr erforderlich ist, was das Experiment weiter vereinfacht.

- In Kooperationen mit UC Berkeley und LOA Paris wurde der Einsatz von Röntgenlasern für nichtlineare Bildgebung untersucht
- Im Rahmen des Exzellenzclusters „Balance of the Microverse“ sowie des QuantumHUB Thüringens untersuchen wir neue Methoden für XUV Mikroskopie mit geringer Dosis zur Vermeidung von Strahlenschäden

T. Helk et al., Science Advances 7 "eabe2265" (2021)

Z. Sun et al., Journal of Microscopy 284, 3 (2021)

S. Oh et al., Applied Sciences 13, 6954 (2023)

Wechselwirkung intensiver Laserpulse mit Nanostrukturen

In Zusammenarbeit mit dem IFK, IFTO und IPC (FSU Jena), sowie einer Reihe von weiteren nationalen und internationalen Partnern untersuchen wir die Wechselwirkung von Femtosekundenlaserpulsen mit hohen Intensitäten mit nanostrukturierten Proben mit reduzierter Dimensionalität. Die Proben reichen von 0D Quantenpunkten, über 1D Nanodrähte und 2D Nanofilmen bis zu 3D sub-Wellenlängenstrukturen. Diese neue Klasse von Materialien eröffnet für die Starkfeldlaserphysik ganz neue Möglichkeiten, die von nichtlinear gepumpten Nanolasern, über die Erzeugung hoher Harmonischer in Festkörpern, bis hin zur Erzeugung von ultraheißen und ultradichten Plasmen reichen. Mit Pulsen im mittleren Infrarot bei subrelativistischen Intensitäten ($<10^{17}$ W/cm²) wurde das Harmonische Spektrum von CdSe Halbleiterquantenpunkten als Funktion von deren Größe gemessen. Mit begleitenden Simulationen konnte gezeigt werden wie mit abnehmender Größe die Elektrontrajektorien zunehmend gestört werden, was zu einer geringeren Effizienz führt. Das relativistische Wechselwirkungsregime mit den nanostrukturierten 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.

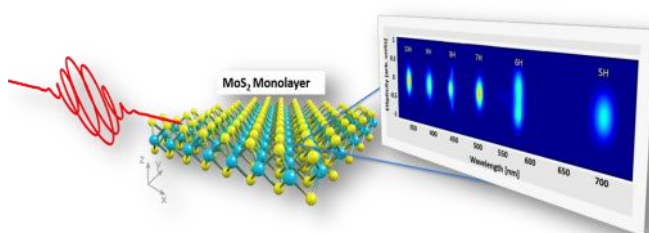


Abb. 2. Das Hohe Harmonische Spektrum aus einem MoS₂ Monolayer erlaubt Rückschlüsse auf die Bewegung der Elektronen im Material.

E. Eftekhari-Zadeh et al., *Phys. Plasmas* 29, 013301 (2022)
 G. Zograf et al., *ACS Photonics* 9 „567“ (2022)
 H. N. Gopalakrishna et al., *Phys. Rev. Research* 5, 013128

Zeitaufgelöste XUV Spektroskopie an neuen Materialien

Im Rahmen des vom DAAD geförderten Projektes „QUESTforENERGY“ untersuchen wir gemeinsam mit Prof. M. Züch von der University of California in Berkeley neue Nanomaterialien, beispielsweise für die Verwendung in Solarzellen. Dazu gehören verschiedene zweidimensionale Materialien, die, wenn sie kombiniert werden, aufgrund ihrer 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 aufweist und daher der Transport über atomar dünne Schichten aus unterschiedlichen Materialien sehr gut durch spektrale Änderungen verfolgt werden kann. Das erforderlich breite XUV Spektrum bis 200eV wird durch hohe Harmonische Generation mit bis zu 3 fs kurzen Pulsen erzeugt. Damit können wichtigen TMDC-2D-Materialien, die von der Gruppe von Prof. A. Turchanin hergestellt werden, untersucht werden.

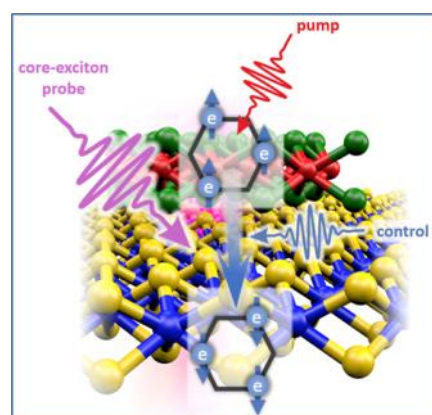


Abb. 3. Untersuchung des Ladungsträgertransports in 2D Materialien mittels zeitaufgelöster XUV Absorptionsspektroskopie nach optischer Anregung.

L. Yue et al., *Physical Review Letters* 129, 147401 (2022)
 F. Kohrell et al., *Review Scientific Instruments* to be published (2024)

Professur für Atomphysik hochgeladener Ionen Prof. Dr. Thomas Stöhlker

Forschungsschwerpunkte

- **Schwerpunkt 1:** Entwicklung und Anwendung kryogener Mikrokalorimeter-Detektoren für Hochpräzisions-Röntgenspektroskopie-Experimente
- **Schwerpunkt 2:** Untersuchung des Polarisationsstransfers in Röntgen-Streuprozessen
- **Schwerpunkt 3:** Laserexperimente an hochgeladenen Ionen: Konstruktion und Inbetriebnahme der HILITE-Ionenfalle

Anwendung kryogener Kalorimeter für Hochpräzisions-Röntgenspektroskopie

Die in den vergangenen Jahren in Kooperation mit dem KIP der Universität Heidelberg entwickelten metallisch-magnetischen Kalorimeter (MMC)-Detektoren der maXs-Serie vereinen durch ihre Funktionsweise mehrere Vorteile konventioneller Röntgendetektoren. Sie erreichen Auflösungsvermögen von $E/\Delta E > 6000$ in einem breiten spektralen Bereich von typischerweise 1–100 keV. Zusammen mit ihrer hohen Linearität und einer schnellen Anstiegszeit erweisen sie sich daher als vielversprechendes Werkzeug für die Hochpräzisions-Röntgenspektroskopie.

Die Analyse der mit diesen Detektoren gewonnenen Messdaten erfordert ein umfassendes Software-Paket, welches innerhalb unserer Arbeitsgruppe kontinuierlich weiterentwickelt wird. Darüber hinaus konnten wir den in Speicherringexperimenten zur Hintergrundunterdrückung verwendeten Nachweis umgeladener Ionen in Koinzidenz mit der Messung der dabei emittierten Photonen mit MMCs etablieren.

Diese technischen Fortschritte ermöglichten eine Reihe erfolgreicher Experimente an einer Ionenfalle sowie den Speicherringen ESR und CRYRING der GSI und zeigen ein großes Potential für zukünftige Experimente an intensiven Röntgenstrahlungsquellen. Zuletzt wurden zwei MMCs zur Untersuchung von Übergängen in heliumartigem Uran verwendet. Die Auslegung des Experiments ermöglichte eine intrinsische Korrektur der Dopplerverschiebung und erstmalig die Auflösung der Aufspaltung der $K\alpha$ -Übergänge im schwersten Zwei-Elektronen-System (Uran; $Z=92$) in ihre Unterkomponenten.

Kröger FM et al. (2023): Towards an Intrinsic Doppler Correction for X-ray Spectroscopy of Stored Ions at CRYRING@ESR. *Atoms* 11(2), S. 22, DOI: 10.3390/atoms11020022

Herdrich MO et al. (2023): High-resolution X-ray emission study for Xe^{54+} on Xe collisions. *Eur. Phys. J. D* 77, S. 125, DOI: 10.1140/epjds/10053-023-00698-2

Pfäfflein Ph et al. (2022): Integration of maXs-type microcalorimeter detectors for high-resolution x-ray spectroscopy into the experimental environment at the CRYRING@ESR electron cooler. *Phys. Scr.* 97, S. 114005, DOI: 10.1088/1402-4896/ac93be

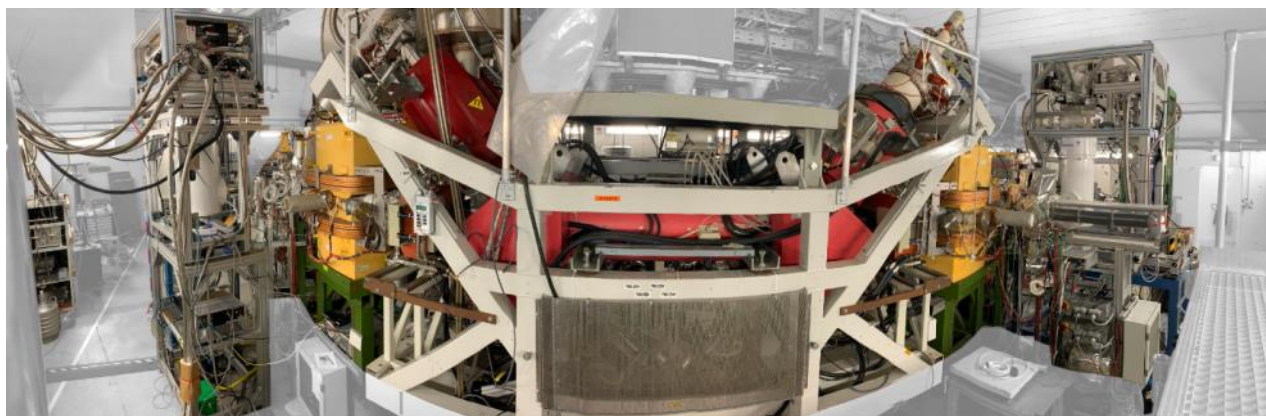


Abb. 1. Experimentaufbau mit zwei maXs-100-Mikrokalorimeter an den 180°- (links) und 0°-Ports (rechts) des Elektronenkühlers des CRYRING@ESR zur Untersuchung der Röntgenspektren von heliumartigem Uran.

Foto: M. Lestinsky, bearbeitet von Ph. Pfäfflein

Untersuchung von Polarisierungseffekten in der Röntgenemission bei atomaren Prozessen

Die Untersuchung der Polarisierungseigenschaften von Röntgenstrahlung ist ein wichtiges Werkzeug zur Überprüfung unseres Verständnisses der zugrundeliegenden Photon-Materie-Wechselwirkungen. Zu diesem Zweck setzt unsere Arbeitsgruppe zweidimensional ortssensitive Röntgendetektoren als effiziente Compton-Polarimeter ein. In einem Experiment am Synchrotron PETRA III wurde mithilfe eines solchen Detektors das Streuverhalten von linear polarisierten 175-keV-Photonen an einem dünnen Gold-Target untersucht. Erstmals wurde dabei die aus der Ebene der Polarisation des einfallenden Strahls herausgestreute Strahlung beobachtet und damit eine gegenüber vorhergehenden Messungen erheblich tiefergehende Untersuchung des Streuprozesses ermöglicht. Diese Untersuchung wurde in enger Zusammenarbeit mit Kollegen von der Theorie durchgeführt.

Mit einem neuen Polarimeter werden zukünftig Untersuchungen von Röntgenemissionsprozessen bis in den MeV-Bereich ermöglicht.

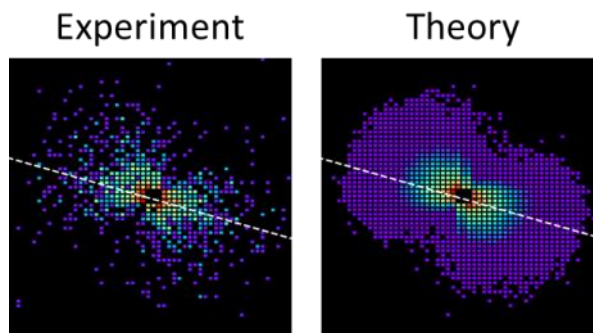


Abb. 2. Aus der Streuverteilung im Compton-Polarimeter lassen sich Polarisationsgrad und -richtung der einfallenden Strahlung rekonstruieren. Abbildung: W. Middents

Strnat S. et al. (2021): Polarization studies on Rayleigh scattering of hard x rays by closed-shell atoms. Phys. Rev. A 103, S. 012801, DOI: 10.1103/PhysRevA.103.012801

Middents W. et al. (2022): Possible Polarization Measurements in Elastic Scattering at the Gamma Factory Utilizing a 2D Sensitive Strip Detector as Dedicated Compton Polarimeter. Ann. Phys. 534, S. 2100285, DOI: 10.1002/andp.202100285

Hochintensitäts-Laser-Experimente an gespeicherten Ionen

Zur detaillierten Untersuchung von Laserionisationsprozessen ist es von großem Vorteil, einfache ionische Systeme mit wenigen Elektronen zu verwenden. Zu diesem Zweck wurde die HILITE-Penningfalle entwickelt, gebaut und in Betrieb genommen. Die Penningfalle ist mit einer externen Ionenquelle ausgestattet, die Ionen in definierten Paketen produziert. Abhängig vom Ladungszustand der produzierten Ionen können in der Falle zwischen 10.000 und 100.000 Ionen gefangen und gespeichert werden. Die Falle ermöglicht es, die gefangenen Ionen für mehrere Minuten zu speichern und sie zerstörungsfrei bezüglich Anzahl und Ionensorte zu charakterisieren. Der kontrollierte Einfang- und Speicherprozess erlaubt das zuverlässige Speichern unterschiedlicher Ionensorten sowie die Kenntnis der Ionenwolkengeometrie. Diese Penningfalle wird in Zukunft die präzise Bestimmung von Laser-Ion-Wirkungsquerschnitten bei relativistischen Laserintensitäten erlauben. Experimente an Großlaseranlagen, wie z.B. am JETi200 in Jena, sind in Vorbereitung.

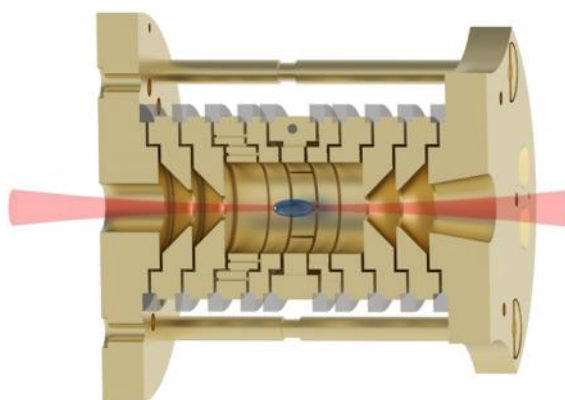


Abb. 3. Illustration des Experimentprinzips: Eine Ionenwolke wird im Zentrum der Falle gespeichert und mit einem hochintensiven Laser bestrahlt. Abbildung: S. Ringleb

Ringleb S. et al. (2022): High-intensity laser experiments with highly charged ions in a Penning trap. Phys. Scr. 97, S. 084002, DOI: 10.1088/1402-4896/ac7a69

Kiffer M. et al (2024): Resistive cooling of ions' center-of-mass energy in a Penning trap on millisecond time scales. Accepted for publication at Phys. Rev. A

Professur 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 Laserquellen**
Mit einer Spitzenleistung von bis zu einem Petawatt (10^{15}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.

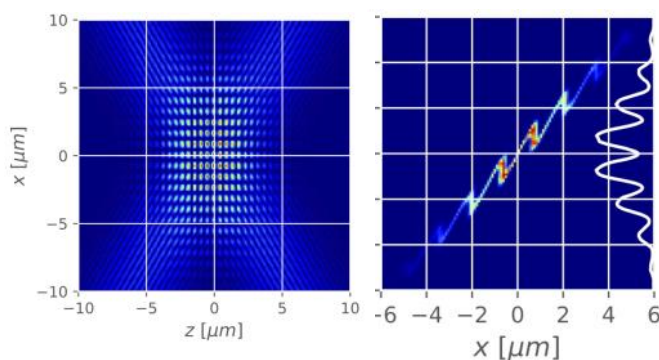


Abb. 1: Ultrapräzise Messmethode zur Bestimmung der Emittanz (Qualität) von Elektronenstrahlen. Die neue Generation von Elektronenstrahlen erfordert neue Messmethoden. Links: Laserinterferenzmuster und rechts damit erzeugte Phasenraummodulation

Seidel 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

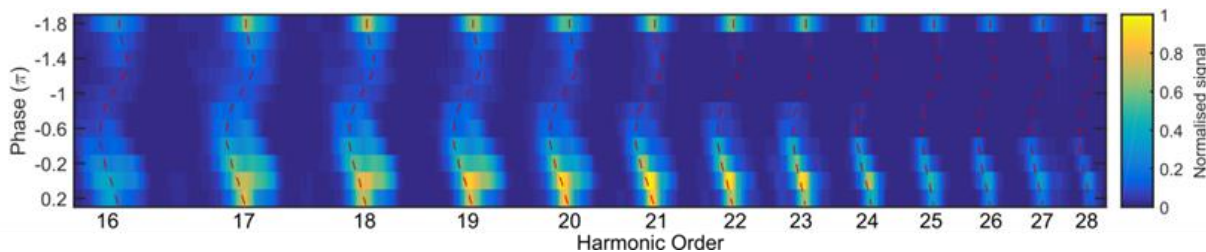


Abb. 2: Intensität der Strahlung im extremen UV als Funktion der relativen Phase zwischen einem infraroten und blauen Laserstrahl. Die phasenabhängige Modulation der Harmonischen (Vielfachen der infraroten Laserfrequenz) ist auf die Manipulation der Plasmaelektronen mit Attosekundengenauigkeit zurückzuführen. [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) 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.

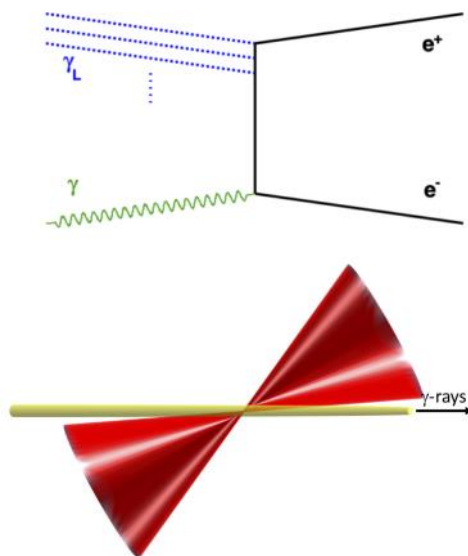


Abb. 3: Experimentelle Anordnung einer Photon/Photon Kollision und Reaktionsdiagramm des Breit-Wheeler Effekts

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, D. Ullmann, E.A. Mosman, M. Zepf, Direct accessibility of the fundamental constants governing light-by-light scattering, *Physical Review Letters* 129 (6), 061802

Professur 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.
- **Erforschung von extrem schmalbandigen Übergängen in Mössbauer-Atomkernen:** Damit kommt die Realisierung von nuklearen Uhren mit Genauigkeiten, die Atomuhren um einige Größenordnungen übertreffen können, in Reichweite. Kürzlich konnten wir am Europäischen Röntgenlaser in Schenefeld bei Hamburg zum ersten Mal das Uhren-Isotop Scandium-45 anregen und dessen Übergangsenergie genau vermessen. Daraus ergeben sich neue Perspektiven für Präzisionsmessungen von fundamentalen Effekten, wie z.B. der Gravitationsrotverschiebung auf sub-mm Skalen, der Suche nach dunkler Materie, sowie dem Präzisionstest von relativistischen Effekten.

Kohärente Kontrolle von angeregten Kernzuständen mittels transientser Magnonen

Die ultraschnelle und präzise Kontrolle von Quantensystemen bei Röntgenenergien erfordert Photonen mit Schwingungsperioden von unter einer Attosekunde. Die kohärente dynamische Kontrolle von Quantensystemen bei diesen Energien ist derzeit eine der größten Herausforderungen in der Quantenoptik für harte Röntgenstrahlung. In einem an der Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III am DESY in Hamburg durchgeführten Experiment konnten wir zeigen, dass die Phase eines in einen Festkörper eingebetteten Quantensystems mittels eines kurzzeitig angeregten Festkörper-Quasiteilchens mit einer Präzision von unter einer Attosekunde kohärent manipuliert werden kann. Im konkreten Fall steuern wir die Quantenphase eines kollektiv angeregten Kernzustandes über transiente Magnonen mit einer Präzision von 1 Zeptosekunde. Derart kleine zeitliche Verschiebungen werden interferometrisch über Quantenschwebungen zwischen verschiedenen Hyperfeinstrukturniveaus des Atomkerns nachgewiesen. Mit diesem Experiment demonstrieren wir die Interferometrie auf der Zeitskala von Zeptosekunden und zeigen, dass transiente Quasiteilchen eine präzise Kontrolle von in kondensierter Materie eingebetteten Quantensystemen ermöglichen.

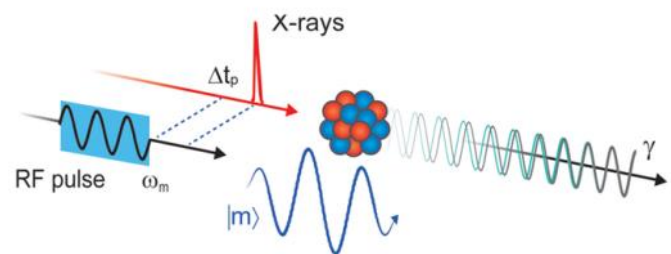


Abb.1: Ein Atomkern in einem magnetischen Material wird durch einen kurzen Röntgenpuls angeregt. Er sendet daraufhin ein Röntgenphoton in einem Überlagerungszustand von zwei Quantenzuständen mit leicht unterschiedlicher Frequenz (grau und grün) aus, die ein Interferenzmuster bilden, eine sogenannte Quantenschwebung. Ein damit synchronisierter Mikrowellen (RF) Impuls regt in dem Material für die Dauer von wenigen Nanosekunden, d.h. transient, Spinwellen (Magnonen $|m\rangle$) in dem Material an. Dies führt zu einer abstimmbaren Phasenverschiebung der Quantenschwebung, aus der sich die zeitliche Verschiebung der Trägerwellen mit Zeptosekunden Genauigkeit rekonstruieren lässt.

Resonante Anregung des Uhren-Isotops Scandium-45 mittels Röntgenlaserstrahlung

Atomare Oszillatoren mit stabilen Frequenzen und großen Gütefaktoren erlauben es, die Zeit mit höchster Präzision zu definieren und zu messen. Die besten Atomuhren haben heute eine Gangungenaugigkeit von einer Sekunde in 30 Milliarden Jahren. Dennoch wird die Suche nach noch stabileren und robusteren Referenzoszillatoren fortgesetzt. Hier kommen nukleare Oszillatoren ins Spiel. Diese haben gegenüber atomaren Oszillatoren erhebliche Vorteile, da sie von Natur aus höhere Gütefaktoren aufweisen und sehr unempfindlich gegen äußere Störeinflüsse sind. Einer der vielversprechendsten Fälle ist ein ultraschmaler (1,4 Femto-eV) Kernresonanz-Übergang im Scandium-45 zwischen dem Grundzustand und dem isomeren 12,4-keV Zustand mit einer für Atomkerne sehr langen Lebensdauer von 0,47 s. Erst seit kurzem sind intensive Röntgenquellen wie z.B. Röntgenlaser zur direkten Anregung der Kernresonanz verfügbar. In einem kürzlich durchgeführten Experiment haben wir den isomeren Scandium-45-Zustand durch Bestrahlung mit 12,4-keV-Photonenpulsen aus einem Röntgenlaser, dem European XFEL bei Hamburg, angeregt. Dadurch konnten wir die Übergangsenergie zu 12.389,59 eV bestimmen, wobei die Messgenauigkeit dieses Wertes um zwei Größenordnungen besser ist als die bisher bekannten Werte. Unsere Erkenntnisse eröffnen Anwendungen dieses Isomers in der Präzisionsmetrologie, der nuklearen Uhrentechnologie, der Präzisionsspektroskopie von Festkörpereigenschaften sowie für fundamentale Tests der Relativitätstheorie.

Yu. V. Shvyd'ko et al., Resonant X-ray excitation of the nuclear clock isomer Scandium-45, *Nature* 622, 471 – 475 (2023).
DOI: 10.1038/s41586-023-06491-w



Abb. 2: Künstlerische Darstellung der Anregung des nuklearen Uhr-Isomers Scandium-45. Röntgenstrahlen aus dem European XFEL beleuchten den Atomkern und regen dabei dessen 12,4 keV Übergang resonant an. Beim anschließenden Zerfall wird die Anregungsenergie des Kerns auf ein Elektron der K-Schale übertragen und führt schließlich zur Emission von verzögerter K-Fluoreszenzstrahlung, die zum Nachweis der Kernanregung genutzt wird.

(Quelle: European XFEL/Helmholtz-Institut Jena, Tobias Wüstefeld/Ralf Röhlsberger).

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.

Nichtlineare Polarisationsholographie

Die Polarisationspektroskopie ist eine Methode zur Ermittlung der nichtlinearen Polarisationsantwort einer Probe. Sie ermittelt die Wellenform der nichtlinearen Polarisation in Relation zum Laserpuls, der sie auslöst. Eine besondere Stärke der nichtlinearen Polarisationspektroskopie im Attosekundenbereich besteht darin, dass sie den Energiefluss zwischen dem Lichtfeld und der Probe auf der Subzykluszeitskala aufzeigt. Die erste Methode, die vor einigen Jahren vorgestellt wurde und bei der eine Attosekunden-Streakkamera benötigt wird, ist aber recht kompliziert. Vielleicht noch wichtiger ist, dass sie bisher nur für Dielektrika demonstriert wurde.

Wir haben eine Methode der nichtlinearen Polarisationspektroskopie entwickelt, die auf der Holographie im Zeitbereich basiert. Sie ist das Zeitbereichsanalogon der holografischen Interferometrie, bei der der Vergleich zweier Hologramme Änderungen der Größe und Position eines Objekts mit interferometrischer (Nanometer-) Präzision aufzeigt. Entsprechend bestimmen wir die Polarisation einer Probe im Zeitbereich mit interferometrischer (Attosekunden-) Präzision.

Mit unserer Methode konnten wir zeigen, dass die durch einen intensiven Laserpuls ausgelöste nichtlineare Polarisation die Dynamik des Energietransfers und der Relaxation in nanoskopischen Metallfilmen offenbart.

In unserer kombinierten experimentellen und theoretischen Studie zeigen wir, dass das Laserfeld zu einer nichtthermischen Verteilung der Elektronen im k -Raum auf ultraschnellen Zeitskalen führt.

M. Hazra *et al.*, Nonlinear polarization holography of nanoscale iridium films, *New J. Phys.* **25**, 123011 (2023)

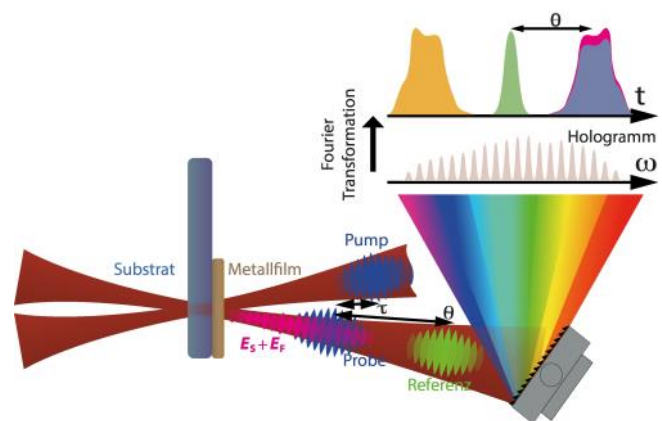


Abb. 1. Durch einen Pump-Puls wird eine nichtlineare Polarisation erzeugt, deren Felder E_S (ausgehend vom Substrat) und E_F (ausgehend vom Metall) im Zeitbereichs-Hologramm eines Probe- und Referenz-Pulses enthalten sind.

Ultraschnelle Spektroskopie mit einer Miniatur-Beamline

Ultrakurze Lichtpulse können am einfachsten im optischen Bereich und im extremen UV-Bereich erzeugt werden. Wir haben nun eine Technik entwickelt, um extrem kurze Lichtpulse im tiefen UV zu erzeugen, wo die meisten etablierten Methoden nicht anwendbar sind. Konventionell werden Femtosekundenpulse im tiefen UV durch einen Frequenzumwandlungsprozess erzeugt, bei dem ein Puls aus optischem Licht in ein nichtlineares Erzeugungsmaterial geleitet wird. Durch Wechselwirkungen innerhalb des Materials wird ein Puls erzeugt, dessen Frequenz ein Vielfaches der Eingangsfrequenz ist. Die Isolierung dieses hochfrequenten Pulses stellt jedoch ein Problem dar, weil dazu normalerweise optische Elemente hinzugefügt werden müssen, die den Puls verzerren.

Wir haben nun ein Verfahren entwickelt, das ohne optische Elemente zur Pulsisolierung auskommt. Dazu werden zwei optische Pulse aus leicht unterschiedlichen Winkeln in einen dünnen Kristall fokussiert. Durch nicht-lineare Wechselwirkung entstehen mehrere Pulse im tiefen UV, die das Material in unterschiedlichen Winkeln verlassen, ähnlich wie bei einem Beugungsgitter. Durch Anpassung der Strahlgeometrie erreichen wir, dass in Richtung eines bestimmten Emissionswinkels mehrere Pulse überlappen und durch Interferenz eine Wellenform mit ultrakurzer Dauer bilden. Diese ultrakurze Wellenform wird wenige Zentimeter hinter der Erzeugung als Abfragepuls in einer Probe verwendet, wo ein Anregungspuls lokal überlagert wird.

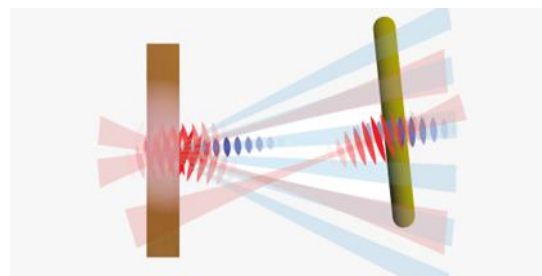


Abb. 2. Im ersten Kristall werden zwei optische Pulse (rot) überlagert. Pulse im tiefen UV (blau) werden erzeugt und in einem zweiten Kristall mit einem Anregungspuls überlagert.

In einem ersten Experiment benutzten wir eine dünne Diamantplatte als Probe und zeichneten die Transmission auf. Die Spektren zeigten Merkmale des dynamischen Franz-Keldysh-Effekts, einer lichtinduzierten Veränderung der Bandstruktur des Materials. Im tiefen UV konnten wir das Zusammenspiel mit Effekten der klassischen nichtlinearen Optik, wie beispielsweise der Vier-Wellenmischung, aufdecken. Wir gehen davon aus, dass wir unsere Miniatur-Beamline für eine Vielzahl von Proben aus kondensierter Materie benutzen können.

J. Reislöhner *et al.*, Dynamical Franz-Keldysh Effect in Diamond in the Deep Ultraviolet Probed by Transient Absorption and Dispersion Spectroscopy Using a Miniature Beamline, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 136902 (2023).

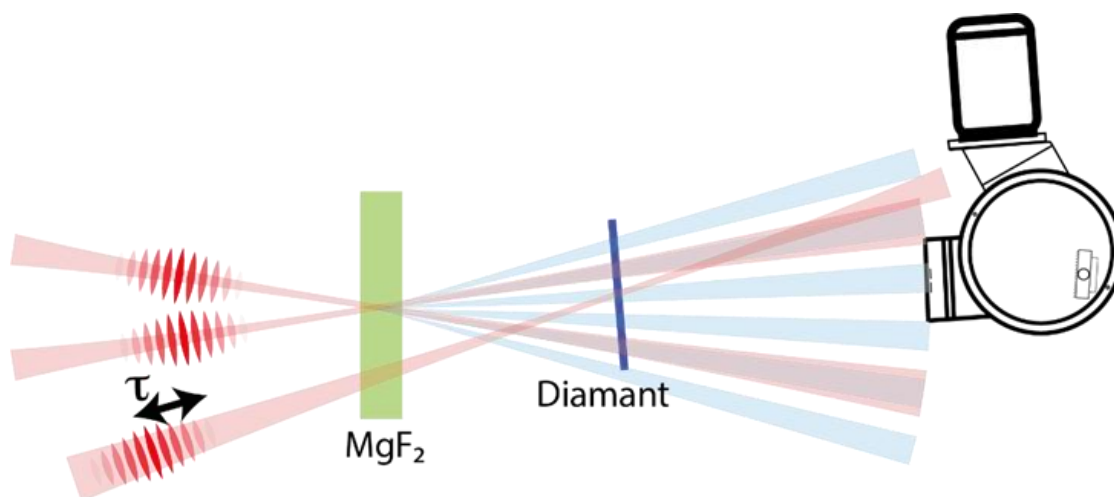


Abb. 3. Strahlengang der Miniatur-Beamline. Das Spektrometer erfasst den Emissionswinkel, wo die kürzesten Wellenformen im tiefen UV entstehen.

Emmy-Noether-Gruppe „Molecular Movies“ Dr. Matthias Kübel

Forschungsschwerpunkte

- **Molecular Movies:** Wenn Moleküle chemische Reaktionen eingehen, nehmen die Elektronen und Atome innerhalb des Moleküls neue Strukturen ein. Die Beschreibung der gekoppelten Bewegung von Atomkernen und Elektronen stellt eine große 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.
- **Attosekunden-Photoionisation:** In den oben beschriebenen Experimenten spielt die Photoionisation mit kurzen Laserpulsen eine wesentliche Rolle. Daher interessieren wir uns besonders für diesen fundamentalen Prozess, der in Abhängigkeit der Lichtquelle verschiedenste Facetten annimmt und ein mächtiges Werkzeug zur Untersuchung der Materie darstellt
- **Nichtlineare Optik in nanoskaligen Festkörpern:** Bei der Wechselwirkung intensiver Laserstrahlung mit Materie wird kurzwellige Strahlung („Hohe Harmonische“) emittiert. Wir untersuchen, wie man aus deren Spektren, Informationen über die ultraschnelle Bewegung der Elektronen innerhalb von Festkörpern, die aus nur wenigen atomaren Schichten bestehen, erhalten kann.

Molecular Movies: Gemeinsame Dynamik von Elektronen und Atomen

Als „Kamera“ für die Molecular Movies fungiert ein „COLTRIMS“ Reaktionsmikroskop, welches von der DFG bereitgestellt¹ wird und seit Mai 2021 im Labor des Lehrstuhls Nichtlineare Optik aufgebaut und optimiert wurde. Dort steht ein Femtosekundenlaser des HIJ mit hoher Repetitionsrate zur Verfügung. Seit Dezember 2023 ist das COLTRIMS zudem mit einer Quelle für Hohe Harmonische (HHG) ausgestattet, siehe Abbildung. Dies eröffnet uns neue experimentelle Möglichkeiten, wie z.B. selektive Anregung.

In einem ersten Experiment mit dem Reakti-

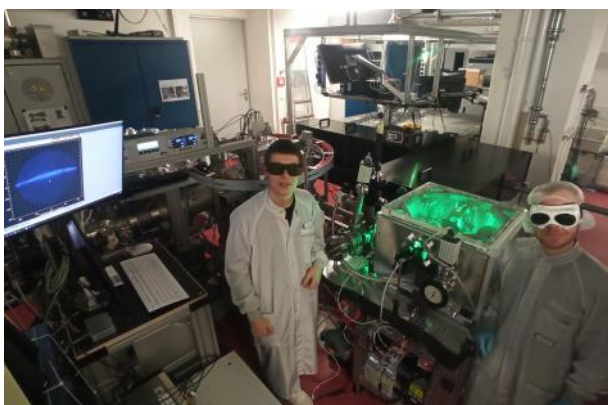


Abb. 1. Foto des Reaktionsmikroskops samt angeschlossener HHG Quelle im Labor des Lehrstuhls Nichtlineare Optik. Im Bild: Masterstudent Julian Späthe (links) und Doktorand Sebastian Hell (rechts).

onsmikroskop wurde die Photoionisation einer seltenen Edelgasverbindung, Ar-H₂O, experimentell untersucht. Diese entsteht bei der Koexpansion von Argon und Wasser in einer Überschalldüse. Wegen der geringen Ausbeute dieser Verbindung, spielt die hohe Repetitionsrate des Lasers eine herausragende Rolle. Die experimentellen Ergebnisse liefern Einblicke in ungewöhnliche Photoionsationsdynamik².

Weitere Experimente widmeten sich der dissoziativen Ionisation von Wasserstoffmolekülen. Durch Phasenmessung an den Photoelektronen sammelten wir Hinweise auf einen neuen Wechselwirkungsmechanismus zwischen Photoelektron und Molekülion, der zur einer starken Korrelation zwischen beiden Teilchen führt.

Experimente zur Abbildung der Elektronendynamik in Molekülen, entsprechend unserer Vorarbeit in Atomen³, stehen nun im Fokus der Experimente. Die neue HHG-Quelle wird dabei eine zentrale Rolle entweder bei der Anregung oder Abfrage der Moleküldynamik spielen.

¹ <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/437321733?language=de>

² Platz, A., Hell, S., Zhang, Y., Ying, B., Paulus, G. G., Kübel, M. (2023), „Intensity-resolved measurement of above-threshold ionization of Ar-H₂O“. *Phys. Rev. A Phys. Rev. A* **108**, 053106, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.108.053106>

³ Kübel, M., et al. (2019), „Spatiotemporal imaging of valence electron motion“. *Nat Commun* **10**, 1042, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09036-w>

Pulscharakterisierung mit Hohen Harmonischen

Die Erzeugung Hoher Harmonischer ist grundlegend für die Attosekundenphysik und wurde mit dem Nobelpreis 2023 ausgezeichnet. In Festkörpern ist der Prozess erst seit etwa 10 Jahren bekannt, da er besonders fortschrittlicher Laserquellen bedarf.

Während einer Messkampagne an ELI-ALPS (s.u.) haben wir 2019 erstmals Messungen mit phasenstabilen Einzelzyklenpulsen durchgeführt und gezeigt, dass Interferenzen der emittierten Harmonischen Rückschlüsse auf die Phase des treibenden Laserpulses ermöglichen¹.

Darauf aufbauende Experimente sollten zudem die Charakterisierung der Hohen Harmonischen ermöglichen. Wesentlich dafür ist jedoch die präzise Charakterisierung des verwendeten Laserpulses. Diesem Puzzlestein sind wir in Zusammenarbeit mit dem IFK (Prof. Ronning) und dem IPC (Prof. Turchanin) durch die Entwicklung einer geeigneten Methode wesentlich näher gekommen. Unsere Methode ist denkbar einfach umzusetzen (siehe Abb. 2) und ermöglicht die präzise Vermessung des Laserpulses direkt an der Probe.

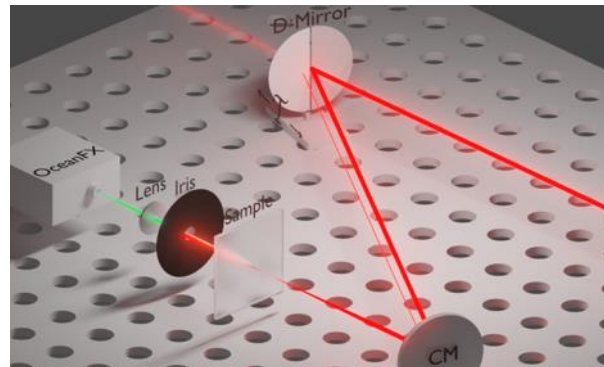


Abb. 2. Experiment zur Charakterisierung der Laserpulse mittels hoher Harmonischer an dünnen Schichten und nanoskaligen Festkörpern
Abbildung aus Publikation²

¹ Hollinger, R., et al, (2020), "Carrier-envelope-phase measurement of few-cycle mid-infrared laser pulses using high harmonic generation in ZnO", Opt. Express **28**, 7314-7322, <https://doi.org/10.1364/OE.383484>

² Awad, M, et al. (2024), „Few-cycle laser pulse characterization on-target using high-harmonic generation from nano-scale solids“, Optics Express **32**, 1325-1333, <https://doi.org/10.1364/OE.508062>

Zweiwöchige Messkampagne an der „Extreme Light Infrastructure“ (ELI-ALPS)

Im März 2023 wurden zwei Experimente am europäischen Laserforschungsinstitut ELI-ALPS durchgeführt. Die Anlage in Szeged, Ungarn, bietet eine Reihe hochmoderner Laserquellen für die Forschung und steht Nutzern aus der ganzen Welt auf Antrag zur Verfügung.

Unser erstes Experiment wurde durch die eingangs erwähnten Experimente an ArH₂O motiviert. Unsere Vorarbeiten zeigten eindeutig den Einfluss der molekularen Umgebung auf die Ionsitaionsdynamik. Dies sollte an ELI mit der sogenannten RABITT-Methode näher untersucht werden. Wir konnten dabei wert-



Abb. 3. Das Team (v.l.n.r. Apurba Manna, Matthias Kübel, Mohanad Awad, Sebastian Hell) während eines Wochenendausflugs nach Budapest.
Eigenes Foto.

volle Erfahrungen sammeln, das Experiment aus technischen Gründen jedoch nicht erfolgreich abschließen.

Das zweite Experiment mit Einzelzyklenpulsen im middle-

ren Infrarot lieferte publizierbare Ergebnisse zur Pulscharakterisierung (siehe oben) und zur phasenabhängigen Emission Hoher Harmonischer an nanoskaligen Festkörpern.

Otto-Schott-Institut für Materialforschung (OSIM)



Foto: Janett Grabow

Geschäftsführender Institutsdirektor:**Prof. Dr. –Ing. Lothar Wondraczek**

(Standort Fraunhoferstr. 6, Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät)

Institutsdirektor, Vertreter der PAF**Prof. Dr.-Ing. habil. Frank A. Müller**

(Standort Löbdergraben 32, Physikalisch-Astronomische Fakultät)

Zur Physikalisch-Astronomischen Fakultät gehören folgende Arbeitsgruppen:**Professur für Metallische Werkstoffe**

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h.c. Markus Rettenmayr (verstorben 5/2022)

Vertreten durch: Dr. Stephanie Lippmann

Professur für Materialwissenschaft

Prof. Dr. rer. nat. Klaus D. Jandt

Professur für Mechanik der funktionellen Materialien

Prof. Dr. Enrico Gnecco (bis 7/2021)

Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien

Prof. Dr. –Ing. habil. Frank A. Müller

Professur für Computational Materials Science

Prof. Dr. rer. nat. habil. Marek Sierka

Professur für Faseroptik und -sensorik (am IPHT Jena)Prof. Dr. Markus A. Schmidt (siehe S. [120](#))**Nachwuchsgruppe für stimuli-reponsive anorganische Hybridmaterialien**

Dr. Eva von Domaros

Adresse: Löbdergraben 32, 07743 Jena/ Fraunhoferstr. 6, 07743 Jena**Homepage:** www.osim.uni-jena.de

Professur für Metallische Werkstoffe

Forschungsschwerpunkte

- rasche Phasenumwandlungen: in-situ Beobachtung und Modellierung
- Hochdurchsatzexperimente zur Bestimmung physikalischer, thermodynamischer und kinetischer Daten
- Entwicklung von CCA- und Al-Li-Legierungen für selektives Laserschmelzen und Lotlegierungen für die Halbleiterindustrie mit CALPHAD-basierten Werkzeugen

Die schwere Erkrankung und der viel zu frühe Tod des von seinen MitarbeiterInnen und KollegInnen hoch geschätzten Lehrstuhlinhabers, Prof. Dr. Dr. h.c. Markus Rettenmayr, war für die Arbeitsgruppe Metallische Werkstoffe in den letzten drei Jahren ein einschneidendes Ereignis.

Seit Sommer 2021 wird die Gruppe, zunächst kommissarisch und später in der Funktion als Vertretungsprofessorin, von Frau Dr. Stephanie Lippmann geleitet.

Experimentellen Methoden zur Untersuchung der Phasenselektion bei hohen Unterkühlungen

Die Vorhersage von Gefügen bei raschen Phasenumwandlungen ist Gegenstand aktueller Forschung. Mithilfe der elektromagnetischen Levitation, einem tiegellosen Verfahren, werden Phänomene der raschen Erstarrung im Detail untersucht. Es werden hochkomponentige, mehrphasige Legierungen wie Inconel 718 und metallische Gläser untersucht. Einzigartig in Jena ist die Untersuchung von niedrigschmelzenden Legierungen mithilfe einer Hochgeschwindigkeitsinfrarotkamera. Mithilfe der gewonnenen Daten ist es beispielsweise erstmalig gelungen, metastabile Verlängerung von Phasengleichgewichten CALculation of PHase Diagrams-konform

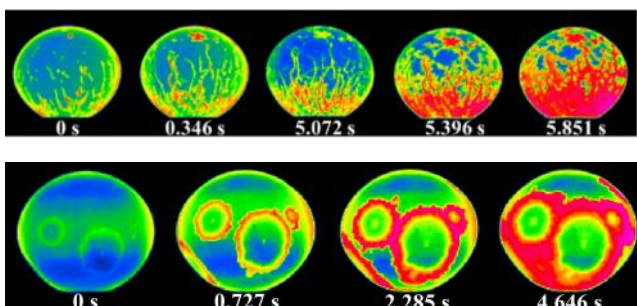


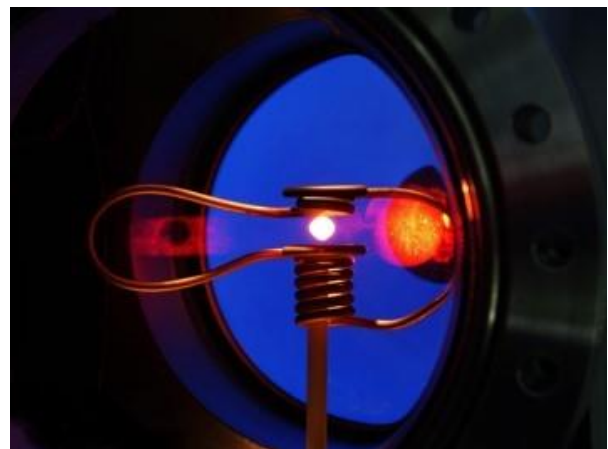
Abb. 1. Elektromagnetische Levitation zur Untersuchung rascher Erstarrung.

Links: Phasenselektion in Al-16wt.%Si bei hohen Unterkühlungen beobachtet mit MWIR Hochgeschwindigkeitskamera. Oben: Primärdendriten aus Si, Unten: auf primäres Si feines Eutektikum in Form von Inseln, die Anreicherung der Schmelze mit Si initiiert in der Folge das Wachstum von Si-Dendriten und grobem Eutektikum.

Rechts: Experimenteller Aufbau mit Doppelspule.

zu beschreiben.

Die Konkurrenz der Festkörperumwandlungen bei hohen Unterkühlungen wird mit kontrollierten elektrischen Pulsen untersucht. Im Fokus stehen Phasenumwandlungen mit kinetisch verschobenen Phasengleichgewichten und grenzflächenkontrollierte Umwandlungen, wie Massivumwandlung und die Bildung von Martensit.



Bestimmung thermodynamischer und kinetischer Daten im Temperaturgradienten

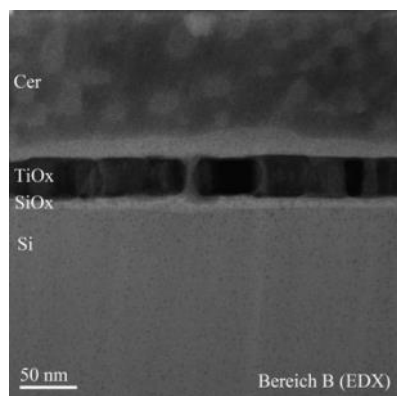
In Legierungen mit makroskopischen Konzentrationsgradienten lassen sich beim (teilweisen) Aufschmelzen und Wiedererstarren simultan in einem Temperaturgradienten eine ganze Reihe von thermodynamischen Zuständen und physikalischer Prozesse simultan beobachten. Aus ihnen lassen sich sehr effizient Daten zur Thermodynamik, Thermophysik und Kinetik vom 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 thermischen Daten.

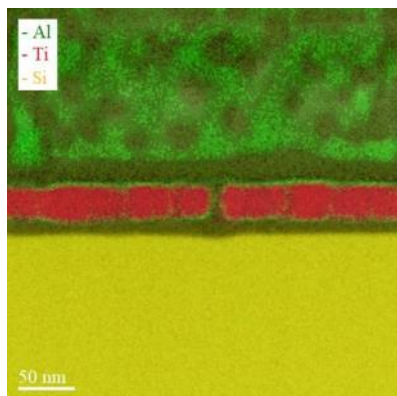
Bestimmung thermodynamischer und kinetischer Daten im Temperaturgradienten

Die Gruppe betreibt ein Cs-korrigiertes TEM (JEOL neoARM 200). Am Gerät kann Konzentrationsanalyse mit EDX-Detektoren (200mm² Detektorfläche) sowie EEL-Spektrometern erfolgen. Die Ausführung lässt atomare Auflösung nicht nur in der Abbildung (ca. 0.75Å), sondern auch in der Konzentrationsanalyse (ca. 1Å) zu.

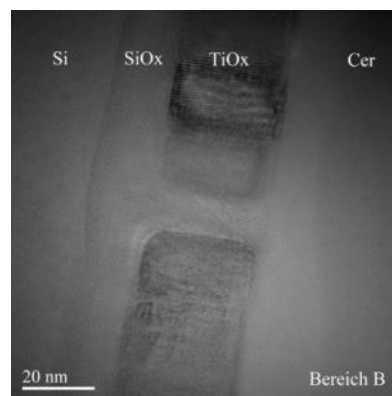
Für unterschiedliche Fragestellungen besteht eine enge Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz, TU Ilmenau, Bergakademie TU Freiberg, FH Schmalkalden, dem Fraunhofer IKTS, den Arbeitsgruppen von Prof. Ronning und Prof. Paulus sowie dem IPHT.



STEM ADF Aufnahme



Elementmapping mit EDX



HRTEM Aufnahme

Abb. 2. Die Abbildungen zeigen eine oxidische Mehrlagenschicht auf Si-Wafer und geben Ausschluss über die während des Prozesses ablaufenden

Modellierung und Simulation der Gefügeentwicklung

Zur theoretischen Beschreibung der Gefügeentwicklung werden in der Arbeitsgruppe unterschiedliche Ansätze mit scharfer und diffuser Grenzfläche betrieben. Federführend in der Modellierung ist Dr. Peter Galenko, u.a. Autor des kürzlich erschienenen Buchs „Phase Field Theory in Materials Physics – The Hodograph Equation“, Springer 2024.

In den letzten drei Jahren stand die Gefügeentwicklung in mehrphasigen, hochkomponentigen Legierungen zur Vorhersage mechanischer Eigenschaften im Mittelpunkt.

[1] P. Galenko „Phase Field Theory in Materials Physics: The Hodograph Equation“ Springer (2024). ISBN: 978-3-031-49277-8

Professur 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 kontrollierten Strukturen und Eigenschaften

Antimikrobielle und bioaktive Proteinbeschichtungen

In den letzten Jahren hat sich ein zunehmendes Interesse an Materialien entwickelt, die mit Proteinen in Form von Nanofasern beschichtet werden können, sogenannten Protein-Nanofasern (PNF). Dies resultiert aus ihren einzigartigen Eigenschaften, wie einer guten Biokompatibilität, einer großen Oberfläche und der Fähigkeit, die natürlichen Strukturen von Geweben nachzuahmen. Diese Materialien zeigen ein breites Anwendungspotenzial in der Materialwissenschaft, im Tissue Engineering und in der biomedizinischen Technik. Beispielsweise können sie als Gerüste für Zellkulturen, zur Arzneimittelabgabe oder als Biosensoren dienen. Aufgrund der vielfältigen und vielseitigen Funktionen von Proteinen werden sie als potenzielle Implantationsmaterialien

für verschiedene Anwendungen erforscht. Ein vielversprechender Ansatz zur Modulation der Eigenschaften von PNFs besteht darin, verschiedene Proteinarten zu kombinieren, um unterschiedliche Funktionalitäten in einzelnen Nanofasern zu integrieren. Diese werden als Hybrid-Protein-Nanofasern (hPNFs) bezeichnet. Kürzlich berichteten wir über eine von der Natur inspirierte, selbstassemblierende Methode zur Herstellung von hPNFs aus zwei verschiedenen Plasmaproteinen, nämlich Fibrinogen (FG) und Fibronectin (FN). [1] Die Kombination dieser Proteine in hPNFs ist aufgrund ihrer Schlüsselfunktionen, wie die Beteiligung von FG an der Blutgerinnungskaskade und der Beitrag von FN zu verschiedenen zellulären Prozessen (wie Zellwachstum, Migration, Adhäsion und Differenzierung), äußerst wünschenswert. Durch Veränderung der Zusammensetzung der Proteine, können Struktur und Eigenschaften der resultierenden hPNFs gesteuert werden.

Ziel unseres Teams ist die Entwicklung neuer antimikrobieller Biomaterialbeschichtungen auf Basis von Proteinen und deren Überstrukturen. Diese sollen die Bakterienadhäsion hemmen und gleichzeitig das Osteoblastenwachstum fördern. Prof. Jandt ist Sprecher des neuen DFG-GRK 2723 Material-Mikroben-Mikroumgebungen (M-M-M): Antimikrobielle Biomaterialien mit maßgeschneiderten Strukturen und Eigenschaften.

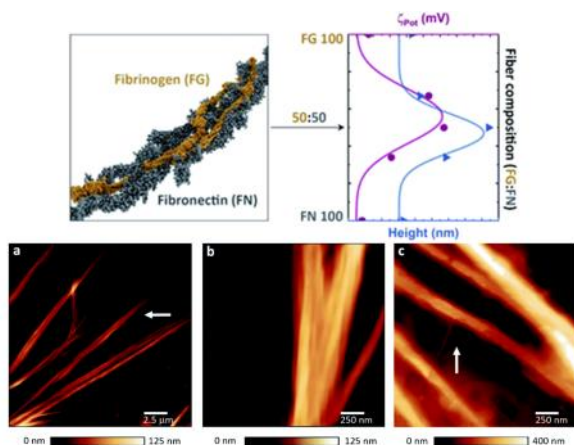


Abb. 1. Strukturelle und physikalische Eigenschaften von hPNF (oben). AFM-Bilder von FN-FG PNF (unten): (a) und (b) bandartige Struktur, (c) Protofibrillen.

[1] Scheuer et al. (2021): Self-assembled fibrinogen–fibronectin hybrid protein nanofibers with medium-sensitive stability. RSC Advances, 10.1039/D0RA10749B

Control of cellular response on materials through protein adsorption

Titan und seine Legierungen zählen zu den häufigsten Implantatmaterialien. Ihre Anwendung birgt jedoch das Risiko von Komplikationen wie Blutgerinnung und Entzündungen. Die Bildung von Blutgerinnseln ist mit der Anhaftung von Thrombozyten an der Materialoberfläche verbunden und wird durch den Entfaltungszustand des adsorbierten Fibrinogens (FG) reguliert. Dieses Phänomen ist von den Oberflächeneigenschaften der Biomaterialien, wie der Oberflächenenergie, Hydrophilie oder Oberflächenrauigkeit, abhängig. In diesem Projekt wird untersucht, wie die kristallografische Orientierung, also die Anordnung der Atome auf der Materialoberfläche, und somit die Oberflächenenergie die adsorbierte FG-Konformation (Verfügbarkeit von Bindungsstellen für Thrombozyten) sowie die weitere Adhäsion der Thrombozyten beeinflussen. [2] Es hat sich gezeigt, dass durch die Anpassung der kristallografischen Ausrichtung des Materials die Anhaftung von Thrombozyten kontrolliert werden kann, wodurch die unerwünschte Gerinnung auf der Oberfläche des Biomaterials verringert wird. [3]

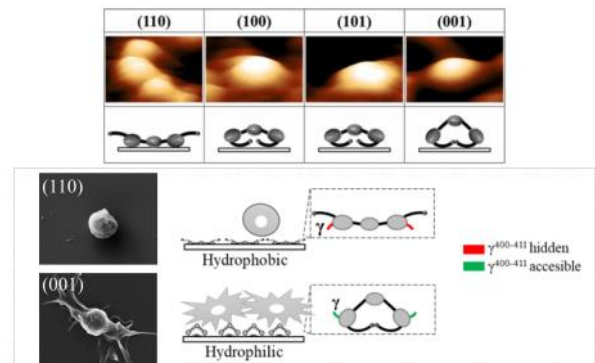


Abb. 2. TiO_2 Kristallografische orientierungsabhängige FG-Adsorption (oben) und Thrombozytenadhäsion (unten).

[2] Struczynska et al. (2022): Rutile facet-dependent fibrinogen conformation: Why crystallographic orientation matters, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 112506.

[3] Struczynska et al. (2023): How Crystallographic Orientation-Induced Fibrinogen Conformation Affects Platelet Adhesion and Activation on TiO_2 , *Advanced Healthcare Materials*, 202202508.

Veranstaltung des internationalen Symposiums für Biomaterialien BioMAT 2023

Die BioMat ist eine der führenden internationalen Konferenzen auf dem Gebiet der Biomaterialien und der bioinspirierten Materialien weltweit. Organisiert von der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e. V. (DGM) und ihrem Fachausschuss Biomaterialien unter Leitung von Prof. Dr. Klaus D. Jandt findet die 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, Prüfung and An-

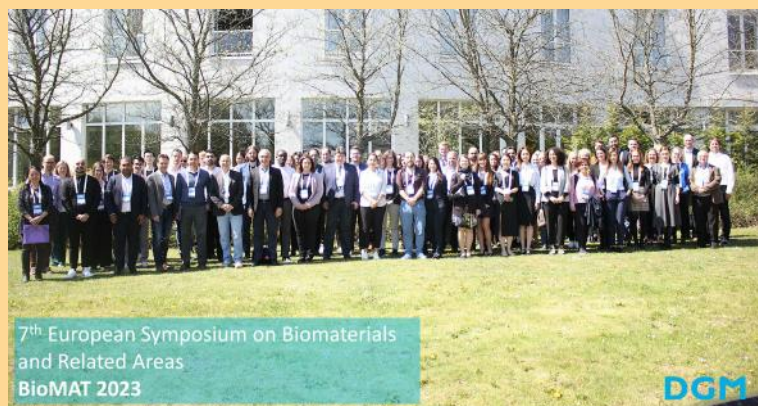


Abb. 3. Wissensteilung auf der Euro BioMat. Foto: DGM photo gallery

wendung von Biomaterialien. Die BioMat bringt über 200 Experten auf den eng verwandten Gebieten der Biomimetik, der Biomineralisation und der Biopolymere zusammen. Dabei

stehen Vortrags und Posterbeiträge sowie Plenarvorträge von führenden internationalen Biomaterialforschern und die Förderung des Nachwuchses im Vordergrund.

Professur für Oberflächen- und Grenzflächentechnologien Prof. Dr.-Ing. Frank A. Müller



Forschungsschwerpunkte

- Verwendung von CO₂- 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 CO₂-Laservaporisation (LAVA): ZrO₂/Al₂O₃-NP für biokompatible Dispersionskeramiken mit herausragenden mechanischen Eigenschaften, ferri- und supermagnetische Eisenoxid-NP als MRT-Kontrastmittel, für Hyperthermie und Drug-Targeting; phosphoreszierende NP zur Herstellung therapeutisch wirksamer Kontaktlinsen; dotierte NP als Fluoreszenzmarker für das Bioimaging und als Basis aktiver Lasermedien; oxidische Hochentropie-NP auf Titanat- und Zirkonat-Basis₂) für die Umwelt- und Energietechnik.
- Bioinspirierte Materialien: Biomineralisation und Selbstheilung nach dem Vorbild Knochen; funktionelle Oberflächen nach dem Vorbild Lotusblatt (dynamische Benetzung), Chamäleon (Farbänderung) und Sandfisch (Tribologie); perlmuttartige Strukturhybride mit schadenstoleranter Bruchmechanik.

Gasphasen-Kondensation funktioneller keramischer Nanopartikel mittels CO₂-Laservaporisation (LAVA)

Die Auswahl geeigneter Rohstoffe und Verfahren zu ihrer Herstellung sind von zunehmender Bedeutung für die Entwicklung moderner Hochleistungskeramik. Strukturkeramiken bedürfen beispielsweise der Verwendung sehr feiner Rohpulver, während Funktionskeramiken eine möglichst homogene Verteilung der Dotierstoffe im Rohmaterial erfordern.

Die Laservaporisation (LAVA) stellt ein laserinduziertes Verfahren zur flexiblen Herstellung oxidkeramischer Nanopartikel mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Intrapartikelstruktur dar. Der Verdampfungsprozess beginnt mit groben Keramikpulvern, die im Fokus eines CO₂-Laserstrahls verdampft werden. Durch anschließende Gasphasenkondensation entstehen sphärische, kristalline und nur leicht agglomerierte Nanopartikel mit Partikelgrößen um 20 nm und der dem Ausgangspulver entsprechenden chemischen Zusammensetzung. Die Gewinnungsraten der Nanopulver liegen bei bis zu 30 g/h. Da der schnelle Entstehungsprozess nicht im thermodynamischen Gleichgewicht abläuft, bestehen die resultierenden Nanopartikel gemäß der Ostwald'schen Stufenregel in der Regel aus einer metastabilen Niedrigtemperaturphase des betreffenden Oxids. Die Co-Verdampfung von Rohpulvergemischen ermöglicht die Herstellung mehrphasiger Nanokugeln in einem einzigen Prozessschritt. So können verschiedene Phasenzusammensetzungen und morphologische Sub-

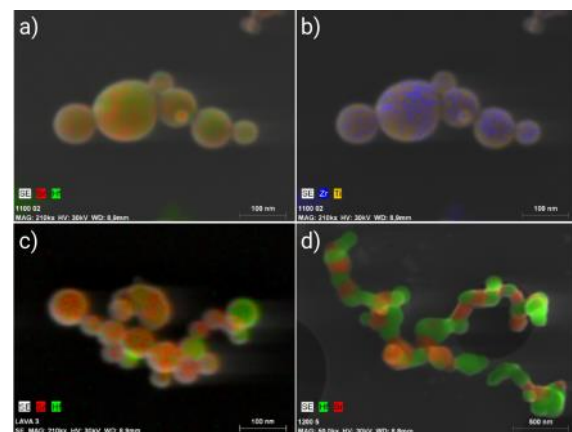


Abb. 1. LAVA-NP im HfO₂-SrO₂-TiO₂-Y₂O₃-ZrO₂-System: a-c) 25°C, d) 1200°C.

strukturen erhalten werden, darunter dotierte Mischkristalle, Hochentropie-Oxide (HEO), in eine Glasmatrix eingebettete Nanokristallite und intrapartikuläre Dispersionen. Die Zusammensetzung der Partikel sowie ihre gezielte Dotierung können durch Mischung der Ausgangspulver mit hoher Präzision eingestellt werden. Daher sind LAVA-Nanopartikel von besonderem Interesse für die Verwendung in hochfesten Strukturkeramiken sowie in Funktionskeramiken mit maßgeschneiderten, z. B. magnetischen, opto-elektronischen, piezo-elektrischen oder photo-katalytischen Eigenschaften.

FA Müller "Synthesis of Ceramic Nanoparticles by Laser Vaporization (LAVA)" *cfi/Ber. DKG* **100** [2] (2023) E31-E37.

Laser-induzierte periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS)

Mittels Ultrakurzpulslaser lassen sich laser-induzierte periodische Oberflächenstrukturen (kurz: LIPSS) auf bestimmten Materialien großflächig mit hoher Regularität erzeugen. Diese auf der sub-Mikrometerskala strukturierten Oberflächen bieten hervorragende Modellsysteme, um funktionelle Oberflächeneigenschaften und deren Einflussparameter detailliert zu untersuchen. Im Rahmen zweier DFG-Projekte werden die beiden nachfolgenden Ansätze verfolgt.

Reibung auf der Nanoskala: Als Basis dienen LIPSS, die mit unterschiedlicher Periodizität, Orientierung und Komplexität auf verschiedenen Werkstoffen aufgebracht werden. An diesen wird der Zusammenhang zwischen stofflichen und geometrischen Eigenschaften zweier Festkörperoberflächen während der Reibung unter trockenen Bedingungen untersucht (Abb. 2). Die Analy-

se erfolgte auf der Nanoebene mittels Rasterkraftmikroskopie (AFM). Hierbei werden für verschiedene Materialpaarungen die Oberflächeneigenschaften wie Morphologie, Steifigkeit und Haftung vor der Kontaktaufnahme analysiert und die zeitliche Entwicklung der Reibung unter verschiedenen Lastbedingungen ermittelt. Die erzielten Ergebnisse dienen als Input zur Überarbeitung und Ergänzung bestehender Kontakttheorien.

Dynamische Benetzung: LIPSS wurden auf Metallen erzeugt und mittels Replikaverfahren auf flexible, dehnbare Polymere übertragen. Das mechano-induzierte Benetzungsverhalten wurde durch selektive chemische Oberflächenfunktionalisierungen gesteuert. Hierdurch gelingt es, die Benetzbarkeit der Polymere durch mechanische Verformung über einen weiten Bereich reversibel einzustellen. Der Kontaktwinkel ferroelektrischer Polymere wiederum lässt sich durch eine externe elektrische Spannung zwischen dem Wassertropfen und dem Substrat steuern. Ziel ist es, basierend auf dem Pyro- bzw. Piezoeffekt des ausgewählten Polymers, den Kontaktwinkel als Funktion der Temperatur bei der mechanischen Belastung einzustellen.

E Chan, J Heier, K Lubig, S Gräf, FA Müller, E Gnecco "Dynamics of Sliding Friction between Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) on Stainless Steel and PMMA Microspheres" ACS Appl. Mater. Inter. 15 (2023) 14970-14978. DOI: 10.1021/acsami.3c00057

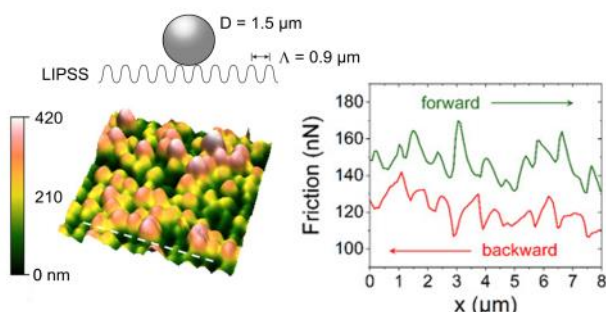


Abb. 2. Reibungsuntersuchung auf nanostrukturierten Oberflächen mittels AFM.

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 viersemestrige Studium ist als weiterbildender Fernstudiengang konzipiert und be-

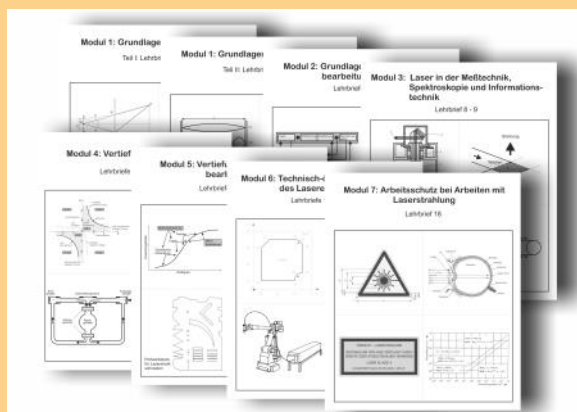


Abb. 3. Lehrmaterialien: 18 Lehrbriefe in 7 Modulen.

rufsbegleitend absolvierbar. Mit einem bundesweit anerkannten Universitätszertifikat sowie der zertifizierten „Sach-

kunde als Laserschutzbeauftragter“ wird das Studium abgeschlossen.

Professur für 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.
- Entwicklung von Software zur Materialdigitalisierung, Entwicklung von Materialontologien, digitalen Workflows sowie semantischen Datenräumen zum Management von hierarchischen, prozessabhängigen Materialdaten.

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 entwickelte Software behandelt größere molekulare und ausgedehnte, periodische Systeme methodisch einheitlich und numerisch genau. Wir haben kürzlich eine praktische und effektive Implementierung der Dichtefunktionaltheorie-basierten Einbettung (DFET) entwickelt, mit der sowohl periodische als auch aperiodische Systeme gleichermaßen behandelt werden können. Sie ermöglicht effiziente und sehr genaue quantenchemische Simulationen von großen Systemen.

Sharma M., Sierka M. (2022): Efficient Implementation of Density Functional Theory Based Embedding for Molecular and Periodic Systems Using Gaussian Basis Functions. *J. Chem. Theory Comput.* DOI: 10.1021/acs.jctc.2c00380

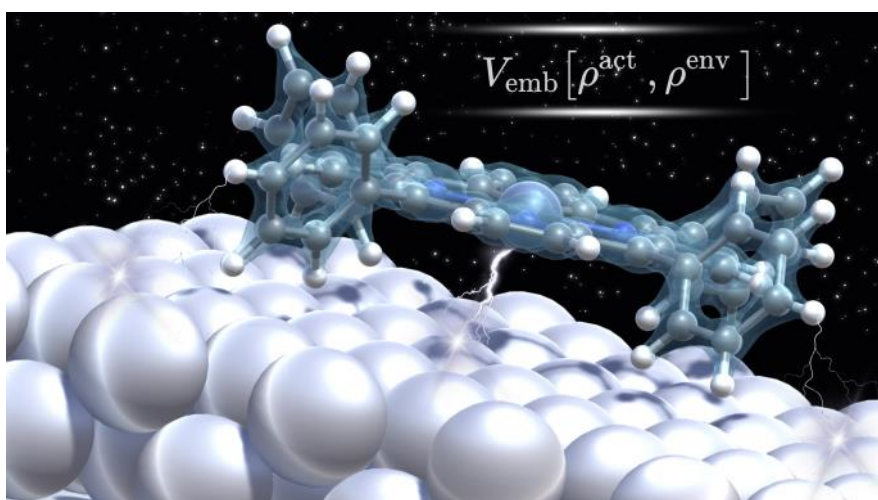


Abb. 1. Schematische Darstellung einer Simulation basierend auf der Dichtefunktional-Einbettungstheorie eines organischen Moleküls, das auf einer Metalloberfläche adsorbiert ist. Das organische Molekül wird durch eine hochgenaue wellenfunktionsbasierte Methode beschrieben, während die Metalloberfläche durch die Dichtefunktionaltheorie beschrieben wird.

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).

Chi M., Gargouri R., Schrader T., Damak K., Maâlej R., Sierka M. (2022): Atomistic Descriptors for Machine Learning Models of Solubility Parameters for Small Molecules and Polymers. *Polymers*. DOI: 10.3390/polym14010026

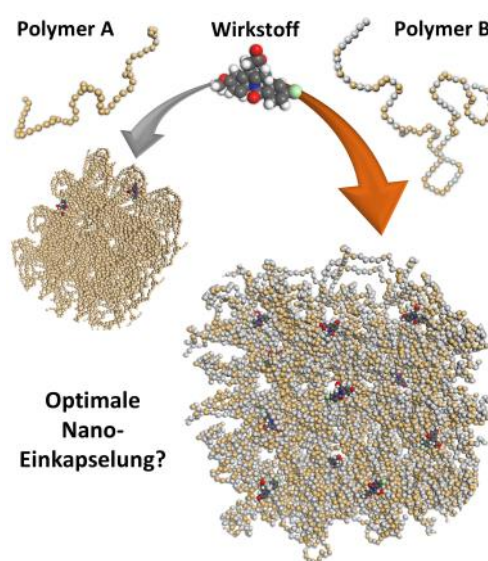


Abb. 2. Mittels eines kombinierten rechnerischen und experimentellen Ansatzes wird die Hydrophobizität von Polymeren systematisch variiert um die höchstmögliche Speicherkapazität medizinischer Wirkstoffe zu erreichen.

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 rechen-effizienten quantenmechanischen Simulationsmethoden zur Beschreibung solcher Materialien. Der methodische Schwerpunkt liegt dabei auf der Implementierung eines rechnerisch effizienten und genauen Dichtefunktionaleinbettungs-schemas und dessen Kopplung mit wellenfunktionsbasierten Methoden und der (Echtzeit-)zeitabhängigen Dichtefunktionaltheorie.

Li W. et al. (2023): Resonance Effect in Brunel Harmonic Generation in Thin Film Organic Semiconductors. *Adv. Optical Mater.* DOI: 10.1002/adom.202203070

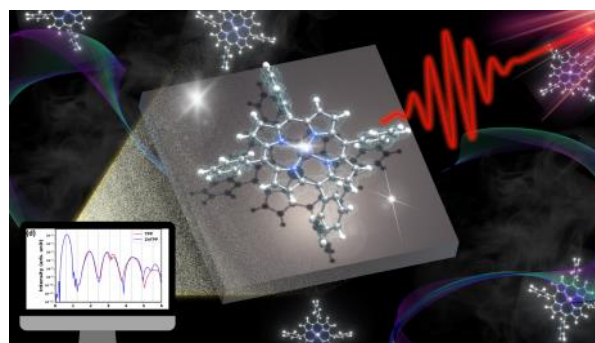


Abb. 3. Unsere (Echtzeit-) zeitabhängigen Dichtefunktionaltheorie-Simulationen in Kombination mit experimentellen Studien zur Erzeugung von hohen Harmonischen in organischen Dünnschicht-Halbleitern, die einer intensiven ultrakurzen Laseranregung ausgesetzt sind, haben ergeben, dass resonante Übergänge, die durch niederenergetische Photonen induziert werden, das nichtlineare Verhalten der Materialien erheblich verändern können, was sich in einem frühen Beginn der nichtperturbativen Erzeugung von Harmonischen äußert.

Professur für Faseroptik und –sensorik

Prof. Dr. Markus A. Schmidt

Forschungsschwerpunkte

- Integration von Nanostrukturen auf Faserendflächen wie Metaoberflächen oder Phasenhologrammen auf Faserendflächen mittels 3D Nanodrucken zur Manipulation des Ausgangsstrahl einer Faser.
- 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 Einfangens von Mikro- und Nanopartikeln mittels optischer faserintegrierter 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.

Realisierung von Meta-Oberflächen auf optischen Fasern durch 3D-Nanodruck für flexible Strahlmanipulation

Die Integration von Metaoberflächen in die Endflächen kommerziell verfügbarer Glasfasern ist ein vielversprechender Ansatz, um neue Funktionen in verschiedenen Bereichen wie Biophotonik, Faseroptik, Quantentechnologien und optische Sensorik zu erschließen. Konventionelle Top-Down-Fertigungsmethoden sind jedoch aufgrund der komplementären Fasergeometrie zu herkömmlichen Wafern nur schwer auf die Oberfläche von Glasfasern anwendbar.

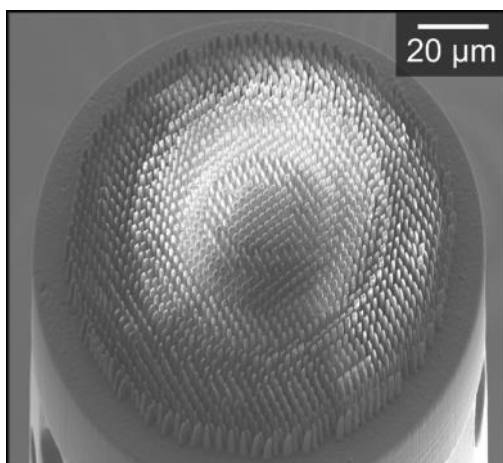


Abb. 1: Metaoberflächen-basierte achromatische Linse auf einer Faserendfläche. Foto: M. A. Schmidt

Ein vielversprechender Ansatz zur Umgehung dieses Engpasses ist der 3D-Nanodruck durch direktes Laserschreiben. Mit diesem Ansatz können auf Nanosäulen basierende Meta-Oberflächen auf die Endoberfläche von optischen Fasern aufgebracht werden, was zu einzigartigen Komponenten - sogenannten Meta-Fasern - führt, mit denen die Eigenschaften des Ausgangsstrahls der Faser geformt werden können.

Konkret wurden (i) auf Meta-Oberflächen basierende Linsen, die Licht über den gesamten Telekommunikationsbereich achromatisch fokussieren (Abb. 1), und (ii) Meta-Fasern, die strukturiertes Licht einschließlich zylindrisch polarisierter Vektorstrahlen oder Zustände mit Drehimpuls erzeugen können, demonstriert. Beide Meta-Fasern basieren auf dielektrischen Nanosäulen aus Polymermaterial und verwenden Nanosäulen unterschiedlicher Höhe innerhalb einer Meta-Oberfläche. Letztere stellt einen einzigartigen Freiheitsgrad dar, der durch das Nanodruckverfahren ermöglicht wird und mit herkömmlichen lithografischen Methoden nur schwer zu realisieren ist.

Nichtlineare Frequenzkonversion in hybriden optischen Fasern

Die nichtlineare Frequenzumwandlung ist ein effizienter Ansatz, um schwer zugängliche Spektralbereiche zu erschließen. Diese Methode wird in aktuellen Forschungsarbeiten zur Lichterzeugung durch nichtlineare Wechselwirkungen in mikrostrukturierten hybriden optischen Glasfasern untersucht. Ein zentraler Forschungsschwerpunkt ist die Superkontinuum-Erzeugung in Flüssigkernwellenleitern, die speziell auf die gezielte Adressierung von Spektralbereichen im mittleren Infrarot und die Erzeugung von Wellenlängen außerhalb der typspezifischen Superkontinuum-Bänder ausgerichtet ist. In dem hier gezeigten Beispiel (Abb. 2) führt die periodische Modulation des Kerndurchmessers einer Flüssigkernfaser zu einer Quasi-Anpassung des fundamentalen Solitons an dispersive Wellen höherer Ordnung und damit zur Erzeugung von Seitenbändern.

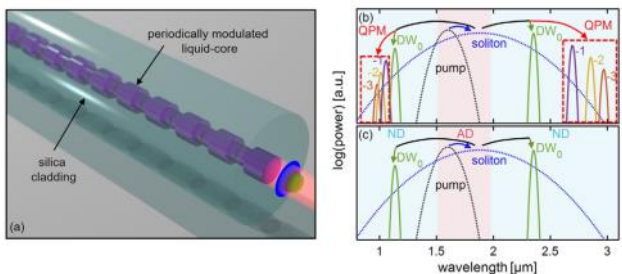


Abb. 2: Der optofluidische Lichtkäfig, welcher für integrierte Absorptionsspektroskopie eingesetzt werden kann. Rechts: Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Lichtkäfigs. Foto: M. A. Schmidt

Qi X. et al., (2024) Nonlinear Dynamics of Higher-Order Quasi-Phase-Matched Dispersive Waves Formation in Dispersion-Oscillating Liquid-Core Fibers. *Laser & Photon Rev.* 2301302.

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. Hier bieten Fasern einen wesentlichen Vorteil, da diese die Partikeldiffusion einschränken. Weiterhin wurden die Fasereigenschaften in einem Forschungsbeispiel so eingestellt, dass die Felder innerhalb des Flüssigkeitsbereichs keine räumliche Abhängigkeit zeigten, d.h. es wurden erstmals sog. flat-fields beobachtet, was die Performance dieses Ansatzes nochmals steigert.

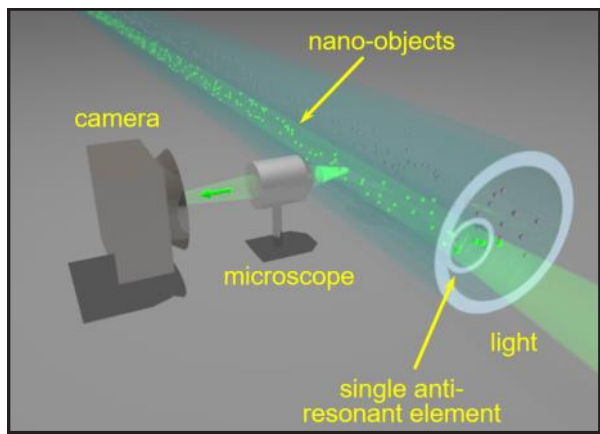


Abb. 3: In Wasser gelöste Nanopartikel (grün) werden in eine optische Hohlkernfaser gefüllt, sodass an ihnen das geführte Licht der Kernmode (rot) gestreut wird. Foto: M. A. Schmidt

Wieduwilt T. et al. (2023). Characterization of diffusing sub-10 nm nano-objects using single anti-resonant element optical fibers. *Nat. Commun.* 14, 3247.

Nachwuchsgruppe für stimuli-responsive anorganische/ Hybridmaterialien

Dr. Eva von Domaros

Forschungsschwerpunkte

- Kernquanteneffekte in quantenmechanischen Berechnungen: Es werden spezielle, sogenannte Kern-Elektron-Orbital-Methoden entwickelt und angewandt, mit deren Hilfe Kernquanteneffekte explizit beschrieben werden, wodurch eine interpretierbare Kernwellenfunktion erhalten wird.
- Vorhersage von Anharmonizität: Durch Techniken maschinellen Lernens sollen anharmonische Schwingungsfrequenzen sowie Anharmonizitätskonstanten vorhergesagt werden, wodurch eine realistischere Beschreibung makroskopischer Materialeigenschaften erzielt wird.
- Makroskopische Eigenschaften von Materialien: Unter Verwendung eines statistisch thermodynamischen Modells werden makroskopische Eigenschaften kondensierter Phasen vorhergesagt. Die Methode wird von Flüssigkeiten auf Materialien wie Polymere erweitert.
- Optische Eigenschaften an Grenzflächen: Quantenmechanische Methoden werden angewandt, um Absorptionsspektren sowie die Änderung der elektronischen Struktur nach Anregung zu beschreiben. Die Systeme sind hierbei Materialoberflächen sowie deren Funktionalisierung durch Farbstoffe.

Forschungsprojekt 1: Säurestärke aus der Protonenwellenfunktion

In quantenmechanischen Berechnungen werden die Atomkerne üblicherweise als klassische Punktladungen beschrieben. Der leichte Wasserstoffatomkern weist durchaus Quantencharakter auf, welcher darin vernachlässigt wird. Diese Quanteneffekte können in Form einer Kernwellenfunktion explizit berücksichtigt werden. Die entsprechenden Methoden werden in das Programmpaket Turbomole implementiert.

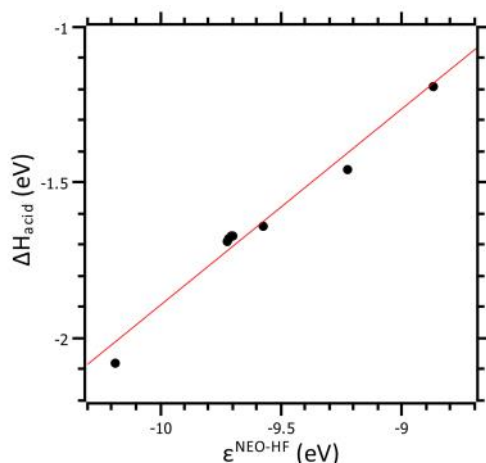


Abb. 1. Korrelation der herkömmlich berechneten Deprotonierungsenthalpie mit der Protonenorbitalenergie.

Bild: <https://doi.org/10.1039/D3CC04304E>.

Analog zur Elektronenstrukturrechnung erhält man dabei Protonenorbitale, die ihrerseits wichtige Informationen enthalten. In Analogie zum Koopmans-Theorem kann die Orbitalenergie des höchsten besetzten Orbitals zur Vorhersage der Deprotonierungsenergie herangezogen werden, welche sich in die wichtige Größe übersetzen lässt. Dadurch ist es gelungen, die Deprotonierungsenthalpien einer Reihe organischer Säuren sehr zuverlässig vorherzusagen.

Das besondere Potential dieser Methode liegt darin, dass sie problemlos auch auf periodische Systeme, z.B. Zeolithe, anwendbar ist. Die herkömmliche Beschreibung von Deprotonierung in periodischen Rechnungen ist derzeit nicht ohne weiteres möglich, da in jedem periodischen Abbild eine Ladung erzeugt wird, sodass ein unendlich geladenes System resultiert. Unter Verwendung der Protonenwellenfunktion werden keine deprotonierten und somit geladenen Systeme behandelt, sondern die Wellenfunktion im neutralen System dient zur Analyse. So können auch solche technisch relevanten Materialien theoretisch beschrieben werden.

Franzke, Y. J., Holzer, C. et al. [inkl. Perl, E.] (2023): TURBOMOLE: Today and Tomorrow. J. Chem. Theory Comput., <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.3c00347>.

Schrader, T., Khanifaev, J., Perl, E. (2023): Koopmans' theorem for acidic protons. Chem. Comm., <https://doi.org/10.1039/D3CC04304E>.

Forschungsprojekt 2: Anharmonizität für Materialeigenschaften

Schwingungen spielen vor allem bei höheren Temperaturen eine große Rolle, z.B. für thermodynamische Eigenschaften. In Berechnungen werden sie meist durch die unzureichende harmonische Näherung beschrieben. In diesem Projekt wird ein umfangreicher Datensatz generiert, für den explizit anharmonische Berechnungen durchgeführt werden. Anschließend werden mit Hilfe maschinellen Lernens anharmonische Frequenzen und Konstanten für unbekannte Systeme vorhergesagt.

Diese können dann entweder direkt als Schwingungsspektrum (Infrarot oder Raman) analysiert werden, oder in Form thermodynamischer Berechnungen weiterverwendet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Anwendung der Quanten-Cluster-Equilibrium-Methode, einer besonderen statistisch-thermodynamischen Methode, die es erlaubt neben thermodynamischen Größen auch Aussagen über strukturelle Eigenschaften zu treffen.

So wurde beobachtet, dass Anharmonizität

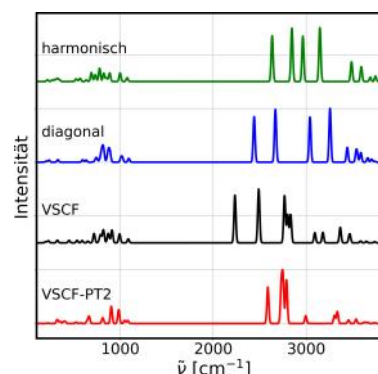


Abb. 2. Einfluss anharmonischer Methoden auf das berechnete Schwingungsspektrum von HF.

Bild: <https://doi.org/10.1002/nadc.20234138919>.

sowohl die Struktur motive als auch Eigenschaften wie die Wärmekapazität beeinflusst.

Khanifaev, J., Schrader, T., Perl, E. (2023): Berechnungen von Molekülschwingungen in der Thermodynamik. Nachrichten aus der Chemie: Trendbericht Theoretische Chemie, <https://doi.org/10.1002/nadc.20234138919>

Khanifaev, J., Schrader, T., Perl, E. (2024): The effect of anharmonic frequencies on thermodynamic properties of liquid hydrogen fluoride. J. Chem. Phys., in Revision.

Forschungsprojekt 3: Optische Eigenschaften funktionalisierter Oberflächen

Die elektronische Struktur periodischer Systeme wird meist durch ebene Wellen beschrieben. An Grenz- und Oberflächen führt der plötzliche Abfall bzw. die Änderung der Elektronendichte zu Schwierigkeiten für diesen Ansatz.

In diesem Projekt kommen stattdessen lokale Basisfunktionen zum Einsatz. Hierfür werden verschiedene Dichtefunktionale für die Berechnung von Bandlücken evaluiert. Anschließend sollen (nichtlinear-)optische Eigenschaften der reinen sowie funktionalisierten Oberflächen bestimmt und der Einfluss der Funktionalisierung, z.B. durch adsorbierte Farbstoffmoleküle, Defekte, oder Heterostrukturen mit Gitterfehlpassung, quantifiziert werden. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 1375 NOA sollen auf diese Weise gezielt Oberflächen mit gewünschten optischen Eigenschaften vorgeschlagen werden.

Schrader, T., Perl, E., Fritz, T., Sierka, M. (2023): Performance of Common Density Functionals for Excited States of Tetraphenyl-dibenzoperiflanthene. J. Phys. Chem. A, <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.2c06715>.

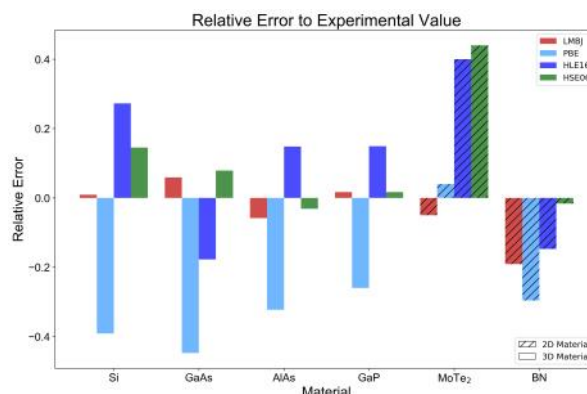


Abb. 3. Relative Abweichung der berechneten Bandlücke im Vergleich zum Experiment für ausgewählte Dichtefunktionale.

Bild: Kíra Klébesz.

Theoretisch-Physikalisches Institut (TPI)



Foto: Jan-Peter Kasper

Institutsdirektor: Prof. Dr. Bernd Brügmann

Professur für Theoretische Physik/Quantentheorie

Prof. Dr. Andreas Wipf (10/2020–9/2023 Seniorprofessur)

Professur für Quantentheorie (ehemals Heisenberg-Professur)

Prof. Dr. Holger Gies

Professur für Quantenfeldtheorie

Prof. Dr. Stefan Flörchinger (ab 1/ 2022)

Professur für Theoretische Physik/Gravitationstheorie

Prof. Dr. Bernd Brügmann

Professur 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

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, Vielteilchenphysik und Gravitation
- 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 Materialeigenschaften. 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, das 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. In der Natur beobachtete Hochenergiesymmetrien des Standardmodells, wie z.B. die chirale Symmetrie von Fermionen, können dabei als Sonden dienen, die Informationen über die experimentell noch unzugängliche Phase starker Gravitation extra-

hieren können. Insbesondere bei den konzeptionellen und methodischen Entwicklungen in unserer Arbeitsgruppe ist die Konstruktion von Hochenergie-voll-ständigen 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.

Holger Gies, Dimitrios Gkiatas, Luca Zambelli: Background effective action with nonlinear massive gauge fixing, *Phys.Rev.D* 106 (2022) 11, 116013, DOI: 10.1103/PhysRevD.106.116013

Holger Gies, Kevin K.K. Tam, Jobst Ziebell: Pauli-term-induced fixed points in d-dimensional QED, *Eur.Phys.J.C* 83 (2023) 10, 955, DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-12080-y

Holger Gies, Abdol Sabor Salek: Asymptotically safe Hilbert-Palatini gravity in an on-shell reduction scheme, *Eur.Phys.J.C* 83 (2023) 2, 173, DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11324-1

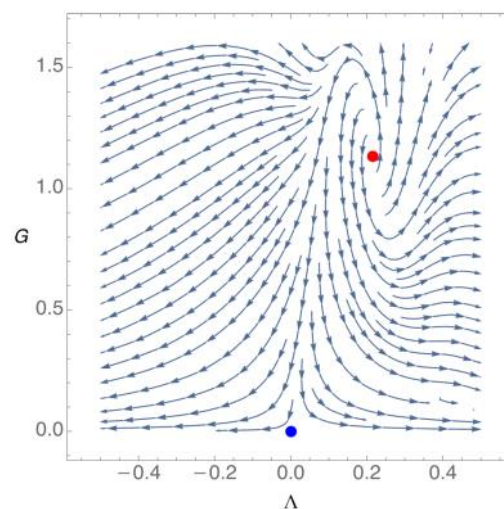


Abb. 1: Approximativer Renormierungsfluss der (dimensionslosen) Newton- und kosmologischen Konstante in einer quantisierten Theorie der Hilbert-Palatini Gravitation.

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) erforscht werden.

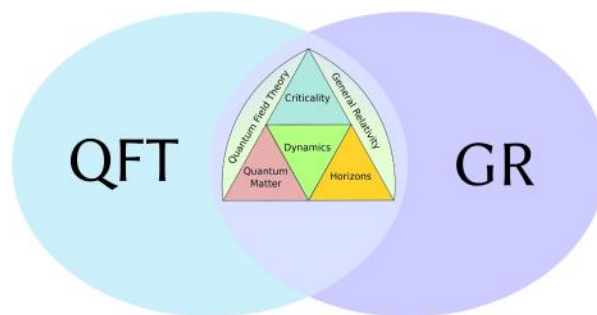


Abb. 2: Struktur des DFG-Graduiertenkollegs 2522 “Dynamics and Criticality in Quantum and Gravitational Systems” an der Schnittstelle zwischen Quantenfeldtheorie (QFT) und Allgemeiner Relativitätstheorie (GR).

Abb. 3 (Links): Physik-Combo des DFG-GRK 2522 in Leipzig, Oktober 2022.

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 solch grundlegender physikalischer Fragestellungen. Unsere Arbeitsgruppe erforscht diese neuen Mög-

lichkeiten im Rahmen der DFG-Forschungsgruppe FOR 2783 (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 Realisierungen unabdingbar. Konkrete Rechnungen in Beispielkonfigurationen schlagen vor, dass Quantensignaturen besonders mit Hilfe von Kombinationen mehrerer Effekte (z.B. Refraktion und Streuung) isoliert werden 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.

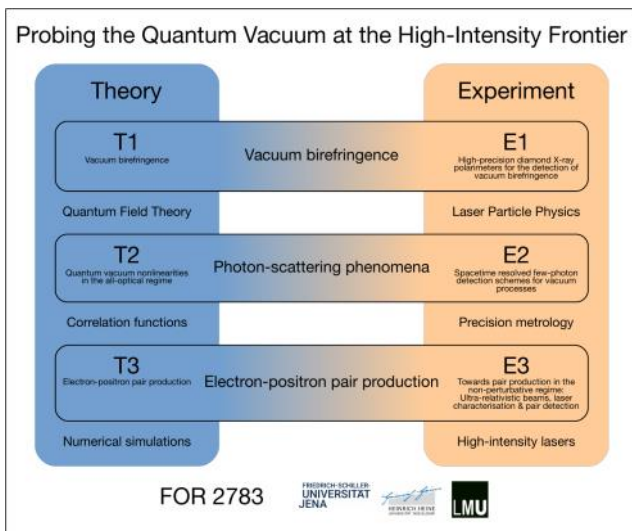


Abb. 4. Struktur der DFG-Forschungsgruppe FOR 2783, www.quantumvacuum.org.

Felix Karbstein, Chantal Sundqvist, Kai S. Schulze, Ingo Uschmann, Holger Gies, Gerhard G. Paulus: Vacuum birefringence at x-ray free-electron lasers, *New J.Phys.* 23 (2021) 9, 095001, DOI: 10.1088/1367-2630/ac1df4

Professur für Quantenfeldtheorie

Prof. Dr. Stefan Flörchinger

Forschungsschwerpunkte

- Theorie der Quantenfelder, in der funktionalen Formulierung der Theorie, etwa im thermischen Gleichgewicht oder auch außerhalb des Gleichgewichts. Wir untersuchen mit Hilfe der Renormierungsgruppe wie effektive physikalische Gesetze bei großen Skalen entstehen, und interessieren uns auch für informationstheoretischen Aspekte, wie etwa Quanten-Verschränkung oder Beziehungen zur mathematischen Theorie der Informationsgeometrie.
- Relativistische Fluidodynamik und die Beschreibung des Quark-Gluon-Plasmas welches bei Kollisionsexperimenten mit sehr hohen Energien entsteht, etwa am Teilchenbeschleuniger des CERN in Genf. Mit ähnlichen Methoden können aber auch Neutronensterne beschrieben werden und in der Kosmologie spielt eine Beschreibung als Fluid ebenfalls eine wichtige Rolle.
- Kosmologische Strukturbildung durch Quantenfluktuationen und ihre Verstärkung durch Gravitationsdynamik. Hier geht es einerseits um ein besseres Verständnis von Quantenfeldern in einer expandierenden Raumzeit, zum Beispiel im sehr frühen Universum. Andererseits geht es darum zu verstehen wie zunächst sehr kleine Quantenfluktuationen später stark anwachsen und daraus Galaxien und Cluster von Galaxien entstehen.

Forschungsprojekt 1: Quantenfeldtheorie, Renormierungsgruppe und Informationstheorie

Mit den Konzepten der Quantenfeldtheorie lassen sich sehr viele Phänomene beschreiben, von der Elementarteilchenphysik über Optik und kondensierte Materie bis zur Kosmologie. Wir arbeiten hier an einem noch tieferem Verständnis, teilweise mit mathematischen Methoden. Eine interessante Frage ist dabei wie verschiedene physikalische Gesetze die bei verschiedenen Skalen gültig sind, auseinander hervorgehen.

Ein aktueller Schwerpunkt ist der Zusammen-

hang von Quantenfeldtheorie und Informationstheorie. Konzepte der Quanteninformationstheorie, wie etwa die Verschränkungsentropie, können helfen Thermalisierung und effektiv dissipative Dynamik besser zu verstehen. Auch aus Einsichten aus der Mathematik, etwa aus dem Bereich der Informationsgeometrie, lassen sich neue Erkenntnisse über die Funktionsweise von Quantenfeldtheorien generieren.

S. Floerchinger, Exact flow equation for the divergence functional, *Physics Letters B*, 846, 138244 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2023.138244>



Abb. 1: Prof. Dr. Stefan Flörchinger,
Foto: J. Scheere / U. Jena

Forschungsprojekt 2: Relativistische Fluidynamik

Quantenfelder verhalten sich über lange Zeiten, bei großen Abständen und wenn die Wechselwirkungsstärke groß genug ist, effektiv wie Flüssigkeiten. Diese Erkenntnis lässt sich nutzen um die Dynamik des Quark-Gluon-Plasmas besser zu verstehen. Dieses hat im sehr frühen Universum eine Rolle gespielt und kann heute in Laborexperimenten, etwa am LHC des CERN in Genf, studiert werden. In der Beschreibung als relativistische Flüssigkeit benötigt man mikro-

scopische Materialeigenschaften wie eine thermodynamische Zustandsgleichung, Viskosität, Leitfähigkeiten usw. Mit den Methoden der Quantenfeldtheorie lassen sich diese aus den mikroskopischen Eigenschaften einer Theorie berechnen. Es ist aber auch interessant die Bewegungsgleichungen der Fluidynamik selbst zu lösen. Mit solchen Rechnungen können experimentelle Daten direkt verglichen werden.

Forschungsprojekt 3: Kosmologische Strukturbildung

Die Strukturen des heute beobachtbaren Universums auf sehr großen Skalen, etwa die Verteilung von Galaxien und Galaxiehaufen, sind sehr wahrscheinlich aus Quantenfluktuationen im frühen Universum entstanden. Sehr kleine Fluktuationen der Dichte haben sich durch gravitative Anziehung verstärkt und wurden durch die Expansion des Universum vergrößert. Wir beschäftigen uns mit zwei Aspekten dieser Theorie. Einerseits mit der Beschreibung des Universums während dieses Strukturbildungsprozesses, insbesondere bei vergleichsweise späten Zeiten, durch Methoden der statistischen Feldtheorie. Andererseits mit der Idee die frühe Dynamik durch Quantensimulatoren experimentell zu testen. Dazu nutzt man moderne Quantentechnologie in der Form wechselwirkender Bose-Einstein-Kondensate. Für quantisierte Schallanregungen, die Phonen, entsteht dort eine effektive Raum-Zeit-Metrik, als Funktion des Ortes und der Zeit, ähnlich wie in der allgemeinen Relativitätstheorie. Durch geschickte Wahl des Dichteprofiles und der Wechselwirkungsstärke kann ein expandierendes (oder kontrahierendes) Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker Universum nachgebaut werden und die Quantenanregungen darauf in der Form der Photonen können studiert werden.

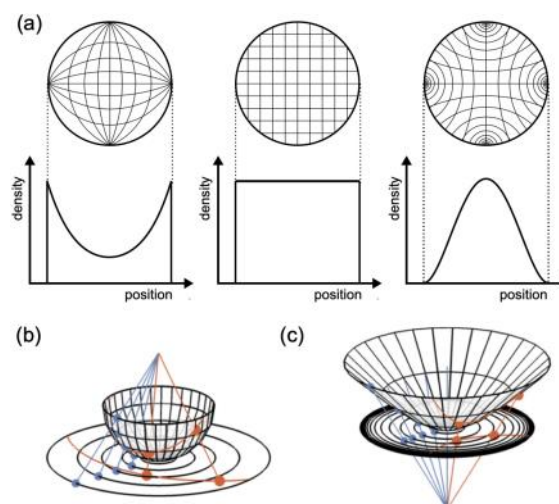


Abb. 2: (a) Korrespondenz zwischen radial-symmetrischen Dichteprofilen eines Bose-Einstein-Kondensates in zwei Dimensionen und maximal symmetrischen Räumen mit konstanter Krümmung. Beim linken Profil in (a) entsteht im Kondensat eine akustische Metrik mit positiver räumlicher Krümmung, ähnlich zur stereographischen Projektion der Kugeloberfläche in (b). Im rechten Profil ist die Krümmung negativ; es entsteht ein hyperbolischer Raum wie bei der Projektion in (c).

Grafik: Publikation M. Tolosa-Simeón et al.

C. Viermann et al., Quantum field simulator for dynamics in curved spacetime, *Nature* 611, 260 (2022), <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05313-9>

M. Tolosa-Simeón et al., Curved and expanding spacetime geometries in Bose-Einstein condensates, *Physics. Rev. A* 106, 033313 (2022), <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.033313>

A. Erschfeld, S. Floerchinger, Dark matter vorticity and velocity dispersion from truncated Dyson-Schwinger equations, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 02, 053 (2024), <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/02/053>

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.

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 Brügmann Computerprogramme, die auf einigen der größten Supercomputer Europas laufen.

Daran waren und sind auch Dr. Reetika Dudi und Prof. Dr. Tim Dietrich beteiligt, die in der AG Brügmann promoviert haben. Dietrich forscht mittlerweile als Juniorprofessor an der Universität Potsdam zur numerischen Relativitätstheorie. Zukunftsweisend war zudem die Dissertation von Reetika Dudi, Doktorandin im Graduiertenkolleg in Jena, die an der numerischen Datenanalyse für

Gravitationswellen von Neutronensternen arbeitet und als Postdoktorandin an das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik wechselte. Mittlerweile ist es möglich, für bestimmte Beobachtungen wie z.B. GW190425 von 2019 konkrete Modelle zu konstruieren.

Reetika Dudi, Ananya Adhikari, Bernd Brügmann, Tim Dietrich, Kota Hayashi, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, and Wolfgang Tichy: Investigating GW190425 with numerical-relativity simulations, *Phys. Rev. D* 106 (2022), 084039, DOI: 10.1103/PhysRevD.106.084039



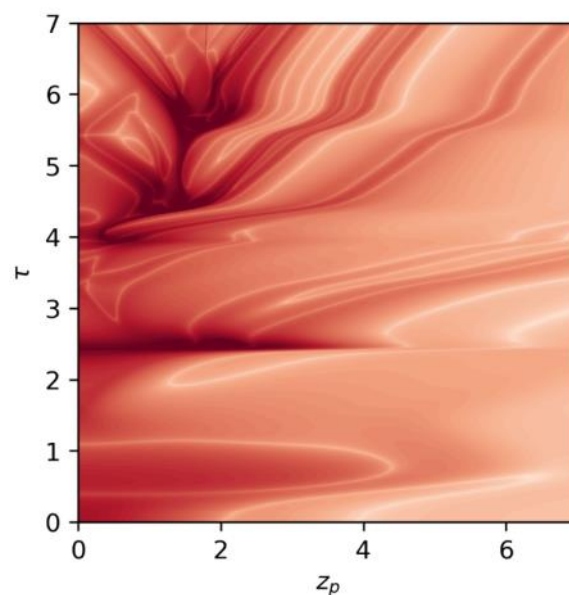
Reetika Dudi und Dr. Tim Dietrich im Harnack Haus, Berlin. (Foto: Privat)

Kollaps zum Schwarzen Loch

Im Bereich der Allgemeinen Relativitätstheorie ergeben sich fundamental theoretische Fragestellungen, zum Beispiel zur Entstehung von Schwarzen Löchern. Schwarze Löcher können durch den Gravitationskollaps von extrem komprimierter Materie unter Einfluss extrem starker Gravitationsfelder entstehen. Der sogenannte Choptuik-Effekt von 1993 beschreibt Phänomene, die im Grenzbereich von infinitesimal kleinen Schwarzen Löchern auftreten. Lösungen der Einstein-Gleichungen für Felder, die knapp zum Gravitationskollaps führen oder diesen knapp verfehlen, zeigen überraschender Weise Aspekte kritischer Phänomene wie Universalität und Selbstähnlichkeit. Erst in den letzten Jahren ist es gelungen, solche kritischen Phänomene jenseits der ersten Rechnungen in Kugelsymmetrie zu untersuchen.

Diese numerischen Rechnungen stellen besonders hohe Anforderungen an die numerische Genauigkeit und die Effizienz beim High-Performance-Computing.

Thomas W. Baumgarte, Bernd Brügmann, Daniela Cors, Carsten Gundlach, David Hilditch, Anton Khirnov, Tomáš Ledvinka, Sarah Renkhoff, and Isabel Suárez Fernández: Critical Phenomena in the Collapse of Gravitational Waves, *Phys. Rev. Lett.* 131 (2023), 181401, DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.181401



Raumzeit-Diagramm einer kollabierenden, extrem starken Gravitationswelle. Erkennbar sind quasi-periodische Oszillationen in der Zeitrichtung, sowie die Bildung eines Kollapszentrums, das entlang der z-Achse verschoben ist.

Basierend auf Fig. 3, Baumgarte et al., *PRL* 131 (2023).

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
- Licht-Materie Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit *twisted light*, d.h. Licht mit definierten Bahndrehimpulscomponenten.
- Multiphotonen-Ionisationsdynamik atomarer Systeme in kurzen und intensiven Pulsen; Zusammenarbeit mit experimentellen Gruppen am DESY und XFEL (Hamburg).
- Modellierung, Charakterisierung und Verschränkung von bi-photonischen Zuständen in der parametrischen Fluoreszenz.
- Entwicklung moderner Codes zur Erforschung der Quantendynamik komplexer Systeme; parallele Rechnen.

Forschungsprojekt 1: Präzise Vorhersagen der Kerneigenschaften verschiedener Isotope

Freie Atome und Ionen weisen mit ihren Spektrallinien einen ganz eigenen „Fingerabdruck“ auf, der sowohl zur Identifizierung der Elemente als auch in vielfältigen Anwendungen genutzt wird. Dieser Fingerabdruck entsteht aus der Dynamik der Elektronen in der (Elektronen-) Hülle der Atome und ist für viele leichte und mittelschwere Atome in den vergangenen Jahrzehnten 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 neuartiger Lichtquellen genutzt, sondern hilft auch, 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 offenschaliger Elemente noch immer eine große Herausforderung für die Vielteilchentheorie dar, auch wenn heutzutage sehr lange Isotopenketten experimentell erzeugt werden können. In Zusammenarbeit mit ex-

perimentellen Gruppen am CERN, in Jyväskylä (Finnland), Löwen (Belgien) oder Darmstadt führen wir gegenwärtig daher umfangreiche Rechnungen durch, um die Hyperfeinstruktur sowie Isotopieverschiebung verschiedener – mittlerer und schwerer – Elemente vorhersagen zu können. Abb. 1 zeigt bspw. die mittleren Ladungsradien mehrerer Scandium-Isotope mit einem deutlich erkennbaren „Knick“ bei der Neutronenzahl $N=20$, der auf einen Schalenabschluss hinweist. Um solche Vorhersagen künftig auch für schwere Elemente treffen zu können, werden in unserer Gruppe neue theoretische Modelle und Methoden zur korrelierten Elektronenbewegung entwickelt.

Kosheleva V.P., Volotka, A.V. et al. (2022): g factor of lithiumlike silicon and calcium: Resolving the disagreement between theory and experiment, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 103001, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.103001>.

Soguel R.N., Volotka A.V. und Fritzsche S. (2022): QED approach to valence-hole excitation in closed-shell systems; *Phys. Rev. A* **106** 012802, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.012802>

K. König, S. Fritzsche, et al. (2023): Surprising charge-radius kink in the Sc isotopes at $N = 20$; *Phys. Rev. Lett.* **131**, 102501, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.102501>

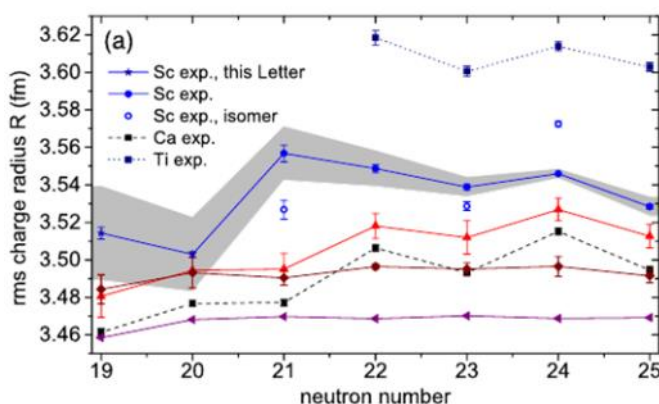


Abb.1: Experimentelle und theoretische Ladungsradien verschiedener Sc Isotope mit einem deutlich erkennbaren „Knick“ bei $N=20$ (aus König et al. 2023).

Forschungsprojekt 2: Hochverschränkte Photonenzustände für die Quanteninformatik

Die parametrische Fluoreszenz (engl. *Spontaneous parametric down-conversion, SPDC*) erlaubt die Erzeugung einer Vielzahl maßgeschneiderter Zustände, wie sie in der Quanteninformatik und Kommunikation dringend benötigt werden. Allerdings ist die Charakterisierung dieser Zustände keinesfalls einfach, da die (sogenannten) Signal- und Idler-Photonen allgemein in ihren räumlichen und Spin-Freiheitsgraden verschränkt sind. Diese Korrelationen können sehr hilfreich sein, beeinträchtigen zunächst jedoch die Effizienz und Nutzung vieler Photonenquellen. Um solche Photonenzustände künftig gezielter erzeugen und charakterisieren zu können, entwickeln wir in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF, Jena) theoretische Modelle, um die Pumpstrahlen und Kristalle besser nutzen zu können, und womit vielleicht schon bald Einzelphotonenzustände mit einer Reinheit > 0.99 hergestellt werden können.

Baghdasaryan B., Sevilla-Gutierrez C et al (2022): Generalized description of the spatio-temporal biphoton state in spontaneous parametric down-conversion; Phys. Rev. A **106**, 063711, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.063711>

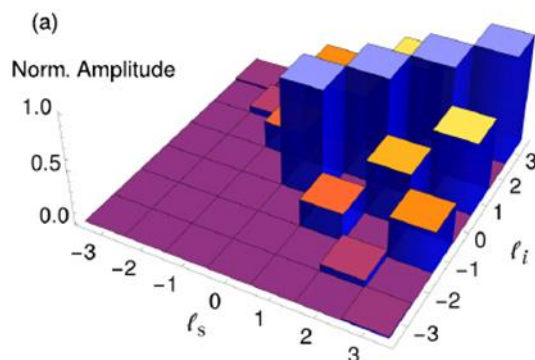
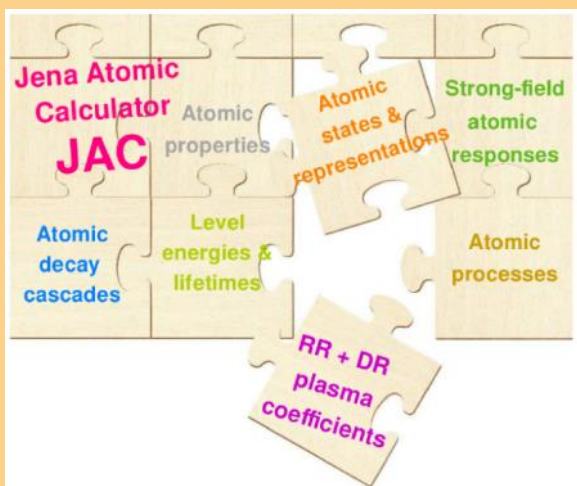


Abb. 2: Hochdimensionale (maximal) verschränkte Zustände in den – Projektionen der – Dreimpulse der Signal- und Idler-Photonen; aus Baghdasaryan B., Sevilla-Gutierrez C et al . (2022).

Baghdasaryan B., Steinlechner F. und Fritzsche S. (2022): Maximizing the validity of the gaussian approximation for the biphoton state from parametric downconversion; Phys. Rev. A **106**, 063714, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.063714>

Baghdasaryan B., Steinlechner F. und Fritzsche S. (2023): Enhancing the purity of single photons in parametric down-conversion through simultaneous pump-beam and crystal-domain engineering; Phys. Rev. A **108**, 023718, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.108.023718>

Atome und Ionen auf dem Rechner



Atomare Eigenschaften und Prozesse bestimmen maßgeblich mit, wie gut wir die Natur verstehen und ihr Verhalten praktisch nutzen können. Atomare Informationen werden daher schon lange nicht mehr allein nur in der Astro- und Plasmaphysik verwendet, sondern sind in vielen Bereichen von Wissenschaft und Technik erforderlich, bis hin zur Entwicklung neuer Strahlungsquellen bzw. „atomarer Uhren“.

Mit dem **Jena Atomic Calculator (JAC)** haben wir eine Programmierumgebung und einen „Werkzeugkasten“ geschaffen, der für viele Prozesse freier Atome und Ionen genaue Vorhersagen erlaubt und vielfältig für (fast) alle Elemente des Periodensystems eingesetzt wird.

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 Gravitations-

theorien 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.

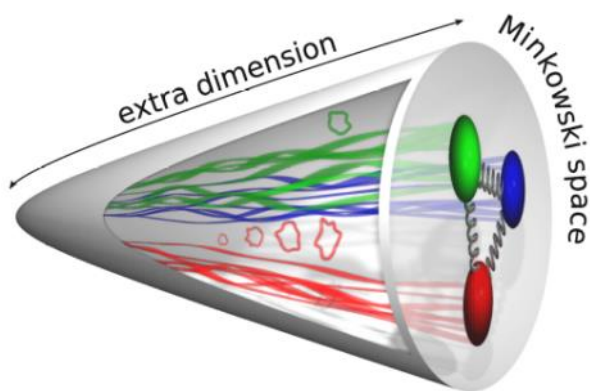


Abb. 1. Schematische Darstellung der AdS/CFT Dualität; die Quantenfeldtheorie wird symbolisiert durch ein Proton bestehend aus drei farbigen Quarks, die Gravitationstheorie durch farbige Saiten.

Hydrodynamische Beschreibung von Quantenfeldtheorien

Symmetrien und deren Brechung spielen eine wichtige Rolle in der Physik. So manifestieren sich gebrochene Symmetrien in Effekten der Hochenergiephysik und Physik der kondensierten Materie. Beispiel hierfür ist die spontane Brechung von U(1) Symmetrien, die relevant für die Beschreibung von Superfluiden ist oder die chirale Anomalie. Letztere manifestieren sich in Weyl Semimetalle.

Obwohl die hydrodynamische Beschreibung solcher Systeme seit Jahrzehnten als sehr gut verstanden gilt und in bereits viele Lehrbücher 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. Der Fokus lag hierbei auf den folgenden Systemen:

- Hydrodynamik von anomalen Quantenfeldtheorien in starken externen Magnetfeldern. Hierbei bedeutet stark, dass das

Magnetfeld als führender Term in der Ableitungsentwicklung (und nicht wie bisher üblich als eine Ableitungsterm) betrachtet wurde. Besonderer Augenmerk lag neben neuartiger nicht-dissipativer Transporteffekten auch auf bereits bekannte Effekten wie den chiral magnetischen Effekt.

- Hydrodynamik im Kontext von pseudo-spontaner Brechungen von U(1) Symmetrien. In diesem Rahmen wurden eine neue universelle Relation zwischen der Masse des Pseudo-Goldstone Bosons, dessen Diffusionsfähigkeit und der Phasenrelaxationsrate gefunden werden.

Zur Zeit studieren wir im Rahmen der holographischen Dualität auch das Verhalten fern des Gleichgewichts.

Ammon, M., Arean, D., Baggioli, M., Gray, S., Griener, S., (2022): Pseudo-spontaneous U(1) symmetry breaking in hydrodynamics and holography, JHEP, DOI:10.1007/JHEP03(2022)015.

Ammon, M., Griener, S., Hernandez, J., Kaminski, M. et al. (2021): Chiral hydrodynamics in strong external magnetic fields, JHEP, DOI:10.1007/JHEP04(2021)078.

Holographische Dualitäten für asymptotisch flache Raumzeiten

Mittels AdS/CFT Dualitäten konnten wichtige Einsichten in Theorien der Quantengravitation in asymptotisch Anti-deSitter Raumzeiten sowie in Quantenaspekten der Schwarzer Löcher gewonnen werden. Anti-deSitter Raumzeiten sind jedoch nicht in der Natur realisiert, und daher sollte die AdS/CFT Korrespondenz lediglich als ein wichtiges „Spielzeugmodell“ angesehen werden.

Ein Ziel der Arbeitsgruppe ist es holographische Dualitäten auch für asymptotisch flache Raumzeiten zu etablieren. Die asymptotischen Symmetrien der Gravitationstheorie, die sogenannte BMS Gruppe, manifestieren sich dabei als Symmetriegruppe der dualen Feldtheorie. Unter dieser Annahme konnten Korrelationsfunktionen in einer zwei-dimensionalen BMS-invarianten Feldtheorie im semiklassischen Limit bestimmt werden. Die gefundenen Ergebnisse stimmen hierbei mit denen auf der dualen Gravitationstheorie überein.

Zudem wurden Skalarfelder konsistent in dreidimensionale asymptotisch flache Höherer-Spin-

Gravitation gekoppelt. Diese strukturellen Untersuchungen zu höheren-Spin Algebren und deren Konstruktion spielt eine wichtige Rolle für konkrete Beispiele von holographischen Dualitäten in asymptotisch flachen Raumzeiten .

Des Weiteren wurde gezeigt, dass auch für sechs-dimensionale Einsteinsche Gravitation die asymptotische Symmetriealgebra durch die BMS- Algebra gegeben ist. Diese Argumentation lässt sich auch auf alle anderen geraden Raumzeitdimensionen verallgemeinern.

Ammon, M., Pannier M., Riegler, M. (2021): Scalar fields in 3d asymptotically flat higher spin gravity, J Phys A, DOI:10.1088/1751-8121/abdbc6.

Ammon, M., Gray, S., Moran, C., Pannier, M., Wöfl, K. (2021): Semi-classical BMS-blocks from the oscillator construction, JHEP, DOI:10.1007/JHEP04(2021)155.

Capone, F., Mitra, P., Poole, A. (2023): Phase space renormalization and finite BMS charges in six dimensions, JHEP, DOI:10.1007/JHEP11(2023)034.

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.

Während des Zeitraums 2020-2022 wurde die Gruppe durch den ERC Horizon2020 Starting Grant "BinGraSp" (2017-2022) und das DFG-Projekt "MEMI" (2020-2022) gefördert. Zu den laufenden Forschungsstipendien gehören ein ERC Horizon Consolidator Grant "InspiRem" zu binären Neutronensternverschmelzungen (2023-2028), ein neues DFG-Projekt "Groovhy" zu binären Schwarzen Löchern (2023-2026) (2024-2027) und ein bilaterales deutsch (DFG)-polnisches (NCN) im Rahmen der EU-Weave-Initiative grant "MERLIN" zu Magnetfeldern in Neutronensternen (2024-2027).

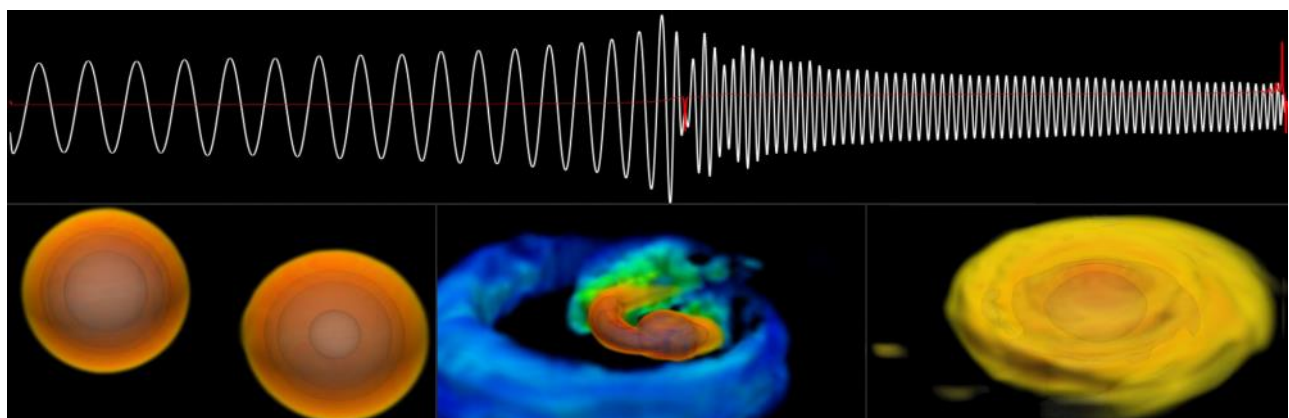


Abb.1: Simulation einer Neutronensternverschmelzung und Gravitationswellen.

Modellierung des Gravitationspektrums von Neutronenstern-Binären (BinGraSp)

Das vom Europäischen Forschungsrat geförderte Projekt BinGraSp (ERC-StG-2015) untersucht detaillierte theoretische Modelle des Gravitationspektrums von Neutronenstern-Doppelsternen.

Das Team entwickelte innovative numerische Methoden und Simulationen und produzierte Daten von astrophysikalischer Relevanz. Diese Daten wurden mit neuen und fortschrittlichen analytischen Methoden für das allgemeine relativistische Zweikörperproblem analysiert. (Abb. 2, rechts). Die detaillierte a priori Kenntnis der Signale ist wesentlich für die Interpretation der Beobachtungsdaten. Zu den wichtigsten Anwendungen gehört die Gewinnung von Informationen über die Massen der Sterne und über die Materie extremer Dichte von Neutronensternen. Die Ergebnisse von BinGraSp sind von zentraler Bedeutung für die Entwicklung der Gravitationswellenastronomie.

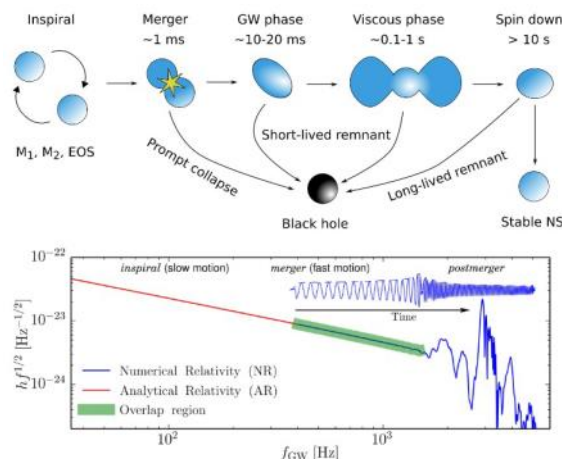


Abb. 2: Analyse des relativistischen Zweikörperproblems

Modellierung von Elektromagnetischen Wellen und Inferenz von Multi-Messenger-Beobachtungen von Neutronensternfusionen (MEMI)



Abb. 3.: Modell einer Kilonova-Lichtkurve

Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Projekt MeMi (2020 –2022) konzentrierte sich auf die elektro-magnetischen Wellen von Neutronenstern-Verschmelzungen

und die Entwicklung von Methoden zur Analyse von gemeinsamen Beobachtungen von Kilonovae und Gravitationswellen. Das Team entwarf Modelle von Kilonova-Lichtkurven (Abb. 3, links), auf der Grundlage von Simulationen der numerischen Relativitätstheorie und einem Bayes'schen Inferenzrahmen ("bajes", Bayesian Jena Software), um die Beobachtungsdaten zu analysieren.

Das Projekt legte den Grundstein für die Analyse zukünftiger Ereignisse, die Identifizierung von Methoden zur Eingrenzung der Schwerelosigkeitstriebwerke der energiereichsten astrophysikalischen Emissionen und des Ursprungs der schweren Elemente (r-Prozess).

Virgo und Einstein Teleskop Gravitationswellenastronomie

Die Gruppe war das erste deutsche Mitglied des Virgo-Experiments, einem der drei Interferometer, das zusammen mit LIGO die ersten Gravitationswellensignale entdeckt hat. Jena leitet die PROMETEO-Gruppe aus Theoretikern und Astrophysikern aus verschiedenen europäischen Universitäten und Forschungszentren, welche die Analyse der Virgo-Daten und die Interpretation der Beobachtungen vornimmt.

Die Jenaer Research Unit wurde 2021 von Bernuzzi gebildet und arbeitet seit dem eng mit der Einstein-Teleskop-Kollaboration zusammen. Letztere entwirft einen ehrgeizigen Plan für die nächste Generation von bodengestützten Gravitationswellendetektoren.

lendetektoren.



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

Multipolmomente stationär rotierender und elektrisch geladener Staubscheiben

Auch im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie kann man sowohl das Gravitationsfeld als auch das elektromagnetische Feld eines stationären Objektes (zum Beispiel eines Neutronensterns) im Fernfeld in eine Reihe entwickeln, deren einzelne Terme wegen der Nichtlinearität der Feldgleichungen zwar keine Lösungen derselben darstellen, aber bereits bei Beschränkung auf relativ wenige Terme eine gute Näherung für die Beschreibung des Fernfeldes liefern und außerdem eine sinnvolle (und invariante) Definition von (im allgemeinen komplexen) Multipolmomenten P_n und Q_n gestatten. Dabei gilt $n=0,1,2,\dots$; die P_n charakterisieren das Gravitationsfeld (die Geometrie der Raumzeit) und die Q_n das elektromagnetische Feld. Die niedrigsten Multipolmomente sind $P_0=M$, $P_1=iJ$, $Q_0=Q$ und $Q_1=iD$ (M : Masse, J : Drehimpuls, Q : Ladung und D : magnetisches Dipolmoment).

Da diese Multipolmomente im Prinzip der astronomischen Beobachtung zugänglich sind, ist ihre theoretische Berechnung für verschiedene Modelle ein nützliches Hilfsmittel für die Interpretation von Beobachtungsdaten.

Für das Modell einer mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotierenden (ungeladenen) Staubscheibe konnten die Multipolmomente ausgehend von der strengen Lösung dieses Problems berechnet werden (Neugebauer und Meinel 1995, Kleinwächter et al. 1995). Dabei hat sich eine

interessante Eigenschaft gezeigt, die möglicherweise allgemeinere Gültigkeit hat: Die Beträge der höheren Multipolmomente P_n ($n \geq 2$) sind größer als die der Kerr-Lösung mit denselben Werten von M und J ("Multipolvermutung" von Filter und Kleinwächter 2009).

Für eine geladene rotierende Staubscheibe konnten wir die Multipolmomente nun ebenfalls mit hoher Genauigkeit bestimmen. Auch hier hat sich die Multipolvermutung in verallgemeinerter Form bestätigt: Die Beträge der höheren Multipolmomente P_n und Q_n ($n \geq 2$) sind größer als die der Kerr-Newman-Lösung mit denselben Werten von M , J und Q .

Sollte die Multipolvermutung für alle rotierenden astrophysikalisch relevanten Objekte (mit Ausnahme Schwarzer Löcher) zutreffen – bisher konnten wir jedenfalls kein Gegenbeispiel finden – hätte man damit ein interessantes Kriterium zur Unterscheidung "normaler" Objekte von Schwarzen Löchern, deren Außenfeld im stationären Fall durch die Kerr-Newman-Lösung beschrieben wird.

Rumler D., Meinel R. (2023): Multipole moments of a charged rotating disc of dust in general relativity. *Physical Review D*, Volume 108, Issue 6, DOI 10.1103/PhysRevD.108.064047.

Erweiterte Neuauflage: 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 dritter Auflage erscheinende 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
- Die rotierende Staubscheibe



Das Buch enthält viele Übungsaufgaben (ihre Anzahl hat sich mit der dritten Auflage um 12 erhöht) mit ausführlich dargestellten Lösungen und ist auch zum Selbststudium geeignet.

Der letzte Abschnitt von Teil II gibt einen Ausblick auf die Themen Gravitationswellen und Kosmologie sowie das Problem der Quantengravitation. Das sind Gebiete der aktuellen Forschung, 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 auch als Grundlage eines anspruchsvollen Oberseminars im Masterstudium verwendet werden. Für die dritte Auflage wurde das spannende Gebiet der Thermodynamik Schwarzer Löcher neu aufgenommen, das auch für die Weiterentwicklung der theoretischen Physik insgesamt vielversprechend ist.

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 (bis 9/2021)

Professur 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

Professur für Physik und ihre Didaktik

Prof. Dr. Holger Cartarius

Hochschuldozent apl. Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze, im Ruhestand

Forschungsschwerpunkte

- Didaktische Rekonstruktion für Lehrinhalte zur modernen Physik und Astronomie an der Schule und an außerschulischen Lernorten
- Didaktische Ansätze zur Quantenphysik und zu Quantentechnologien
- Lehrinhalte zur Astronomie in verschiedenen Unterrichtsfächern
- Studiengangphase und Mathematikausbildung im Lehramtsstudium Physik
- Lehrkonzepte zur professionsorientierten Ergänzung der theoretischen Physik im Lehramtsstudium

Didaktische Rekonstruktion in der Physik: Konzepte zur Quantenphysik und nichtlinearen Optik

Themen der Quantenphysik und -technologien spielen in zwei Aspekten der Forschung der Arbeitsgruppe eine wichtige Rolle. In einem ersten Projekt werden **Lehrinhalte aufbauend auf den Wesenszügen der Quantenphysik** nach Müller und Küblbeck passend zu den KMK-Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife und dem zukünftigen Thüringer Lehrplan Physik entwickelt. Besonderer Fokus liegt dabei auf einer experimentellen Unterstützung mit einem **Multiperspektiven-Ansatz**, der optische Analogieexperimente, konzeptionelle Analogieaufbauten auf Basis von NFC-Chips und Microcontrollern sowie quantenphysikalische Realexperimente vereint.

Die für die didaktische Rekonstruktion notwendige Erprobung findet im Schülerlabor der Arbeitsgruppe und im Schulunterricht kooperierender Lehrkräfte statt. Während Unterrichtsmaterialien vorhanden sind und eine Schülerlabor-Einheit bereits ein halbtägiges Programm erlaubt, entstehen demnächst eine Lehrerfortbildung und zusätzliche Interferometer-Experimente.

In einem zweiten Projekt, das innerhalb des SFB 1375 Nonlinear Optics Down to Atomic Scales (NOA) durchgeführt wird, streben wir in Kooperation mit dem Deutschen Optischen Museum die **didaktische Rekonstruktion und Wissenschaftskommunikation zu Themen der nichtlinearen und Quantenoptik** an. Vorrangiges Vorhaben aus Sicht der Physikdidaktik ist die Realisierung eines Schülerlabors zu NOA-Projekten, das sich z.B. mit der Spektroskopie oder Analogexperimenten zur nichtlinearen Optik beschäftigen wird. Daneben stehen didaktische Strukturie-

rungen auf dem Programm, die den NOA-Wissenschaftler:innen für ihre eigene Wissenschaftskommunikation in die Hand gegeben werden. Erste Ergebnisse zu Ladungstransferprozessen zwischen halbleitenden Monolagen und Nanodrähten zur Erzeugung von Laserstrahlung bestimmter Frequenz liegen vor.

Darüber hinaus werden Hands-on-Exponate für das Museum (Schaufenster der modernen Optikforschung) entwickelt. Besonders sticht hier die Realisierung eines **Quantenbildgebungs-Aufbaus** mit undetektierten Photonen (siehe Abb. 1, Idler-Photonen wechselwirken mit einem Objekt O, bleiben undetektiert, Interferenz der Signal-Photonen wird gemessen) heraus.

Aehle S., et al. (2022): An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments. *Physics* 4, 1241, DOI: 10.3390/physics-4040080.

Aehle, S., Cartarius H. (2023): Die Rolle des Zufalls in der Quantenphysik—Grundlagen und technische Anwendungen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 198, 16.

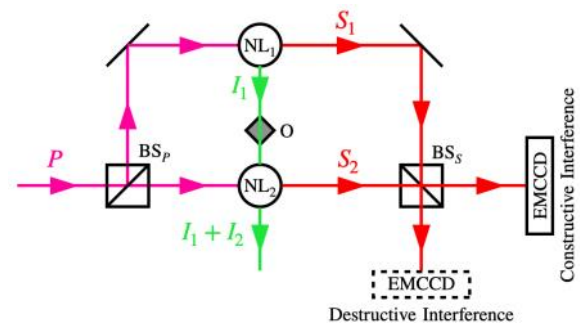


Abb. 1. Schema des Quanten-Bildgebungs-aufbaus nach Basset, et al., *Las. & Phot. Rev.* 13, 1900097 (2019), wie er aktuell für das Deutsche Optische Museum entsteht. Grafik: D.-P. Preissler

Astronomische Bildung außerhalb des Astronomieunterrichts

Da astronomische Bildung im Schulunterricht der Sekundarstufe I in Deutschland einen unzufriedenstellenden Stand hat (s. Abb. 2, Lehrplananalyse Sek. I), die Astronomie aber Interesse für Naturwissenschaften stiften kann, beschäftigt sich ein Forschungsthema der Arbeitsgruppe mit der Entwicklung von **Mathematikaufgaben mit Inhalten aus der Astronomie-Bildung** zu Themen wie dem Sonnensystem, der Raumfahrt, Skalen der Astronomie, aber insbesondere auch modernen Aspekten wie Exoplaneten, schwarzen Löchern oder Fragen der Kosmologie.

Die Aufgaben werden im Sinn einer didaktischen Rekonstruktion astronomischer und physikalischer Inhalte erstellt, sind kompetenzorientiert und berücksichtigen sowohl den Bedarf von Lehrkräften (in einer Befragung erhoben) als auch Kriterien der Astronomie- und Mathematikdidaktik. Sie werden mit Lösungen und Lehrercommentaren versehen, damit sie auch von nicht astronomisch vorgebildeten Lehrkräften eingesetzt werden können. In Fortbildungen werden sie mit großem Interesse aufgenommen.

Hammer E. (2023): Astronomie in neuen Mathematikaufgaben. Der

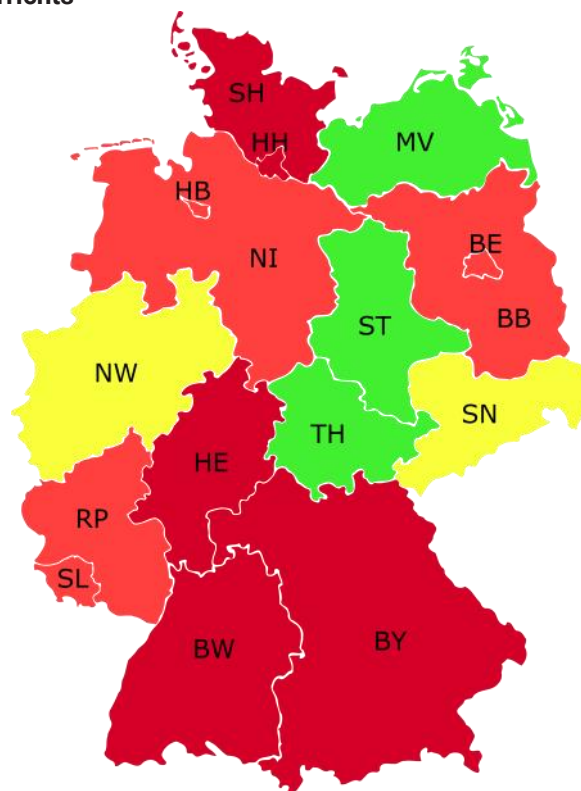


Abb. 2. Astronomie als Fach (grün), astronomische Inhalte in Physik (gelb), geringe (hellrot) bzw. keine Nennung (dunkelrot). Grafik: Eleen Hammer

Schülerlabor, Veranstaltungen und Fortbildungen

Nachdem das in der Arbeitsgruppe beheimatete **Schülerlabor** der Physikalisch-Astronomischen Fakultät 2021 geschlossen bleiben musste, konnten 2022 und 2023 zusammen 1223 Besucher:innen begrüßt werden. Dabei wurden neue Versuchsreihen zur speziellen Relativitätstheorie, Quantenphysik und Astronomie erprobt sowie der Einsatz von Tablets in einer Versuchsreihe zur Radioaktivität eingeführt.

Begeisterung für Physik wurde auf dem **MINT-Festival Jena** vermittelt. Für die stark eingeschränkte Ausgabe 2021 stellte sich die Arbeitsgruppe einer neuen Herausforderung und entwickelte fünf Online-Workshops. Wir beteiligten uns 2023 mit vier Präsenzworkshops, darunter zwei Neuent-



Abb. 3. Astronomy from multiple perspectives im September 2023 an der Sternwarte Asiago, Foto: S. Ciroi

wicklungen. In einem weiteren Highlight wurden zur **Langen Nacht der Wissenschaften 2022** Physikexperimente in mehreren Räumen angeboten.

Neben der jährlich in Jena organisierten **bundesweiten Lehrerfortbildung Astronomie** steuerten wir mehrere **Beiträge zu Lehrerfortbildungen** zur Quantenphysik bei. Daneben entwickelten wir Workshops zu Cepheiden, Exoplaneten und

Gammablitzern für drei von uns mitorganisierte internationale **W. & E. Heraeus-Sommerschulen „Astronomy from multiple perspectives“**.

Mit Kolleg:innen aus Stuttgart gründeten wir die **QuBIT EDU-Konferenzen**, ein neues Austauschformat zur Didaktik der Quantenphysik und Quantentechnologien. Die erste Präsenzausgabe 2022 in Jena hatte etwa 60 Teilnehmer:innen.

Professur für Geschichte der Physik mit Schwerpunkt Wissenschaftskommunikation

Prof. Dr.-Ing. Timo Mappes

Forschungsschwerpunkte

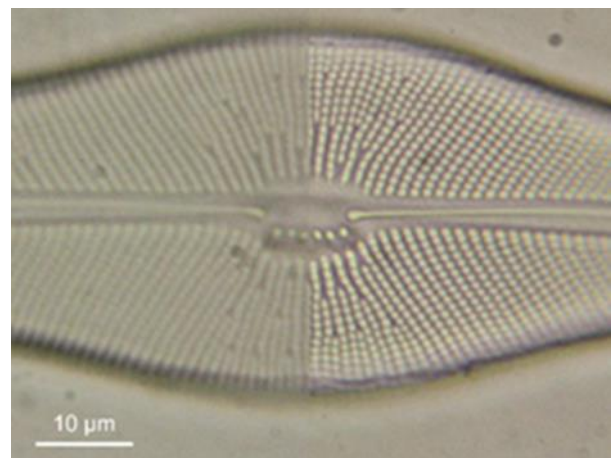
- Experimentelle Replikation der Meilensteine in der Entwicklung der Optik: Ultramikroskopie als Vorläufer der Lichtblattmikroskopie. Kontextualisierung der Theorie Ernst Abbes zu Bildentstehung im Mikroskop.
- Physikalische Charakterisierung historischer Optiken: Charakterisierung historischer Brillengläser um Aufschluss über Herstellung, Verbreitung und Tragekomfort zu erhalten.
- Edutainment als Form der Wissenschaftskommunikation: Einsatz originaler historischer Optiken für die Wissensvermittlung. Leitgedanke, Konzeption, Aufbau und Erprobung im Feldversuch von didaktisch optimierten Mitmachstationen zur Wissensvermittlung optischer Phänomene.

Experimentelle Replikation der Meilensteine der Entwicklung der Optik & Photonik

Mit einem experimentellen Aufbau wurde die von Ernst Abbe veröffentlichte Theorie zur Bildentstehung im Mikroskop kontextualisiert und der direkte Vergleich des Einflusses der numerischen Apertur auf die Auflösung mit antiken Optiken und an historischen Präparaten demonstriert (Abb. 1).

Abbe, Ernst (1873): Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. Archiv für mikroskopische Anatomie 9: 413–468

Abb. 1. Vergleich der Auflösung an einem Präparat der Kieselalge *Gomphonema geminatum* aus 1890 durch ein Objektiv homogener Immersion 90x von Carl Zeiss Jena aus 1935. Links: numerischer Apertur 0,8. Rechts: numerischer Apertur 1,25.



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.) 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 (erlebbar 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.

[2] 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: Das D.O.M. entsteht

Mit einem Gesamtvolumen von 56,7 Mio. € entsteht bis 2027 das Deutsche Optische Museum (D.O.M.) am Carl-Zeiss-Platz in Jena auf einer für Besuchende zugänglichen Fläche von gut 3100 m². Die neue Dauerausstellung umfasst gut 100 interaktive Stationen an denen reale Experimente durchgeführt werden können. Hierzu setzen das Team des D.O.M. und seine Partner wo immer möglich historische Instrumente ein, um den Besuchenden ein authentisches Erlebnis zu ermöglichen.

Das Projekt befindet sich in der Ausführungsplanung. Stets verbindet das D.O.M. authentische Objekte mit Experimenten. So wird im Ausstellungsraum der Spektroskopie (Abb. 2) das Monumentalgemälde „Fraunhofer erklärt seinen Freunden den Spektrometer“ von Rudolph Wimmer der Öffentlichkeit erstmals seit dem Zweiten Weltkrieg wieder zugänglich gemacht. 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 aufwän-



Abb. 2. Illustration des Ausstellungsraumes zur Spektroskopie.
Grafik: D.O.M. und studio klv Berlin.



Abb. 3. D.O.M. mit Neubau und Kunstwerk von Studio Other Spaces
Grafik: Luxigon für studio Qwertz.

dig, doch es erlaubt den Besuchern ein umfassendes Erlebnis jenes Eindrucks, den die Personen auf der Szene vor über 200 Jahren erfuhren.

Niederschwellige Kunst vermag Menschen gleich welcher Herkunft dauerhaft zu begeistern. Daher sollen die Besuchenden bereits vor dem Betreten des Gebäudes mit dem Inhalt der Ausstellung des D.O.M. interagieren. Deshalb wird die Fassade des Neubaus mit farbigen Glasstreifen und teilverspiegelten Aluminiumprofilen gestaltet, um in der Wahrnehmung der Passanten

kontinuierlich ihre Farbe zu ändern. Die robuste und beeindruckende geometrische Umsetzung einer Winkelfunktion wird vom renommierten Studio Other Spaces (der Künstler Olafur Eliasson und Sebastian Behmann) als deren erstes architektonisches Werk in Deutschland umgesetzt (Abb. 3). Die Objektplanung führt Studio Qwertz aus, dessen Architekten bereits mehrfach UNESCO Welterbe Museumsbauten errichteten.

Abbe Center of Photonics

Geschäftsführender Direktor (06/22 –05/23):

Prof. Dr. Jürgen Popp

Das Abbe Center of Photonics stellt sich vor:

- Hochschulzentrum gemäß §27 Abs. 3 Nr. 9 des Thüringer Hochschulgesetzes
- Im Jahr 2010 gegründet
- Mitglieder: 57 WissenschaftlerInnen (principal scientists), darunter 32 HochschullehrerInnen, die schwerpunktmäßig, jedoch nicht ausschließlich der Physikalisch-Astronomischen Fakultät zuzuordnen sind
- Fakultäts- und disziplinübergreifende Weiterentwicklung der universitären Optik, Photonik und Quantentechnologien in Forschung, Lehre und Transfer und innerhalb der Profillinie LIGHT
- Vernetzung und strategischer Ausbau der vorhandenen Optik-, Photonik- und Quantenkompetenzen am Standort, 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 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 2023 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 01.06.2023 wurde dieses Amt von Christian Spielmann an Jürgen Popp übergeben. Das Direktorium wird in seiner operativen Arbeit durch die ACP-Geschäftsstelle unterstützt.

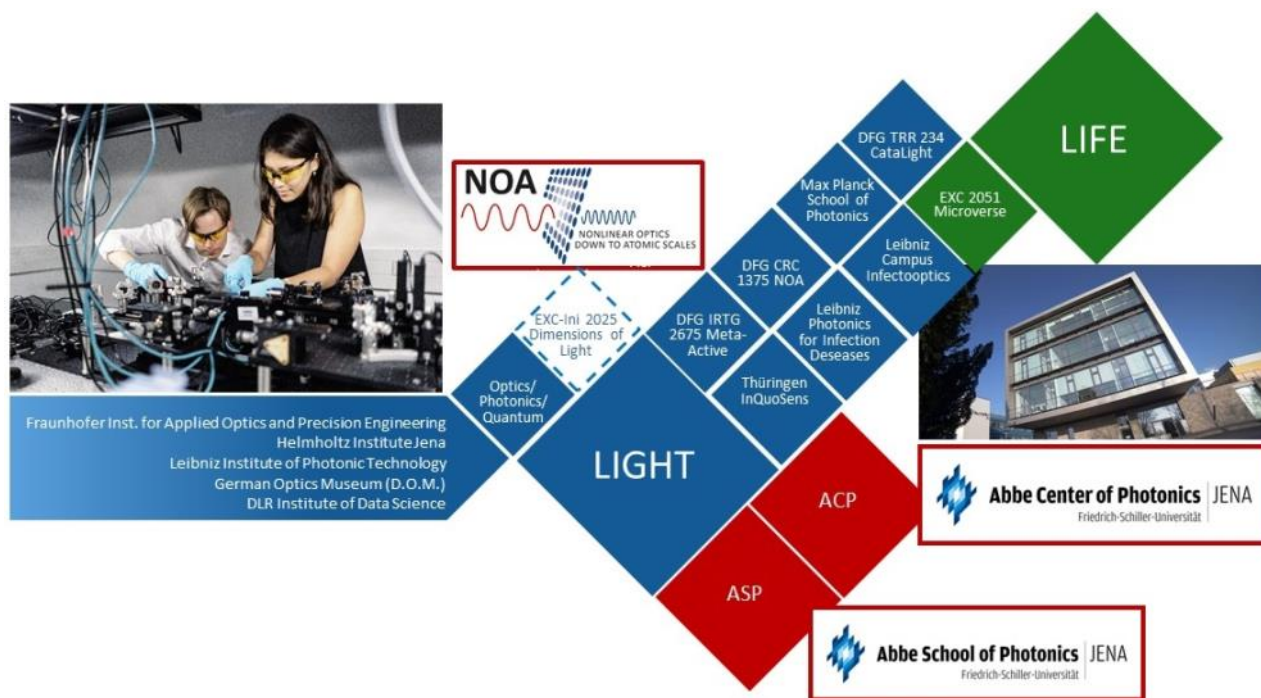
Das ACP trägt maßgeblich zur Einwerbung und erfolgreichen operativen Umsetzung kollaborativer und strukturell wirksamer Drittmittelprojekte bei. Einige Beispiele aus jüngster Zeit sind das Thüringer Innovationszentrum für Quantenoptik und -sensorik (InQuoSens) in Kollaboration mit der TU Ilmenau, das im Zeitraum 2024-2029 durch den Freistaat Thüringen mit 3 Mio. EUR pro Standort für die Modernisierung der jeweiligen Forschungsinfrastruktur gefördert wird. Auf euro-

päischer Ebene gelang zuletzt die Akquise des EU-Twinning-Projekts BioQantSens (2022-2025) zusammen mit dem Institut für Physik Belgrad und dem Consiglio Nazionale delle Ricerche Firenze sowie des EU-Projekts EMIMEP (2024-2029) zum Aufbau eines Joint Master Degree zusammen mit drei weiteren europäischen Universitäten. Zudem wird das an das ACP angegliederte Carl-Zeiss-Stiftung Center for Quantum Photonics (QPhoton) bis 2027 und standortübergreifend in Jena, Stuttgart und Ulm durch die Stiftung mit 4 Mio. EUR pro Standort gefördert.

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, Optische Systeme und Quantentechnologien die komplette Kontrolle von Licht in all seinen Eigenschaften angestrebt. 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 in-

ternationalisierte Ausbildung der ebenfalls fakultätsübergreifenden Abbe School of Photonics quervernetzt (Abbildung 1).

Abb. 1. Einordnung von Abbe Center/School of Photonics innerhalb von LIGHT und strukturierten Förderprogrammen.



Aktivitäten des Abbe Centers of Photonics

Das ACP trägt maßgeblich zur Einwerbung und erfolgreichen operativen Umsetzung kollaborativer und strukturell wirksamer Drittmittelprojekte bei. Einige Beispiele aus jüngster Zeit sind das Thüringer Innovationszentrum für Quantenoptik und -sensorik (InQuoSens) in Kollaboration mit der TU Ilmenau, das im Zeitraum 2024-2029 durch den Freistaat Thüringen mit 3 Mio. EUR pro Standort für die Modernisierung der jeweiligen Forschungsinfrastruktur gefördert wird. Auf europäischer Ebene gelang zuletzt die Akquise des

EU-Twinning-Projekts BioQantSens (2022-2025) zusammen mit dem Institut für Physik Belgrad und dem Consiglio Nazionale delle Ricerche Firenze sowie des EU-Projekts EMIMEP (2024-2029) zum Aufbau eines Joint Master Degree zusammen mit drei weiteren europäischen Universitäten. Zudem wird das an das ACP angegliederte Carl-Zeiss-Stiftung Center for Quantum Photonics (QPhoton) bis 2027 und standortübergreifend in Jena, Stuttgart und Ulm durch die Stiftung mit 4 Mio. EUR pro Standort gefördert.



Abb. 2. V.l.n.r.: Forschungsgebäude ACP am Beutenberg Campus, Präsentation fernsteuerbarer Quanten-Experimente auf der LASER World of Photonics 2023 in München, Sitzung des ACP-Beirats im Juni 2023 (Vierter von links: Beiratsvorsitzender Prof. Helmut Zacharias, Universität Münster).

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, Elektronik und Tieftemperaturservice.
- 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. Der Tieftemperaturservice ist der Versorger der FSU für kryogene Medien. Ein wichtiger Schwerpunkt ist, dass die Werkstätten unmittelbar an Forschung und Lehre beteiligt sind und nicht rein dienstleistungsorientiert arbeiten.

Organigramm und Abläufe

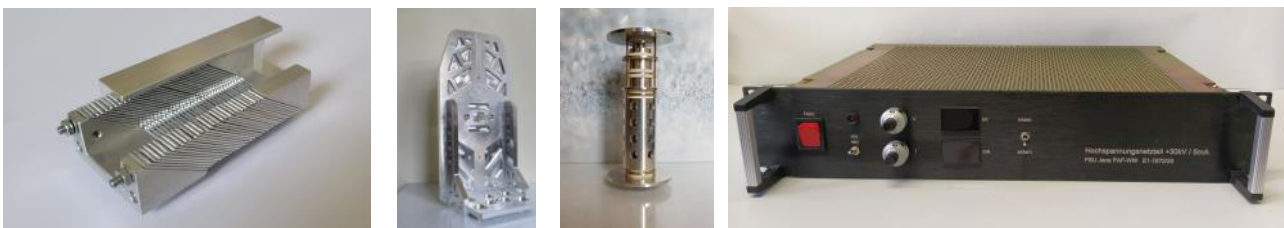


Abb. 1: Struktur Wissenschaftliche Werkstätten

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, HI-Jena und Deutsches Optisches Museum) bearbeitet und auch exakt mit diesen Partnern verrechnet. Als neue Aufgabe seit 2020 betreiben wir die zentrale Infrastruktur Tieftemperaturservice „Versorgung mit kryogenen Gasen“ der gesamten Universität und regionalen Partnern.



Mechanische Werkstätten Feinwerktechnik 1 und 2, Servicepunkt Mechanik, Schlosserei mit Konstruktion

Um die mechanischen Aufgabenschwerpunkte zu erfüllen, stehen konventionelle Werkzeugmaschinen und CNC Bearbeitungszentren zur Verfügung. Außerdem ist die Schlosserei mit modernen Schweißverfahren unverzichtbar.

In der Konstruktionsabteilung werden komplexe mechanische Baugruppen in 3D entwickelt. Komplizierte Bauteile werden dann über CAM in die CNC-Fertigung exportiert.

Für Vakuumtechnik wird ein Reinigungslabor und der Pumpenservice betrieben.



Abb. 2: CNC-Bearbeitungstechnik, Foto: B. Klumbies

Elektrotechnik, Elektronik

Der Bereich Elektronik entwickelt und fertigt elektronische Geräte und Anlagen der Analog-, Digital-, Hochspannungs/-strom-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. Ein wichtiger Aufgabenteil ist 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 Praktikumseinrichtungen. Der Bereich ist Ansprechpartner bei Neu- und Erweiterungsinstallationen von Laboren und Funktionsräumen. Hinzu kommen die gesetzlich vorgeschriebenen Überprüfungen aller elektrischen Geräte und Anlagen.

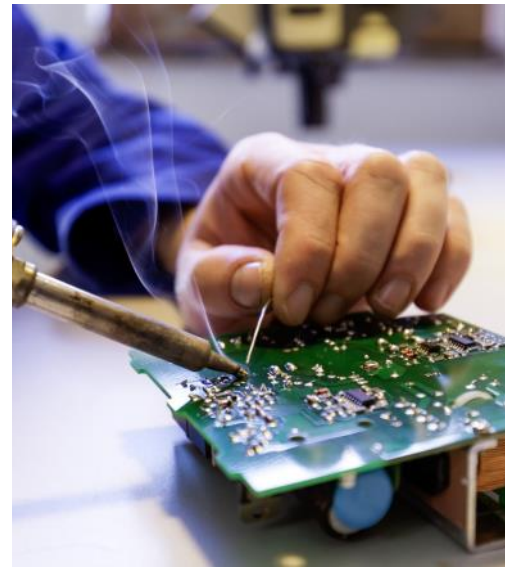


Abb.3: Reparatur Platine, Foto: Anna Schroll

Tieftemperaturservice

Der Tieftemperaturservice ist die zentrale Infrastruktur der Universität für kryogene Gase. Von hier aus werden die jeweiligen Struktureinheiten mit tiefkaltem Helium und Stickstoff versorgt. Wir betreiben den einzigen Heliumverflüssiger in Thüringen und sind damit auch ein regional wichtiger Versorger. Des Weiteren betreiben wir ein Netz zur Versorgung mit gasförmigem Stickstoff. Der Vakuumpumpenservice für die naturwissenschaftlichen Fakultäten ist ein wichtiger Bestandteil unserer Aufgaben.



Abb. 4: He-Abfüllstation des L70 von Linde Foto: A. Winnefeld

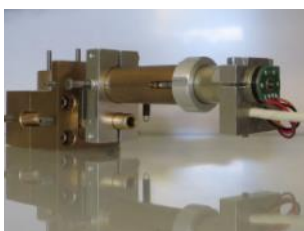


Abb. 5-12: Ausgewählte Arbeiten bis 2024, Fotos: Bernhard Klumbies, Thomas Bahrmann, Dirk Hieronymus

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 (10 Semester) und Regelschule (9 Semester zukünftig 10) nach dem Jenaer Modell mit frühzeitigem Praxisbezug, 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, englischsprachiger 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

Neuer Studiengang MSc. Quantum Science and Technology

Die Quantenwissenschaften und Quantentechnologien, welche auf ein fundamentales Verständnis bzw. die Anwendung von Quanteneffekten abzielen, haben in den letzten Jahren eine rasant steigende Bedeutung erfahren. Diese Entwicklung in Wissenschaft und Industrie wird angetrieben durch das Potential von Quanteneffekten für disruptive Anwendungen und unterstützt durch eine Vielzahl von Förderinitiativen auf regionaler, nationaler und europäischer Ebene. Das kohärente Engagement verschiedenster wissenschaftlicher, industrieller und institutioneller Stakeholder stellt dabei sicher, dass die bisher angestoßene Entwicklung und Transformation eine langfristige Wirkung entwickeln wird.

An der PAF hat sich diese Entwicklung in den letzten Jahren in einer Vielzahl von Forschungsprojekten sowie der Besetzung von 2 Professuren (eine davon neu geschaffen) sowie der Stelle eines Akademischen Rates (neu geschaffen) niedergeschlagen. Diese Transformation der wissenschaftlichen Themenstellungen an der PAF und anderen Standorten als auch im wirtschaftlichen Umfeld geht mit einem geänderten Anforderungs-

profil an Masterabsolventen einher. Daneben wird durch diese Entwicklung auch eine größere Anzahl an entsprechend qualifizierten Absolventinnen und Absolventen benötigt. Diesen geänderten Anforderungen soll durch die Einrichtung eines dedizierten internationalen Masterstudiengangs „Quantum Science and Technologies“ Rechnung getragen werden, in dem eine umfassende Ausbildung sowohl zu den fundamentalen Prinzipien der Quantenphysik als auch deren Anwendung ermöglicht wird. Dieser Studiengang soll dabei klar auf internationale Studierende ausgerichtet sein und damit zusätzliche Studierende nach Jena locken, welche durch das bisherige Studienangebot noch nicht angesprochen werden.

Die Einrichtung des Studienganges wurde im Jahr 2022 begonnen und in mehreren Arbeitsgruppen- und Gremiensitzungen vorgestellt, ausgearbeitet und beschlossen. Die Einrichtung wurde von externen Gutachtern befürwortet und ist zum Wintersemester 2024/25 geplant.

Ziel des Masterstudiums Quantum Science and Technology ist es, die Studierenden auf eine forschungsorientierte und wissenschaftsgestützte Berufstätigkeit auf den Gebieten der Quantenphysik und der Quantentechnologien vorzubereiten bzw. mit der fachwissenschaftlichen Ausbildung die Basis für weiterführende Ausbildungsprogramme innerhalb oder außerhalb der Hochschule zu legen.

Dazu werden über beide Studienjahre hinweg aufbauende Qualifikationen und Kompetenzen vermittelt.

Das Studium soll in 4 Teile unterteilt sein, welche jeweils klare Ausbildungszwischenziele implementieren:

- Anpassung / Adjustment (16 ECTS): Diese Phase soll den Studierenden das für das Verständnis der zentralen Studieninhalte sowie für spezifische Spezialisierungen benötigte Wissen vermitteln.
- Essentielles / Essentials (16 ECTS): In den hier angebotenen Pflichtmodulen sollen die zentralen Studieninhalte vermittelt werden. Dies sind einerseits die physikalischen und technologischen Grundlagen der Implementierung und Nutzung von Quantensystemen, andererseits grundlegende Konzepte und Methoden der

Quanteninformationsverarbeitung.

- Spezialisierung / Specialization (24 ECTS): In dieser Studienphase können die Studierenden durch eine Vielzahl von vertiefenden Wahlvorlesungen tiefergehendes Wissen in verschiedenen Spezialisierungsrichtungen erlangen. Es ist vorgesehen, in das Wahlpflichtprogramm auch Ausbildungsinhalte anderer Fakultäten, z.B. aus Chemie, Informatik und Mathematik zu integrieren, soweit dies für die Quantentechnologien relevant ist.
- Praktische Forschungsausbildung und Masterarbeit / Practical Research Training and Master thesis (34 + 30 ECTS): Im forschungspraktischen Teil der Ausbildung sollen die Studierenden zunächst in einem Praktikum erste hands-on Erfahrung bei der Realisierung von Quanteneffekten sammeln. Danach sollen sie im Rahmen eines Internships erste Einblicke in Forschungs- und Anwendungsumgebungen erhalten, danach in Research Project und Masterarbeit ein zusammenhängendes Forschungsprojekt absolvieren, welches mit der Masterarbeit abgeschlossen wird.

Semester ECTS	1 30 ECTS	2 30 ECTS	3 30 ECTS	4 30 ECTS
Adjustment (16 ECTS)	2 out of: Advanced Quantum Theory (8 ECTS) General Relativity (8 ECTS) Introduction to Quantum Physics (8 ECTS) Physical Chemistry (8 ECTS) Fundamentals of Modern Optics (8 ECTS)			
Essentials (16 ECTS)	Fundamentals of Quantum Information (8 ECTS)	Advanced Quantum Information (8 ECTS)		
Specialization (24 ECTS)		Elective Modules (12 ECTS), e.g.: Quantum Optics, Quantum Computing, Integrated Quantum Systems, Quantum Field Theory, Computational Quantum Physics, ...	Elective Modules (12 ECTS), e.g.: Advanced Quantum Optics, Quantum Communication, Quantum Imaging, Quantum Vacuum in Strong Fields, ...	
Practical Research training (34 ECTS)	Quantum Laboratory (6 ECTS in semester break - NEW)	Internship (10 ECTS)	Research Project (18 ECTS)	
Master thesis (30 ECTS)				Master Thesis (30 ECTS)

Abb. 1. Musterstudienplan im neuen MSc. Quantum Science and Technology.

Neugestaltung der materialwissenschaftlichen Studiengänge BSc. und MSc. Werkstoffwissenschaft

Der B.Sc. Werkstoffwissenschaft wurde zum WS 2023/24 grundlegend neu strukturiert, um seine Attraktivität für Studieninteressierte zu erhöhen, den Studierenden mehr Flexibilität und Freiraum für die Entwicklung eigener Interessen und Schwerpunkte zu geben und einer Überschreitung der Regelstudienzeit entgegenzuwirken. Wesentliche Neuerungen sind:

- Neue Modulreihe "Materialwissenschaft I-V" ab dem dritten Semester. In diesen Modulen werden die Thermodynamik und Kinetik von Werkstoffen, sowie die vier Materialhauptgruppen (Metalle, Keramiken, Glas und Polymere) vertiefend behandelt. Diese Gliederung vermittelt die wesentlichen materialwissenschaftlichen Grundlagen nachhaltigkeitsorientiert und didaktisch sinnvoll.
- Zur Schärfung des grundlagenorientierten sowie des natur- und materialwissenschaftlichen Profils des Studiengangs werden die wesentlichen ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen mit den Modulen "Grundlagen der Fertigungstechnik" und "Werkstofforientierte Konstruktion" abgedeckt. Der Wahlpflichtbereich bietet den Studierenden weiterhin die Möglichkeit, individuelle ingenieurwissenschaftliche Akzente in ihrem Bachelorstudium zu setzen.

Semester	1	2	3	4	5	6
Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen (72 ECTS)	Mathematik für Werkstoff- und Geowiss. I (7 ECTS)	Mathematik für Werkstoff- und Geowiss. II (7 ECTS)	Mathematik für Werkstoff- und Geowiss. III (7 ECTS)			
	Experimentalphysik I (8 ECTS)	Experimentalphysik II (10 ECTS)				
	Chemie I (Allgemeine/ Anorganische) (5 ECTS)	Chemie II (Organische) (5 ECTS)	Chemie III (Physikalische Chemie) (5 ECTS)			
	Informatik (Grundlagen) (5 ECTS)	Allgemeine Mineralogie und Kristallographie (5 ECTS)	Datenbearbeitung und Maschinelles Lernen (3+5 ECTS)			
Werkstoffwissenschaftliches Fachstudium (71 ECTS)	Grundlagen der Materialwissenschaft (5+3 ECTS)		Materialwissenschaft I (Thermodynamik und Kinetik von Werkstoffen) (5 ECTS)	Materialwissenschaft III (Keramik) (5 ECTS)	Materialwissenschaft V (Polymere) (5 ECTS)	Additive Fertigung (5 ECTS)
			Materialwissenschaft II (Metalle + Werkstoffprüfung) (10 ECTS)	Materialwissenschaft IV (Glas) (5 ECTS)	Materialwissenschaftliches Praktikum (5+5 ECTS)	
				Grundlagen der Fertigungstechnik (5 ECTS)		
				Werkstofforientierte Konstruktion (5 ECTS)		
				Spezialwerkstoffe und innovative Materialien (3+5 ECTS)		
Soft Skills (7 ECTS)			Wissenschaftliche Recherche und Präsentation (2+5 ECTS)			
Wahl (20 ECTS)					Wahlpflichtmodule* (10+10 ECTS)	
Bachelorarbeit (10 ECTS)						Bachelorarbeit (10 ECTS)
Summe	30 ECTS	30 ECTS	30 ECTS	30 ECTS	30 ECTS	30 ECTS

- Der Wahlpflichtbereich wird von 10 ECTS auf 20 ECTS-Punkte erweitert. Die Unterteilung der Wahlpflichtmodule in den freien und den materialwissenschaftlichen Bereich wird aufgehoben, um die Anrechnung der vollen Leistungspunkte eines Moduls zu erleichtern. Um den Bezug zur Materialwissenschaft weiterhin zu gewährleisten, müssen jedoch mindestens 10 ECTS aus dem materialwissenschaftlichen Modulkatalog erworben werden

- Das neue Modul "Datenverarbeitung und Maschinelles Lernen" mit 8 ECTS dient der Erweiterung der Informatik-Grundlagen des Studiengangs angesichts der zunehmenden Bedeutung computergestützter Methoden in der Materialwissenschaft.

Abb. 1: Musterstudienplan BSc. Werkstoffwissenschaft ab WS 2023/24

Auch der Studienplan des M.Sc. Werkstoffwissenschaft wurde zum WS 2023/24 neu strukturiert. Die Kooperation mit der TU Ilmenau wurde für beide Studiengänge B.Sc. und M.Sc. Werkstoffwissenschaft aufrecht erhalten. Die parallele Neustrukturierung des Masterstudiengangs an der TU Ilmenau ist bereits zum Wintersemester 2021/2022 erfolgt.

Der überarbeitete Studiengang gliedert sich in Spezialisierungsrichtungen, die die aktuelle Struktur und die Schwerpunkte des Otto-Schott-Instituts für Materialforschung widerspiegeln. Gegenwärtig sind dies "Glas und optische Materialien", "Strukturwerkstoffe", "Materialien für die Energie- und Umwelttechnik" sowie "Biomaterialien". Die Studierenden werden verpflichtet, zwei der Spezialisierungsrichtungen zu wählen.

Jede Spezialisierungsrichtung umfasst zwei Spezialisierungsmodule mit insgesamt 10 ECTS. Die allgemeine natur- und materialwissenschaftliche Grundausbildung umfasst die Pflichtmodule Festkörperphysik und das neue Modul "Computergestützte Materialwissenschaft" im ersten bzw. zweiten Semester.

Die Möglichkeit zur Schwerpunktbildung im Bereich einer der vorgenannten Spezialisierungsrichtungen wird im Masterstudium integriert. Dazu müssen zusätzlich zu den Spezialisierungsmodulen mindestens 15

ECTS an Wahlpflichtmodulen aus der gewählten Spezialisierungsrichtung absolviert werden und die Masterarbeit muss in der Spezialisierungsrichtung angefertigt werden. Um die Schwerpunktbildung zu erleichtern, ist jedes der im Masterstudiengang angebotenen werkstoffwissenschaftlichen Wahlpflichtmodule einer oder mehreren Spezialisierungsrichtungen zugeordnet. Der Schwerpunktbereich wird auf der Masterurkunde ausgewiesen.

Semester	1	2	3	4
Allgemeine Pflichtmodule	Festkörperphysik (5 ECTS)	Computergestützte Materialwissenschaft (5 ECTS)		
Spezialisierungsmodule Verpflichtende Belegung von 2 aus 4 Spezialisierungsrichtungen*	Spezialisierungsrichtung "Glas und optische Materialien"			
	Glasstruktur (5 ECTS)	Nichtkristalline Funktionsmaterialien (5 ECTS)		
	Spezialisierungsrichtung "Materialien für die Energie- und Umwelttechnik"			
	Nanomaterialien für Energie- und Umwelthanwendungen (7 ECTS)	Konstruktionswerkstoffe für Energie- und Umwelthanwendungen (3 ECTS)		
	Spezialisierungsrichtung "Strukturwerkstoffe"			
	Metallische Werkstoffe (5 ECTS)	Struktur-Eigenschaftskorrelation (5 ECTS)		
	Spezialisierungsrichtung "Biomaterialien"			
	Bioinspirierte Materialsynthese (5 ECTS)	Materials for LIFE (5 ECTS)		
	Wahlpflichtmodule** (30 ECTS)		Wahlpflichtmodule** (5 ECTS)	
			Fortgeschrittenenpraktikum (10 ECTS)	
			Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten und Projektplanung (15 ECTS)	
				Masterarbeit (30 ECTS)

Abb. 2: Musterstudienplan M.Sc. Werkstoffwissenschaft ab WS 2023/24

M.Sc. Photonics – Möglichkeit der Fernimmatrikulation

Zum Wintersemester 2023/24 sind die überarbeiteten Ordnungen im M.Sc. Photonics in Kraft getreten. Grundlage für die Änderung war insbesondere die Implementierung der Fernimmatrikulation, die es Studierenden ermöglicht einen Teil (insbesondere den Beginn) des Studiums im Ausland zu absolvieren. Im Zuge der Fernimmatrikulation wurden implementiert:

- Remote Vernetzung der Studierenden und Tutoren (ASP Gathertown)
- Digitalisierung von Laborpraktika durch das Lab-Buddy System und XRT Twin Lab
- Kickstarter Moodle Kurs

Ebenso neu ist die Möglichkeit eines Freiversuches, d.h. die Wiederholung einer Prüfungsleistung zur Notenverbesserung im ersten Studienjahr.

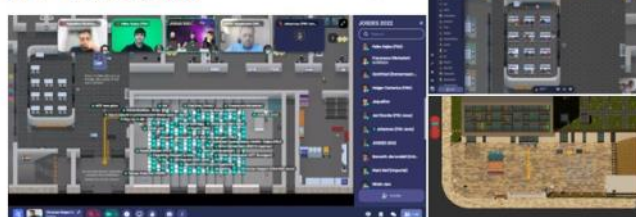
Moodle Kickstarter Course



Hybrid Math-Pre-Course



ASP Gathertown



Lab-Buddy System



XRTwin-Lab : remote labs



Abb. 1: Digitalisierung des M.Sc. Photonics Kurses;
Fotos: C. Helgert, F. Lukas, J. Kretschmar, F. Soyka

Reform der Lehramtsstudiengänge

Die Lehramtsstudiengänge wurden in den vergangenen Jahren modernisiert. Während die Initiative im Fach dazu vom Beirat und der Fakultät ausging, müssen aktuell zusätzlich neue Anforderungen an die Lehrerbildung in Thüringen beachtet werden.

Eine **Optimierung der fachlichen Inhalte** wurde im Jahr 2019 durch eine Arbeitsgruppe der Fakultät begonnen, im Jahr 2021 von den Fakultätsgruppen beschlossen und trat zum Wintersemester 2022/23 in Kraft. Wesentliche Bestandteile sind die Stärkung der Verknüpfung von Fachinhalten mit der Fachdidaktik und die Anpassung der Fachveranstaltungen an die aktuellen Anforderungen der Lehrpläne durch die Einführung einer eigenen Lehramtsvorlesung zur Optik für alle Studierenden sowie im Lehramt für die Sekundarstufe I (Lehramt Regeschule in Thüringen) die Aufnahme der Kernphysik und der Verzicht auf eine Theorie-Vorlesung zur Quantenphysik.

Eine neue **Schnittstelle zwischen Fach und Fachdidaktik** wurde in den vier Modulen der theoretischen Physik (Mechanik, Elektrodynamik, Quantentheorie, Thermodynamik/Statistik) geschaffen (Lehramt Regeschule ohne Quantentheorie). Die Vorlesung wurde von 4 SWS auf 3 SWS gekürzt und dafür ein fachdidaktisches Ergänzungsseminar im Umfang von 1 SWS eingeführt, das die Verbindung zur Schulphysik stärkt und auf Fehlvorstellungen eingeht (Abb. 2). Erste Erfahrungen zeigen, dass die Studierenden dieses Angebot sehr gut annehmen und im Verständnis davon profitieren.

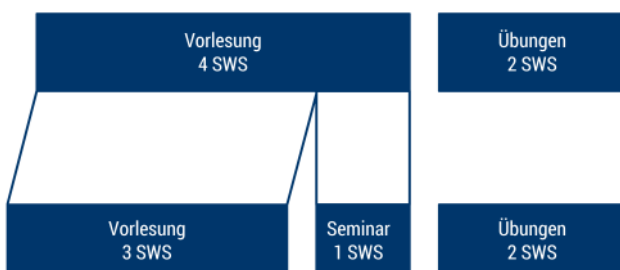


Abb. 2: Einrichtung einer neuen Schnittstelle zwischen Fach und Fachdidaktik—das fachdidaktische Ergänzungsseminar von 1 SWS (Mitte)

Die Thüringer Landesregierung hat entschieden, auf den eklatanten Lehrermangel an Regelschulen und die landesweit stark zurückgegangenen Einschreibezahlen in **Regelschul-Lehramtsstudiengängen** mit einer Aufwertung des Studiums um 30 auf 300 LP zu den Themen Inklusion, digitales Lernen und pädagogische Beratung zu reagieren. Die Universität Jena war aufgefordert, hierzu ein Konzept vorzulegen, das im Jahr 2023 beschlossen wurde und unter anderem 5 LP mehr fachdidaktische Veranstaltungen in jedem Fach vorsieht, die an die bildungswissenschaftlichen Inhalte anschließen. Hierzu wurde ein neues Modul zu Themen der Differenzierung und digitaler Medien im Physikunterricht eingerichtet, das zusätzliche Lehrkapazitäten in der Physikdidaktik beansprucht. Studierende sollen zum Wintersemester 2024/25 erstmals in den reformierten Studiengang eingeschrieben werden.

Zukünftige Herausforderungen ergeben sich dadurch, dass auf Wunsch der Landesregierung die neuen bildungswissenschaftlichen Inhalte auch für das **Gymnasiallehramt** geöffnet werden sollen. Die Planungen sehen vor, dass die Fächer Leistungspunkte an einen übergreifenden Wahlpflichtbereich abtreten, was die Wahlfreiheiten im Fach deutlich einschränken wird.

Da Konzepte zur Weiterbildung von **Quer- und Seiteneinsteiger:innen** in Thüringen fehlen, hat die Physikdidaktik zusammen mit dem Studienseminar Thüringen die Initiative ergriffen, eigene Fortbildungsangebote zu entwerfen. Eine Anerkennung als Fortbildung für die Lehrer:innen wird derzeit vom Studienseminar Thüringen vorbereitet.

Sehr einschneidend wird sich die Entscheidung der Landesregierung auswirken, die eigenständigen Schulfächer Physik und Astronomie ab dem Schuljahr 2024/25 zugunsten eines **Doppelfachs Physik/Astronomie** aufzulösen. Noch sind die Konsequenzen nicht im Detail abzusehen, da weder Kompetenzanforderungen für die Lehrerbildung noch Lehrpläne vorliegen. In jedem Fall werden jedoch Pflichtanteile zur Astronomie und Astronomiedidaktik in das Physik-Lehramtsstudium eingehen müssen.

Studienverlaufsmonitoring

Laufende Weiterentwicklung der Studiengänge an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät:

- Bewerbung des neuen Masterstudienganges M.Sc. Quantum Science and Technology
- Überarbeitung der Studiengänge B.Sc. und M.Sc. Physik insbesondere im Hinblick auf die Quantentheorieausbildung und die Praktika
- Verbesserung der Studieneingangsphase durch ein betreutes Physik-Café
- Erhöhung der Rücklaufzahlen beim CHE Ranking in Zusammenarbeit mit dem Fachschaftratsrat
- Wiederaufnahme des Tages der Physik

Bei der Weiterentwicklung der Studiengänge an der Fakultät wird der Fokus zukünftig auf dem gesamten Verlauf des Studiums liegen, und nicht allein die Steigerung der Anfängerzahlen in den Blick genommen. Beispielsweise lassen sich Anhaltspunkte für den Studienabbruch zwar aus den Systembefragungen und Einzelgesprächen ver-

muten, diese sind aber bisher nicht systematisch untersucht. Erste Erfahrungen haben gezeigt, dass eine Zusammenführung von statistischen Universitätsdaten und Einzelfallanalysen im Prüfungsamt deutlich sicherere Aussagen erzeugen, aus denen sich dann Maßnahmen ableiten lassen.



Abb. 1. Marketingmaßnahme: Weihnachtsvorlesung mit Studierenden und Schulklassen Foto: Dorit Schmidt

**Zusammenfassung der Datenblätter studiengangbezogener Kennzahlen (Studiengangdatenblatt) für die Studiengänge der
Lehreinheit Physik an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät**

Quelle: Datenblätter aus der Stabstelle Qualitätsentwicklung in der Lehre, Stand 08/2023	Anzahl Studierende Trend ab WiSe 2017/18	Durchschnittswerte der Prüfungsjahre 2018-2022							
		Anzahl Studierende	darunter weiblich	darunter international	Anzahl Studienanfänger/-innen 1. FS	Anzahl Absolvent/-innen	Studien-dauer in Semestern	mittl. Auslastung	Aufnahme-kapazität 1. FS
B.Sc. Physik		235	27,7%	5,0%	113	35	6,4	64,1%	176
M.Sc. Physik		88	17,6%	12,5%	39	23	5,0	71,4%	55
M.Sc. Photonics		173	33,3%	94,4%	60	40	5,2	81,0%	74
Lehramt Regelschule Physik		5	31,3%	0,0%	3	1	/	19,2%	16
Lehramt Gymnasium Physik		106	24,9%	0,4%	38	10	11,4	52,2%	72
Lehreinheit Physik		607	27,0%	22,5%	253	109	/	57,6%	393

Kurzerläuterungen:
Prüfungsjahr: Ein Prüfungsjahr umfasst das im vorherigen Jahr gestartete Wintersemester und das darauffolgende Sommersemester (Bsp.: Prüfungsjahr 2013 = 01.10.2012 – 30.09.2013).
mittl. Auslastung Studiengang: Verhältnis zwischen der errechneten Aufnahmekapazität und der tatsächlichen Anzahl aufgenommener

**Zusammenfassung der Datenblätter studiengangbezogener Kennzahlen (Studiengangdatenblatt) für die Studiengänge der
Lehreinheit Werkstoffwissenschaften an der Physikalisch-Astronomischen Fakultät**

Quelle: Datenblätter aus der Stabstelle Qualitätsentwicklung in der Lehre, Stand 08/2023	Anzahl Studierende Trend ab WiSe 2017/18	Durchschnittswerte der Prüfungsjahre 2018-2022							
		Anzahl Studierende	darunter weiblich	darunter international	Anzahl Studienanfänger/-innen 1. FS	Anzahl Absolvent/-innen	Studien-dauer in Semestern	mittl. Auslastung	Aufnahme-kapazität 1. FS
B.Sc. Werkstoffwissenschaft		36	29,8%	3,6%	12	8	6,7	17,8%	65
M.Sc. Werkstoffwissenschaft		44	26,3%	35,8%	14	11	5,7	27,8%	49
Lehreinheit Werkstoffwissenschaften		80	28,1%	19,7%	26	19	/	22,8%	114

Kurzerläuterungen:
Prüfungsjahr: Ein Prüfungsjahr umfasst das im vorherigen Jahr gestartete Wintersemester und das darauffolgende Sommersemester (Bsp.: Prüfungsjahr 2013 = 01.10.2012 – 30.09.2013).
mittl. Auslastung Studiengang: Verhältnis zwischen der errechneten Aufnahmekapazität und der tatsächlichen Anzahl aufgenommener Erstsemester im Prüfungsjahr (Mittel der letzten 5 Jahre)

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, Photonik und Quantentechnologien
- 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, Quantum Science and Technology (geplant 2024), Photon Science and Technology (geplant 2025) und Medical Photonics

Abbe School of Photonics

Die Abbe School of Photonics (ASP) bildet den Ausbildungsschwerpunkt des Abbe Centers of Photonics ab. Sie bietet ein umfassendes akademisches, interdisziplinäres Bildungsprogramm auf Master- und Promotionsebene mit besonderem Fokus auf Optik, Photonik und Quantentechnologien und mit internationaler Sichtbarkeit. Während die Geschäftsstelle der ASP strukturell an der PAF angesiedelt ist, hat sie einen stark institutsübergreifenden und interfakultativen Charakter. Die Prozesse innerhalb der ASP werden durch einen Sprecherrat und das besonders hohe Engagement des langjährigen Sprechers Prof. Thomas Pertsch gesteuert und durch eine Geschäftsstelle unterstützt.

Das ASP-Bildungsangebot gliedert sich in internationalisierte Masterstudiengänge sowie ein durch die Graduiertenakademie der FSU zuletzt in 2020 herausragend po-

sitiv 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. Derzeit sind zwei weitere internationale Studiengänge in Planung, die das Potenzial haben, die Attraktivität des Ausbildungsangebots der Fakultät maßgeblich zu erweitern.



Abb. 1: M.Sc. Photonics Jahrgang 2021 vor dem Forschungsgebäude ACP, in dem signifikante Teile der forschungsnahen Lehre durchgeführt werden.

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.

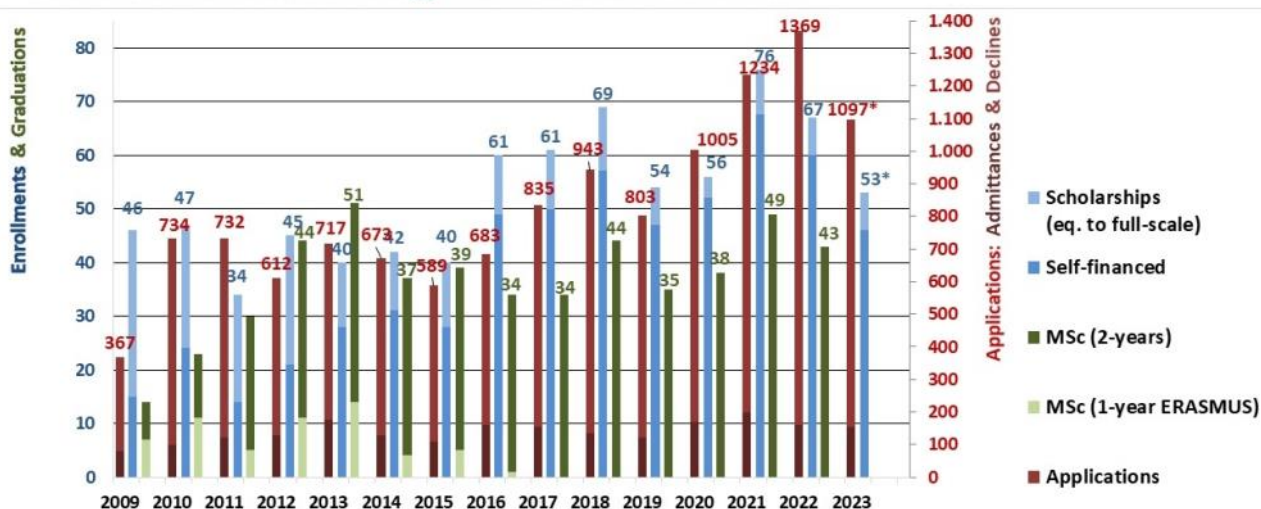
Die ASP erhält jährlich mehr als 1.000 Bewerbungen zur Teilnahme am Master- und/oder Promotionsprogramm. In einem systematischen Auswahlprozess werden dabei die Bewerber:innen, die auf Basis ihrer bisherigen Leistungen ein besonders hohes akademisches Potenzial und eine überdurchschnittlich hohe Affinität zur Photonik aufweisen, ausgewählt. Die exzellentesten Bewerber:innen 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 824 Studierende aus 70 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 Karriere-möglichkeiten zu gewinnen. Neben Sprachkursen wird für die Absolventen ein spezielles Bewerbungstraining angeboten und die Teilnahme an Jobbörsen sowie Speed-Datings mit Firmenvertretern organisiert.

Maßgeblichen Einfluss auf das Ausbildungsprofil der ASP hatte die 2019 gestartete Max Planck School of Photonics, die ganz wesentlich auf den etablierten Strukturen und Erfahrungen der ASP aufbaut, durch die ASP koordiniert wird und deren Spitzenforschungsambitionen sich mittlerweile neun weitere deutsche Hochschulen angeschlossen haben. Zudem hat die ASP die Herausforderungen der COVID-19-Pandemie konstruktiv genutzt, um weitreichende Innovationen in der Digitalisierung der Lehre zu erproben und zu verstetigen. Nur beispielhaft genannt seien hier die Inbetriebnahme komplett fernsteuerbarer optischer Setups (Michelson-Interferometer, Adaptive Optik) für Praktika sowie – für herausragende Kandidat:innen – die universitätsweit bisher einzigartige, dauerhafte Option der Ferneinschreibung in den Masterstudiengang Photonics verbunden mit der Möglichkeit des Fernstudiums über bis zu zwei Semester bei uneingeschränkter Studierfähigkeit. Dieser Schritt wird als wesentlicher Beitrag zur Senkung von allgemeinen (z.B. Pandemien, Kriege, Embargos) und individuellen (z.B. eingeschränkte Mobilität, Handicaps, familiäre Einschränkungen) Hindernissen für den Zugang zu akademischer Bildung angesehen.

M.Sc. Photonics: evolution of applications and student numbers



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 Vertreter:innen 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

Der Fachschaftsrat ist die Vertretung der Studierenden der Physikalisch-Astronomischen Fakultät. Dabei dient er als Ansprechpartner für jegliche Probleme der Studierenden und strebt stets an, die Situation dieser zu verbessern. Zur Durchsetzung dieser Ziele gibt es verschiedene Projekte, die vom Fachschaftsrat am Leben erhalten werden.

Dabei sind insbesondere das Klausurvorbereitungswochenende und die Lehrevaluation zu nennen.

Das **Klausurvorbereitungswochenende** (KlaVoWo) dient der optimalen Prüfungsvorbereitung der ersten beiden Semester. Dabei werden die Grundlagenvorlesungen mit Aufgaben und Probeklausuren abgedeckt, die die Studierenden in Gruppen mit oder ohne Hilfe von Tutor:Innen lösen können. Um mögliche Ablenkungen gering zu halten, findet das Wochenende im Januar in einer Jugendherberge statt.

Während der Corona-Pandemie musste für das Klausurvorbereitungswochenende eine Online-Möglichkeit geschaffen werden.

Die **Lehrevaluation** wird jedes Semester am Ende der Vorlesungszeit durchgeführt. Dabei kommen Vertreter:Innen des FSRs in die Vorlesungen und geben den Studierenden die Möglichkeit, die Vorlesung sowie entsprechende Übungen und Tutorien anonym zu evaluieren und Lob, Verbesserungswünsche und Kritik zu äußern. Die dabei entstehenden Daten werden zusammengefasst und den Lehrpersonen zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse der Evaluation werden verwendet, um den Lehrpreis der Fakultät zu vergeben und Studierende für ausgezeichnete Übungsleitung auszuzeichnen.



Abb. 1: Lehrpreisverleihung am 17.11.2021

Veranstaltungen des Fachschaftrats

Der Fachschaftratsrat bietet verschiedene Veranstaltungen über das Jahr verteilt an. Diese reichen von Wanderungen über verschiedene Kurse (LATEX und Python) bis hin zu den Studieneinführungstagen (StET).

Dabei dienen die Veranstaltungen unter anderem der Vernetzung der Studierenden verschiedener Semester untereinander.

Während der Corona-Pandemie gab es deutlich weniger Veranstaltungen. Allerdings versuchte der Fachschaftratsrat, einige Projekte wie Film- und Spieleabende und die Weihnachtsfeier auch online zu ermöglichen.



Abb. 2: Studieneinführungstage 2023



Abb. 3: Wanderung am 23. April 2023

Sobald es wieder möglich war, wurden mehr gemeinsame Aktivitäten durchgeführt. Dabei wurden im Sommer Wanderungen unternommen, eine Radtour zum Freibad in Camburg organisiert und das Fakultätsfest veranstaltet.

Nach mehrjähriger Pause (durch die Corona-Pandemie) wurde 2023 auch wieder eine lokale Firma – Active Fiber Systems GmbH (AFS) – besucht und die dortigen Labore besichtigt.

Für die nähere Zukunft sind auch überregionale Exkursionen, nach Dresden-Rossendorf und Greifswald, geplant.

Der Fachschaftratsrat stellt sich vor

Ab WiSe 2021:

Leonie Graf
Adrian Minnich
Jan Böhmer
Tom Jungnickel
Felix Schulz
Sabine Häußler
Jonathan Bollig
Frauke Parr
Samuel Ritzkowski

Ab WiSe 2022:

Ben Marske
Samuel Ritzkowski
Florian Hilpert
Jan Böhmer
Jonas Margraf
Willi Kröning
Christian Korhammer
Sayonil Mollah
Richard Kindler
Ole Fröhlich
Eric Heise

Ab WiSe 2023:

Raja Hoffmann
Ben Marske
Willi Kröning
Leopold Peter
Dina Monden
Stella Hocevar
Elisabeth Haberkorn
Susanna Bräu
Thies Potthoff
Emma Simon
Yannis Andre
Julia Fischer
Christian Korhammer
Leander Beukman
Konrad Kesberger

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:

- 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 teilnehmenden Firmen als auch den Studierenden und Promovierenden gut angenommen. (Abb. 1) Leider musste die Job-Börse coronabedingt auch in 2021 ausfallen. Seit 2022 findet sie wieder regelmäßig statt und ist von den Firmen so stark nachgefragt, dass die maximal möglichen 15 Standplätze nicht ausreichen und einigen Firmen abgesagt werden musste.
- Organisation und finanzielle Absicherung des jährlichen **Alumni-Tages mit feierlicher Zeugnisübergabe**. Zur im Juni stattfindenden Festveranstaltung werden neben den Master-Zeugnissen und Promotionsurkunden noch von verschiedenen Sponsoren gestiftete Preise für die besten Abschlussarbeiten unter Anwesenheit der Preisstifter verliehen (siehe S. 173 ff.). Außerdem gibt



Abb. 1: Zur Jobbörse am 04.07.2023 wurde erstmals ein Zelt auf dem Max-Wien-Platz für zusätzliche 3 Standplätze aufgebaut. Foto: Sarah Dürer



Abb. 2: Der M.Sc. Photonics Student Siavash Davani bei der musikalischen Umrahmung des Alumnitages am 01.07.2022

Foto: Falk Ronneberger



der Dekan einen Überblick über die Fakultät. 2021 wurde die Festveranstaltung corona-bedingt noch einmal mit der traditionell im Dezember stattfindenden Veranstaltung „Der Dekan informiert“ zusammengelegt, konnte aber schon wieder in Präsenz stattfinden. Für die musikalische Umrahmung der Festveranstaltung hat der Alumni-Verein 2022 ein Stage Piano angeschafft, welches seitdem von verschiedenen Akteuren (auch zu Übungszwecken von Studierenden) genutzt wird.

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
- Fakultätstreffen zum regen Austausch
- Ferienworkshop „Physik für Schülerinnen“
- Öffentliche Samstagsvorlesungen
- Weihnachtsvorlesung

Zur besseren Identitätsstiftung und Bindung der Absolventen an die Fakultät befasst sich der Alumni-Verein auch mit der **Geschichte der Fakultät**. So hat der Verein die feierliche Umbenennung des Hörsaals 2 im Abbeaum in Rudolf-Straubel-

Hörsaal am 6. Februar 2023 sowohl finanziell als auch organisatorisch unterstützt.

Seit 2023 ist die Verleihung von **Goldenen Diplomen**, d.h. einer Urkunde 50 Jahre nach der Erlangung des Diploms nachgefragt. So fanden mehrere Veranstaltungen zur Verleihung des Goldenen Diploms an Physiker der Matrikel 1969 (4-Jahres-Studium) und 1968, Mathematik-Physik-Lehrer Matrikel 1969 und Dipl.-Ing. für Technologie Matrikel 1968 statt.



Abb. 3: Der Dekan, Prof. Dr. Christian Spielmann, während der Namensgebungsfeier für den Rudolf-Straubel-Hörsaal am 06.02.2023.

Foto: Dorit Schmidt

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.

Zur Mitgliederversammlung am 21.02.2024 hatte der Verein 461 Mitglieder.

Dem **Vorstand des Alumni-Vereins** gehören an:

Prof. Dr. Paul Seidel	Vorsitzender
M.Sc. Luise Lukas	stellvertretende Vorsitzende
Dr. Dorit Schmidt	2. Stellvertreterin (bis 21.02.24, danach Schatzmeisterin)
Dr. Angela Unkroth	Schatzmeisterin (bis 21.02.24, danach 2. Stellvertreterin)
Dr.-Ing. habil Volker Herold	
Dr. Christian Königsdörffer	(bis 21.02.24)
Prof. Dr. Gerhard Paulus	Verantwortlicher für Jobbörse (seit 21.02.24 Vorstandsmitglied)

GLEICHSTELLUNG

Die Physikalisch-Astronomische Fakultät ist in die Gleichstellungsbestrebungen und –maßnahmen der Universität fest eingebunden. In Gleichstellungsfragen hat sich die Fakultät grundsätzlich positiv entwickelt.

Professoren

Im Zeitraum 2021-2023 ist es gelungen, gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung eine Nachwuchsgruppenleiterin auf eine W2-Professur zu berufen. Mit Frau Prof. Staude wurde im Zuge von Bleibeverhandlungen eine W2-Profesur auf eine W3-Professur angehoben. Leider hat uns im März 2023 eine W3-Professorin aus familiären Gründen verlassen. Die PAF hat damit nunmehr zwei W3-Professorinnen, eine W2-Professorin und eine apl. Professorin. Außerdem wurde mit Frau Prof. Stefanie Gräfe einer Professorin der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät die Zweitmitgliedschaft in unserer Fakultät gewährt (derzeit hat die PAF vier Zweitmitglieder). Der Professorinnenanteil der PAF beträgt damit 10,6%. Er wird sich trotz aller Maßnahmen bei den Berufungsverfahren nicht wesentlich steigern lassen, da der durchschnittliche Frauenanteil bei den Studierenden aller Studiengänge der PAF mit 30,5 % gerade so den Basiswert gemäß Ziel- und Leistungsvereinbarungen erreicht hat. Bei den Promovierenden liegt er mit 25,9 % sogar darunter.

Es bleibt zu hoffen, dass sich die Vorbildrolle dieser fünf Professorinnen langfristig auf die Erhöhung des Frauenanteils beim wissenschaftlichen Nachwuchs und den Studierenden auswirkt.

Studierende

Der Frauenanteil unter den Studierenden lag zum Wintersemester 2023/24 je nach Studiengang zwischen 18,5% beim M.Sc. Physik und B.Sc. Werkstoffwissenschaft und 39,5% beim M.Sc. Photonics (siehe Abb. 2). Insgesamt sind 30,5% unserer Studierenden weiblich. Der Studentinnenanteil konnte damit um 2,7% gegenüber dem Berichtszeitraum 2019-2021 gesteigert werden. Zu klären ist noch, warum der Frauenanteil beim Übergang vom Bachelor zum Master in Physik auf etwa die Hälfte gesunken ist.

Wissenschaftlicher Nachwuchs

Der Frauenanteil bei den Promovierenden ist in etwa konstant geblieben. Er liegt damit um ca. 5 % unter dem Frauenanteil bei den Studierenden. Der Frauenanteil bei den abgeschlossenen Promotionen liegt mit 21,8% nicht wesentlich darunter (Abb. 1). Bei den Habilitationen hat sich ein erfreulicher Trend gezeigt. Während sich im Zeitraum 2018-2020 keine Frau habilitiert hat, sind im Zeitraum 2021-2023 drei von fünf abgeschlossenen Habilitationen von Frauen, was einem Anteil von 60% entspricht. Dagegen ist der Frauenanteil bei den Juniorprofessuren (0%) sowie bei den Privatdozenturen und der Leitung von Nachwuchsgruppen (13%) steigerungswürdig.

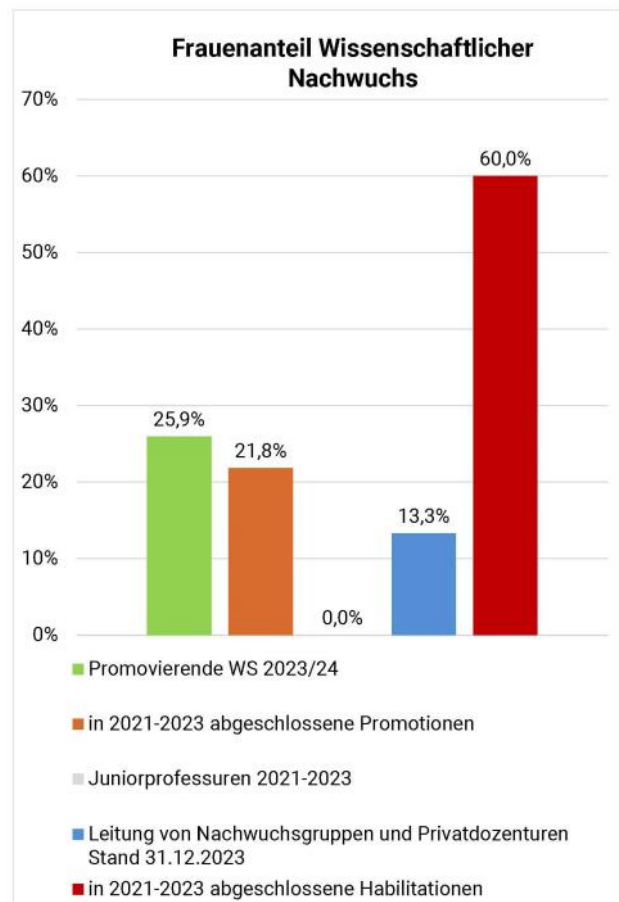


Abb. 1: Frauenanteil beim wissenschaftlichen Nachwuchs

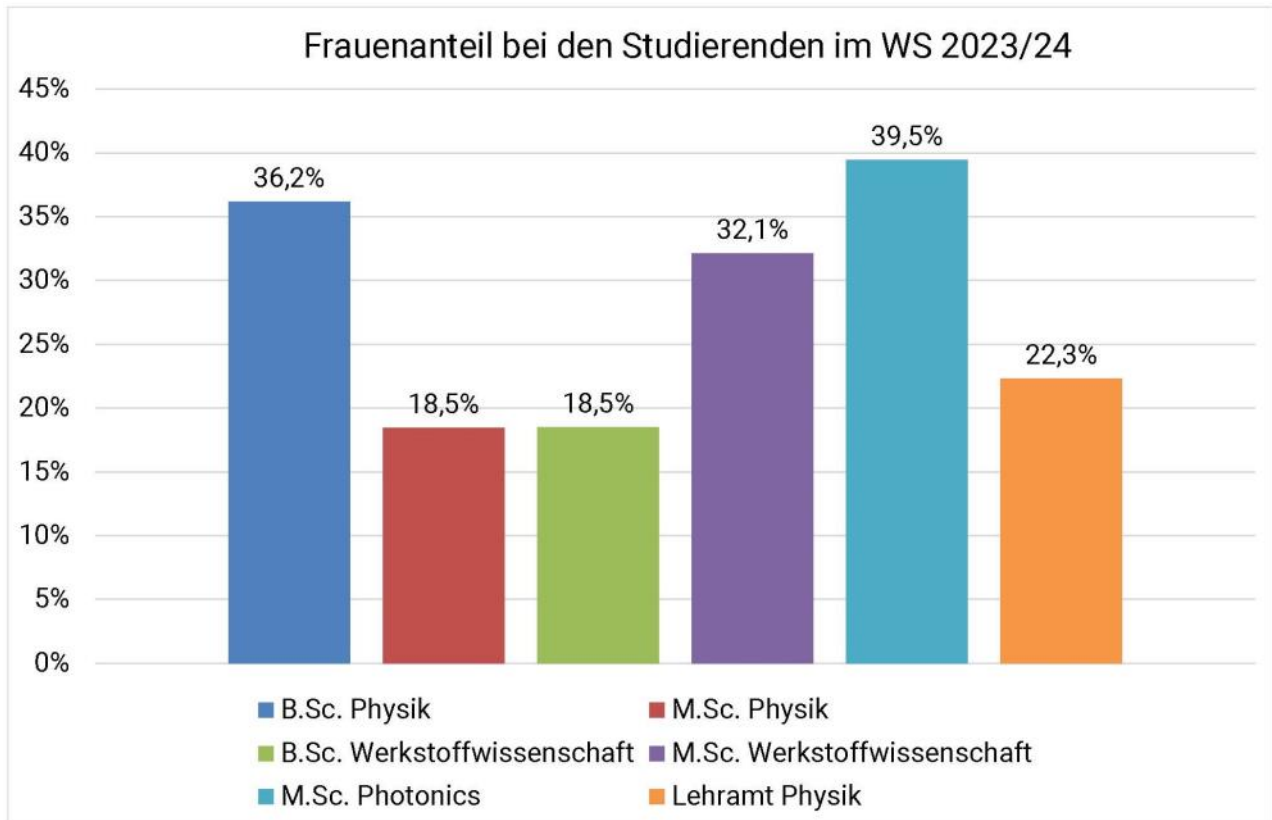


Abb.2: Frauenanteil bei den Studierenden, Datenquelle: HISPOS

Die Fakultät setzt bei der Nachwuchsgewinnung bereits in den Schulen an. So wird in der Regel einmal pro Jahr der *Workshop „Physik für Schülerinnen“* durchgeführt, welcher sich an Schülerinnen der Klassen 10 bis 12 wendet. (siehe Abb. 3) Die Ausschreibung erfolgt in Thüringen und den angrenzenden Bundesländern. Damit wird auch die Aufmerksamkeit der Schulen auf die Universität Jena als Ausbildungsort gelenkt. Corona-bedingt konnte dieser Workshop erst 2022 wieder stattfinden und er muss sich nach der langen Pause erst wieder etablieren, was die geringe Zahl von acht Teilnehmerinnen erklärt.



Abb.3: Im Ferien-Workshop „Physik für Schülerinnen“ experimentieren die Schülerinnen in kleinen Projektgruppen, hier Projektgruppe Röntgenphysik (Foto links: Anna Janunts). Rechts: Besichtigung des Polaris Lasers Foto: Heike Marschner

INTERNATIONALES

Gastwissenschaftler

Nachfolgend sind Gastwissenschaftler:innen aufgeführt, die im Berichtszeitraum an der Physikalisch–Astronomischen Fakultät gearbeitet haben oder noch hier arbeiten.

Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

Professur für Astrophysik (Prof. Neuhäuser)

Ernst Paunzen und **Martin Piecka**: Universität Brno, Tschechische Republik

Pouyan Rezvani: Project PAL, Bavarian Academy of Sciences, München

Christian Ginski: Anton Pannekoek Institute for Astronomy, Amsterdam, Niederlande

Sven Buder: Australian National University, Canberra, Australien

Satenik Ghazaryan: Byurakan Astrophysical Observatory, Armenien

Akemi Tamanoi: Riken National Research and Development Agency, Wako, Japan

Professur für Astronomie (Prof. Krivov)

Mark Booth: UK Astronomy Technology Centre, Edinburgh, UK

Nicole Pawellek: Cambridge University, UK

Tim Pearce: University of Warwick, UK

Philippe Thébault: Observatoire de Paris, France

Institut für Angewandte Optik und Biophysik

Professur für Wellenleiteroptik (Prof. Čížmár)

Christian Schwab: Senior Lecturer in Photonics, Macquarie University, Australian Astronomical Optics, Sydney, Australia

Hui Cao: John C. Malone Professor of Applied Physics, Department of Applied Physics Yale University, New Haven, CT 06520

Professur für Superresolution Microscopy (Prof. Eggeling)

Christoph Tatgenhorst: Bowdoin College, Maine, 2022

Hans Blom: Karolinska Stockholm, 2023

Lei Jin: University Toronto, Canada, 2023

Institut für Angewandte Physik

Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)

Lauris Talbot: Université Laval, Quebec, Canada

Valdemar Stankevič: Center for Physical Sciences and Technology, Vilnius, Lithuania

Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)

Igor Aharonovich: University of Technology Sydney, Sydney, Australia

Hans Bachor: Australian National University, Canberra, Australia

Elise Bailly: Université Paris Saclay, Paris, France

Andy Boes: University of Adelaide, Australia

Justus Bohn: University of Exeter, UK

Lorcan Conlon: Australian National University, Canberra, Australia

Costantino De Angelis: University of Brescia, Italy

Francesco De Lucia: Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, UK

Elena Goi: Centre for Artificial-Intelligence Nanophotonics, University of Shanghai, China

Brana Jelenkovic: Institute of Physics, University of Belgrade, Serbia

Alexander Kildishev: Purdue University, West Lafayette, USA

Avi Niv: Ben-Gurion University of the Negev, Israel

Christopher Poulton: UTS University of Technology Sydney, Australia

Josephine Spiegelberg: McGill University, Montreal, Canada

Vincent Vinel: University of Paris, France

Lukas Wesemann: The University of Melbourne, Australia

Matthias Wurdack: Australian National University, Canberra, Australia

Mike Xu: Monash University, Melbourne, Australia

Institut für Optik und Quanten- elektronik

Alexander Dreischuh: Sofia University, Sofia, Bulgarien (10-11/2021 und 10/2022)

Joel Carpenter: University of Queensland, Australia, 06/2022

Dejan Milsevic: Universität Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 08/2022

Hiroaki Nishimura: Faculty of Engineering Electrical and Electronic Eng., Fukui, Japan, 08/2022

Lyubomir Stoyanov: Alexander von Humboldt-Stipendiat, Universität Sofia, Bulgarien, 05/2021-04/2023

Yutaka Yoshida: Gastprofessor, Shizuoka University, Japan 04/2022-03/2024

Michael Zürich: University of California at Berkeley, USA

Otto-Schott-Institut für Material- forschung

Professur für Oberflächen –und Grenzflächentechnologie (Prof. Müller)

Alicja Lawrynowicz: Materials Engineering, University of Turku, Finnland

Professur für Metallische Werkstoffe

Luibov Toropova: Ural Federal University, Ekaterinburg, Russland

Chenglin Huang: Shanghei University, China

Irina Nizovtseva: Ural Federal University, Ekaterinburg, Russland

Liudmyla Sahura: Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine

Gastaufenthalte im Ausland

Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

Ralph Neuhäuser: Uni Ca'Foscari, Venedig, Italien (Feb/März 2023)

Valeri Hambaryan: mehrmals am Byrakan Observatory Armenien (mehrere Wochen 2023)

Institut für Angewandte Optik und Biophysik

Professur für Superresolution Microscopy (Prof. Eggeling)

Daniel Schröder: Montpellier, 2022

Christina Wichmann: Paris Orly, France; 2023)

Institut für Angewandte Physik

Professur für Laserphysik (Prof. Nolte)

Timothy Imogore: Université Laval, Quebec, Canada

Professur für Nanooptik (Prof. Pertsch)

Frank Setzpfand:

- Australian National University, Canberra, Australia
- Institute of Physics Belgrade, Serbia
- Aleksa Krstic:** Australian National University, Canberra, Australia
- Thomas Pertsch:**
 - Australian National University,
 - Nanyang Technological University, Singapore
 - National University of Singapore, Singapore
 - Agency for Science, Technology and Research (A*STAR), Singapore
 - Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne, Australia
 - The University of Melbourne, Australia
 - National Central University, Taoyuan, Taiwan
 - National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan

Maximilian Weissflog: Australian National University, Canberra, Australia

Internationale Studierende

Institut für Festkörperphysik

Carsten Ronning: Australian National University, Canberra, Australia, 2-6/2023

Isabelle Staudé: Australian National University, Canberra, Australia, 2-4/2023

Lukas Jäger: Australian National University, Canberra, Australia, 4-12/2023

Sebastian Klimmer: Australian National University, Canberra, Australia, 8-10/2022 & 8-12/2023

Institut für Optik und Quantenelektronik

Professur für Quantenelektronik
(Prof. Spielmann)

Richard Hollinger: Forschungsaufenthalt University of California, Berkeley, 01/2021-08/2021

Während in den grundständigen Studiengängen Physik, Werkstoffwissenschaft und Lehramt der Anteil der ausländischen Studierenden im Wintersemester 2023/24 zwischen 0% (B.Sc. Werkstoffwissenschaft) und 39% (M.Sc. Werkstoffwissenschaft) liegt, kommen im komplett englischsprachigen Studiengang M.Sc. Photonics über 92,5 % der Studierenden aus dem Ausland. Jeweils zum Wintersemester wurden ca. 50 Studierende aus der ganzen Welt in den M.Sc. Photonics neu immatrikuliert. Die Physikalisch-Astronomische Fakultät unternimmt große Anstrengungen, auch den M.Sc. Physik zu internationalisieren. Der Ausländeranteil in diesem Studiengang ist seit 2021 von 7,5% auf 21,5 % gestiegen.

Bei den eingeschriebenen Promovierenden lag der Ausländeranteil zum Jahresende 2023 bei 51% (siehe Seite 15). Ebenso ist der Ausländeranteil bei den abgeschlossenen Promotionen von 27% in 2021 auf 58% in 2023 kontinuierlich gestiegen. Diese Entwicklung ist hinsichtlich der Absicherung der im Grundstudium zumeist deutschsprachigen Lehrveranstaltungen nicht unproblematisch.

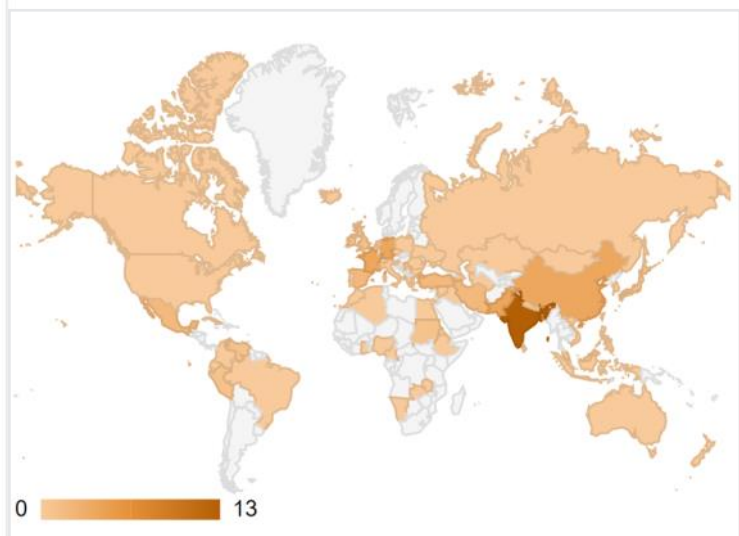
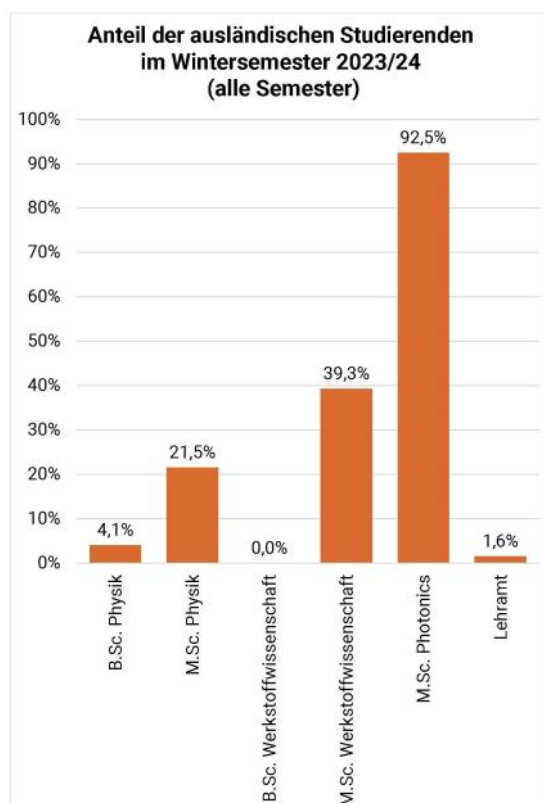


Abb.1: Ausländeranteil in den Studiengängen der PAF im Wintersemester 2023/24

Abb.2: Herkunft der Studierenden im Studiengang M.Sc. Photonics im Wintersemester 2023/24

PERSONALIA

Berufungen und Pensionierungen

Berufungen an die PAF

Prof. Dr. Martin Ammon, W3–Professur für Theoretische Physik –Raumzeit und Materie, (Berufungsverfahren auf eine höherwertige Professur), 2021

Prof. Dr. Stefan Flörchinger, W2/W3–Professur für Quantenfeldtheorie, Januar 2022

Prof. Dr. Markus Roth, W3–Professur für Astrophysik, April 2022

Prof. Dr. Holger Cartarius, W3–Professur für Physik und ihre Didaktik (Tenure-Evaluation), 2023

Prof. Dr. Isabelle Staude, W3–Professur für Nano- und Quantensysteme, 2023

Prof. Dr. Janine George, W2–Professur für Materialinformatik (gemeinsame Berufung mit der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung BAM), September 2023

Prof. Dr. Martin Gärtner, W2–Professur für Theorie der Quanteninformatik, September 2023

Prof. Dr. Vladan Blahnik, W3–Professur für Optisches Systemdesign und Simulation, November 2023, freigestellt bis Mai 2024

Jun.-Prof. Dr. Mario Chemnitz, W1–Professur für Intelligente Photonische Systeme, (gemeinsame Berufung mit IPHT Jena), Dezember 2023

Prof. Dr. Andrey Turchanin, W2–Professur für Angewandte Physikalische und Molekulare Nanotechnologie am Institut für Physikalische Chemie; Erteilung der Zweitmitgliedschaft in der Physikalisch-Astronomischen Fakultät im Juli 2022

Prof. Dr. Fabian Steinlechner, W2–Professur für Experimentelle Quanteninformatiktheorie, Januar 2024

Jun.-Prof. Dr. Peter Micke, W1–Professur für Laserspektroskopie in Ionenfallen (gemeinsame Berufung mit Helmholtz-Institut Jena), März 2024

Laufende Berufungsverfahren

W2 /W3–Professur für Mikro– und Nanooptische Hybride Systeme–Design, Technologie und Ap-

W3–Professur für Theoretische Physik /Gravitationstheorie (Berufungsverfahren auf eine höherwertige Professur)

W3–Professur für Theoretische Festkörperphysik (Nachfolge Prof. Botti)

W3–Professur für Angewandte Physik/Nanooptik (Berufungsverfahren auf eine höherwertige Professur)

W2–Professur für Optik zweidimensionaler Festkörper, (tenure track-Verfahren von W1 auf W2)

W3–Professur für Computational Materials Science (Berufungsverfahren auf eine höherwertige Professur)

W2/W3– Professur für Metallische Gläser/Metastabile Metalle (Nachfolge Prof. Rettenmayr)

Rufannahmen nach außen

Apl. Prof. Dr. Uwe Zeitner, Professur für Technische Optik, Hochschule München, 2022

Dr. Tobias Vogl, Professur für Quantum Communication Systems Engineering, Technische Universität München, 2023

Dr. Markus Gräfe, Professur für Experimentelle Festkörper-Quantenoptik, TU Darmstadt, 2023

Prof. Dr. Silvana Botti, Professur für Theorie der Angeregten Zustände integrierter Festkörpersysteme, Ruhr-Universität Bochum, 2023

Ablehnungen von Ruf nach außen

Prof. Dr. Isabelle Staude, W3-Professur an TU Darmstadt, 2021

Prof. Dr. Thomas Pertsch, W3-Professur, Universität Oldenburg, 2023

Prof. Dr. Marek Sierka, W3-Professur für Digitale Materialwissenschaft, TU Ilmenau, 2024

Prof. Dr. Markus Schmidt, W3-Professur, Universität Oldenburg, 2024

Personalstruktur

Pensionierungen

Apl. Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze, Wilhelm und Else Heraeus-Seniorprofessur für innovative Ausbildungskonzepte im Fach Physik, 2016 - 2021

Apl. Prof. Dr. Elke Wendler, apl. Professur für Ionenstrahlphysik, 9/2021

Prof. Dr. Herbert Gross, W3-Professur für Theorie Optischer Systeme, 2022

Prof. Dr. Artie Hatzes, C4 –Professur für Astronomie und Direktor der Thüringer Landessternwarte Tautenburg, 2023

Prof. Dr. Andreas Wipf, C4-Professur für Theoretische Physik/ Quantentheorie, September 2020–August 2023 Seniorprofessor



Abb.1: Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze stand auch nach seiner Pensionierung und dem Ende der Seniorprofessur für Video-Aufzeichnungen des Mathematik-Vorkurses zur Verfügung

Wie dem unten aufgeführten Diagramm zur Personalstruktur der Physikalisch-Astronomischen Fakultät zu entnehmen ist, sind mehr als die Hälfte unserer Mitarbeiter:innen über Drittmittel oder Stipendien beschäftigt. Im Bereich der wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen und Stipendiat:innen sind dank der sehr erfolgreichen Drittmittelinwerbung (siehe S. 7) sogar nur etwa ein Viertel aus dem Haushalt finanziert. Und selbst bei den Professor:innen wird etwa die Hälfte über Stiftungs-Professuren oder gemeinsame Berufungen mit außer-universitären 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 des akademischen Mittelbaus entsprechend dem bereits 2017 gemeinsam mit der Universitätsleitung erarbeiteten Dauerstellenmodell 21 sogenannte Funktionsstellen eingerichtet worden. Gegenwärtig sind etwa 29,5% der Wissenschaftler-Vollzeitäquivalente bzw. 22% der Wissenschaftlerköpfe unbefristet.

Aufgrund finanzieller Engpässe muss die Friedrich-Schiller-Universität bis 2028 ca. 100 Vollzeitstellen abbauen, davon wurden der PAF 9,1 VZÄ auferlegt. Dieser Abbau wird im Wesentlichen durch Nichtwiederbesetzung bereits unbesetzter Stellen oder durch Renteneintritt bis dahin frei werdender Stellen realisiert und betrifft in starkem Maße das OSIM (Wegfall einer Professur).

Zum Zwecke der sofortigen Mitteleinsparung wurde außerdem eine Stellensperre festgelegt, welche die Wiederbesetzung aller frei werdenden Stellen (egal aus welchem Grund) erst nach 6 Monaten erlaubt, Professuren sogar erst nach 12 Monaten. Das stellt die Fakultät vor einige Herausforderungen insbesondere hinsichtlich der Lehre.

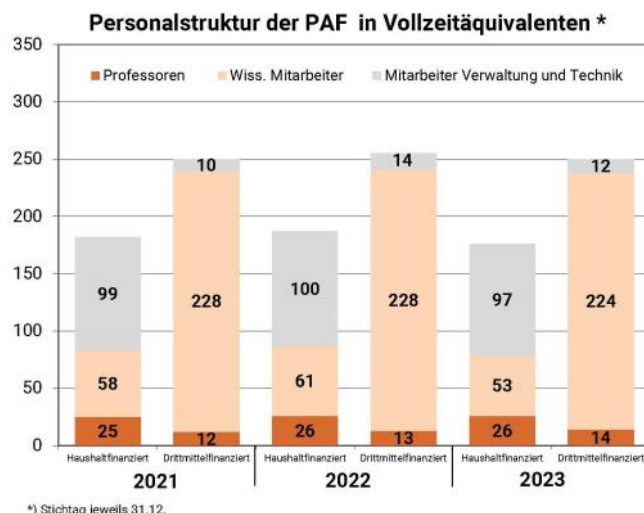


Abb. 2: Personalstruktur der Physikalisch-Astronomischen Fakultät in Vollzeitäquivalenten für haushalts- und drittmittelfinanziertes Personal

Preise und Ehrungen

Nachfolgend sind Preise und Ehrungen aufgeführt, die Mitglieder der Physikalisch-Astronomischen Fakultät im Berichtszeitraum erhalten haben. Genannt sind jeweils Preisträger:in, Name des Preises, Datum der Verleihung und ggf. die Dotierung.

Dekanat / Studiendekanat

Team des Physikalischen Grundpraktikums (Frank Perner, Barbara Lüdge, Monika Müller, Torsten Zentgraf, Katharina Schreyer): Lehrpreis des Dekanats der PAF 2021, 650 €



Abb. 1: Das Team des Physikalischen Grundpraktikums erhielt 2021 Lehrpreis des Dekanats für sein außerordentliches Engagement. Foto: F. Ronneberger

Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

Valerie Hambaryan, Ralph Neuhäuser: Preis-Ausschreibung 2022 in Armenien zur internationalen Zusammenarbeit mit Armenien (offen für alle Fächer); Projekt „Search and identification of high-velocity stars by dynamical ejection and supernovae from multiple star“ wurde als einziges in Astronomie genehmigt

Institut für Angewandte Optik und Biophysik

Christian Franke: Best TALENT Presentation auf dem 2. LIFE Symposium –CONNECTING TALENTs, Jena 2023, 1.000 €

Gregor J. Gentsch: Best Student Talk Award at the 28th International Workshop on „Single Molecule Spectroscopy and Super-resolution Microscopy“, Berlin 2023, 750 €, „Nanotexture enables computational multiplexing of super-resolved intracellular structures with high fidelity“

Anindita Dasgupta: ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics 2022, 3.000 €

Andreas Stark:

- IMPULSEproject der Friedrich-Schiller-Universität, 10.000 €
- Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung für optische Messtechnik 2022; 1.500 €



Abb. 2: Verleihung des Preises der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung an Dr. Andreas Stark (Mitte), rechts: Dekan Prof. C. Spielmann, links: Dr.-Ing. Bernd-Jochen Schniewind, Werth-Stiftung; Foto: Falk Ronneberger

Christian Eggeling: Royal Microscopical Society (RMS) Award of Light Microscopy 2023



Foto: privat



Foto: Falk Ronneberger

Abb. 4: Dr. Michael Kempe (rechts) und der Dekan, Prof. Spielmann verleihen den ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics 2022 an Anindita Dasgupta

Institut für Angewandte Physik

Professur für Angewandte Physik (Tünnermann)

Andreas Tünnermann: Fraunhofer-Ehrenmedaille der Fraunhofer Gesellschaft, 2022



Foto: Fraunhofer IOF

Abb. 1: Präsident Prof. Neugebauer verleiht dem Direktor des Fraunhofer-IOF, Prof. Dr. Andreas Tünnermann die Ehrenmedaille der Fraunhofer-Gesellschaft

Marta Gilaberte Basset: Zeiss Ph.D. Award in Modern Optics, „Quantenbildgebung mit nicht-detektiertem Licht“, 2021



Abb. 2: Verleihung des ZEISS Ph. D. Award in Modern Optics 2021 an Marta Gilaberte Basset durch Marco Hanft von der Carl Zeiss AG; Foto: Falk Ronneberger

Martin Landmann: Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung für beste Promotion auf dem Gebiet der optischen Messtechnik 2023; „Schnelle und genaue 3D-Formvermessung mittels Musterprojektion und Stereobildaufnahme im thermischen Infrarot“



Abb. 3: Verleihung des Preises der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung 2023 an Dr. Martin Landmann (rechts) durch Bernd Marshaus, Werth-Stiftung (Mitte) und den Dekan Prof. Dr. Ulf Peschel (links)

Magdalena Hilbert: Beste Bachelorarbeit - Applied Photonics Award 2022, “Gas Sensing with 2D Materials on Exposed-Core Fibers”

Professur für Festkörperlaser (Limpert)

Robert Klas: SPARC PhD-Prize, Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (GSI); “Efficiency Scaling of High Harmonic Generation using Ultra-short Fiber Lasers”; 2021

Lars-Henning Stark: 1st Place Best Student Paper, Photonics West sub-conference “Fiber Lasers XVIII: Technology and Systems”, SPIE. Photonics West 2021; “100 fs pulses directly from a kW-class mJ-level ytterbium-doped fiber CPA laser system”

Albrecht Steinkopff: 3rd Place Best Student Paper, Photonics West sub-conference “Fiber Lasers XVIII: Technology and Systems”, SPIE. Photonics West, 2021; “Optimizing the design of coherently combined multicore fiber amplifiers”

Christoph Stihler: Applied Photonics Award: Preis der Jury für besondere Anwendungspotenziale “Transverse mode instability - Insights into modal energy transfer in high-power fiber lasers”; 2021

Maximilian Weißflog: Best Talk, DoKDoK-lite, “Describing SPDC in Nanoresonators Using Quasinormal Mode Expansions”, 2021

Tobias Heuermann: 3rd Place Best Student Presentation Award, SPIE. Photonics West 2023; “Scaling of ultrafast thulium-doped fiber laser systems using coherent beam combination of large mode area fiber amplifiers”

Ziyao Wang: 1st Place Best Student Presentation Award, SPIE. Photonics West 2023, “Nonlinear pulse compression of a high-power ultrafast thulium-doped fiber laser in a glass filled capillary”

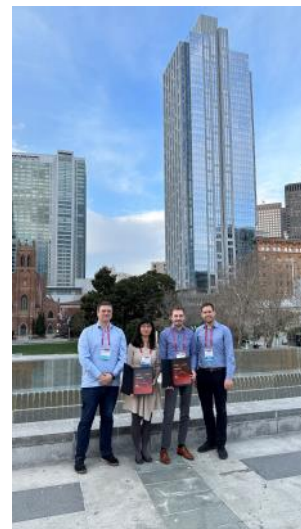


Abb. 4: Die Preisträger Ziyao Wang und Tobias Heuermann (Mitte) auf der Photonics West in San Francisco
Foto: IAP

Yiming Tu: 2nd Place Best Student Paper Award, SPIE. Photonics West 2022, “Real-time modal decomposition of fiber laser beams using a spatial mode multiplexer”

Martin Gebhardt: Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Angewandte Forschung 2022, “Power scaling of few-cycle short-wavelength infrared laser sources for nonlinear frequency conversion”

Jan Rothhardt: Senior Member Optical Society (OSA), 2023

Richard Kindler: Honours-Programm für forschungsorientierte Studierende, Friedrich Schiller University Jena 2023; „Erschließung neuer Wellenlängenbereiche für integrierte Optiken mittels Photonic Integrated Circuits (PICs)“

Robert Klas: 3rd Place Hugo Geiger Award 2023

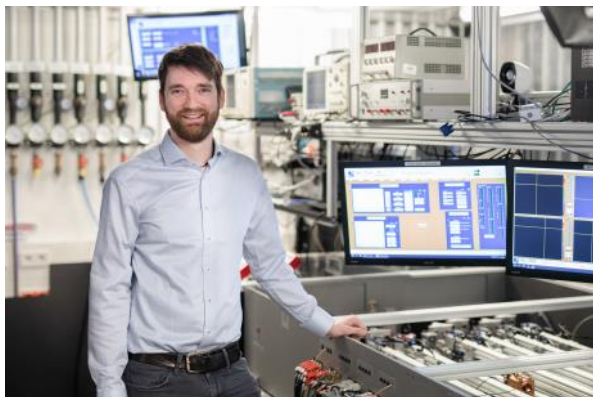


Abb. 5: Robert Klas vor der entwickelten EUV-Quelle
Foto: Walter Oppel (Fraunhofer IOF)

Jens Limpert, Jan Rothhardt, Thomas Pertsch: Wissenschaftspreis für „Exzellente interdisziplinäre Kooperation“ Beutenberg-Campus Jena e.V. 2023, „Neuartige Mikroskopie im extremen Ultraviolett enthüllt Nanowelt der Mikroorganismen“



Foto: Ira Winkler, FSU

Professur für Mikro- und Nanostrukturtechnik (apl. Prof. Dr. Uwe D. Zeitner)

Fatemeh Abtahi: 2. Platz Poster Session, DoK-DoK-lite 2021, “Surface Nonlinearities in Dielectric Nanofilm”

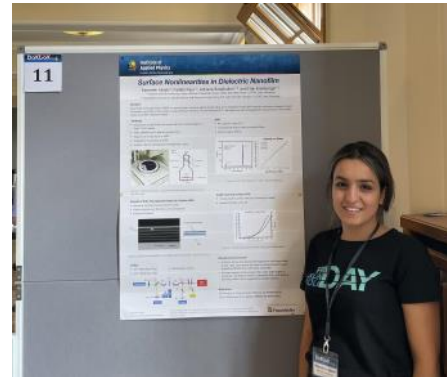


Abb. 7: Fatemeh Abtahi vor ihrem Poster, Foto: IAP

Thomas Siefke: Preis der Dr.-Ing. Siegfried Werth Stiftung, beste Dissertation auf dem Gebiet der optischen Messtechnik 2021; „Entwicklung von Drahtgitterpolarisatoren für Anwendungen im ultravioletten bis in den vakuumultravioletten Spektralbereich“

Lilit Ghazaryan: Best Paper Award, 27th Microoptics Conference (MOC2022)

Uwe Zeitner: MOC Contribution Award, Japan Society of Applied Physics; For significant contributions to successfully hold the MOC2022 in Jena, Germany

Tobias Vogl: Innovationspreis „INNOspace“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Projekt „QuVeKS – Quantenprozessoren für verschlüsselte Kommunikation mit Satelliten“ “Single Crystal Diamond Membranes for Optical Quantum Devices”



Abb. 7: Die Preisträger des INNOspace Master Award 2021 (v.l.n.r.) Dr. Tobias Vogl, Kim Lammers, Dr. Falk Eilenberger; Foto: Fraunhofer IOF

Professur für Experimentalphysik / Laserphysik
(Prof. Dr. Stefan Nolte)

Mostafa Abasifard: Best Poster Award, Quantum 2022 Summer School on Quantum Optical Technologies, "Towards quantum key distribution with true single-photon sources at room temperature"



Foto: Ira Winkler, FSU

Dr. Jisha Chandroth Pannian: Senior Member Optical Society (OSA), 2022

Ria Krämer: BGPP best students award 2022, Optical Society (OSA), "Tailored Apodization of femtosecond written fiber Bragg gratings by aperture shaping"

Kim Alina Lammers: Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Grundlagenforschung 2022, 2.000 €, "Polarization manipulation in femtosecond laser direct written waveguides in fused silica"



Foto: Andrey Yershov

Dr. Sina Saravi: Nexus Fellowship 2023, Carl-Zeiss-Stiftung

Josefine Krause: Fakultätspreis für die beste Masterarbeit (Rohde & Schwarz) 2023, "Coupling of Quantum Emitters in 2D Materials into Laser-Written Waveguides", 1.000 €

Dr. Tobias Vogl: Nachwuchswissenschaftspreis Beutenberg-Campus Jena e.V.

Abb. 6 (rechte Spalte): Verleihung des Nachwuchswissenschaftspreises an Dr. Tobias Vogl (Mitte), Foto: Ira Winkler



Abb. 3: Den von Rohde & Schwarz gestifteten Fakultätspreis für die beste Masterarbeit erhielt 2023 Josefine Krause (Mitte). Links: Dr. Hendrik Bartko, Rohde & Schwarz, rechts: Dr. Falk Eilenberger (Betreuer)

Professur für Angewandte Physik / Nanooptik
(Prof. Dr. Thomas Pertsch)

Katsuya Tanaka: 1. Platz Poster Session, DoKDoK-lite, 2021, "Femtosecond pulse shaping with semiconductor Huygens' metasurfaces"

Daniel Werdehausen: Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Angewandte Forschung 2021, "Nanocomposites as Next-generation Optical Materials: Fundamental Properties and Potential", 2.000 €

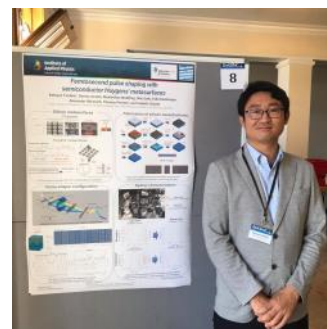


Abb. 4 (links): Katsuya Tanaka vor seinem preisgekrönten Poster, Foto: IAP

Abb. 5 (rechts): Dr. Daniel Werdehausen während seines Vortrages zur Verleihung des Friedrich-Hund-Dissertationspreises 2021, Foto: Falk Ronneberger



Maximilian Weißflog: 2nd Poster Prize at the 2nd Colloquium on the Physics and Applications of Metasurfaces 2022, “Entangled Photon-Pair Generation in Dielectric Nanoresonators”

Lichtwerkstatt - Johannes Kretzschmar, David Zakoth, Sabine Best: “Innovation Methods in Photonics”, Kurs - Lehrpreis, Sparkassenstiftung, 2022; 2.500 €

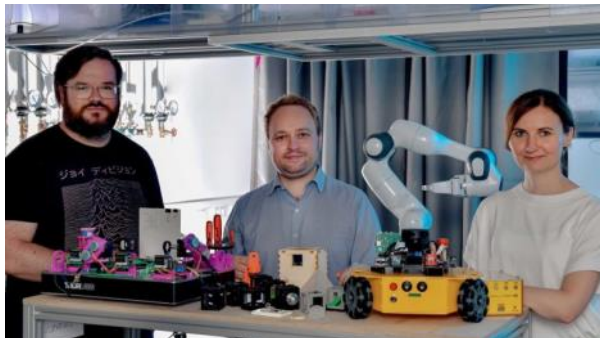


Abb. 7: Das Team der Lichtwerkstatt
Foto: Jürgen Scheere, Universität Jena

Thomas Pertsch: Lehrpreis der Fachschaft der PAF für das WS 2021/22, 650 €

Domenica Bermeo-Alvaro: Honours-Programm für forschungsorientierte Studierende 2023, Friedrich Schiller University Jena; „Vier-Wellen-Mischung in mikrostrukturierten Fasern“

Jan Sperrhake, Maria Mittag, Michael Steinert, Jan Petersen, Thomas Pertsch: Digital Innovation Hub Photonics (DIHP) Award, 2023, “Development of nanostructures on glass chips with multiple chambers of different environmental conditions and microbial cultures migrating in between - a light-controlled microverse”

Manuel Klockow: Applied Photonics Award 2023, Fraunhofer Gesellschaft, “Evaluating Diffractive Neural Network Architectures”

Maximilian Weißflog: EPS-QEOD Travel Grant Student Award 2023, “Tuneable Spatially Entangled Photon-Pair Emission from a Nonlinear Metasurface”

Jan Sperrhake: Fakultätspreis (Rohde & Schwarz) für die beste Dissertation 2023; “Coupling of Quantum Emitters in 2D Materials into Laser-Written Waveguides”, 1.500 €



Foto: Andrey Yershov

Professur für Optisches Systemdesign (Gross)

Dr. Ziyao Tang: Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Angewandte Forschung 2023, 2.000 €, Improved correction methods for symmetry-free systems”

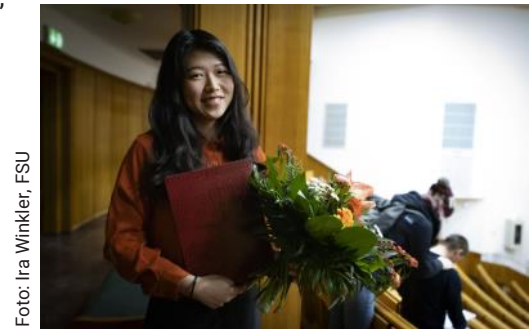


Foto: Ira Winkler, FSU

Institut für Festkörpertheorie und -optik

Professur für Festkörperoptik (Prof. Peschel)

Dr. Andre Luiz Marquez Muniz: Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Grundlagenforschung 2021, 2.000 €, “Experiments on Synthetic Dimensions in Photonics”

Institut für Festkörperphysik

Juniorprofessur für Optik zweidimensionaler Festkörper (Prof. Soavi)

Giancarlo Soavi:

- Stipendienprogramm für Postdoktoranden und Juniorprofessoren 2021, Daimler und Benz Stiftung
- Rowena-Morse-Preis 2023, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 5000 €
- Lehrpreis der Fachschaft der PAF für das Sommersemester 2023, 650 €



Abb. 9: Jun.-Prof. Dr. Giancarlo Soavi erhielt 2023 den Rowena-Morse-Preis der FSU, Foto: Jens Meyer

Sebastian Klimmer:

- Examenpreis der Friedrich-Schiller- Universität 2022; 500 €
- ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics 2023



Abb. 1: Verleihung des ZEISS Ph.D. Award in Modern Optics durch Marco Hanft (links) an M.Sc. Sebastian Klimmer (rechts); Foto: Andrey Yershov

Apl. Professur für dünne Schichten (Schmidl)

Frank Schmidl:

- Lehrpreis des Dekanats 2023, 650 €
- Janus-Cornarius-Lehrpreis der Fachschaft Medizin 2021, 500 €



Abb. 2: Medizinstudierende zeichnen Prof. Dr. Frank Schmidl (5.v.li.) mit dem Janus-Cornarius-Lehrpreis aus. Foto: Heiko Hellmann/ UKJ

Professur für Festkörperphysik (Prof. Fritz)

Julian Picker: Examenpreis der Friedrich-Schiller-Universität 2021; 500 €

Professur für Festkörperphysik (Prof. Ronning)

Martin Hafermann: Promotionspreis der Friedrich-Schiller-Universität 2022, 750 €



Abb. 3: Die Verleihung des Examenpreises der FSU erfolgte 2021 wegen Corona im Rahmen des Alumnitages der PAF durch den Dekan Prof. Spielmann (links) an M.Sc. Julian Picker (rechts). Foto: Falk Ronneberger



Abb. 4: Verleihung des Promotionspreises der FSU 2022 an Dr. Martin Hafermann (Mitte) Foto: Jens Meyer (Universität Jena)

Institut für Optik und Quantenelektronik

Professur für Atomphysik hochgeladener Teilchen (Prof. Stöhlker)

Philip Pfäfflein: Posterpreis, "Precision x-ray spectroscopy of He-like uranium employing metallic magnetic calorimeter detectors", International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2023), Kanada

Marc Oliver Herdrich: Posterpreis, "Report on Cryogenic Micro-Calorimeter Detectors in High-Precision X-Ray Spectroscopy Experiments at GSI/FAIR", International Conference on Precision Physics and Fundamental Physical Constants (FFK 2023), Wien

Professur für Relativistische Laserphysik (Kaluza)

Malte Kaluza: Lehrpreis der Fachschaft der PAF für das Sommersemester 2021, 650 €

Martin Beyer:

- Posterpreis, Titel: "Shadowgraphy of the plasma's evolution around water micro-droplets irradiated by high-power laser pulses", 6th European Advanced Accelerator Concepts workshop (EAAC 2023) auf Elba
- Anerkennungsurkunde für ausgezeichnete Lehre, Fachschaftsrat, 2021+2022+2023

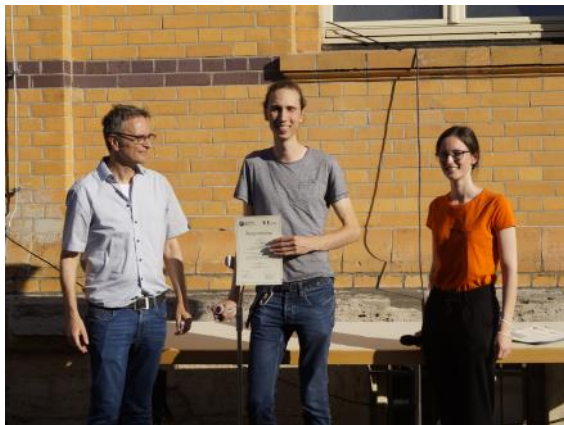


Abb. 5: Verleihung der Anerkennungsurkunde an Martin Beyer (Mitte) durch den Dekan Prof. Spielmann (links) und die Vorsitzende des Fachschaftsrates Leonie Graf (rechts) anlässlich des Fakultätsfestes im Juni 2022, Foto: Fachschaftsrat

Professur für Nichtlineare Optik (Prof. Paulus)

Gerhard G. Paulus:

- Lehre in der Pandemie Award (2021)
- Sonderpreis für Zivilcourage der Stadt Jena „Klang der Stolpersteine“, 2023, gemeinsam mit Klaus Wegener und Till Noack



Abb. 6: Verleihung des Zivilcourage-Preises
Foto: Stadt Jena

Professur für Quantenelektronik (Prof. Spielmann)

Richard Hollinger: Fakultätspreis (Rohde & Schwarz) für die beste Dissertation 2021, Titel: "Extreme nonlinear optics in highly excited semiconductors", 1.500 €



Abb. 7: Dr. Hendrik Bartko, Rohde & Schwarz, (links) verlieh den Fakultätspreis für die beste Dissertation 2021 an Dr. Richard Hollinger (rechts)
Foto: Falk Ronneberger

Otto-Schott-Institut für Materialforschung

Professur für Materialwissenschaft (Prof. Jandt)

Klaus D. Jandt:

- IADR Distinguished Scientist Wilmer Souder Award 2022, USA
- Batsheva de Rothschild Fellow 2022, Israel

Professur für Metallische Werkstoffe

Robert Wonneberger: Fakultätspreis (Rohde & Schwarz) für die beste Dissertation 2022, Titel: "Frühe Stadien der Oxidation des nichtrostenden Austenits 316L – Zur Bildung mehrlageriger Oxidschichten", 1.500 €



Abb. 8: Verleihung des Fakultätspreis für die beste Dissertation 2022, v.l.n.r. Dekan Prof. Dr. C. Spielmann, Dr. Robert Wonneberger, Dr. Hendrik Bartko (Rohde & Schwarz), Foto: Falk Ronneberger

Theoretisch – Physikalisches Institut

Professur für Raumzeit und Materie (Ammon)

Martin Ammon: Lehrpreis der Fachschaft der PAF Sommersemester 2022, 650 €



Abb.1: Der Fachschaftsratsvorsitzende Jan Böhmer (links) verleiht den Lehrpreis an Prof. Martin Ammon (Mitte) anlässlich der Veranstaltung „Der Dekan informiert“; Foto: Andrey Yershov

Tobias Hössel: Examenspreis der Friedrich-Schiller-Universität 2023, 500 €, „Conformal Blocks on the Plane from Oscillator Representations“



Abb. 2: Die Vizepräsidentin für Studium und Lehre apl. Prof. Dr. Karina Weichold verleiht den Examenspreis 2023 an M.Sc. Tobias Hössel. Foto: Christoph Worsch (Universität Jena)

Michel Pannier: Friedrich-Hund-Dissertationspreis für Grundlagenforschung 2023, 2.000 €, „Aspects of Holography and Higher Spins in Three-Dimensional Asymptotically Flat Space-times“

Sebastian Grieninger: Promotionspreis der Friedrich-Schiller-Universität 2021, 750 €, „Non-equilibrium dynamics in holography“



Abb. 3: Dr. Michel Pannier, Friedrich-Hund-Dissertationspreisträger 2023
Foto: Ira Winkler, FSU



Abb. 4: online -Verleihung des Promotionspreises der FSU 2021 an Dr. Sebastian Grieninger (rechts) durch den Vizepräsidenten für wissenschaftlichen Nachwuchs Prof. Dr. Uwe Cantner
Foto: Jens Meyer (Universität Jena)

Professur für Quantentheorie (Prof. Gies)

Holger Gies: Lehrpreis der Fachschaft der PAF Wintersemester 2022/23, 650 €

Ruben Küspert: Fakultätspreis (Rohde & Schwarz) für die beste Masterarbeit 2021, 1.000 €, „Spin-base-invariant formulation of Hilbert-Palatini gravity“



Abb. 5: Verleihung des Fakultätspreises für die beste Masterarbeit 2021, v.l.n.r. Prof. Holger Gies, Ruben Küspert, Dr. Hendrik Bartko (Rohde & Schwarz)
Foto: Falk Ronneberger

AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie

Holger Cartarius:

- Lehrpreis der Fachschaft der PAF für das Wintersemester 2020/21, 650 €
- Lehrpreis des Dekanats der Physikalisch-Astronomischen Fakultät 2022, 650 €



Abb. 6: Verleihung des Lehrpreises des Dekanats 2022 an Prof. Dr. Holger Cartarius (rechts)
Foto: Andrey Yershov

Elisa Helbig: Examenspreis der FSU 2021, „ Bis die Ohren klingeln – Akustikexperimente aus der Alltagswelt“, 500 €

Silvia Simionato: Promotionspreis der Friedrich-Schiller-Universität 2023, 750 €, „Dark Matter and Gravitational Lensing as Teaching Tools for Physics and Astronomy“



Abb. 7: Verleihung des Examenspreises 2021 für das Lehramt an Elisa Helbig durch den Vorsitzenden des Lehrerbildungsausschusses Prof. Dr. Perkams
Foto: Falk Ronneberger



Abb. 8: Verleihung des Promotionspreises der FSU 2023 an Dr. Silvia Simionato durch den Vizepräsidenten für wissenschaftlichen Nachwuchs Prof. Dr. Uwe Cantner (in Abwesenheit)
Foto: Jens Meyer (Universität Jena)

Nobelpreis für Physik 2023 für unsere Ehrendoktorin

Der Nobelpreis für Physik wurde 2023 an Anne L’Huillier von der Universität Lund, Pierre Agostini von der Ohio State University in Columbus und Ferenc Krausz von der Ludwig-Maximilians-Universität München verliehen. Sie werden für experimentelle Methoden zur Erzeugung von Attosekunden-Lichtpulsen geehrt: extrem schnellen Laserblitzen, mit deren Hilfe sich die Dynamik von Elektronen in Materie untersuchen lässt. [1]

Für unsere Fakultät ist dies eine besondere Freude, da wir Prof. Anne L’Huillier am 5. November 2015 die Ehrendoktorwürde für ihre bahnbrechenden Beiträge zur Attosekunden-Laserphysik verliehen haben.

[1] Dirk Eidemüller; Welt der Physik 04.10.2023; <https://www.weltderphysik.de/thema/nobelpreis/nobelpreis-fuer-physik-2023/>



Abb. 9: Verleihung der Ehrendoktorwürde an Prof. Dr. Anne L’Huillier am 5. November 2015 durch den Dekan Prof. Dr. Gerhard Paulus (links) und den Präsidenten Prof. Dr. Walter Rosenthal (rechts); Foto: PAF

Mitgliedschaften und Funktionen

Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte

Professur für Astrophysik

Prof. Dr. Ralph Neuhäuser:

- Mitglied Beirat Ethik-Zentrum FSU
- Mitglied Herausbergremium der internat. referierten Zeitschrift "Astronomical Notes"
- Mitglied DPG, AG, IAU
- Berufungsbeauftragter der PAF
- Mitglied des Fakultätsrates

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

Professur 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
- Stellvertretendes Mitglied des Fakultätsrates

Juniorprofessur für Digitalisierte Experimentelle Mikroskopie (Jun.-Prof. Franke)

Jun.-Prof. Dr. Christian Franke:

- Prüfungsausschuss M.Sc. Medical Photonics
- Organisationsteam des Physikalischen Kolloquiums
- Jury-Mitglied für Siegfried Czapski Publication Prize der FSU Jena (2022 und 2023)

Institut für Angewandte Physik

Professur für Angewandte Physik

Prof. Dr. Andreas Tünnermann:

- Mitglied des Fakultätsrates
- Rat der TU Bergakademie Freiberg

- Sprecher der Max Planck School of Photonics
- Direktoriumsmitglied des Helmholtz-Instituts Jena
- Mitglied des Beirates des DFG Exzellenz-Clusters „Balance of the microverse“
- Sprecher der Fraunhofer Innovations-Cluster „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“ und des BMBF Programms QuNET
- Sprecher des Fraunhofer Innovationsclusters „Leistungszentrum Photonik“ und des Graduiertenkollegs „Fraunhofer Graduate Research School Photonics“
- Sprecher des Thüringer Innovationszentrums „Quantum optics and sensors“
- Vorsitzender des Technischen Rats der Fraunhofer Gesellschaft
- Kuratorium des MPA, Heidelberg
- 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"
- Aufsichtsratsmitglied Jenoptik AG
- Stakeholder Photonics 21-Plattform
- OSA-Fellow – Optical Society of America
- Mitglied des BMBF –Forschungsclusters "infectooptics"
- Direktor des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF)
- Mitglied der Strategiekommision "industrielle Produktion und Systeme"
- Vertreter der Fraunhofer Gesellschaft im Münchener Quantum Valley
- Vertreter der Fraunhofer Gesellschaft im Quantum Valley Niedersachsen (QVLS)
- Direktor des Carl Zeiss Stiftungszentrums für Quantenphotonik (CZS Center Q Photon)
- Mitglied des CPM Beirates
- Mitglied des ODF'24 Beirates
- Gutachter für BMBF, DFG, EU, AIF, MF, VF Projektträger Euronorm (BMW)
- Auswahlkommission für die Alexander-von-Humboldt-Professur der Alexander von Humboldt-Stiftung
- Jury-Mitglied für den Thüringer Innovationspreis der STIFT

- Mitglied des Programmkomitees Technology 514
- Sprecher des Thüringer QuantenHub
- Mitglied des Strategic Advisory Board for the Quantum Technologies Flagship (SAB), EU
- Mitglied des Expertenrates “Quantencomputing” der Bundesregierung
- Mitglied des Rates für technologische Souveränität des BMBF (RAT4TS)
- Mitglied der DPG

Dr. Markus Gräfe:

- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale
- Mitglied der DPG
- Mitglied des Abbe Centers of Photonics

Dr. Fabian Steinlechner:

- Gutachter für DFG
- Gutachter für Swiss National Science Foundation
- Sprecher des Quanten Hub Thüringen Qi1 – Quantenkommunikation
- Sprecher des EU-Kanada –Projektes “HyperSpace”, Horizon Europe
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Professur für Festkörperlaser

Prof. Dr. Jens Limpert:

- Mitglied der Optical Society of America (OSA)
- Mitglied der DPG
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Dr. Jan Rothhardt:

- Mitglied des erweiterten Direktoriums des Helmholtz Instituts Jena
- Programmkomitee der CLEO Europe conference
- Programmkomitee der EOSAM conference 2021
- Mitglied der Optical Society of America (OSA)
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Professur für Laserphysik

Prof. Dr. Stefan Nolte:

- Stellv. Mitglied des Haushaltsausschusses des Senats und vorsitzender der Haushaltskommission der PAF
- Stellv. Institutsleiter des Fraunhofer Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik
- Mitglied der Geschäftsführung der Abbe School of Photonics

- Jurymitglied “Jugend forscht”
- Mitglied verschiedener Wissenschaftsausschüsse (Phot. West, CLEO, ICALEO, LANE, Lasertagung Jena)
- Fellow of the Optical Society of America (OSA)
- Fellow der International Society for Optics and Photonics SPIE
- Mitglied der Max Planck School of Photonics und deren Finanzausschusses
- Mitglied des wissenschaftlichen Beirates des Deutschen Optischen Museums (D.O.M.)
- Mitglied der DPG
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Tobias Vogl:

- Mitglied der DPG
- Sprecher des Forschungsnetzwerks QUICK3, DLG und BMWK
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Dr. Roland Ackermann:

- Mitglied des Fakultätsrates
- Mitglied der Evaluierungskommission der PAF

Professur für Nanooptik

Prof. Dr. Thomas Pertsch:

- Sprecher des Lenkungsausschusses der Profillinie “Light” der FSU Jena
- Direktoriumsmitglied des Abbe Centers of Photonics der (ACP) FSU Jena
- Sprecher der Abbe School of Photonics der FSU Jena
- Mitglied des Beirates des London Institute for Advanced Light Technologies of King’s College London, Imperial College London and University College London
- 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
- Fellow der OPTICA (früher Optical Society of America, OSA)
- Assoziierter Forscher im Exzellenzcluster “Balance of the Microverse”
- Assoziierter Forscher im Exzellenzcluster “Transformative Meta-Optical Systems” des Australischen Forschungsrates

- Studienberater für die Jenaer Hochschulgruppe der OSA
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Dr. Frank Setzpfandt:

- Geschäftsführer des Thüringer Innovationszentrums für Quantenoptik und Sensorik
- Mitglied der Studienkommission der PAF
- Projektgutachter für die DFG
- Assoziierter Forscher im Exzellenzzentrum “Transformative Meta-Optical Systems” des Australischen Forschungsrates
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Dr. Falk Eilenberger:

- Fellow der Max Planck School of Photonics
- Koordinator des Graduiertenkollegs „3D-Technologien in der Mensch-Maschine-Interaktion“
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

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”
- Gutachter für den Holländischen Forschungsrat (Dutch Research Council, NOW)
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

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 bei den Konferenzen 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
- Fellow der Max Planck School of Photonics
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Apl. Professur für Mikro- und Nanostrukturtechnik

Apl. Prof. Dr. Uwe D. Zeitner:

- Programmkomitee für Microoptics Conference, MOC2021 und MOC2023
- Mitglied des Programmkomitees der : SPIE Advanced Lithography: Optical Microlithography XXXIV
- Stellv. Leiter der 27. Mikrooptik Konferenz MOC2022
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Dr. Adriana Szeghalmi:

- Seniormitglied der Optical Society of America (OSA)
- Mitglied der DPG
- Gutachterin für verschiedene wissenschaftliche Journale

Dr. Thomas Siefke

- Mitglied des Programmkomitees SPIE Modeling Aspects in Optical Metrology
- Organisator der NANO-FAME 2023 Micro and Nano fabrication technology meets Nano metrology
- Gutachter für verschiedene wissenschaftliche Journale

Institut für Festkörperphysik

Professur für Festkörperphysik

Prof. Dr. Carsten Ronning:

- Fachkollegiat der DFG, Fachkollegium 307-01
- Mitglied im Forschungsausschuss der FSU
- Mitglied des Fakultätsrates
- Editorial Board Member des Journals "Nano Energy"

Professur 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
- Mitglied des Studienausschusses des Senats

PD Dr. Roman Forker:

- Mitglied der Studienkommission der PAF
- Mitglied der Evaluierungskommission der PAF

Dr. Marco Grünewald:

- Masterauswahlausschuss Physik

Apl. Professur für Dünne Schichten

Apl. Prof. Dr. Frank Schmidl:

- 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 der AG Physik in den Medizinisch-Pharmazeutischen Studiengängen (AGPM) in der DPG

Juniorprofessur für Optik zweidimensionaler Festkörper

Jun.-Prof. Dr. Giancarlo Soavi:

- Organisationsteam des Physikalischen Kolloquiums

Professur für Festkörperphysik/Quantendetektion

Prof. Dr. Heidemarie Schmidt:

- Mitglied des Fakultätsrates

Institut für Festkörpertheorie und -optik

Professur 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 (bis 3/2023)

Professur für Festkörperoptik

Prof. Dr. Ulf Peschel:

- Vorsitzender der Evaluierungskommission der PAF
- Dekan (seit 4/2023)
- Sprecher des SFB 1375–Nonlinear Optics Down to Atomic Scales (NOA) bis 3/2023
- Mitglied des Fakultätsrates (bis 3/2023)
- Mitglied des Michael-Stifel-Zentrums Jena für "Datengetriebene und Simulationsgestützte Wissenschaft" Core area Simulation Science

Institut für Optik und Quantenelektronik

Professur für Relativistische Laserphysik

Prof. Dr. Malte Kaluza:

- Mitglied des Senats der FSU
- Mitglied Prüfungsausschuss Physik
- Prodekan (seit 4/2023)
- Mitglied im Advisory Board des Bereichs „Matter and Technology“ am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Erasmus-Koordinator der PAF
- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Institutes Jena

Professur 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

Professur für Nichtlineare Optik

Prof. Dr. Gerhard G. Paulus

- Mitglied des Senats der FSU (bis 9/2022)
- 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

Professur für Quantenelektronik

Prof. Dr. Christian Spielmann:

- Dekan der PAF (bis 3/2023)
- Sprecher der Graduiertenschule RS-APS
- Mitglied des Direktoriums des ACP
- Mitglied des Sprecherrates der Abbe School of Photonics

Burgard Beleites:

- Stellvertretendes Mitglied des Fakultätsrates

Professur für Röntgenphysik

Prof. Dr. Ralf Röhlsberger:

- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Institutes Jena
- Masterauswahlausschuss der PAF

Lehrstuhl für Laserteilchenbeschleunigung

Prof. Dr. Matt Zepf:

- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Institutes Jena

AG Attosekunden-Laserphysik

Dr. Adrian Pfeiffer:

- Gleichstellungsbeauftragter der PAF

Otto-Schott-Institut für Materialforschung

Professur für Metallische Werkstoffe

Prof. Dr. Markus Rettenmayr († 07.05.2022):

- Vorsitzender der Kommission zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der FSU
- Mitglied des Fakultätsrates

Dr. Stephanie Lippmann:

- Mitglied des Fakultätsrates
- Mitglied des Senats der FSU
- Mitglied der Studienkommission der PAF

Professur für Materialwissenschaft

Prof. Dr. Klaus D. Jandt:

- 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 u.a.

PD Dr. Jörg Boßert:

- Prüfungsausschuss Werkstoffwissenschaft

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“
- 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

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

Theoretisch –Physikalisches Institut

Professur 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 (bis 4/2023)
- Mitglied des Fakultätsrates
- Stellvertretender Senator
- Sprecher Graduiertenkolleg GRK 2522
- Sprecher DFG-Forschungsgruppe FOR 2783
- Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat des HZDR, Dresden-Rosendorf

Professur für Quantentheorie

Prof. Dr. Andreas Wipf:

- Series-Editor von "Graduate Texts in Physics", Springer Verlag

Professur für Quantenfeldtheorie

Prof. Dr. Stefan Flörchinger:

- Mitglied Bibliotheksausschuss des Senats
- Mitglied Prüfungsausschuss Physik

Professur für Gravitationstheorie

Prof. Dr. Bernd Brügmann:

- Direktor des Michael-Stifel-Zentrums Jena für "Datengetriebene und Simulationsgestützte Wissenschaft" Core area Simulation Science
- Institutsdirektor
- Mitglied des Fakultätsrates

Professur für Gravitationstheorie

Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi:

- Masterauswahlausschuss der PAF
- Organisationsteam Physikalisches Kolloquium

Professur für Raumzeit & Materie

Prof. Dr. Martin Ammon:

- Mitglied des Studienausschusses des Senats (bis 2022)
- Studiengangverantwortlicher Physik
- Mitglied der Studienkommission der PAF
- Mitglied des Expertengremiums der Akademie für Lehrentwicklung der FSU Jena
- Mitglied des Fakultätsrates
- Gutachter für ERC, DAAD, Humboldt-Stiftung, FWF, Research Foundation Flandern (FWO), NWO, Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wiss. Forschung (SNF)

M.Sc. Anna-Katharina Wölfel:

- Mitglied der Evaluierungskommission der PAF
- Mitglied des Fakultätsrates
- Mitglied des Institutsrates des TPI

Professur für Theorie korrelierter Quantensysteme in intensiven Feldern

Prof. Dr. Stephan Fritzsche:

- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Institutes Jena
- Mitglied des Nachwuchsausschusses des Senats der FSU
- 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)
- Lokaler Ansprechpartner für Nominierungen zu den Lindauer Nobelpreisträger-Tagungen

AG Didaktik des Physik- und Astronomieunterrichts

Professur für Physik und ihre Didaktik

Prof. Dr. Holger Cartarius:

- Studiendekan (seit 4/2023)
- Vorsitzender der Studienkommission der PAF
- Mitglied Evaluierungskommission der PAF
- Mitglied des Direktoriums des Zentrums für Lehrerbildung und Bildungsforschung der FSU
- Beratendes Mitglied im Lehrerbildungsausschuss der FSU

Dr. Silvana Fischer:

- Stellvertretende Gleichstellungsbeauftragte der PAF
- Mitglied der Studienkommission der PAF

Professur für Geschichte der Physik

Prof. Dr. Timo Mappes

- Mitglied des Fakultätsrates
- Vizepräsident Museumsverband Thüringen e.V.
- Vorstandsmitglied Witelo e.V.
- DFG-Gutachter zur Geschichte der Physik und Wissenschaftskommunikation

Professorinnen/Professoren A – Z



Foto: privat

Prof. Dr. Martin Ammon
W3-Proessur für Raumzeit und
Materie
→ S. 136



Foto: Sergey Turtaev

Prof. Dr. Tomáš Čížmár
W3-Proessur für Wellenleiter-
optik/Faseroptik
Leibniz- IPHT &
Institut für Angewandte Optik
und Biophysik
→ S. 52



Foto: privat

Prof. Dr. Sebastiano Bernuzzi
W2-Proessur für Theoretische
Physik/ Gravitationstheorie
→ S. 138



Fotostudio Wilder Göttingen

Prof. Dr. Christian Eggeling
W3-Proessur für Superresoluti-
on Microscopy
Leibniz-IPHT &
Institut für Angewandte Optik
und Biophysik
→ S. 48



Foto: Annegret Günther

Prof. Dr. Silvana Botti
W3-Proessur für Theoretische
Physik/Festkörperphysik
(bis 2023)
→ S. 88



Foto: Konrad Goes

Prof. Dr. Stefan Flörchinger
W2- Professur für Quantenfeld-
thorie
(seit 2022)
→ S. 130



Fotostudio Gebhardt Jena

Prof. Dr. Bernd Brügmann
C4-Proessur für Theoretische
Physik/Gravitationstheorie
→ S. 132



Foto: privat

Jun.- Prof. Dr. Christian Franke
tenure track Juniorproessur
für digitalisierte experimentelle
Mikroskopie
Institut für Angewandte Optik
und Biophysik
→ S. 50



Foto: F. Eberhardt

Prof. Dr. Holger Cartarius
W3-Proessur für Physik und
ihre Didaktik
→ S. 144



Foto: Annegret Günther

Prof. Dr. Torsten Fritz
W3-Proessur für Angewandte
Physik/Festkörperphysik
→ S. 74



Foto: Leibniz-IPHT, 2022

Jun.- Prof. Dr. Mario Chemnitz
Juniorproessur für Intelligente
Photonische Systeme
(seit 12/2023)
Leibniz-IPHT & Institut für An-
gewandte Optik und Biophysik



Foto: Jan-Peter Kasper

Prof. Dr. Stephan Fritzsche
W3-Proessur für Theorie korre-
lierter Quantensysteme in inten-
siven Feldern
→ S. 134

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Martin Gärtner
W2-Proessur für Theorie der
Quanteninformation
→ S. 92

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Alexander Krivov
C3-Proessur für Astronomie
→ S. 42

Foto: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung



Prof. Dr. Janine George
W2-Proessur für Materialinfor-
matik
Bundesanstalt für Materialfor-
schung und -prüfung (BAM)
& IFTO

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Jens Limpert
W2-Proessur für Experimental-
physik/ Festkörperlaser
→ S. 64

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Holger Gies
W3-Proessur für Quantenfeld-
theorie; ehemals Heisenberg-
Proessur
→ S. 128

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Timo Mappes
W3-Proessur für Geschichte
der Physik mit Schwerpunkt
Wissenschaftskommunikation
(Direktor des Deutschen Opti-
schen Museums)
→ S. 146

Foto: Christian Högner



Prof. Dr. Artie Hatzes
C4-Proessur für Astronomie,
Thüringer Landessternwarte
Tautenburg (bis 2023)
→ S. 44

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Frank Müller
W2-Proessur für Oberflä-
chen- und Grenzflächentech-
nologien
→ S. 118

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Klaus D. Jandt
C4 -Proessur für Materialwis-
senschaft
→ S. 116

Foto: privat



Prof. Dr. Ralph Neuhäuser
C4-Proessur für Astrophysik
→ S. 40

Foto: Jens Meyer



Prof. Dr. Malte Kaluza
W3-Proessur für Experimental-
physik/ Relativistische
Laserphysik
→ S. 96

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Stefan Nolte
W2-Proessur für Experimental-
physik/ Laserphysik
→ S. 60

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Gerhard G. Paulus
W3-Proessur für Experimental-
physik/ Nichtlineare Optik
→ S. 98

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Markus Roth
W3-Proessur für Astrophysik
Thüringer Landessternwarte
Tautenburg
→ S. 44

Foto: privat



Prof. Dr. Thomas Pertsch
W2 -Proessur für Angewandte
Physik/ Nanooptik
→ S. 62

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Heidemarie Schmidt
W3-Proessur für Festkörper-
physik/ Quantendetektion

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Ulf Peschel
W3-Proessur für Theoretische
Physik / Festkörperoptik
→ S. 90

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Markus Schmidt
W3-Proessur für Faseroptik und
-sensorik
→ S. 122

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Markus Rettenmayr
W3-Proessur für Metallische
Werkstoffe († 2022)
→ S. 114



Prof. Dr. Marek Sierka
W2-Proessur für Computatio-
nal Materials Science
→ S. 120

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Ralf Röhlsberger
W3-Proessur für Röntgenphy-
sik
→ S. 106

Foto: Annegret Günther



Jun.- Prof. Dr. Giancarlo Soavi
tenure track Juniorproessur
für Optik zweidimensionaler
Festkörper
→ S. 80

Foto: Jens Meyer



Prof. Dr. Carsten Ronning
Proessur für Experimental-
physik/Festkörperphysik
→ S. 76

Foto: FSU Jena



Prof. Dr. Christian Spielmann
W3-Proessur für Experimental-
physik/ Quantenelektronik
→ S. 100

Foto: privat



Prof. Dr. Isabelle Staudé
W3- Professur für Photonische
Nanomaterialien,
Institut für Festkörperphysik
→ S. 78

Foto: Fotostudio Stein Jena



Prof. Dr. Frank Wyrowski
C3-Professur für Technische
Physik

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Thomas Stöhlker
W3-Professur für Experimental-
physik/Atomphysik hochgela-
dener Ionen
→ S. 102

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Matt Zepf
W3-Professur für Laserteil-
chenbeschleunigung
→ S. 104

Fotostudio Ariene Knipper



Prof. Dr. Andreas Tünnermann
W3-Professur für Angewandte
Physik
→ S. 56

Seniorprofessoren

Foto: Fotostudio Lange Suhl



Prof. Dr. Karl-Heinz Lotze
apl. Professur für Physik und
Didaktik, Seniorprofessur der
Wilhelm und Else Heraeus –
Stiftung für innovative Ausbil-
dungskonzepte im Fach Phy-
sik (bis 9/2021)

Foto: privat



Prof. Dr. Andreas Wipf
C4-Professur für Theoretische
Physik/ Quantentheorie
(bis 9/2023)

Foto: FSU



Prof. Dr. Herbert Gross
W3- Professur für Theorie
optischer Systeme
(bis 3/2022)
→ S. 58

Foto: privat



Prof. Dr. Paul Seidel
C3-Professur für Angewandte
Physik/Tiefemperaturphysik

Außerplanmäßige Professoren

Foto: Stefan Meinel



Prof. Dr. Reinhard Meinel
Hochschuldozentur für Relativistische Astrophysik
apl. Professur für Theoretische Physik
→ S. 140

Foto: privat



Prof. Dr. Elke Wendler
apl. Professur für Ionenstrahlphysik
Institut für Festkörperphysik
(bis 9/2021)

Foto: Regina Geiling



Prof. Dr. Frank Schmidl
apl. Professur für dünne Schichten
Institut für Festkörperphysik

Foto: FSU



Prof. Dr. Uwe Zeitner
apl. Professur für Experimentalphysik/ Mikro- und Nanostrukturtechnik
→ S. 66

Fotostudio Gebhardt Jena



Prof. Dr. Katharina Schreyer
apl. Professur für Physikalisches Experimentieren
Physikalisches Grundpraktikum sowie AIU

Professoren mit Zweitmitgliedschaft in der Physikalisch-Astronomischen Fakultät

Foto: Annegret Günther



Prof. Dr. Rainer Heintzmann
W3-Professur für Physikalische Chemie I (Nanobiophotonik)
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät

Foto: A. Günther-Mitsching



Prof. Dr. Jürgen Reichenbach
Professur für Medizinische Physik/ Bildgebung
Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie

Foto: Jan-Peter Kasper



Prof. Dr. Stefanie Gräfe
Professur für Theoretische Chemie
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät

Foto: Jens Meyer



Prof. Dr. Andrey Turchanin
Professur für Angewandte Physikalische Chemie und Molekulare Nanotechnologie
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät
→ S. 82

Abkürzungen

ACP	Abbe Center of Photonics
AIU	Astrophysikalisches Institut und Universitätssternwarte
ASP	Abbe School of Photonics
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CGF	Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät
DAAD	Deutscher Akademischer Austauschdienst
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGM	Deutsche Gesellschaft für Materialkunde
DPG	Deutsche Physikalische Gesellschaft
FMI	Fakultät für Mathematik und Informatik
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
PAF	Physikalisch-Astronomische Fakultät
TAB	Thüringer Aufbaubank
TLS	Thüringer Landessternwarte
TPI	Theoretisch-Physikalisches Institut
ZAF	Zentrum für Angewandte Forschung