



SFB/Transregio 142

CRC/Transregio 142

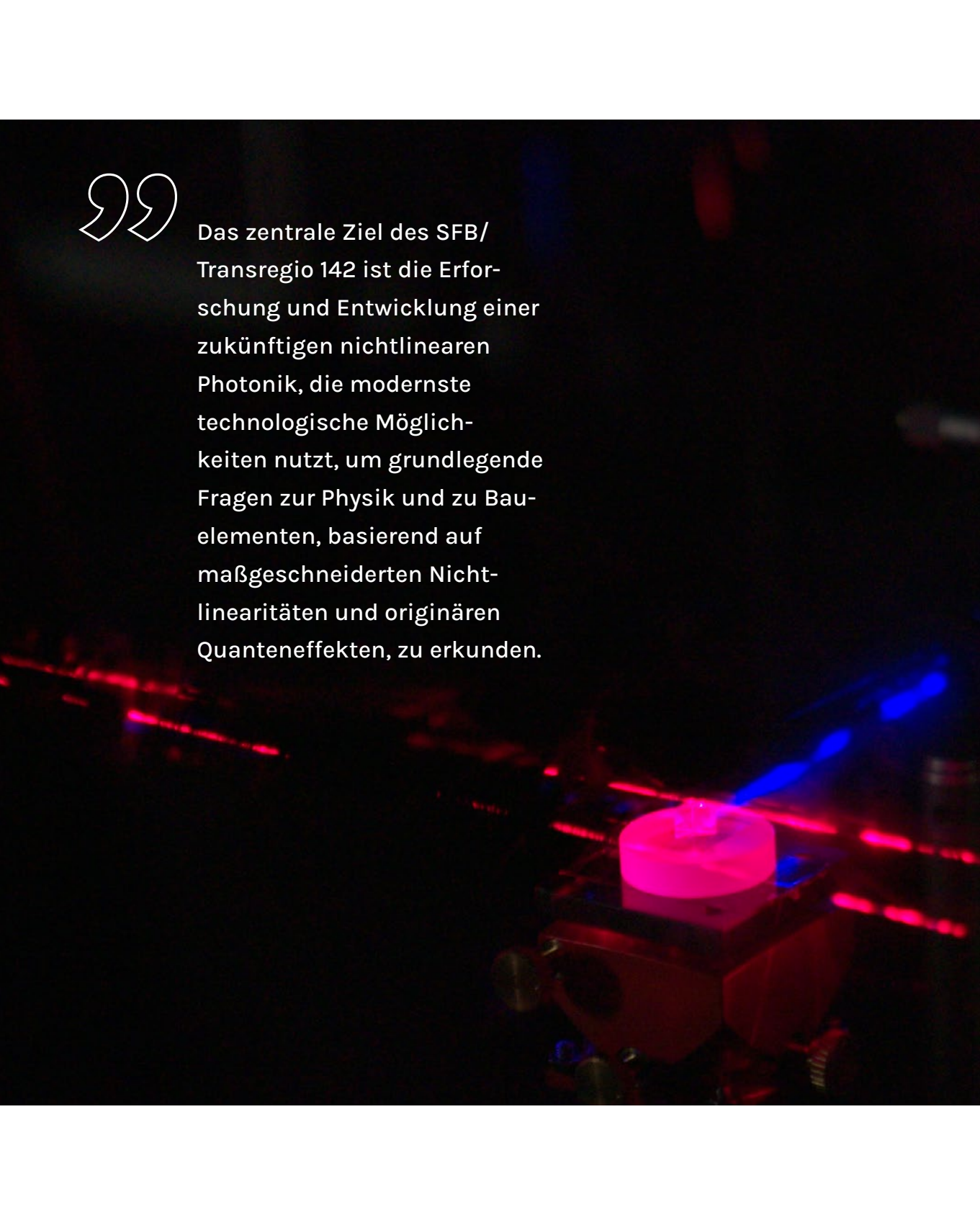
Maßgeschneiderte nichtlineare Photonik – von
grundlegenden Konzepten zu funktionalen Strukturen

Tailored nonlinear photonics – from fundamental
concepts to functional structures

2014 – 2025



Das zentrale Ziel des SFB/
Transregio 142 ist die Erfor-
schung und Entwicklung einer
zukünftigen nichtlinearen
Photonik, die modernste
technologische Möglich-
keiten nutzt, um grundlegende
Fragen zur Physik und zu Bau-
elementen, basierend auf
maßgeschneiderten Nicht-
linearitäten und originären
Quanteneffekten, zu erkunden.





The central goal of the CRC/Transregio 142 is the research and development of future nonlinear photonics that utilizes state-of-the-art technological capabilities to explore fundamental questions about physics and devices based on tailored nonlinearities and original quantum effects.



Prof. Dr. Thomas Zentgraf

Sprecher des SFB TRR 142
(2024-2025)

Spokesperson of CRC TRR 142
(2024-2025)

VORWORT INTRODUCTION

Moderne Technologien stehen auf dem Fundament exzellenter Grundlagenforschung, die ein tieferes Verständnis ermöglicht. Ohne sie wären deutliche Fortschritte undenkbar. Mit großer Freude blicken wir auf fast 12 Jahre zurück, in denen der SFB/Transregio 142 bedeutende Meilensteine in der Forschung zu optischen Technologien gesetzt hat.

Die enge Kooperation zweier herausragender Partner aus der Festkörperphysik und der optischen Spektroskopie hat einen starken Forschungsverbund geschaffen, der sich der Erforschung und Entwicklung der nichtlinearen Photonik der Zukunft verschrieben hat. Mit modernsten theoretischen Ansätzen und innovativen experimentellen Methoden konnten wir grundlegende physikalische Fragestellungen sowie neue Bauelementdesigns untersuchen – basierend auf maßgeschneiderten Nichtlinearitäten sowie fundamentalen Quanteneffekten.

Diese Broschüre gewährt Ihnen einen Einblick in die Erfolgsgeschichte des Transregio 142 – eine Geschichte außergewöhnlicher Forschung. Gleichzeitig möchten wir Ihnen die Menschen vorstellen, deren wissenschaftliche Neugierde und Leidenschaft hinter diesen Errungenschaften stehen. Tauchen Sie ein in die faszinierende Welt der nichtlinearen Photonik!

Modern technologies are based on excellent fundamental research, which enables deeper understanding and would be inconceivable without it. We look back with great pleasure on almost 12 years in which SFB/Transregio 142 has set significant milestones in research into optical technologies.

The close cooperation between two outstanding partners from the fields of solid-state physics and optical spectroscopy has created a strong research network dedicated to the exploration and development of nonlinear photonics of the future. Using state-of-the-art theoretical approaches and innovative experimental methods, we have been able to investigate fundamental physical questions and new device designs based on tailor-made nonlinearities and fundamental quantum effects.

This brochure provides you with an insight into the success story of Transregio 142 – a story of extraordinary research. At the same time, we would like to introduce you to the people whose scientific curiosity and passion are behind these achievements. Immerse yourself in the fascinating world of nonlinear photonics!



Prof. Dr.
Matthias Bauer

Präsident der Universität Paderborn
[President of Paderborn University](#)



Prof. Dr.
Manfred Bayer

Rektor der TU Dortmund
und Co-Sprecher des SFB TRR 142
(2014-2025)

[Rector of TU Dortmund University](#)
[and Co-Spokesperson of CRC TRR 142](#)
(2014-2025)

Liebe Kolleginnen und Kollegen
des TRR 142,

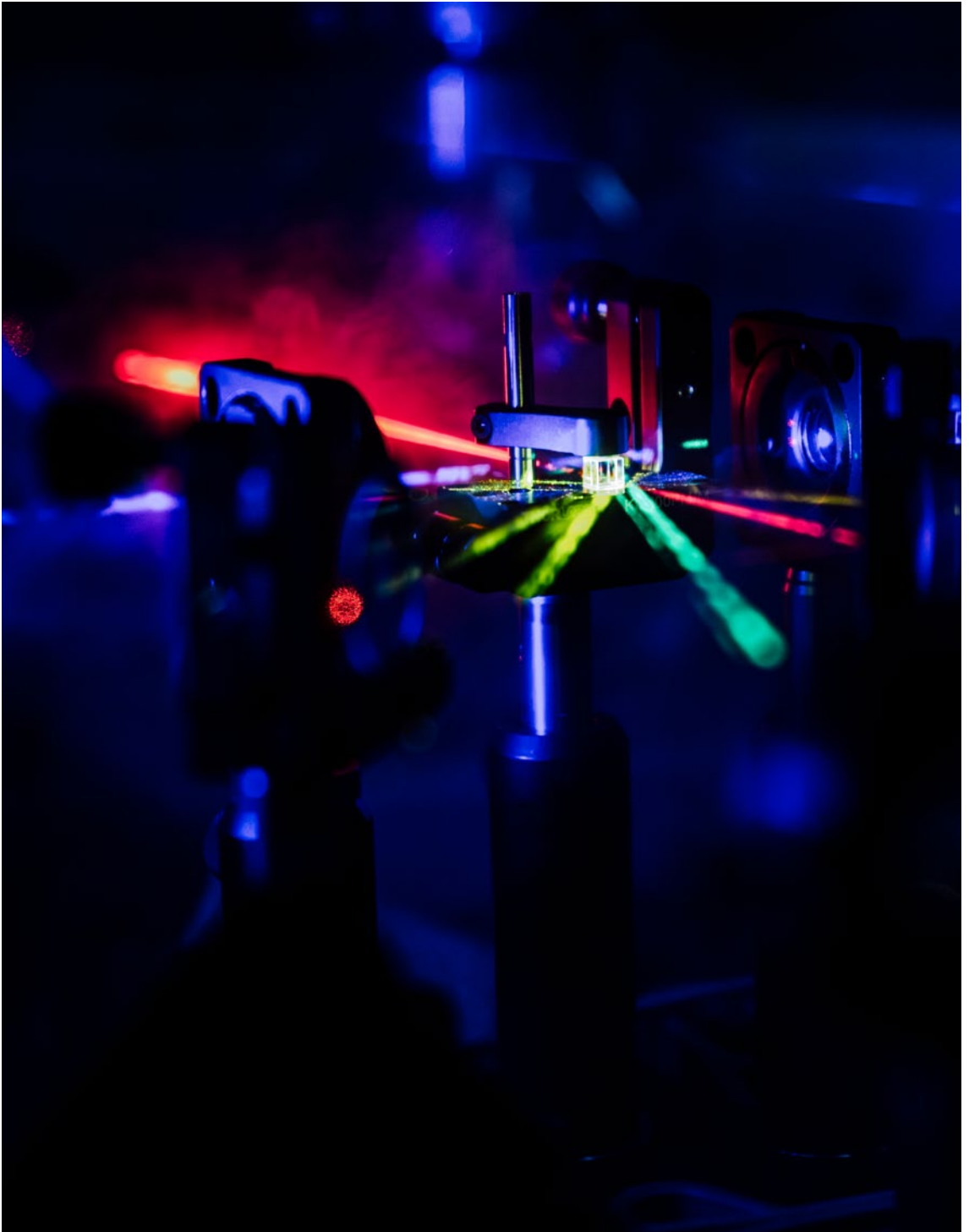
nach 12 Jahren endet die Förderung des TRR 142 „Maßgeschneiderte nichtlineare Photonik“ durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Herzlichen Glückwunsch zu allem, was in diesen Jahren erreicht wurde. Es wurden herausragende wissenschaftliche Resultate erzielt, aber auch neue wissenschaftliche Beziehungen geknüpft und Freundschaften geschlossen, die über die Jahre hinweg zwischen den beiden Standorten Paderborn und Dortmund gepflegt werden und sicher ein Leben lang halten.

Ein TRR ist das Resultat jahrelanger Aufbauarbeit und Durchhaltevermögen. Deshalb gilt ein besonderer Dank den Sprechern und der Sprecherin in den drei Förderperioden: Artur Zrenner, Christine Silberhorn und Thomas Zentgraf, neben einem der Unterzeichner dieses Grußworts. Der Erfolg des TRR 142 war ganz wesentlich in der großen Komplementarität

Dear colleagues of TRR 142,

After 12 years, the funding of TRR 142 'Tailored Nonlinear Photonics' by the German Research Foundation has come to an end. Congratulations on everything that has been achieved in these years. Outstanding scientific results have been achieved, but new scientific relationships have also been forged, and friendships have been made and nurtured over the years between the two locations of Paderborn and Dortmund. Certainly, they will last a lifetime.

A TRR is the result of years of development work and perseverance. For this reason, special thanks go to the spokespersons during the three funding periods: Artur Zrenner, Christine Silberhorn and Thomas Zentgraf, alongside one of the signatories of this greeting. The success of TRR 142 was largely due to the great complementarity of the two locations: Paderborn with



beider Standorte begründet: Paderborn mit besonderer Expertise in Quantenoptik, Halbleitertechnologie und -theorie, Dortmund auch mit Expertise in Quantenoptik und seinem Fokus auf spektroskopischen Methoden. Das hat die Erarbeitung eines international führenden Arbeitsprogramms sehr erleichtert und mündete in sehr erfolgreichen Begehungen sowohl bei der Einrichtung als auch bei den Wiederbegehungen.

Die wissenschaftlichen Resultate und Perspektiven ließen offenbar keine anderen als exzellente Bewertungen zu. Der TRR hat auch zu strategischen Entwicklungen beigetragen: In Paderborn ist hier beispielsweise der Forschungsbau PhoQS Lab zu nennen, in Dortmund fanden weitere Berufungen mit spektroskopischem Fokus statt. Auch wenn der TRR nun zum Ende kommt, so sind mit ihm exzellente Perspektiven für die Zukunft und zur weiteren Zusammenarbeit der Standorte gelegt. Ausdruck davon ist, dass bereits ein gemeinsamer Antrag für einen Folge-SFB gestellt ist. Dafür wünschen wir alles Gute!

Herzliche Grüße,
Matthias Bauer & Manfred Bayer

particular expertise in quantum optics, semiconductor technology and theory, Dortmund also with expertise in quantum optics and its focus on spectroscopic methods. This has greatly facilitated the development of a leading international work programme and has resulted in very successful inspections both during the establishment and re-inspections.

The scientific results and prospects obviously did not allow for anything other than excellent evaluations. The TRR has also contributed to strategic developments: in Paderborn, for example, the PhoQS Lab research building should be mentioned here, while further appointments with a spectroscopic focus were made in Dortmund. Even though the TRR is now coming to an end, it has created excellent prospects for the future and for further cooperation between the locations. This is reflected in the fact that a joint application has already been submitted for a follow-up SFB. All the best for this!

Best regards,
Matthias Bauer & Manfred Bayer



Die Revolution des Lichts The Revolution of Light



Der TRR 142: Photonik neu gedacht

Der DFG Transregio TRR 142 („Maßgeschneiderte nichtlineare Photonik: Von grundlegenden Konzepten zu funktionellen Strukturen“) widmete sich der Erforschung und Entwicklung neuer Konzepte und Anwendung im Bereich der nichtlinearen Photonik. Mit diesem ambitionierten Ansatz geht die Forschung im TRR 142 weit über die etablierten Funktionalitäten der linearen Optik und Photonik hinaus. Dort werden Phänomene wie die Brechung, Reflexion oder Interferenz von Licht genutzt um beispielsweise Objektive für die Bildgebung, Systeme für die optische Kommunikation oder optische Sensoren zu realisieren. All diese Anwendungen verhalten sich streng linear als Funktion der Lichtintensität. Auch die Frequenz oder die spektrale Verteilung des eingestrahnten Lichts bleibt unverändert.

Nichtlineare Photonik: Unser Weg zu neuen Technologien

Die nichtlineare Optik und Photonik ist hingegen in der Lage, diese fundamentalen Begrenzungen zu überwinden. So ist etwa die Implementierung bedingter optischer Schaltfunktionen oder einer Frequenzkonversion

TRR 142: Rethinking photonics

The DFG collaborative research centre TRR 142 (‘Tailored Nonlinear Photonics: From Fundamental Concepts to Functional Structures’) was dedicated to the research and development of new concepts and applications in the field of nonlinear photonics. With this ambitious approach, research in TRR 142 goes far beyond the established functionalities of linear optics and photonics. There, phenomena such as refraction, reflection or interference of light are used to realize, for example, lenses for imaging, systems for optical communication or optical sensors. All these applications behave strictly linearly as a function of light intensity. The frequency or spectral distribution of the incident light also remains unchanged.

Nonlinear photonics: Our route towards new technologies

Nonlinear optics and photonics, on the other hand, are able to overcome these fundamental limitations. For example, the implementation of conditional optical switching functions or frequency conversion in the opti-

im optischen Bereich nur durch die Nutzung nichtlinearer Prozesse möglich. Die Forschungsprogrammatik des TRR 142 definierte dazu innovative Konzepte, um neuartige nichtlineare Funktionalitäten aus den Bereichen der modernen Materialphysik und Quantenphotonik für Anwendungen im Bereich künftiger Informations- und Kommunikationstechnologien nutzbar zu machen. Ziel war es, grundlegende physikalische Fragestellungen zu nichtlinearen optischen und quantenmechanischen Effekten zu beantworten und diese Erkenntnisse in technisch relevante Anwendungen zu überführen. Im Fokus standen dabei maßgeschneiderte Festkörpersysteme, welche die Bereiche Halbleiterphysik, Nanooptik und Quantenphotonik miteinander verbinden. Die wissenschaftliche Relevanz dieses Ansatzes wird anhand der folgenden Beispiele klar.

Im Bereich der Halbleiterphysik standen Halbleiter-Quantenpunkte im Fokus, deren quantenmechanischer Zustand durch resonante Laseranregung im nichtlinearen Regime kontrolliert wird. Dadurch werden steuerbare Einzelphoton-Quellen möglich, die für die intrinsisch sichere Quantenkommunikation benötigt werden. In Halbleiter-Mikroresonatoren wurden sogenannte Exziton-Polariton Kondensate, also Mischzustände aus Licht und Materie, realisiert, deren stark nichtlineares Verhalten neuartige opto-optische Schaltprozesse ermöglicht.

cal range is only possible through the use of nonlinear processes. Accordingly, the TRR 142 research programmatics defined innovative concepts to make use of novel nonlinear functionalities from the fields of modern materials physics and quantum photonics for applications in the field of future information and communication technologies. The objective was to answer fundamental physical questions about nonlinear optical and quantum mechanical effects and to transfer these findings into technically relevant applications. The focus was on tailored solid-state systems that virtually connect the fields of semiconductor physics, nano-optics and quantum photonics. The scientific significance of this approach becomes clear with the following examples.

In the field of semiconductor physics, the focus was on semiconductor quantum dots whose quantum mechanical state is controlled by resonant laser excitation in the nonlinear regime. This enables controllable single-photon sources, which are required for intrinsically secure quantum communication. In semiconductor microresonators, so-called exciton-polariton condensates, i.e. mixed states of light and matter, were realized, whose strongly nonlinear behavior enables novel opto-optical switching processes.

Im Bereich der Nanooptik wurden neuartige Metamaterialien mit maßgeschneiderten nichtlinearen Eigenschaften hergestellt und untersucht. Durch die gezielte Anordnung von Nanostrukturen auf Oberflächen konnten künstliche Materialien realisiert werden, deren lineares und nichtlineares optisches Verhalten einstellbar ist und in ihrer Funktionalität weit über die Möglichkeiten klassischer Materialien hinausgeht. Dies ermöglicht kompakte optische Bauelemente für die Frequenzkonversion oder die Kontrolle der Lichtausbreitung.

Die Forschung im Bereich der Quantenphotonik war auf die Quantenkommunikation, Quantensensorik und Quanteninformationsverarbeitung ausgerichtet. Eine wichtige Grundlage für die Umsetzung der Vorhaben waren technologische Pionierarbeiten im Bereich der integrierten Optik, wie etwa die Entwicklung effizienter periodisch gepolter Wellenleiter für die Frequenzkonversion auf der Basis von LiNbO₃. Durch zielgerichtete Nutzung dieser technologischen Entwicklungen konnten integriert-optische Frequenzkonverter, Quanten-Lichtquellen und nichtlineare Interferometer realisiert werden, die unverzichtbare Schlüsselbauelemente für die optischen Quantentechnologien sind.

In the field of nano-optics, novel metamaterials with tailored nonlinear properties were produced and investigated. Through the targeted arrangement of nanostructures on surfaces, artificial materials have been realized with adjustable linear and nonlinear optical behavior and functionalities which exceed the capabilities of classical materials by far. This enables compact optical components for frequency conversion or the control of light propagation.

The research in the field of quantum photonics was focused on quantum communication, quantum sensing and quantum information processing. An important basis for the implementation of these projects was pioneering technological work in the field of integrated optics, such as the development of efficient periodically polarized waveguides for frequency conversion based on LiNbO₃. By the targeted use of these technological developments, integrated optical frequency converters, quantum light sources and nonlinear interferometers were realized, which are indispensable key components for optical quantum technologies.

Erfolg durch koordinierte Forschung

Die enge Zusammenarbeit zwischen der Universität Paderborn und der TU Dortmund mit der Bündelung ihrer Kompetenzen in den Bereichen photonische Materialien, Festkörpertechnologie, Quantenoptik, Theorie, nichtlineare Spektroskopie und Instrumentierung hat zu hervorragenden Ergebnissen auf dem ambitionierten Gebiet der nichtlinearen Photonik geführt. Die gemeinsam erzielten Resultate sind Meilensteine auf dem Weg zu künftigen oder bereits in der Evaluierungsphase befindlichen Informationstechnologien, wie etwa der Quantenkommunikation oder der optischen Quanteninformationsverarbeitung. Der TRR 142 hat damit Grundlagen zur Erlangung technologischer Souveränität geschaffen, um neue Märkte für optische Zukunftstechnologien zu erschließen.

Success by coordinated research

The close cooperation between Paderborn University and TU Dortmund University, combining their expertise in the fields of photonic materials, solid-state technology, quantum optics, theory, nonlinear spectroscopy and instrumentation, has resulted in outstanding results in the ambitious field of nonlinear photonics. The jointly achieved results are milestones on the route towards future information technologies or those already in the evaluation phase, such as quantum communication or optical quantum information processing. The TRR 142 has thus established the foundations for the achievement of technological sovereignty to open up new markets for future optical technologies.



Prof. Dr.
Artur Zrenner

Sprecher des SFB TRR 142
(2014-2020)

Spokesperson of CRC TRR 142
(2014-2020)

Kurz und knapp

In a Nutshell



147

Photonics Lectures
Photonics Lectures



297

Publikationen
Publications



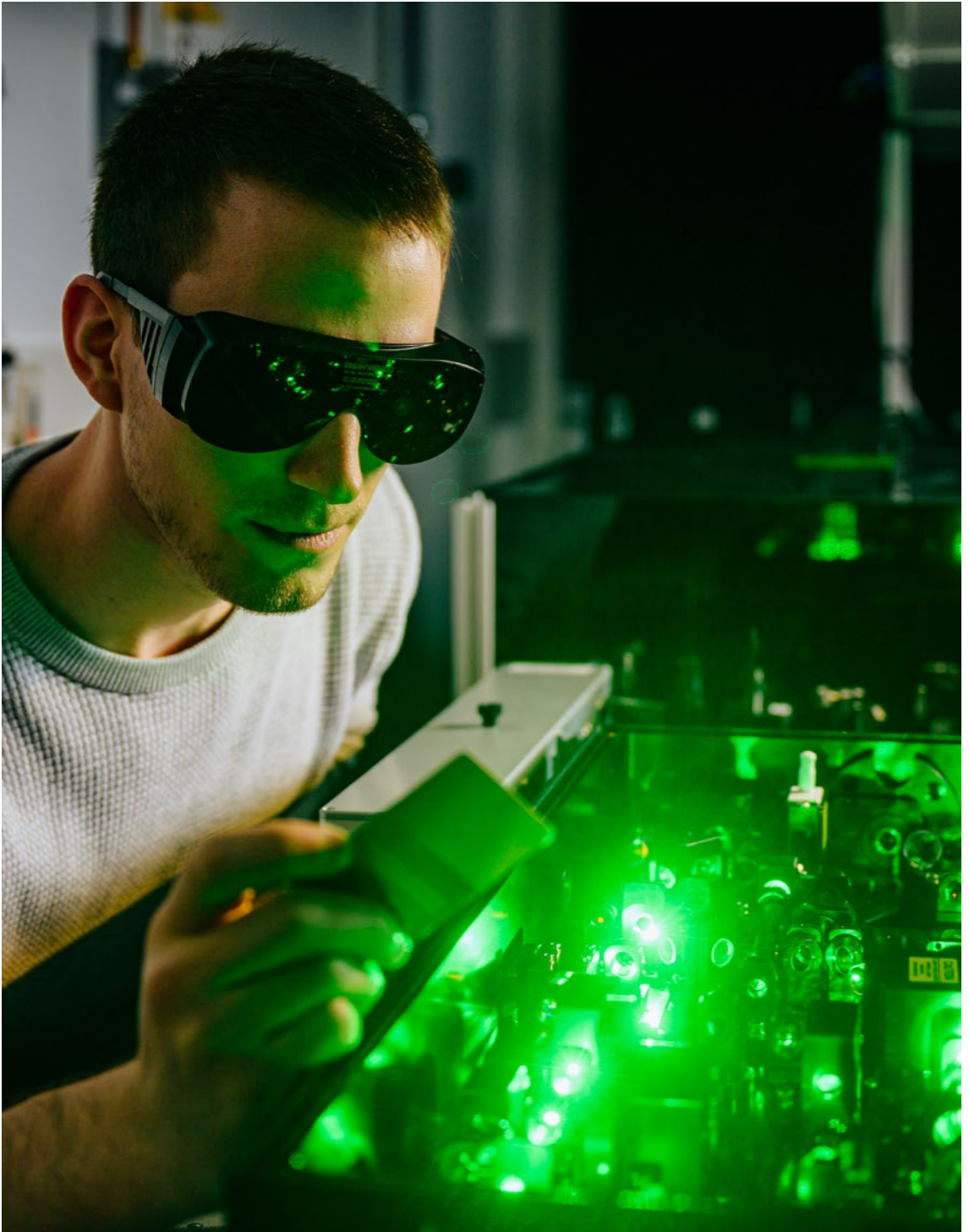
> 210

Forschende im TRR 142 (2014-2025)
Researchers within the TRR 142 (2014-2025)



~ 35

Millionen € Fördersumme
million in funding





Dr. Ronja
Köthemann

ALUMNI ALUMNI



„Während meiner Zeit im TRR 142 habe ich den Teamgeist und die Vielfalt der Forschungsthemen sehr genossen – von meiner eigenen Arbeit an photonischen Mikrodisk bis hin zur Unterstützung einer Masterstudentin auf ihrem Weg zur Promotion. Ich fand es großartig, dass es für jede Herausforderung eine Lösung gab, und die Workshops halfen mir, mich weit über das Labor hinaus weiterzuentwickeln. Rückblickend hat diese Erfahrung wahrscheinlich den Grundstein für meine heutige Leidenschaft für Networking und den Austausch mit Menschen gelegt.“

Ronja wurde 2023 von Prof. Dr. Cedrik Meier promoviert, war danach in der Arbeitsgruppe für Integrierte Quantenoptik (IQO) als Post Doc beschäftigt und arbeitet seit Ende 2024 als Solution Manager für Business Intelligence bei der Sparkassen Finanz Informatik in Münster.

„During my time in the TRR 142, I truly enjoyed the collaborative spirit and the diversity of research topics – from my own work on photonic microdisks to supporting a master’s student on her way to a PhD. I appreciated how every challenge had a solution, and the workshops helped me grow far beyond the lab. Looking back, this experience likely laid the foundation for my current passion for networking and connecting with people.“

Ronja received her doctorate from Prof. Dr. Cedrik Meier in 2023, then worked as a postdoctoral researcher in the Integrated Quantum Optics Group (IQO) and has been working as a Solution Manager for Business Intelligence at Sparkassen Finanz Informatik in Münster since the end of 2024.

Projektbereich A

Grundlagen/ Licht-Materie-Wechselwirkung

Project Area A

Fundamentals/ Light-Matter Interaction

Im Projektbereich A des Transregio 142 haben wir innovative Wege beschritten, um die faszinierenden Möglichkeiten der nichtlinearen Licht-Materie-Wechselwirkung zu erforschen. Unser Ziel war es, neue Maßstäbe zu setzen und die Grenzen des Machbaren zu erweitern – und das ist uns in beeindruckendem Maße gelungen.

Ein zentraler Aspekt unserer Forschung sind nichtlineare Effekte, die uns wertvolle Einblicke in die Eigenschaften von Materialien bieten. Eine exzellente Methode dazu ist das Vierwellenmischen, bei dem die nichtlineare Antwort eines Systems auf vier einzelne Lichtfelder untersucht wird. In Projekt A02 haben wir diese Technik perfektioniert und mit insgesamt acht Lichtfeldern die kohärente Dynamik geladener Exzitonen in Quantenpunkten mit beispielloser Präzision erfasst.

Um unsere Lichtfelder ebenso detailliert zu verstehen wie unsere Materialien, haben wir ihren Quantenzustand genau bestimmt. Das ist allerdings ein zeitraubender Vorgang. In Projekt A04 haben wir im

In Project Area A of Transregio 142, we have broken new ground in exploring the fascinating possibilities of nonlinear light-matter interaction. Our goal was to set new standards and push the boundaries of what is possible – and we have succeeded in doing so to an impressive degree.

A central aspect of our research is nonlinear effects, which offer us valuable insights into the properties of materials. An excellent method for this is four-wave mixing, in which the nonlinear response of a system to four individual light fields is investigated. In Project A02, we perfected this technique and used a total of eight light fields to capture the coherent dynamics of charged excitons in quantum dots with unprecedented precision.

To understand our light fields in as much detail as our materials, we precisely determined their quantum state. However, this is a time-consuming process. In Project A04, we worked for

Zusammenspiel von Theorie und Experiment 12 Jahre lang daran gearbeitet, die dazu nötigen Korrelationsmessungen und ihre Analyse zu beschleunigen. Während anfänglich eine Messung noch mindestens 30 Minuten in Anspruch nahm, konnten wir diesen Zeitraum durch konsequente Optimierung auf unter eine Millisekunde reduzieren.

Gleich in mehreren Projekten haben wir ein-drucksvoll demonstriert, dass wir das Potenzial unserer Materialien bis an die Grenzen ausreizen können – selbst bei Materialien, die nur eine einzige Atomlage dick sind und dennoch bemerkenswerte nichtlineare Effekte aufweisen.

Passend dazu haben wir im Projekt A06 bewiesen, dass es möglich ist, selbst kleinste Bewegungen auf atomarer Skala durch maßgeschneiderte Strukturen und nichtlineare Licht-Materie-Wechselwirkungen präzise zu messen. Wir haben so selbst minimale Verschiebungen von nur 100 Attometern detektieren können – das entspricht rund einem Achtel des Radius eines Protons.

Durch diese exzellenten Ergebnisse zeigen wir nicht nur das Potenzial unserer Forschung auf, sondern auch die hervorragende Koordination und Zusammenarbeit innerhalb des Transregios. Wir sind überzeugt davon, dass unsere Erkenntnisse wegweisend für zukünftige Entwicklungen in diesem spannenden Forschungsfeld sein werden.

12 years, combining theory and experiment, to accelerate the necessary correlation measurements and their analysis. While initially a measurement took at least 30 minutes, we were able to reduce this time to less than a millisecond through consistent optimisation.

In several projects, we have impressively demonstrated that we can exploit the potential of our materials to the fullest – even in materials that are only one atomic layer thick and yet exhibit remarkable nonlinear effects. In line with this, we have proven in Project A06 that it is possible to precisely measure even the smallest movements on an atomic scale using tailor-made structures and nonlinear light-matter interactions. We have been able to detect even minimal displacements of only 100 attometres – equivalent to around one-eighth of the radius of a proton.

These excellent results not only demonstrate the potential of our research, but also outstanding coordination and cooperation within the Trans-regio. We are convinced that our findings will be groundbreaking for future developments in this exciting field of research.

Prof. Dr.
Marc Aßmann

TU Dortmund
TU Dortmund University



Material und Technologie

Project Area B

Materials and Technology

Im Forschungsbereich „B: Materialien und Technologie“ haben wir uns mit der Technologie und dem Materialdesign für verbesserte nichtlineare Wechselwirkungen befasst, z. B. mit der Steuerung von Materialeigenschaften für nichtlineare und Quanteneffekte und der entsprechenden theoretischen Beschreibung.

Im neuen Projekt B06 war es das Ziel, einzelne InAs-Quantenpunkte (QDs) in einem hochwertigen Mikroresonator zu realisieren, der eine ultraschnelle elektrische Stark-Abstimmung des Quantenpunkts ermöglicht. Hochwertige GaAs/AlAs-Heterostrukturen mit eingebetteten Quantenpunkten, die bei etwa 930 nm emittieren, wurden mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellt. Das Layout der Schichtstruktur, insbesondere die optimale Position der dotierten Schichten, wurde durch Simulationen bestimmt. Im Rahmen des Projekts wurde eine Overlay-Elektronenstrahlolithografie mit einer Genauigkeit von 20 nm etabliert.

Die erfolgreiche Modellierung der optischen Anregungsdynamik mit Femtosekunden-Genauigkeit stellt einen der wichtigsten theoretischen Durchbrüche im Projektbereich B dar. Insbesondere in B07 konnten wir die Bildung gebundener Polaronen in Lithiumniobat erfolgreich modellieren. Bei Raum-

In the research area “B: Materials and Technology”, we investigated technology and material design for improved nonlinear interactions, e. g., the control of material properties for nonlinear and quantum effects and the corresponding theoretical description.

In the new project B06, the goal was to realize single InAs quantum dots (QDs) in a high-quality microcavity, which allows for ultrafast electrical Stark tuning of the quantum dot. High-quality GaAs/AlAs-heterostructures with embedded quantum dots emitting around 930 nm have been fabricated by molecular beam epitaxy. The layout of the layer structure, especially the optimal position of the doped layers, was determined by simulations. Overlay electron beam lithography with an accuracy of 20 nm was established within the project.

The successful modelling of optical excitation dynamics with femtosecond accuracy represents one of the major theoretical breakthroughs achieved in project area B. In particular, in B07 we were able to successfully model the formation of bound polarons in lithium niobate. At room temperature, these bound polarons form on average within approximately

temperatur bilden sich diese gebundenen Polaronen im Durchschnitt innerhalb von etwa 60 fs. Die Berechnungen zeigen auch einen ausgeprägten Einfluss von Polaronen und Bipolaronen auf die Suszeptibilität dritter Ordnung von Lithiumniobat. Darüber hinaus haben wir den Exzitonentransfer in Tetracen-sensibilisierten Siliziumsolarzellen modelliert. In einer gemeinsamen experimentellen und theoretischen Studie wurden die komplexen und nicht trivialen Effekte von Mg-Dotierstoffen auf die ferroelektrische Domäneninversion untersucht.

Der Schwerpunkt des Projekts B08 lag auf Subzyklus-Nichtlinearitäten von hochbandbegrenzten THz-Hohlraum-Polaritonen im Bereich der tiefen starken Kopplung. Ein Highlight ist das Erreichen von Niedertemperatur-Ladungsträgerbeweglichkeiten von über $6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ in einem Stapel von 16 n-Typ-modulationsdotierten schmalen GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -Quantentöpfen mit einer akkumulierten Elektronendichte von über $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Die Nutzung der quasi-gebundenen Zustände im Kontinuum für eine effiziente Erzeugung der zweiten Harmonischen und die räumliche Phasenanpassung in GaAs-Metasoberflächen war Teil des Projekts B09. GaAs(111)-Membranen wurden durch epitaktisches Lift-off auf Substrate mit niedrigem Index übertragen und nanostrukturiert. Das genaue Design der Nanostrukturen basierte auf Simulationen.

60 fs. The calculations also reveal a pronounced influence of polarons and bipolarons on the third-order susceptibility of lithium niobate. In addition, we modelled exciton transfer in tetracene-sensitized silicon solar cells. In a joint collaborative experimental and theoretical study, the complex and nontrivial effects of Mg dopants on ferroelectric domain inversion were investigated.

The focus of project B08 was subcycle nonlinearities of highly narrowband THz cavity polaritons in the deep-strong coupling regime. A highlight is the achievement of low-temperature carrier mobilities exceeding $6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ in a stack of 16 n-type modulation-doped narrow GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum wells with an accumulated electron density exceeding $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Exploiting the quasi-bound states in the continuum for efficient second-harmonic generation and spatial phase tailoring in GaAs metasurfaces was part of project B09. GaAs(111) membranes have been transferred by epitaxial lift-off to low-index substrates and nanopatterned. The exact design of the nanopatterns was based on simulations.

Prof. Dr.
Dirk Reuter

Universität Paderborn
Paderborn University



Quantenanwendungen

Project Area C

Quantum Applications

Der Forschungsbereich „C: Quantenanwendungen“ konzentrierte sich auf die Nutzung von Nichtlinearitäten für photonische Quantentechnologien und die Erkundung neuer Konzepte für Quantenanwendungen. Die Forschungsarbeiten reichten von der theoretischen Analyse und Quantifizierung innovativer Quantensysteme über die experimentelle Demonstration neuer Bauelemente bis hin zur Entwicklung neuer Technologien und der Konstruktion ausgefeilter integriert-photonischer Schaltungen (PICs) einschließlich Modulatoren, Quantenemitter und supraleitender Detektoren.

Ein vorrangiges Ziel war die Etablierung einer Dünnschicht-Lithiumniobat-Technologie (TFLN), die für Quanten-PICs geeignet ist. Dies bedeutete, dass die Technologie in der Lage sein musste, Strukturen und verlustarme Bauelemente von hoher Qualität herzustellen. Die Arbeit hat sich als große Herausforderung erwiesen, sowohl was die Suche nach geeigneten Parametereinstellungen für eine hochgradig optimierte Herstellungsroutine als auch die Erlangung eines tiefen Verständnisses der zugrunde liegenden physikalischen und technischen Prinzipien angeht. Dennoch ist es uns gelungen, eine hochwertige TFLN-Technologie zu etablieren und das erste Zwei-Photonen-Interferenz-Experiment sowie eine zweifarbige Zweiphotonenfluoreszenz-Quelle (PDC) zu demons-

The research area „C: Quantum Applications“ has been focused on the exploitation of non-linearities for photonic quantum technologies and the exploration of new concepts for quantum applications. The research spanned from the theoretical analysis and quantification of the innovative quantum systems, over the experimental demonstration of new devices to the development of new technologies and the engineering of elaborated integrated photonic circuits (PICs) including modulators, quantum emitters and superconducting detectors.

One primary goal was the establishment of a thin-film lithium niobate technology (TFLN), which is suitable for quantum PICs. This implied that the technology needs to be capable of producing structures and low-loss devices of high quality. The work has proven to pose significant challenges on both, finding appropriate parameter settings for a highly optimized fabrication routines and gaining a deep understanding of the underlying physics and engineering principles. Yet, we succeeded in establishing a high-quality TFLN technology and could demonstrate the first two-photon interference experiment and two-color para-

trieren. Unter Verwendung von TFLN-Modulatoren haben wir die Leistungsfähigkeit unserer kompakten Hochfrequenzschaltungen für eine effiziente und hochgradig kontrollierbare Erzeugung von gepulstem Licht aus CW-Lasern untersucht.

Ein zweiter Forschungsschwerpunkt war die Entwicklung fortschrittlicher Quantenlichtquellen und hybrider Systeme auf der Basis von Quantenpunkten, die die Vorteile verschiedener Plattformen kombinieren und verschiedene Aufgaben auf einem einzigen Chip erfüllen können. Es wurden integrierte supraleitende Detektoren, die mit Resonator-verstärkter PDC kombiniert werden können, sowie ein Transferdruck-Werkzeugkasten für das Stapeln von Bauelementen entwickelt. Für die Implementierung der idealen Erzeugung von Photonenpaaren bei Telekommunikationsfrequenzen wurde das lokale Tropfenätzen an Quantenpunkte angepasst, die im optischen C-Band emittieren.

Die theoretische Forschung untersuchte die Auswirkungen der Klick-Detektion für Messungen der Photonenstatistik und analysierte in diesem Zusammenhang auch das Boson-Sampling als vielversprechenden Ansatz für einen photonischen Quantenrechner. Darüber hinaus wurde die Verschränkung in relativistischen Systemen als Schlüsselressource für Quantentechnologien erforscht.

metric downconversion (PDC) source. Using TFLN modulators we studied the performance of our compact, high frequency circuits for an efficient and highly controllable generation of pulsed light from CW lasers.

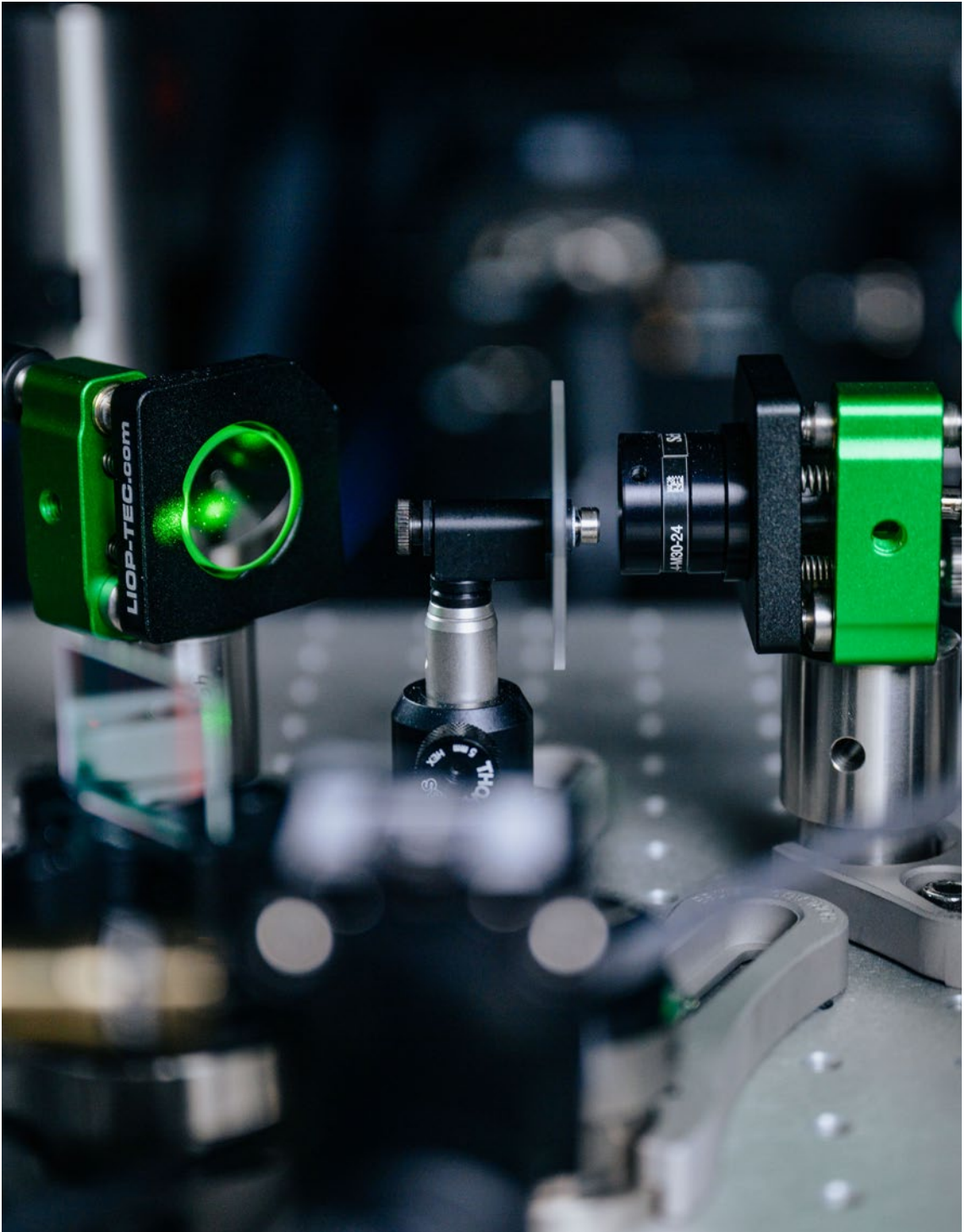
A second focus of this research was devoted towards the development of advanced quantum-dot based quantum light sources and hybrid systems, which combine the advantages of different platforms and can perform different tasks on one single chip. A transfer printing toolbox for device stacking as well as integrated superconducting detectors, which can be combined with cavity enhanced PDC, have been developed. For the implementation of ideal photon pair generation at telecom frequencies, local droplet etching has been adapted to quantum dots, which emit in the optical C-band.

The theoretical work studied the impact of click detection for measuring photon statistics and also analysed in this context boson sampling as a promising candidate for photonic quantum computation. Moreover, entanglement in relativistic systems was researched as a key resource for quantum technologies.

Prof. Dr.
Christine Silberhorn

Universität Paderborn
Paderborn University







Prof. Dr.
Marc Sartison

ALUMNI ALUMNI



„Was mich an meiner Forschung im Rahmen des TRR 142 am meisten begeistert hat, war die Zusammenarbeit zwischen allen Arbeitsgruppen, wo unglaublich viel Fachwissen aus sehr unterschiedlichen Bereichen zusammengetragen wurde.“

Marc kam 2020 als PostDoc an die Universität Paderborn und war als Gruppenleiter im Team von Prof. Dr. Klaus Jöns verantwortlich für Prozess-/Fertigungsentwicklung und alle Reinraumaktivitäten. Seit Mai 2025 ist er Professor für Wirtschaftsingenieurwesen an der Duale Hochschule Baden-Württemberg in Stuttgart.

“What excited me most about my research within the TRR 142, was the collaboration between all the working groups, bringing together expertise from very different fields.”

Marc joined Paderborn University as a postdoctoral researcher in 2020 and was responsible for process/production development and all cleanroom activities as group leader in Prof. Dr. Klaus Jöns' team. Since May 2025, he has been Professor of Industrial Engineering at the Duale Hochschule Baden-Württemberg (Baden-Württemberg Cooperative State University) in Stuttgart.

Early Career Support im TRR 142 Early Career Support in TRR 142

Die Begleitung und passgenaue Weiterbildung während der Doktorarbeit wird neben der eigentlichen Forschungstätigkeit von vielen Wissenschaftler:innen als wichtiges Element gesehen. Sie bereitet nicht nur auf eine wissenschaftliche Karriere vor, sondern ist auch für Tätigkeiten in der Industrie wertvoll.

In zahlreichen Workshops und Seminaren wurden über die Jahre Vernetzung zwischen den Arbeitsgruppen und „transregionale“ Kooperationen initiiert, gelebt und vertieft.

Many scientists consider support and tailored further training during their doctoral studies to be an important element alongside their actual research activities. Not only does it prepare them for a scientific career, but it is also valuable for activities in industry.

Numerous workshops and seminars have been held over the years to initiate, foster and deepen networking between working groups and ‘trans-regional’ collaborations.





Im Rahmen des Early Career Supports stand die gezielte Unterstützung von jungen Forscherinnen und das Bewusstsein für Chancengleichheit zwischen den Geschlechtern, auch und gerade in der Wissenschaft, im Fokus.

Mit der Workshopreihe „PHOTONICS FUTURE. Profound | Equal | Inclusive“ wurde im TRR 142 ein Format entwickelt, in dem sich junge Forschende – Frauen und Männer – mit aktuellen Entwicklungen in der Photonik sowie mit Themen wie Diversität und Chancengleichheit auseinandersetzen können. Das Besondere: es wurden ausschließlich weibliche Forschende als Sprecherinnen eingeladen – als wichtige Rollenmodelle für die Förderung von Frauen in Wissenschaft und Technik.

Early Career Support focused on providing targeted support to young female researchers and raising awareness of gender equality, especially in science.

With the workshop series ‘PHOTONICS FUTURE. Profound | Equal | Inclusive’ series of workshops, TRR 142 developed a format in which young researchers – both women and men – could engage with current developments in photonics as well as topics such as diversity and equal opportunities. What made this series special was that only female researchers were invited as speakers – as important role models for the empowerment of women in science and technology.





Dr. Laura
Padberg

ALUMNI ALUMNI



„Als langjähriges Mitglied durfte ich die Entwicklung im TRR 142 aus nächster Nähe begleiten. Er hat mich durch meine Promotionszeit, als Postdoc und meine Zeit als Gruppenleiterin begleitet und war dabei stets eine herausragende Gelegenheit für die Bündelung von Fachwissen aus sehr unterschiedlichen Bereichen. Die im TRR 142 geknüpften Verbindungen und der gute Austausch bei den Treffen waren ein essenzieller Bestandteil meiner wissenschaftlichen Laufbahn und haben sie nachhaltig bereichert.“

Laura promovierte 2022 bei Prof. Silberhorn an der Universität Paderborn. Seit Februar 2023 hat sie der Gruppe von Prof. Silberhorn 2023 die Gruppenleitung für die Untergruppe „Quantenphotonik-Technologie“ übernommen.

“Being a long-standing member, I witnessed the evolution of TRR 142 firsthand. It was a constant companion throughout my PhD, Postdoc phase, and as a group leader, always providing an exceptional platform for bringing together expertise from highly diverse fields. The network I built within TRR 142 and the valuable discussions at our meetings were crucial to my scientific journey and truly enriched it.”

Laura obtained her PhD in 2022, supervised by Prof. Silberhorn at Paderborn University. In February 2023, she took over as group leader for the ‘Quantum Photonics Technology’ subgroup within Prof. Silberhorn’s group.

TRR 142 Closing Symposium

“Tailored Nonlinear Photonics”

30 September 2025

10:00	Welcome reception
10:30	Greetings
11:00	Presentation of the CRC TRR 142 Thomas Zentgraf
11:30	Keynote: Interaction of dielectric metasurfaces with short laser pulses Isabelle Staude
12:30	Panel Discussion with TRR 142-Alumni
13:00	Lunch break
14:00	TRR 142 - presentation Area A Marc Aßmann
14:30	Ultrafast exciton dynamics in 2D materials Ermin Malic
15:30	Coffee break
16:00	Poster Session
17:00	Dynamics of non-classical light generation and detection Kai Müller
18:00	Computer exhibition open for TRR 142
19:30	Dinner Live music with „Tom Baldauf & Band“

1 October 2025

08:30	Morning coffee
09:00	TRR 142 - presentation Area B Dirk Reuter
09:30	Spin and light in sensing – from physics and material science to the life sciences Elke Neu-Ruffing
10:30	Coffee break
11:00	Exceptional non-Hermitian topology Flore Kunst
12:00	Topology in space, time, and space-time Alexander Szameit
13:00	Lunch break
14:00	TRR 142 - presentation Area C Tim Bartley
14:30	Invited Talk Mete Atatüre
15:30	Concluding remarks
15:45	End of the symposium
16:00	Guided laboratory tours on UPB Campus



Prof. Dr.
Isabelle Staude

Friedrich Schiller University
Jena

Interaction of dielectric metasurfaces with short laser pulses

The interaction of optically resonant dielectric metasurfaces with short laser pulses can be harnessed for enhancing and tailoring a range of nonlinear and ultrafast all-optical effects. Additionally, metasurfaces offer important opportunities for temporally shaping short laser pulses themselves. This talk will start with a brief introduction to nonlinear, dispersive, and ultrafast optical properties of dielectric metasurfaces, followed by an overview of our recent research activities concentrating on metasurfaces operated in conjunction with short laser pulses. In particular, we will discuss nonlinear frequency generation in metasurfaces incorporating materials with non-vanishing second-order nonlinear-optical response, including lithium niobate, III-V

semiconductors and monolayers of transition metal dichalcogenides. Next, we will show how the specific properties of the nonlinear-optical response of the latter class of materials can be harnessed to realize ultrafast all-optical second-harmonic wavefront shaping in conjunction with polarization-dependent metasurfaces. Moving from the domain of spatial shaping to temporal shaping, femtosecond pulse shaping with semiconductor Huygens' metasurfaces will be discussed. Finally, we speculate on the potential of semiconductor metasurfaces to solve an important open challenge in photonics, namely, the deterministic generation of complex light fields, which vary both in space and at an ultrafast time scale in an arbitrary, user-defined fashion.



Prof. Dr.
Ermin Malic

Philipps-Universität Marburg

Ultrafast exciton dynamics in 2D materials

Monolayer transition metal dichalcogenides (TMDs) and related van der Waals heterostructures present a new class of atomically thin semiconductors. They exhibit an extraordinarily rich exciton physics including bright and a variety of dark states, spatially separated interlayer and hybrid exciton states as well as moiré-trapped excitons in twisted TMD heterostructures. Based on a density matrix formalism, we perform microscopic modeling of many-particle physics determining optics, dynamics and transport phenomena in these technologically promising materials. In combination with first-principle calculations, our approach is material-specific and has a predictive character. In joint theory-experiment studies, we shed light, in particular, on the importance of dark exciton states, e.g.

for explaining the complex optical fingerprint in low-temperature photoluminescence spectra, the ultrafast phonon-driven charge transfer dynamics in TMD heterostructures as well as the surprising exciton anti-funneling in presence of inhomogeneous strain profiles. Furthermore, we focus on the emergence of moiré-trapped excitons in twisted TMD heterostructures and study their twist-angle and density-dependent optical signatures as well as their phonon-driven relaxation cascade exhibiting pronounced bottleneck effects due to the flat nature of excitonic subbands. The gained microscopic insights into the spatiotemporal exciton dynamics are crucial for understanding and controlling technologically important many-particle phenomena in atomically thin semiconductors.



Prof. Dr.
Kai Müller

Dynamics of non-classical light generation and detection

Photonic quantum technologies rely on the ability to generate, process, and detect quantum states of light with high efficiency and fidelity. Therefore, realizing building blocks for these tasks does not only require highly pure materials and state of the art nanofabrication but moreover to develop a deep understanding of the underlying physical processes. This talk will present insights into the dynamics of generating quantum states of light from optically active few-level quantum

systems, represented by semiconductor quantum dots. Moreover, progress in pushing the limits of superconducting nanowire single photon detectors via local He-ion irradiation will be discussed.



Prof. Dr. Elke
Neu-Ruffing

Rheinland-Pfalz
Technical University
Kaiserslautern-Landau

Spin and light in sensing – from physics and material science to the life sciences

At the first glance, magnetic properties especially the spin of a quantum system seem not connected to its light emission (fluorescence). However, spin-dependent photophysics often connect fluorescence and spin states making it possible to even read out the spin of single electrons in a fluorescence microscope. This renders such optically readable spin systems highly versatile sensors for magnetic fields, electric fields or even temperature. The talk will introduce the

field illustrated by recent applications and shows its connection to modern microscopy and imaging as well as non-linear optics.



Prof. Dr.
Flore Kunst

Exceptional non-Hermitian topology

While topological phases of matter have predominantly been studied for isolated Hermitian systems, a recent shift has been made towards considering these phases in the context of non-Hermitian Hamiltonians. Non-Hermitian topological phenomena reveal an enrichment of the phenomenology of topological phases, and forms a rapidly growing new cross-disciplinary field. In this talk, we will see that non-Hermitian Hamiltonians, which come about due to, e.g., gain and loss, feature many exotic properties,

which are radically different from their Hermitian counterparts. In particular, I will focus on our recent work on higher-order exceptional points, which are truly non-Hermitian degeneracies, and symmetries, and present explicit toy models to illustrate our findings.



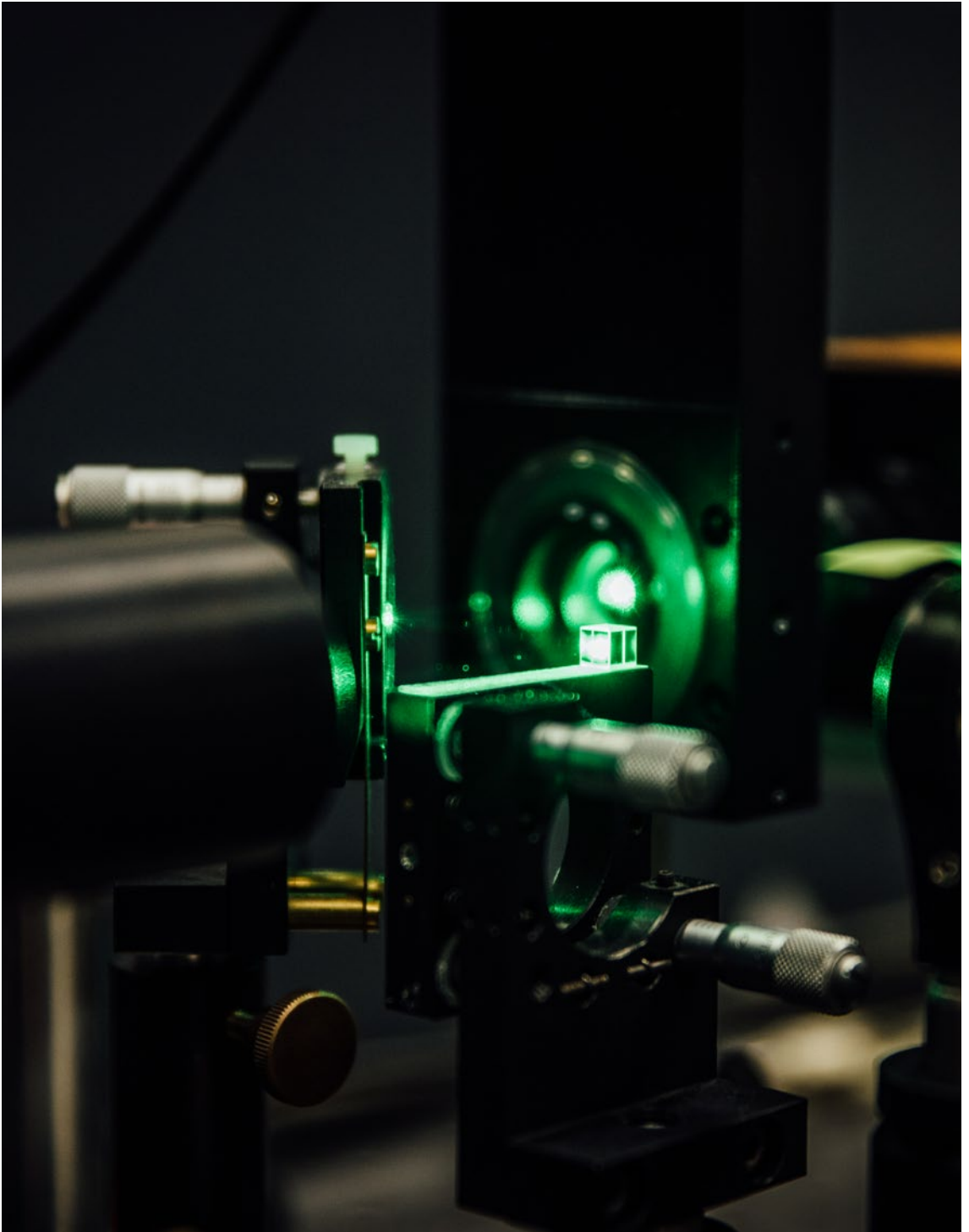
Prof. Dr.
Alexander
Szameit

Rostock University

Topology in space, time, and space-time

In recent years, topological phenomena in photonic systems have attracted much attention, with their striking features arising from robust states in the energy gaps of spatially periodic media. However, light waves are entities that extend in space as well as time, such that one may ask whether topological effects can also occur in the temporal domain, or even space-time. Intuitively, systems that are periodic in time may be gapped in momentum, leading to topological states localized at time interfaces. However,

time - in contrast to space - exhibits a unique unidirectionality often referred to as the “arrow of time”. Inspired by these features, I will present our most recent experiments on topological states residing at temporal interfaces. Moreover, I will discuss the formation of spacetime-topological events and demonstrate unique features such as their limited collapse under disorder and causality-suppressed coupling.





Dr. Michat
Kobecki

ALUMNI ALUMNI



„Die aktuelle Herausforderung in der Wissenschafts- und Technologiebranche liegt in der Komplexität der Probleme, die wir lösen wollen. Diese Herausforderungen erfordern erhebliche finanzielle Mittel, eine multidisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Teams und einen enormen Arbeitsaufwand seitens der Wissenschaftler, Ingenieure und Verwaltungsmitarbeiter. Der TRR 142 hat mich mit seinem breiten Spektrum an wissenschaftlichen Aktivitäten beeindruckt, das über viele Jahre hinweg aufrechterhalten wurde. Es ist der Beweis dafür, dass hervorragende Ergebnisse möglich sind, wenn die Anstrengungen gut organisiert sind. Ich könnte mir kein besseres Umfeld vorstellen, um meine berufliche Karriere voranzutreiben.“

Michat promovierte bei Prof. Bayer an der TU Dortmund und arbeitet derzeit als MSCA-Postdoktorand an einer unabhängigen Forschungsarbeit über die resonante Anregung kohärenter Phononen in Halbleiter-Nanostrukturen unter Verwendung eines abstimmbaren offenen optischen Resonators.

“The current challenge in the science and technology industry lies in the complexity of the problems we aim to solve. These challenges require substantial funding, multidisciplinary collaboration among involved teams, and an enormous amount of work from scientists, engineers, and administrative staff. TRR 142 has impressed me with its broad scope of scientific activity sustained so over many years. It stands as proof that achieving excellent results is possible when efforts are well-organized. I couldn’t imagine a better environment for accelerating my professional career.”

Michat gained his PhD from Prof. Bayer at TU Dortmund University, and is currently working as a MSCA Postdoctoral Fellow conducting independent research on the resonant excitation of coherent phonons in semiconductor nanostructures, utilizing a tunable open optical cavity.

Der TRR 142 im Film

TRR 142 as a short movie



2025

Abenteuer Forschung.
Die Zukunft im Blick. Für
das Morgen - schon heute.

Katharina Lorena Stremmel, Dr. Andreas Farenbruch und Prof. Dr. Tim Bartley forschen im Rahmen des TRR 142. In diesem Video geben sie Einblicke in ihr persönliches Abenteuer Forschung.



The Adventure of Research.

Katharina Lorena Stremmel, Dr. Andreas Farenbruch and Prof. Dr. Tim Bartley are scientists within the TRR 142. In this video, they provide insights into their personal 'adventure of research'. They are anticipating the future. Tomorrow begins today.



2021

Licht mit Licht kontrollieren.

Der TRR142 stellt seine Forschungsarbeit vor. Wie lässt sich Licht mit Licht gestalten? In diesem Film beantwortet der Forschungsbereich „Maßgeschneiderte nichtlineare Photonik“ diese und noch mehr Fragen, um die Eigenschaften von Licht besser zu verstehen. Die beteiligten Forscher geben Einblicke in ihre Arbeit.

Controlling light with light.

The TRR142 presents its research work. How can light be shaped with light? In this film, the research area 'Tailor-made Nonlinear Photonics' answers these and other questions in order to better understand the properties of light. The researchers involved provide insights into their work.





Dr. Daniel
Frese

ALUMNI ALUMNI



„Während meiner Zeit im TRR 142 habe ich als Doktorand die Themenvielfalt in den Projekten sehr genossen. Die Projektarbeit in interdisziplinären Teams, sowie die Fortbildungsangebote des TRR 142, waren für meine persönliche Entwicklung sehr bereichernd. Die Offenheit und Hilfsbereitschaft der Kolleginnen und Kollegen bleiben mir sehr positiv in Erinnerung.“

Daniel wurde 2022 von Prof. Dr. Thomas Zentgraf promoviert und arbeitet seitdem als Prozessentwickler für optische Strukturierungstechnologie bei Zeiss Semiconductor Manufacturing Technology.

“During my time in TRR 142, I greatly enjoyed the variety in research topics covered in the projects. Working in interdisciplinary teams was very enriching for my personal development, as were the training opportunities in the form of workshops and seminars. The collaboration was characterised by openness and helpfulness.”

Daniel received his PhD from Dr. Thomas Zentgraf in 2022. He has been working as a scientist for optical structuring technologies at Zeiss Semiconductor Manufacturing Technology since February 2022.

IMPRESSUM **IMPRINT**

Herausgeber **Published by**

Sonderforschungsbereich Transregio 142 der Universität Paderborn und der TU Dortmund
Collaborative Research Center Transregio 142 of Paderborn University and TU Dortmund University

Der SFB TRR 142 wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft
(Projektnummer 231447078/TRR 142/3-2022).

The CRC TRR 142 is funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft
(Project number 231447078/TRR 142/3-2022).

V.i.S.d.P. Responsible under German press law

Prof. Dr. Matthias Bauer, Präsident Universität Paderborn [President Paderborn University](#)

Inhaltliche Verantwortung **Responsible for content**

Prof. Dr. Thomas Zentgraf, Sprecher TRR 142 [Spokesperson TRR 142](#)

Redaktion **Edited by**

Dirk Waldhoff, Koordinator TRR 142 [Coordinator TRR 142](#)

Übersetzung **Translated by**

DeepL, Dirk Waldhoff

Gestaltung **Layout**

Almut Gröning, G3 Werbung

Fotos und Grafiken **Photographs and graphics by**

Seiten [pages](#) 1/40, 4, 6, 8, 10/11, 16, 17, 21, 22, 23, 27, 28: Besim Masziqi, Universität Paderborn |
8, 34: Konrad Stöhr | 2/3, 36, 37: Dirk Baxmann, Zielspur | 31 (Prof. Dr. Staude): Anne Günther, Universität
Jena | 27 (Grafik): Dr. Adriana Bocchini | 38: klang[bild] Photographie & Film, Guido Müllerke, Bielefeld |
Alle weiteren Fotos: privat [all other images: private](#)

Auflage **Print run**

200

September 2025 [September 2025](#)

Gefördert von **Funded by**

Freundlich verbunden mit **In close partnership with**

