

## Selected Publications Prof. Dr. Ulrike Woggon (Stand 2019)

### A. Colloidal Nanophotonics

„Colloidal Nanophotonics“ umfasst Forschungsthemen aus der Nanophotonik mit chemisch synthetisierten Nanoteilchen. Diese, meist halbleiterbasierten, Nanoteilchen entwickeln aufgrund von Quanteneffekten neue Eigenschaften, die in der Natur so nicht vorkommen. Am bekanntesten sind kolloidale Quantenpunkte, d.h. sphärische Nanoteilchen mit Radien in der Größenordnung des exzitonischen Bohrradius, die bereits seit den 90iger Jahren grundlagenphysikalisch intensiv erforscht werden (u.a. (A12) Habilitationsschrift U. Woggon). Da die optischen und elektronischen Eigenschaften von Quantenpunkten, Quantendrähten oder Quantenplättchen durch Größenvariation und Formänderung extern kontrolliert werden können, haben derartige Nanoteilchen große Bedeutung erlangt und neue Anwendungsfelder eröffnet z.B. in der Optoelektronik (Displaytechnologien, Modulatoren, Lichtquellen), in der Photovoltaik (Solarzellen) oder in der Biophotonik (Fluoreszenzmarker, Zweiphotonenmikroskopie). Zum grundlagenphysikalischen Verständnis wurden neue Methoden der Tieftemperatur-Einzelteilchen-Spektroskopie und der Ultrakurzzeitspektroskopie entwickelt und angewandt. Das Forschungsgebiet bewegt sich heute stark an der Schnittstelle zwischen Physik, Chemie und greift auf Kenntnisse weiterer Disziplinen zurück.

#### **A1. Impact of Shell Growth on Recombination Dynamics and Exciton-Phonon Interaction in CdSe-CdS Core-Shell Nanoplatelets**

A.W. Achtstein, O. Marquardt, R. Scott, M. Ibrahim, T. Riedl, A.V. Prudnikau, A. Antanovich, N. Owschimikow, J.K.N. Lindner, M.V. Artemyev, [U. Woggon](#)  
ACS Nano **12**, 9476 (2018)

#### **A2. Directed emission of CdSe nanoplatelets originating from strongly anisotropic 2D electronic structure**

R. Scott, J. Heckmann, A.V. Prudnikau, A. Antanovich, A. Mikhailov, N. Owschimikow, M.V. Artemyev, J.I. Climente, [U. Woggon](#), N.B. Grosse, A.W. Achtstein  
Nature Nanotechnology **12**, 1155 (2017)

#### **A3. Directed Two-Photon Absorption in CdSe Nanoplatelets Revealed by k-Space Spectroscopy**

J. Heckmann, R. Scott, A.V. Prudnikau, A. Antanovich, N. Owschimikow, M.V. Artemyev, J.I. Climente, [U. Woggon](#), N.B. Grosse, A.W. Achtstein  
Nano Letters **17**, 6321-6329 (2017)

#### **A4. Time-Resolved Stark Spectroscopy in CdSe Nanoplatelets: Exciton Binding Energy, Polarizability, and Field-Dependent Radiative Rates**

R. Scott, A.W. Achtstein, A.V. Prudnikau, A. Antanovich, L.D.A. Siebbeles, M.V. Artemyev, [U. Woggon](#)  
Nano Letters **16**, 6576 (2016)

#### **A5. Two Photon Absorption in II-VI Semiconductors: The Influence of Dimensionality and Size**

R. Scott, A. Achtstein, A. Prudnikau, A. Antanovich, S. Christodoulou, I. Moreels, M. Artemyev, [U. Woggon](#)  
Nano Letters **15**, 4985 (2015)

#### **A6. Electronic Structure and Exciton-Phonon Interaction in Two-Dimensional Colloidal CdSe Nanosheets**

A.W. Achtstein, A. Schliwa Andrei, A. Prudnikau, M. Hardzei, M.V. Artemyev, C. Thomsen, [U. Woggon](#)  
Nano Letters **12**, 3151 (2012)

#### **A7. A Self-Assembled Donor Comprising Quantum Dots and Fluorescent Proteins for Long-Range Fluorescence Resonance Energy Transfer**

Huachang Lua, O. Schöps, [U. Woggon](#), C.M. Niemeyer  
J. Am. Chem. Soc. (JACS) **130**, 4815 (2008)

**A8. Single semiconductor nanocrystals: physics and applications**

U. Woggon

J. Appl. Physics **101**, 081727 (2007) (invited review)

**A9. Exciton fine structure in single CdSe nanorods**

N. LeThomas, E. Herz, O. Schöps, U. Woggon, M.V. Artemyev

Phys. Rev. Lett. **94**, 016803 (2005)

**A10. Dot-in-a-Dot: electronic and photonic confinement in all three dimensions**

U. Woggon, R. Wannemacher, M.V. Artemyev, B. Möller, N. LeThomas, V. Anikeyev, O. Schöps

Appl. Phys. **B 77**, 469 (2003), (invited review)

**A11. Phonon interaction of single excitons and biexcitons**

F. Gindele, K. Hild, W. Langbein, U. Woggon

Phys. Rev. B **60**, (Rapid Comm) R2157 (1999)

**A12. Optical properties of semiconductor quantum dots**

U. Woggon, Monographie, Springer Tracts in Modern Physics 137 (248 pages) (1997)

**A13. Exchange Interaction and Phonon Confinement in CdSe Quantum Dots**

U. Woggon, F. Gindele, O. Wind, C. Klingshirn

Phys. Rev. B **54**, 1506 (1996)

**A14. Ultrafast Energy Relaxation in Quantum Dots**

U. Woggon, H. Giessen, F. Gindele, O. Wind, B. Fluegel, N. Peyghambarian

Phys. Rev. B **54**, 17681 (1996)

**B. Ultrafast and Coherent Spectroscopy**

„Ultrafast and Coherent Spectroscopy“ umfasst Forschungsthemen, die sich mit der Erzeugung und Anwendung ultrakurzer Laserpulse zur Spektroskopie von neuartigen Materialien und Systemen beschäftigen. Im Zentrum stehen dabei meist methodische Entwicklungen auf der Basis nichtlinear-optischer Effekte. Zur Untersuchung der ultraschnellen Dynamik von Ladungsträgerverteilungen und Besetzungen von Energieniveaus werden Anregungs- und Abfrageexperimente mit mehreren, zeitverzögerten Laserpulsen, meist auch mit unterschiedlichen Wellenlängen eingesetzt. In diesen können Absorptionsänderungen bereits im Femtosekundenbereich zeitlich aufgelöst werden. Zum besseren Verständnis der Zeitskalen, auf denen Streuprozesse zum Verlust von Kohärenz führen, werden Vierwellenmischexperimente benutzt. Diese sind sensitiv auf Phasenänderungen, z.B. über die Messung der Dynamik des Brechungsindex, und erlauben dadurch die Untersuchung bis hin zu Polarisierungen resonant angeregter optischer Übergänge. Mit derartigen Methoden konnte bereits sehr früh die Erzeugung optischen Gewinns in Quantenpunkten (*B14*, *B15*) gezeigt werden. Der Nachweis langer Kohärenzlebensdauern in Indiumarsenid (InAs)-Quantenpunkten eröffnete z.B. neue Perspektiven für deren Anwendung in der Quanteninformationsverarbeitung (*B10*). Weitere neue Materialsysteme, bei der die Messung der ultraschnellen Dynamik Aufschluss zur Natur der elektronischen Zustände erlaubt, sind ultradünne Schichten von Übergangsmetaldichalkogeniden und kolloidale Nanoteilchen (*B1*, *B2*, *B12*).

**B1. Biexciton fine structure in monolayer transition metal dichalcogenides**

A. Steinhoff, M. Florian, A. Singh, K. Tran, M. Kolarczik, S. Helmrich, A.W. Achtstein, U. Woggon, N.

Owschimikow, F. Jahnke, Xiaoqin Li

Nature Physics **14**, 1199 (2018), DOI: 10.1038/s41567-018-0282-x

**B2. Exciton-phonon coupling in mono- and bilayer MoTe<sub>2</sub>**

S. Helmrich, R. Schneider, A.W. Achtstein, A. Arora, B. Herzog, S.M. de Vasconcellos, M. Kolarczik, O. Schöps, R. Bratschitsch, U. Woggon, N. Owschimikow  
2D Materials 5, 045007 (2018)

**B3. Long-Lived Valley Polarization of Intravalley Trions in Monolayer WSe<sub>2</sub>**

A. Singh, K. Tran, M. Kolarczik, J. Seifert, Y.P. Wang, K. Hao, D. Pleskot, N.M. Gabor, S. Helmrich, N. Owschimikow, U. Woggon, X (Elaine).Q. Li  
Phys. Rev. Lett. **117**, 257402 (2016)

**B4. Quantum coherence induces pulse shape modification in a semiconductor optical amplifier at RT**

M.Kolarczik, N.Owschimikow, J.Korn, B.Lingnau, Y.Kaptan, D. Bimberg, E. Scholl, K. Luedge, U. Woggon  
Nature Comm. **4**, 2953 (2013)

**B5. Time- and spectrally-resolved four-wave mixing in single CdTe quantum dots**

B. Patton, W. Langbein, U. Woggon, L. Maingault, H. Mariette  
Phys. Rev. **B 73**, 235354 (2006)

**B6. Exciton dephasing via phonon interactions in InAs QDs: Dependence on quantum confinement**

P. Borri, W. Langbein, U. Woggon, V. Stavarache, D. Reuter, A. D. Wieck  
Phys. Rev. **B 71**, 115328 (2005)

**B7. Nonmonotonous temperature dependence of the initial decoherence in quantum dots**

A. Vagov, V.M. Axt, T. Kuhn, W. Langbein, P. Borri, U. Woggon  
Phys. Rev. **B 70**, 201305 (Rapid Comm.) (2004)

**B8. Control of fine-structure splitting and biexciton binding in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum dots by annealing**

W. Langbein, P. Borri, U. Woggon, V. Stavarache, D. Reuter, A. D. Wieck  
Phys. Rev. **B 69**, 161301 (Rapid Comm.) (2004)

**B9. Exciton dephasing in quantum dot molecules**

P. Borri, W. Langbein, U. Woggon, M. Schwab, M. Bayer, S. Fafard, Z. Wasilewski, P. Hawrylak,  
Phys. Rev. Lett. **91**, 264701 (2003)

**B10. Exciton Relaxation and Dephasing in Quantum-Dot Amplifiers From Room to Cryogenic Temperature**

P. Borri, W. Langbein, S. Schneider, U. Woggon, R. L. Sellin, D. Ouyang, and D. Bimberg,  
IEEE J. Sel. Topics of Quantum El. **8**, 984 (2002)

**B11. Relaxation and dephasing of multiexcitons in semiconductor quantum dots**

P. Borri, W. Langbein, S. Schneider, U. Woggon  
R. L. Sellin, D. Ouyang, D. Bimberg,  
Phys. Rev. Lett. **89**, 187401 (2002)

**B12. Ultralong dephasing time in InGaAs quantum dots**

P. Borri, W. Langbein, S. Schneider, U. Woggon  
R. L. Sellin, D. Ouyang, D. Bimberg  
Phys. Rev. Lett. **87**, 157401 (2001)

**B13. Quantum kinetic exciton-LO phonon interaction in CdSe**

U. Woggon, F. Gindele, W. Langbein, J.M. Hvam,  
Phys. Rev. **B 61**, 1935 (2000)

**B14. Dynamics of Optical Excitations in Quantum Dots of Wide-Gap Materials**

U. Woggon, Adv. in Solid State Physics **35** (Festkörperprobleme), 175 (1996)

**B15. Femtosecond Optical Gain in Strongly Confined Quantum Dots**

H. Giessen, U. Woggon, B. Fluegel, G. Mohs, Y.Z. Hu, S.W. Koch, N. Peyghambarian  
Optics Letters **21**, 1043 (1996)

**B17. Femtosecond Dephasing in CdS Quantum Dots Determined by Nondegenerate Four Wave Mixing**

U. Woggon, M. Portune  
Phys. Rev. B **51** (Rapid Comm.), 4719 (1995)

**C. Nonlinear Plasmonics**

Die „Nichtlineare Plasmonik“ ist ein Forschungsfeld, welches besonders in den letzten 10-15 Jahren Bedeutung erlangt hat. Neue Impulse kamen vor allem durch die Möglichkeiten, verschiedene Nanomaterialien zu kombinieren und metallische Nanostrukturen für sub-Wellenlängenanwendungen in der Photonik mit aktiven kolloidalen Nanoteilchen zu funktionalisieren. Ein wichtiges Ergebnis war zum Beispiel der Nachweis der Lumineszenzverstärkung bei kolloidalen Quantenpunkten, wenn diese in die Nähe von Metallpartikeln gebracht werden (C9). Die Demonstration, dass Prinzipien aus der Wellenoptik, wie Interferenz und Propagation, auf Plasmonen, d.h. kollektive Anregungen von Elektronenwellen, übertragen werden können, gelang besonders eindrucksvoll an metallischen Nanoteilchen und –strukturen. Methodisch hat unsere Arbeitsgruppe mit der Etablierung der hochwinkelaufgelösten nichtlinearen k-Raumspektroskopie in der Plasmonik einen wichtigen Beitrag geleistet (C3,C5).

**C1. Symmetric Cladding Thin Film Waveguides: From Lossy Media to Disordered Nanostructures**

K. Pufahl, D. Boyaciyan, J. Heckmann, N.B. Grosse, R. von Klitzing, U. Woggon  
ACS Photonics **5**, 5110-5118 (2018).

**C2. Utilizing strongly absorbing materials for low-loss surface-wave nonlinear optics**

N.B. Grosse, P. Franz, J. Heckmann, K. Pufahl, U. Woggon  
Phys. Rev. A **97**, 043844 (2018)

**C3. Plasmon-enhanced nonlinear yield in the Otto and Kretschmann configurations**

J. Heckmann, K. Pufahl, P. Franz, N.B. Grosse, Xiaoqin Li, U. Woggon  
Phys. Rev. B **98**, 115415 (2018)

**C4. The dual annihilation of a surface plasmon and a photon by virtue of a three-wave mixing interaction**

J. Heckmann, M.E. Kleemann, N.B. Grosse, U. Woggon,  
Optics Express **21**, 28856 (2013)

**C5. Nonlinear Plasmon-Photon Interaction Resolved by k-Space Spectroscopy**

N.B. Grosse, J. Heckmann, U. Woggon,  
Phys. Rev. Lett. **108**, 136802 (2012)

**C6. Active magneto-plasmonics in hybrid metal-ferromagnet structures**

V.V. Temnov, G. Armelles, U. Woggon, D. Guzatov, A. Cebollada, A. Garcia-Martin, J.M. Garcia-Martin, T. Thomay, A. Leitenstorfer, R. Bratschitsch  
Nature Photonics **4**, 107 (2010)

**C7. Surface plasmon mediated interference phenomena in low-Q silver nanowire cavities**

M. Allione, V.V. Temnov, Y. Fedutik, U. Woggon, M. V. Artemyev  
Nano Letters **8**, 31 (2008)

**C8. Exciton-plasmon-photon conversion in plasmonic nanostructures**

Y. Fedutik, V.V. Temnov, O. Schöps, U. Woggon, M.V. Artemyev  
Phys. Rev. Lett. **99**, 136802 (2007)

**C9. Enhanced luminescence of CdSe quantum dots on gold colloids**

O. Kulakovich, N. Strekal, A. Yaroshevich, S. Maskevich, S. Gaponenko, I. Nabiev, U. Woggon,  
M. V. Artemyev  
Nano Letters **2**, 1449 (2002)

**D. Quantum Optical Principles in Semiconductor Nanostructures**

Da Quantendimensionseffekte bei Halbleitermaterialien zu energetisch diskreten Energieniveaus führen, kann man unter bestimmten Bedingungen Halbleiterquantenpunkte wie „künstliche“ Atome behandeln. Im Kontext der Forschung zu Möglichkeiten der Quanteninformationsverarbeitung begann man um 2000 zu untersuchen, inwieweit Prinzipien aus der Atomphysik und Quantenoptik auf Halbleiterquantenpunkte übertragbar sind (war auch Thema des GRK 726, das von mir initiiert wurde). Methodisch fanden hier wiederum Vierwellenmischen und Pump-Probe-Experimente Anwendung, insbesondere dann, wenn diese mit Heterodyntechnik kombiniert wurden und so die Bestimmung von Amplitude und Phase des Quantenzustandes erlaubten, wie dies in unserer AG seit 1999 der Fall ist. Rabioszillationen in InAs Quantenpunkten in der Zeitdomäne (*D7*, *B2*) und alternativ dazu Rabiaufspaltungen in CdSe Nanorods in einem Mikroresonator (*D3*) in der Frequenzdomäne sind einige Beispiele für den Nachweis quantenoptischer Prinzipien in Halbleiterquantensystemen.

**D1. Pump-probe quantum state tomography in a semiconductor optical amplifier**

N. B. Grosse, N. Owschimikow, R. Aust, B. Lingnau, A. Koltchanov, M. Kolarczik, K. Lüdge, U. Woggon  
Optics Express **22**, 32520 (2014)

**D2. Photon statistics in the cooperative spontaneous emission**

V.V. Temnov, U. Woggon  
Optics Express **17**, 5774 (2009)

**D3. Cavity QED with semiconductor nanocrystals**

N. LeThomas, U. Woggon, O. Schöps, M.V. Artemyev, M. Kazes, U. Banin  
Nano Lett. **6**, 557 (2006)

**D4. Coherent Control and Polarization Readout of Individual Excitonic States**

B. Patton, U. Woggon, W. Langbein  
Phys. Rev. Lett. **95**, 266401 (2005)

**D5. Superradiance and Subradiance in an Inhomogeneously Broadened Ensemble of Two-Level Systems Coupled to a Low-Q Cavity**

V. V. Temnov, U. Woggon  
Phys. Rev. Lett. **95**, 243602 (2005)

**D6. Self-Induced transparency in InGaAs quantum dot waveguides**

S. Schneider, P. Borri, W. Langbein, U. Woggon, J. Förstner, A. Knorr, R. L. Sellin, D. Ouyang, D. Bimberg,  
Appl. Phys. Lett. **83**, 3668 (2003)

### ***D7. Rabi Oscillations in the ground state transition of InGaAs Quantum Dots***

P. Borri, W. Langbein, S. Schneider, U. Woggon, R. L. Sellin, D. Ouyang, D. Bimberg, Phys. Rev. B **66**, 081306 (Rapid Comm.) (2002)

## **E. Semiconductor Quantum-Dot Based Devices**

Nahezu parallel mit dem Verständnis der besonderen Eigenschaften von Halbleiterquantenpunkten (u.a. durchstimmbare Wellenlängen, delta-Funktion in der Zustandsdichte, veränderte Mechanismen der Kopplung an Phononen, Feinstrukturaufspaltungen, höhere exzitonische und biexzitonische Bindungsenergien) begannen intensive Forschungen zu Anwendungen in Bauelementen und damit der Etablierung von Forschungsthemen zu „Semiconductor Quantum-Dot Based Devices“. Dieses Forschungsfeld ist stark durch Kooperationen mit der Industrieforschung geprägt, da Hochtechnologien zur Herstellung von derartigen Bauelementen, z.B. von wellenleiterbasierten Lasern und Verstärkern für Anwendungen in der glasfaserbasierten Telekommunikation benötigt werden. Neben spektroskopischer Charakterisierung sind Fragestellungen der Grundlagenforschung zu fundamentalen Grenzen in der Dynamik der Bauelemente nach wie vor im Zentrum des Forschungsinteresses (E9). Hohe Relevanz hat dabei die Suche nach minimalsten Schaltenergien pro bit zur Senkung des Energieverbrauchs in Informations- und Kommunikationstechnologien (E4, E5).

### ***E1. Broadband light-emitting devices based on heteroconfined excitons in InGa(Sb)As submonolayer quantum dots***

B. Herzog, B. Lingnau, M. Kolarczik, S. Helmrich, A.W. Achtstein, K. Thommes, F. Alhussein, D. Quandt, A. Strittmatter, U. W. Pohl, O. Brox, M. Weyers, U. Woggon, K. Lüdge and N. Owschimikow IEEE J. Select. Top. Quantum Electron. **25**, 1900310 (2019).

### ***E2. Sideband pump-probe technique resolves nonlinear modulation response of PbS/CdS quantum dots on a silicon nitride waveguide***

M. Kolarczik, C. Ulbrich, P. Geiregat, Y.P. Zhu, L.K. Sagar, A. Singh, B. Herzog, A.W. Achtstein, X.Q. Li, D. van Thourhout, Z. Hens, N. Owschimikow, U. Woggon APL Photonics **3**, 016101 (2018)

### ***E3. Dynamic phase response and amplitude-phase coupling of self-assembled semiconductor QDs***

B. Lingnau, B. Herzog, M. Kolarczik, U. Woggon, K. Luedge, N. Owschimikow Appl. Phys. Lett. **110**, 241102 (2017)

### ***E4. Fast gain and phase recovery of semiconductor optical amplifiers based on submonolayer quantum dots***

B. Herzog, N. Owschimikow, J.H. Schulze, R. Rosales, Y. Kaptan, M. Kolarczik, T. Switaiski, A. Strittmatter, D. Bimberg, U.W. Pohl, U. Woggon, Appl. Phys. Lett. **107**, 201102 (2015)

### ***E5. High-Speed Fabry-Perot Optical Modulator in Silicon with 3- $\mu$ m Diode***

S. Meister, H. Rhee, A. Al-Saadi, B.A. Franke, S. Kupijai, C. Theiss, H.J. Eichler, D. Stolarek, H.H. Richter, L. Zimmermann, B. Tillack, M. Lesny, C. Meuer, C. Schubert, U. Woggon J. Lightwave Techn. **33**, 878 (2015)

### ***E6. Gain dynamics of quantum dot devices for dual-state operation***

Y. Kaptan, H. Schmeckebier, B. Herzog, D. Arsenijević, M. Kolarczik, V. Mikhelashvili, N. Owschimikow, G. Eisenstein, D. Bimberg, U. Woggon, Appl. Phys. Lett. **104**, 261108 (2014)

***E7. Impact of carrier-carrier scattering and carrier heating on pulse train dynamics of quantum dot SOAs***

N. Majer, K. Lüdge, S. Dommers-Völkel, J. Gomis-Bresco, A. Knorr, U. Woggon, E. Schöll,  
Appl. Phys. Lett. **99**, 131102 (2011)

***E8. Colloidal Quantum Dots in All-Dielectric High-Q Pillar Microcavities***

M. Kahl, T. Thomay, V. Kohnle, K. Beha, J. Merlein, M. Hagner, A. Halm, J. Ziegler, T. Nann, Y. Fedutik, U. Woggon, M.V. Artemyev, F. Perez-Willard, A. Leitenstorfer, R. Bratschitsch  
Nano Lett. **7**, 2897 (2007)

***E9. Engineering of Coulomb scattering and its impact on ultrafast gain recovery in InGaAs quantum dots***

J. Gomis-Bresco, S. Dommers, V. V. Temnov, U. Woggon, M. Laemmlin, D. Bimberg, E. Malic, M. Richter, E. Schöll, A. Knorr  
Phys. Rev. Lett. **101**, 256803 (2008)

***E10. Bloch-Modes and Disorder Phenomena in Coupled Resonator Optical Waveguides***

B. Möller, U. Woggon, M.V. Artemyev  
Phys. Rev. B **75**, 245327 (2007)

***E11. Electron Microscopic and Optical Investigations of In Distribution in GaAs capped InGaAs Islands***

U. Woggon, W. Langbein, J.M. Hvam, A. Rosenauer, T. Remmele, and D. Gerthsen  
Appl. Phys. Lett. **71**, 377 (1997).