



Laser und Quantenoptik Attraktive Physik WS 2023/2024

Thomas Walther Institute of Applied Physics – TU Darmstadt









Laser und Quantenoptik



Lasing without Inversion (Zusammenarbeit mit Gruppe R. Walser)

Quantenschlüsselaustausch (SFB CROSSING, Sprecher: M. Fischlin) (Deutsche Telekom)



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT





Laser und Quantenoptik

Laserspektroskopie und -entwicklung



Triplettsolvatationsdynamik (mit Th. Blochowicz)

> Resonanzionisationsspektroskopie an schweren Elementen (mit M. Block, GSI)







Untere CF-200 Sektion



Amplitude



Angewandte Projekte

Brillouin-LIDAR











Die Klammer: Laserentwicklung





TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Auswahl von 2 Projekten



Lasersysteme zum Kühlen von relativistischen Ionenstrahlen (mit D. Winters, M. Bussmann, GSI)







Quantenschlüsselaustausch (SFB CROSSING, Sprecher: M. Fischlin) (Deutsche Telekom)













Advantages of ion beam cooling:

lowest possible
$$\frac{\Delta p}{p}$$
 $l_{bunch} \propto \frac{\Delta p}{p}$



Prinzip von Kühlung der Ionenstrahlen in Beschleunigeranlagen



as counteracting force

- Scalable to high intensities and high energies $\gamma \rightarrow SIS100$
- Requires addressable fast transitions (e.g. E1)
- Compact design





 Λ_{Ion} $\lambda_{a.coll}$





ESR (2021): $^{12}C^{3+} \rightarrow \beta \approx 0.47$ $\gamma \approx 1.13$

















ESR 2012 (cw laser)



T. Beck, "Lasersystem zur Kühlung relativistischer C³⁺-Ionenstrahlen in Speicherringen", Dissertation, 2015





timing, alignment and relative frequency position crucial

=> All three laser systems together combine the advantages of low final ion momentum spreads and a wide range of addressable ion velocities



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

width of laser force:

 $\sigma_{laser} \propto$ τ_{pulse}

lowest attainable momentum spread:

 Δp $\propto \sigma_{laser}$ p



Vergangene C³⁺ Strahlexperimente am ESR

ESR 2012 (cw laser)



T. Beck, "Lasersystem zur Kühlung relativistischer C³⁺⁻ Ionenstrahlen in Speicherringen", Dissertation, 2015



ESR 2021 (long pulse laser)





Prototyp: cw Laser System

- External cavity diode laser (ECDL) as seed laser @ 1028 nm
- Mode hop free scanning over **20 GHz (50 Hz** scan rate) @ 257 nm due to frequency offset stabilization
 - TDR goal: 100 GHz (200 Hz scan rate)
- Bow-tie cavity employing LBO crystal for conversion to 514 nm
- Conversion to 257 nm with novel elliptical bowtie cavity to reduce degradation effects in BBO









cw Laser - Ergebnisse







cw Laser - Ergebnisse



- IR achieved power up to
 30 W @ 1028 nm
- Green achieved power up to 14.9 W @ 514 nm

- UV achieved power up to >2 W @ 257 nm







Prototyp: Langpuls-Laser System

Tunable distributed feedback laser (DFB) as seed laser @ 1028 nm

Forming of transform limited pulses with 1-10 MHz repetition rate and 50-735 ps pulse duration

Multi-stage pulsed fiber amplifiers to generate up to 60 W average IR power

Two single pass stages to generate 514 nm and 257 nm







Pulslaser (TUDa) - Ergebnisse







10 MHz Repetition Rate

| Pulse duration | Average power (514 nm) | Average power (257 nm) |
|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 735 ps | 17.1 W | 0.7 W |
| 240 ps | 30.6 W | 2.5 W |
| 115 ps | 34.3 W | 4.1 W |
| 50 ps | 30.4 W | 2.1 W |

- Seed laser tunable in the range 1028 - 1031 nm via temperature scan (sine scan) or current scan (arbitrary scan functions)

- Synchronization between laser pulses and ion bunches was demonstrated (ESR 2021)

Heavy-Ion Synchrotron SIS100









Picture: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, D. Fehrenz

Quanteninformation: Quantenkryptografie

Quanteninformations-verarbeitung

Quantencomputer



suggested by Feynman in the 80s Threat to "classical" cryptography

Bestandteile: Superposition, Verschränkung, Interferenz und No Cloning

Quantenschlüsselverteilung









Quantum Key Distribution



Informationstheoretisch sicher Vernam One-Time-Pad Alice zufällig einmalige Verwendung Länge wie Botschaft

N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel and H. Zbinden, Rev. Mod. Phys 74 (2002) 145





asymmetrischer Schlüssel (RSA) symmetrischer Schlüssel



Problem: Verteilung des Schlüssels (QKD)



Sicherheitsbeweise existieren für die meisten Protokolle

Quantenkryptografie: Einmal-Schlüssel

(1) Austausch der Schlüssel





(2) Übertragung der Nachricht





Progress in Fast Forward

Protocols

BB84

Ekert91 (entanglement)

BBM92 (entanglement)

COW

Decoy

...



A. Ekert

Sources

CW Single Photons SPDC Weak coherent pulses



Missing: Quantum repeater





Medium

Air **Optical Fiber**

Detectors

PMT

APD

...

SC-nanowire





 \Rightarrow trusted nodes (for large distances)



BB84-Protokoll

QUANTUM CRYPTOGRAPHY: PUBLIC KEY DISTRIBUTION AND COIN TOSSING Charles H. Bennett (IBM Research, Yorktown Heights NY 10598 USA) Gilles Brassard (dept. IRO, Univ. de Montreal, H3C 3J7 Canada) When elementary quantum systems, such as polarized photons, are used to transmit digital information, the uncertainty principle gives rise to novel cryptographic phenomena unachieveable with traditional transmission media, e.g. a communications channel on which it is impossible in principle to eavesdrop without a high probability of disturbing the transmission in such a way as to be detected. Such a quantum channel can be used in conjunction with ordinary insecure classical channels to distribute random key information between two users with the assurance that it remains unknown to anyone else, even when the users share no secret information initially. We also present a protocol for coin-tossing

Ch. H. Bennett, G. Brassard, International Conference on Computers, Systems & Signal Processing Bangalore, India December 10-12, 1984





- Einzelphotonen
- Zufällige Polarization
- No-Cloning

"Sifting" **Security by Sifting**

4 Quantenzustände (Polarisation)



BB84-Protocol





Quantenschlüsselverteilung @ TU Darmstadt







TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Setup: Entangled Photons with Timebin-Entanglement











QKD-Netzwerk mit 4 Teilnehmern (skalierbar auf 102 Teilnehmer)



Quanten-Hub

QKD-Netzwerk mit 4 Teilnehmern (skalierbar auf 102 Teilnehmer)



Time-Bin Entanglement Protokoll

Schlüsselraten begrenzt durch Detektoren (Effizienz und Totzeit)

QBER zur Phasenstabilisierung (Interferometer)

E. Fitzke, L. Bialowons, T. Dolejsky, M. Tippmann, O. Nikiforov, ThW, F. Wissel, M. Gunkel, Scalable Network for Simultaneous Pairwise Quantum Key Distribution via Entanglement-Based Time-Bin Coding, PR X Quantum 3 (2022) 020341

Stabile simultaner Schlüsselaustausch zwischen allen zweier Teilnehmerkombinationen

Alice/Diana (red) + Bob/Charlie (black)



Kombinationen und Distanzen QBER (orange), Rohschlüsselrate (red)





Field Deployed Fiber Link



E. Fitzke et al., PRX Quantum **3** (2022) 020341

<u>TECHNIS</u>CHE



The Dagger Complex is a US military base in Darmstadt (Germany), close to Griesheim and located at the Eberstädter

The complex is under US Army Intelligence and Security Command (INSCOM) command on behalf of the US National Security Agency (NSA) and is officially known as Subunit 1 operated by USMC G Company.^[1] After a large basement expansion at the complex in 2002 it hosted an important SIGINT processing, analysis and reporting center.^[2]

© Google Maps



Field Deployed Fiber Link



E. Fitzke et al., PRX Quantum **3** (2022) 020341





Feldtest







Voll automatisiert Auto-Kalibration WSS mit variabler Bandbreite Full Clock Recovery

| | Alice / Bob | Charlie / D |
|----------------------------------|--------------------|---------------|
| WSS channel width | 50 GHz | 25 GHz |
| <secure key="" rate=""></secure> | (6.3 ± 1.1) bits/s | (102 ± 8) bi |
| QBER | (4.5 ± 2.0) % | (2.6 ± 1.2) 9 |

E. Fitzke et al., PRX Quantum **3** (2022) 020341





Allgemeines zur Bachelorthesis

- Welche F\u00e4higkeiten sollen Sie erwerben/demonstrieren?
- Einarbeiten in eine Thematik
- Grundzüge des wissenschaftlichen Arbeitens
- Zusammenfassende Arbeit
- Vortrag
- •Was ist der zeitliche Verlauf?
- Einarbeitung: 3-4 Wochen
- Ausführung: 4-7 Wochen
- schriftl. Ausarbeitung: 2-4 Wochen.
- Wann muss ich mich darum kümmern?
- Rechtzeitig (3-4 Monate vorher)
- •Wie umfangreich sollte die schriftliche Ausarbeitung sein?
- 20 bis 40 Seiten.





Bachelor Theses: 153 Master Theses/Diplomarbeiten: 133

- - Frequenzüberhöhungsresonatoren zur SHG/SFG von 1014.6 nm Strahlung
- Quantenkryptografie
 - Photonenkorrelationen in der spontanen Parametrischen Konversion •
 - Charakterisierung des Systems zur Quantenschlüsselverteilung in einem Feldtest •
 - Charakterisierung der Effizienz und des Jitters von Einzelphotonendetektoren mittels POVMs •
- Brillouin Streuung
 - Messung der Linienbreite der Brillouinspektra als Funktion der Temperatur \bullet
 - Konstruktion eines Spiegelteleskops für das Brillouin Projekt •
- Laserentwicklung
 - Laserstabilisierung mittels eines Fabry-Perot Etalons •
 - Halbleiterlaser zum Injection Seeding eines gepulsten Ti:Saphir-Lasers
 - Aufbau von Diodenlasern mit externen Resonatoren
 - Aufbau von Faserverstärkern
 - Aufbau von SHG mit Überhöhungsresonatoren
- Externe Bachelorarbeiten



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Unser Team (Aufnahme Sommer 2019)







Projekte





Triplettsolvatationsdynamik





Lasing without Inversion

Resonanzionisationsspektroskopie an schweren Elementen

Fangen und Kühlen von neutralem Quecksilber (Photo-Assoziation, EPR Experiment)









Lasersysteme zum Kühlen von relativistischen Ionenstrahlen

