



Photonenstatistik an klassischen und nicht-klassischen Lichtquellen

Mit einem Intensitätsinterferometer (auch *Hanbury Brown-Twiss-Interferometer* genannt) kann die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung eines Lichtfeldes gemessen werden. Diese gibt Auskunft über die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines zweiten Photons um den Zeitpunkt der Messung des ersten Photons herum.

Wir betrachten daher mit zwei Photodetektoren die zeitliche Verteilung der Ankunft von Photonen an ein- und derselben Lichtquelle. Hierzu werden viele Messungen durchgeführt und die gemessenen Zeitabstände zwischen dem Eintreffen der zwei Photonen in einem Histogramm aufgetragen.

Wir führen Messungen an klassischen Lichtquellen wie einer Kerze und einem Laser durch, die ein Lichtfeld erzeugen, welches auch klassisch (ohne Photonenhypothese) erklärbar ist. Des Weiteren betrachten wir das Lichtfeld einer nicht-klassischen Strahlungsquelle am Beispiel eines NV-Zentrums in Diamant. Das NV-Zentrum ist eine Störstelle im Diamant, welches aus einer Fehlstelle und einem Stickstoff-Atom besteht. Es besitzt zwei freie Elektronen, von denen eines vom Stickstoff und das zweite von einem weiteren Stickstoff innerhalb des Gitters stammt; diese können optisch angeregt werden und so beim Übergang in den Grundzustand ein Photon emittieren.

Im Gegensatz zu den klassischen Feldern kann diese korrekt nur *mit* der Einsteinschen Photonenhypothese erklärt werden: Photonen sind unteilbare Quanten des elektromagnetischen Feldes. Deshalb können bei der Messung eines Einzel-Photonen-Emitters, wie der NV-Störstelle, niemals zwei Photonen gleichzeitig detektiert werden.

Die dargestellte Messung der Intensitätskorrelation ist inzwischen ein Standardwerkzeug in vielen Bereichen der Quantenoptik, um einzelne Quantensysteme (wie z.B. auch einzelne Atome oder Quantenpunkte) zu identifizieren, und wird hierzu im aktuellen Forschungsbetrieb an einigen Instituten der Universität verwendet.

I. Erforderliche Kenntnisse

Grundlagen der Quantenmechanik (Schwarzer Strahler, reine und gemischte Zustände, Pseudo-Wahrscheinlichkeitsverteilungen)
Theoretische Grundlagen in Quantenoptik (Fock-, kohärenten und chaotischen Zustände, Varianzen, Theorie des elektromagnetischen Feldes)
Korrelationsfunktionen / Kohärenz, Korrelation
Intensitätsinterferometer (Hanbury Brown-Twiss-Setup, Anwendungen)
Optik (Immersionsmikroskopie, Raumfilter, Spektrale Filter, Strahlteiler, Spektrometer)
Grundlagen der Statistik (Poisson-Verteilung)
Laser (prinzipieller Aufbau)

NV-Störstellen (Diamantstruktur, Gitterfehler, Produktion von Gitterfehlern, Struktur der NV-Störstelle)

II. Literatur

C. Schlatow – *Quantenstatistik der Fluoreszenz einzelner NV-Störstellen in Diamant*, Kap.1-3, pp. 3-80. (www.photonenstatistik.de/vu)

Oder:

Intensitätsinterferometer

- R. Hanbury Brown, R.Q. Twiss – *Correlation between Photons in two coherent beams of light*, Nature **177**, No. 4497, 7. Januar 1956
- W. Demtröder – Experimentalphysik IV, Kap. 11.1.1 (Direkte Messung von Sternradien)



Zum Antibunching und Bunching

- H.J. Kimble, M. Dagenais, L. Mandel – *Photon Antibunching in Resonance Fluorescence*, Phys. Rev. Lett., Vol. **39**, No. 11, 12. Sept. 1977
- T. Jelte, J. M. McNamara, W. Hogervorst, W. Vassen, V. Krachmalnicoff, M. Schellekens, A. Perrin, H. Chang, D. Boiron, A. Aspect & C. I. Westbrook - *Comparison of the Hanbury Brown–Twiss effect for bosons and fermions*, Nature, Vol. **445**, 25. Januar 2007, DOI: 10.1038/nature05513

Versuchsaufbau zur Photonenstatistikmessung an NV-Zentren

- R. Brouri, A. Beveratos, J.-P. Poizat und P. Grangier – *Photon antibunching in the fluorescence of individual color centers in diamond*, Opt. Lett. Vol. **25**, No. 17, 1. Sept. 2000

NV-Zentren in Diamant

- F. Jelezko, C. Tietz, A. Gruber, I. Popa, A. Nizovtsev, S. Kilin and J. Wrachtrup – *Spectroscopy of Single N-V Centers in Diamond*; Single Mol. **2** (2001) 4, pp. 255-260
- D.D. Awschalom, R. Epstein, R. Hanson – *Spintronik mit Diamant*, Spektrum der Wissenschaften, Dezember 2007, pp. 112-120

Zusätzlich kann herangezogen werden:

Kohärenz optischer Felder (Bunching)

L. Mandel, E. Wolf – *Coherence Properties of Optical Fields*, Rev. Mod. Phys., Vol **37**, No. 2, pp. 231-287 (1965), DOI: 10.1103/RevModPhys.37.231 (Kap. 1 – 3 und 6.3 – 6.4)

Quantenoptik

Glauber, Roy – *Quantum Theory of Optical Coherence* (Kap. 1.1 – 1.4 und 2.1 – 2.3)

Schleich, Wolfgang – *Quantum Optics in Phase Space* (Kap.1) (insb. 1.1-1.2)

Loudon, Rodney – *The quantum theory of light*

Weiterführende Literatur:

Zum Begriff "Photon"

Lamb, Jr., W.E. – *Anti-photon*, Appl. Phys. B. 60, 77-84 (1995)

Zur Nichtlokalität einzelner Teilchen

Dunningham, J.; Vedral, V. – *Nonlocality of a Single Particle*, Phys. Rev. Lett., Vol. 99, 180404, 2007

L. Hardy – *Nonlocality of Single Photon Revisited*; Phys. Rev. Lett. Vol. **73**, No. 17, 24. Oktober 1994, DOI: [10.1103/PhysRevLett.73.2279](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.2279)

Zu Diamant (Eigenschaften, Herstellung/Entstehung)

A. Krüger – *Neue Kohlenstoffmaterialien*; ISBN 978-3-519-00510-0, 1. Auflage 2007, Teubner (Wiesbaden), DOI: [10.1007/978-3-8351-9098-6](https://doi.org/10.1007/978-3-8351-9098-6)

U. Schwarz: *Diamant: naturgewachsener Edelstein und maßgeschneidertes Material*, Chemie in unserer Zeit **34**, No. 4, pp. 212-222 (20. Sept. 2000), DOI: [10.1002/1521-3781\(200008\)34:4<212::AID-CIUZ212>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1521-3781(200008)34:4<212::AID-CIUZ212>3.0.CO;2-7)

Statistik

A. Steland – *Basiswissen Statistik*; Springer Berlin Heidelberg New York, 2007, ISSN 0937-7433, ISBN: 978-3-540-74204-3, DOI: [10.1007/978-3-540-74206-7](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74206-7) (Kap. 2, insb. 2.1, 2.6 und 2.7)



III. Experimentelle Aufgabe

Erster Versuchstag

A. Quantenstatistik eines thermischen Strahlers

1. Bauen Sie eine „Halierung“ für die Glühbirne vor dem Kollimator auf.
2. Bauen Sie einen geeigneten Filter vor den Kollimator, da der thermische Strahler eine zu hohe Intensität besitzt.
3. Nehmen Sie die Statistik des thermischen Strahlers auf.

B. Justage der Strahlengangs ohne Raumfilter

1. Kontrollieren Sie die Justage der Strahlaufweitung.
2. Kontrollieren Sie die Einkopplung in das Mikroskop-Objektiv. (Worauf müssen Sie hier achten?)
Verstellen Sie nicht ohne Betreuer das Mikroskop-Objektiv!
3. Bauen Sie den Strahlengang ohne Raumfilter auf, ohne den Raumfilter zu versetzen.
4. Koppeln Sie gut in den Kollimator ein!

C. Quantenstatistik-Messung (ohne Raumfilter)

1. Scannen Sie die Probe 2D, sodaß die einzelnen NV-Zentren sichtbar werden.
2. Fokussieren Sie ein stark leuchtendes NV-Zentrum.
3. (Spektroskopie-Messung des fluoreszierenden Lichtes.)
4. G^2 -Messung an der Fluoreszenz dieses Zentrums.
5. Sie können ggf. auch weitere Zentren untersuchen.

ACHTUNG

Sie arbeiten mit teurem Equipment (Wert: ca. 55.000€).
Bitte behandeln Sie es pfleglich.

Zweiter Versuchstag

D. Justage des Strahlengangs mit Pinhole






1. Kontrollieren Sie die Justage der Strahlaufweitung.
2. Kontrollieren Sie die Einkopplung in das Mikroskop-Objektiv. (Worauf müssen Sie hier achten?)
Verstellen Sie nicht ohne Betreuer das Mikroskop-Objektiv!
3. Bauen Sie den Strahlengang mit Raumfilter auf, ohne den Raumfilter zu versetzen.
4. Sie können die Justage des Raumfilters mit parallelem Licht des Lasers kontrollieren. Anstelle die Probe zu beleuchten, stellen Sie einen Spiegel vor die Probe. (→Quantenstatistik von koh. Licht aufnehmen!)
5. Koppeln Sie gut in den Kollimator ein!
6. Gehen Sie wie in Aufgabe C vor.
7. Wiederholen Sie die Messung mit der Hälfte und einem Viertel der Anregungsleistung.

IV. Auswertung



1. Bestimmen Sie die Zeitkonstante der Korrelation des Fock-Zustandes bzw. die NV-Zentrums. Schätzen Sie die Größe der NV-Störstelle ab. Vergleichen Sie dabei die verschiedenen Anregungsleistungen.
2. Bestimmen Sie die Kohärenzlänge der thermischen Lichtquelle.
3. Diskutieren Sie die Wirkungsweise des Pin-Holes.
4. Stellen Sie die rel. Bewegung des Fokus zur Probe während der Messung im Ereignis- oder Zustands-Raum dar.
5. Erstellen Sie Sättigungsdiagramm des NV-Zentrums.
6. Bestimmen Sie anhand des Cross-Talks . Was lässt sich über die Sensitivität der APDs sagen?



V. Hinweise

-  (i) Niemals direkt in das Laserlicht schauen!
-  (ii) Niemals auf die APD (im Betrieb) ungeschwächtes kohärentes Licht (Laser) geben; bevor die APD eingeschaltet wird, ist IMMER der Laserfilter einzubauen.
-  (iii) Niemals die Faser einer laufenden APD entfernen.
- (iv) Der Piezo-Controller soll vor dem Ausschalten ca. 1 bis 2 Minuten auf Nullspannung gelegt werden, um Hochspannungsschäden beim Abschalten zu vermeiden. Hierzu ist ein Programm *DA_Steuerung.exe* auf dem Desktop zur Verfügung gestellt, mit dem an jedem einzelnen Kanal eine Spannung ausgegeben werden kann.
-  (v) Auf den Piezo-Block des Probentisches während des Betriebes nicht mechanisch einwirken.
-  (vi) Das Mikroskop-Objektiv nur vom Betreuer justieren lassen; bei zu tiefer Einstellung kann der Probenhalter durchbrochen werden.
- (vii) Die Faser nicht knicken.
- (viii) Die Software zur Spektroskopie der Diamantproben enthält einige Bugs.
 - a. Unter anderem ist das Speichern der aufgenommen Intensitätsgraphen davon betroffen. Dieses funktioniert nur semi-automatisch – die Datei, in die die Daten geschrieben werden soll, muss ca. zehnmal bestätigt werden –.
 - b. Beim Laden einer früheren Graphik muss diese dann mit *Set* übernommen werden, sodass das aktuelle Bild verloren geht. Außerdem können der Prozedur die Eckdaten (Offset, Pixel-Size, Scan-Time) nicht übernommen werden.
 - c. Z-Control auf deaktivieren setzen, falls noch nicht getan, da die Probe parallel zum Objektiv eingebaut ist.

d. Find-Maximum funktioniert gut mit der Einstellung: Scan:2 μm und Pixel: 40.

-  (ix) Das Pinhole nicht dejustieren, sondern als Ganzes in den Strahlengang einpassen.
- (x) Achten Sie auf Einhalten der Strahlenganghöhe (sofern möglich); hierfür sind die Irisblenden hilfreich. Ein schiefer Strahlengang führt bei den Optiken zu Fehlern und somit zu Intensitätsverlusten.
- (xi) Zur Justage der Optiken kann der Rückreflex beachtet werden, der kongruent auf dem Strahl liegen sollte (s.a. Autokollimation).
- (xii) Insbesondere ist darauf zu achten, das Objektiv gerade zu treffen, da hiervon die Güte der Anregung der Störstelle maßgeblich abhängt.
- (xiii) Bevor das Rack/NIM-Halter ausgeschaltet wird: Überprüfen, ob MCB-Software (MAESTRO-32) geschlossen wurde.
- (xiv) Einschaltreihenfolge des Lasers beachten. Die Ausschaltreihenfolge ist gerade umgekehrt.
- (xv) Der TAC ist bei hohen Countraten überfordert und „verschluckt“ Daten (Deadtime). Bei hohem Signal kann zur Aufnahme eines 2D-Intensitätsgraphen die APD direkt an die Counter-Karte geschlossen werden.
- (xvi) Achten Sie darauf, dass die Delay-Zeit innerhalb des am TAC eingestellten Zeitbereichs liegt.
-  (xvii) Kein direkter Hautkontakt mit Spiegeln und Filter, die Reinigung ist sehr aufwendig.
- (xviii) Als Datenspeichermöglichkeiten stehen ein CD/DVD-Brenner und eine Karten-Schnittstelle zur Verfügung.