

Doppelspalt mit Einzelphotonen

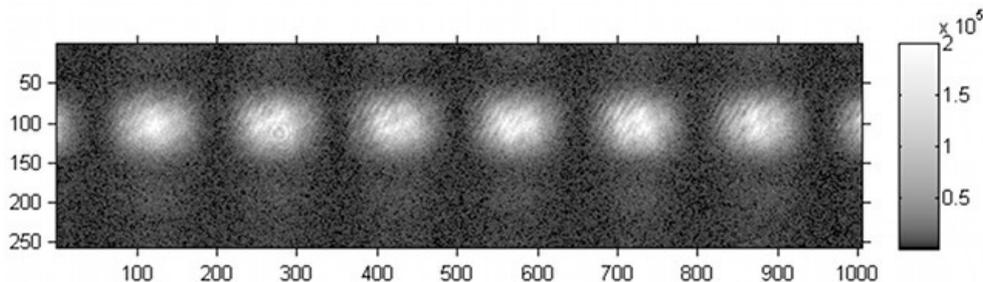


Abb. 1: Beugungsbild eines Doppelspaltes, aufgenommen mit einer EMCCD-Kamera

Im Rahmen der Erweiterung und Verbesserung der Vorlesungsexperimente wurde eine EMCCD-Kamera beschafft.

Die Erfindung der CCDs wurde im Jahre 2009 durch den Nobelpreis geehrt. Sie geht zurück auf eine Veröffentlichung von Willard S. Boyle und George E. Smith aus dem Jahr 1970. Die technische Neuerung der Electron-Multiplifying CCD kann im Zusammenhang mit der Funktionsweise von CCDs im allgemeinen erläutert werden. Mit einer EMCCD ist es möglich einzelne Photonen nachzuweisen.

Die zentrale Idee ein Doppelspalt Experiment mit einzelnen Photonen aufzubauen, besteht in der Veranschaulichung des Messprozesses von Ereignissen, die quantenmechanisch zu beschreiben sind.

Die Tatsache, dass einzelne Photonen, die ja auch einen Impuls besitzen und somit auch als Teilchen beschrieben werden können, mit sich selber Interferenz zeigen, ist vielen Studierenden oftmals nicht gut vermittelbar. Es tauchen immer wieder Missverständnisse hinsichtlich der Vorstellung auf, die im Wesentlichen an der Bildhaftigkeit eines Teilchens (oder auch einer Welle) liegen.

Der Modellcharakter physikalischer Beschreibungen wird neben mathematischen Formulierungen in den Vorlesungen oftmals übersehen, und kann gerade durch ein Experiment mit einem zweideutigen Ergebnis sehr gut thematisiert werden. Der „geisterhafte“ Teilchen Welle Dualismus wird nicht etwa in Richtig oder Falsch unterteilt, sondern sortiert sich in das eine und das andere Modell. Dadurch verliert die Quantenmechanische Beschreibung ein wenig ihre Fremdartigkeit und kann als weitere, für bestimmte Phänomene besser geeignete, Theorie ihren Platz im Gebäude der physikalischen Konzepte und auch in den Köpfen der Studierenden einnehmen.

Versuchsbeschreibung:

Der in Abb. 2 dargestellte Versuchsaufbau wird vorgestellt und die Verwendung der EMCCD als Einzelphotonenmessgerät mit Hilfe der Kamerasoftware und vorbereiteten Animationen präsentiert.

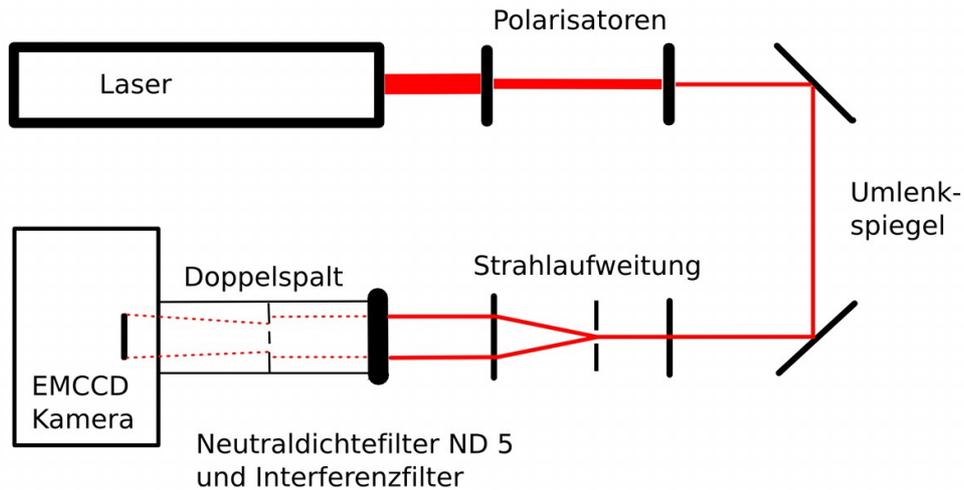


Abb. 2: Versuchsaufbau

Licht aus einem Helium Neon Laser wird aufgeweitet und nach Abschwächung um 5 Größenordnungen mit einem Neutralsdichtefilter in einem Lichtdichten Rohr auf einen Doppelspalt mit Spalten der Breite $d = 10\mu m$ im Abstand $a = 500\mu m$ geleitet. Mit Hilfe von Polarisatoren lässt sich die Intensität des Lasers regulieren.

Vorgeführt wird zuerst ein verrauschtes Bild bei niedriger Lichtintensität (Abb. 3), welches sich nicht von Bildern herkömmlicher CCDs unterscheidet. Schritt für Schritt wird dann zunächst die Kühlung der Kamera eingeschaltet und danach die Verstärkung des Electron-Multipliyng-Schieberegisters vergrößert.

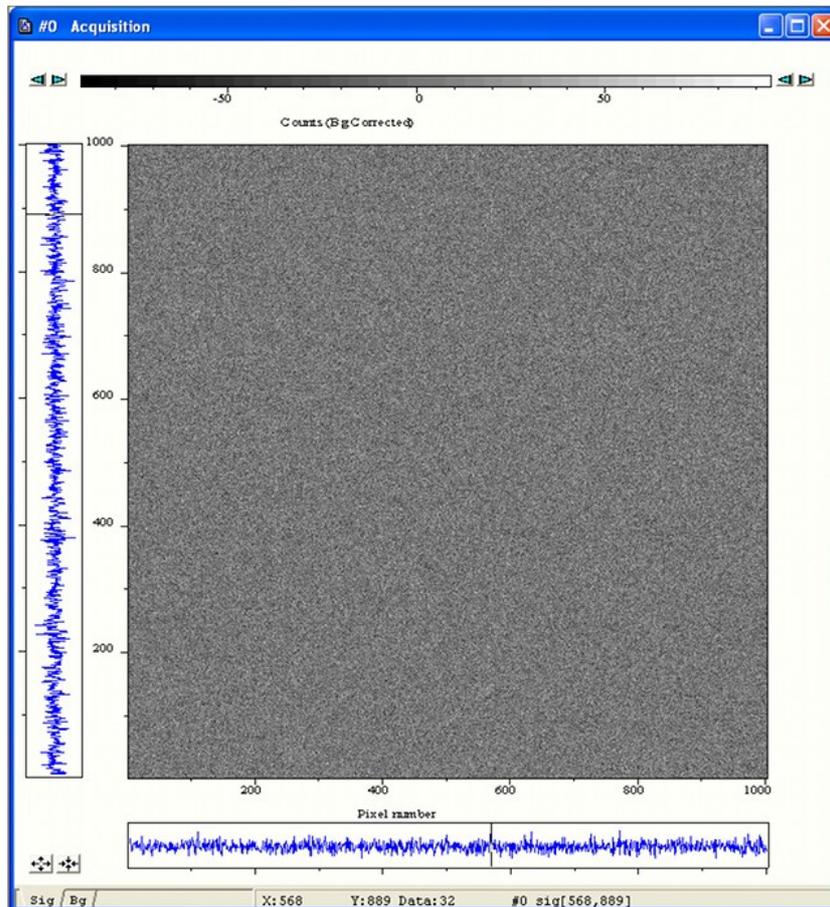


Abb. 3: Bildausgabe der Kamerasoftware ohne EM-Verstärkung

In einer herkömmlichen CCD sind die Intensitäten der Messwerte gaussförmig verteilt (Abb. 4).

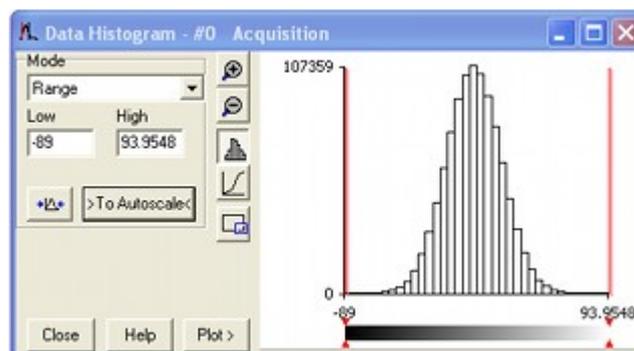


Abb. 4: Histogramm eines verrauschten Bildes

Nach Einschalten der Kühlung und der EM-Verstärkung ergibt sich für die gleiche Belichtungszeit (hier 0,1s) folgendes Bild (Abb. 5).

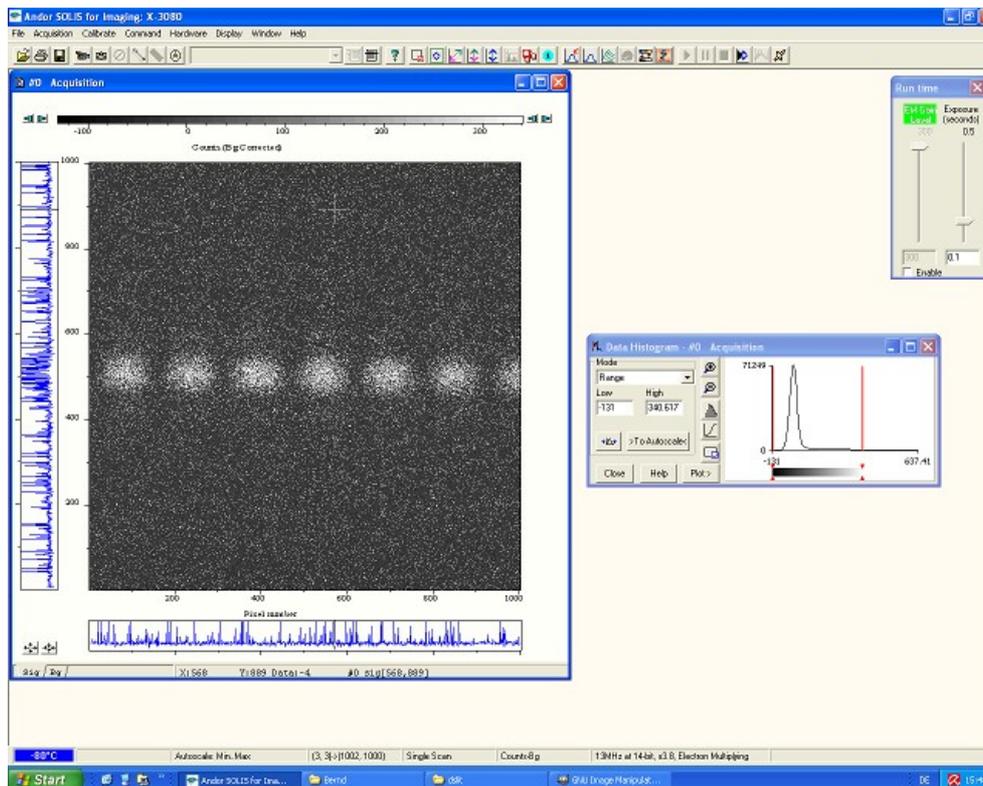


Abb. 5: Monitorbild der Kamerasoftware nach einer Messung mit EM-Verstärkung

Das Beugungsbild wird sichtbar. Anzumerken ist an dieser Stelle das die vertikale Ausdehnung der Spalten $450\mu m$ beträgt, es ist daher auch ein schwaches Beugungsbild in Vertikaler Richtung sichtbar.

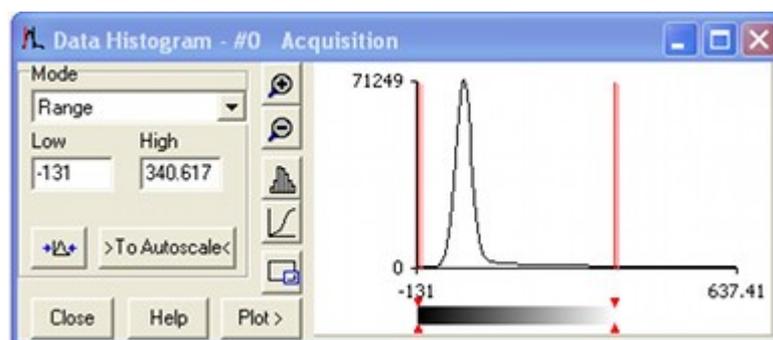


Abb. 6: Histogramm aus Abb. 5

Hier lohnt sich ein Blick auf das Histogramm (Abb. 6). Die rechte Seite der Verteilung enthält noch Ereignisse bei höheren Intensitäten. Hier „verstecken“ sich die Einzelelektronenmessungen, die Verteilung läuft exponentiell aus. Eine Charakteristik, die auf den EM-Verstärkungsprozess zurückgeht.

Durch Kühlung des Chips und Verwendung der EM-Verstärkung werden nun Messwerte, die vorher als einzelne Elektronen vom CCD-Array an das EM-Register weitergegeben wurden, aus dem Rauschen „herausgehoben“. An dieser Stelle ist es die Entscheidung

des Beobachters welches Messereignis von einem Photon stammt und welches durch anderweitige (störende) Ereignisse erzeugt wurde.

Eine weitere Messung skizziert die Fähigkeit einzelne Photonen messen zu können. Dazu wird bei einer noch kürzeren Belichtungsdauer (~1ms) eine Serie von Bildern (hier 1000 Stück) aufgenommen, aufaddiert und zusätzlich noch eine vorher durchgeführte Messung des Untergrundes abgezogen. In Abb. 7 ist schon eindrucksvoll zu erkennen wie sich das Beugungsbild eines Doppelspaltes zusammensetzt. Nicht etwa aus Interferenzstreifen, wie in der Optik oder klassischen Elektrodynamik beschrieben, sondern aus einzeln aufgenommenen Messpunkten, die sich zum (klassischen) Gesamtbild zusammensetzen.

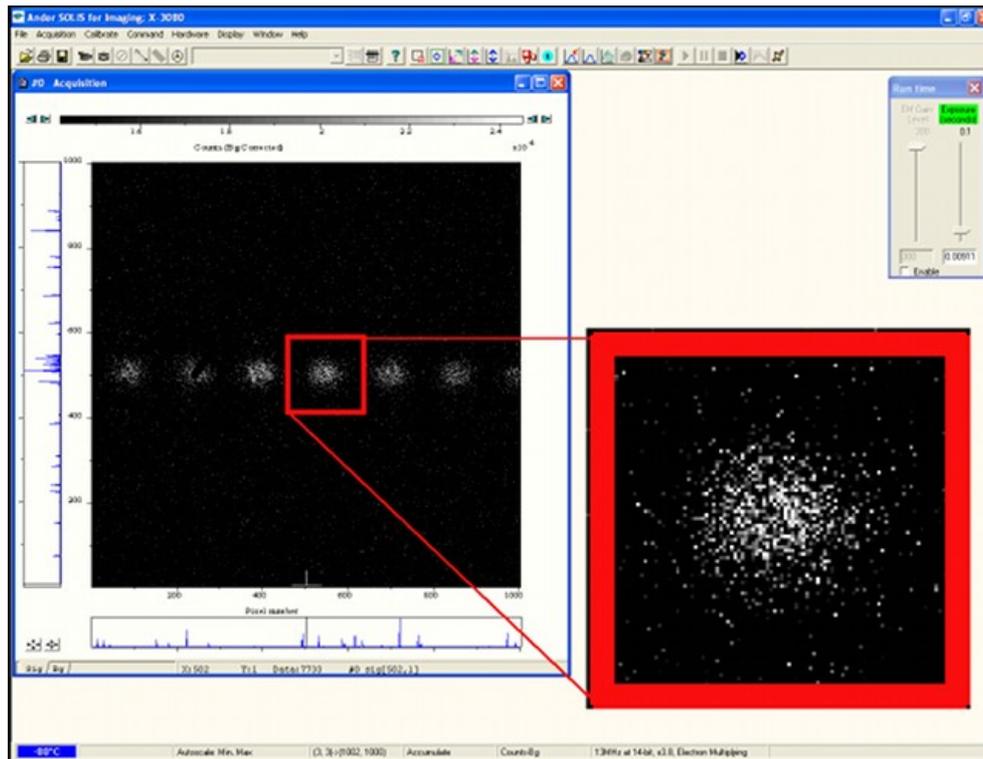


Abb. 7: Beugungsbild, zusammengesetzt aus 1000 Einzelaufnahmen

In dieser Darstellung wurde zusätzlich der Bereich der sichtbaren Messereignisse im Histogramm eingegrenzt, so dass nur Messwerte hoher Intensität zu sehen sind. Zusätzlich ist ein Bildausschnitt vergrößert eingefügt.

Bei vorbereitenden Messungen wurden 3000 Aufnahmen kurzer Belichtungszeit bei sehr geringer Intensität aufgenommen. Die Messergebnisse wurden mit Matlab aufgearbeitet. Der Untergrund ist abgeschnitten und die einzelnen Aufnahmen wurden Bild für Bild übereinandergelegt. Das Ergebnis steht findet sich im Link Versuchsdaten als Animation.

In einem CCD-Array werden durch Licht-Materie Wechselwirkungen in einem Halbleiter Ladungsträgerpaare erzeugt. Auf dem als Schieberegister konstruierte Array können die Elektronen von Pixel zu Pixel verschoben werden. Am Schluss wird so jede Ladung (in herkömmlichen CCDs einige Elektronen) einem Vorverstärker übergeben und ein messbares Signal erzeugt.

Dieser Prozess ist durch verschiedene Faktoren in seiner Genauigkeit begrenzt. Die Verstärkung so geringer Ladungsmengen ist stark rauschbehaftet und es kann passieren,

dass beim Verschieben der Ladungen einzelne Elektronen zusätzlich entstehen (clock induced charges). Des weiteren werden auch durch andere Strahlungsereignisse Ladungsträger erzeugt, so genannte Dunkelphotonen. Außerdem spielt die Temperatur des Arrays eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Sämtliche Parameter werden im Systemrauschen von CCDs sichtbar. Messungen sehr schwacher Signale gehen dabei im Rauschen unter.

EMCCD steht für Electron Multiplying Charge Coupled Device und unterscheidet sich von der CCD Technik in der Art, dass die Ladungen, direkt auf dem Chip „verstärkt“ werden. Die Idee dahinter ist ein durch 4 Spannungen gesteuertes Schieberegister (mit in Abb. 8 abgebildetem Potenzialverlauf) , welches auch als Verstärkungsregister bezeichnet wird. Die Ladungen aus dem (Potential-) Topf 1 werden über das Potenzial „dc“ gehoben, durch das Fallen in den tiefen Topf 2 werden zusätzliche Ladungen generiert. Topf 3 wird dann ein wenig abgesenkt und die Ladungen werden durch Anheben von Topf 2 in Topf 3 befördert. Der nächste Topf 1 senkt sich und durch Heben von Topf 3 werden die Ladungen dort hinein befördert usw..

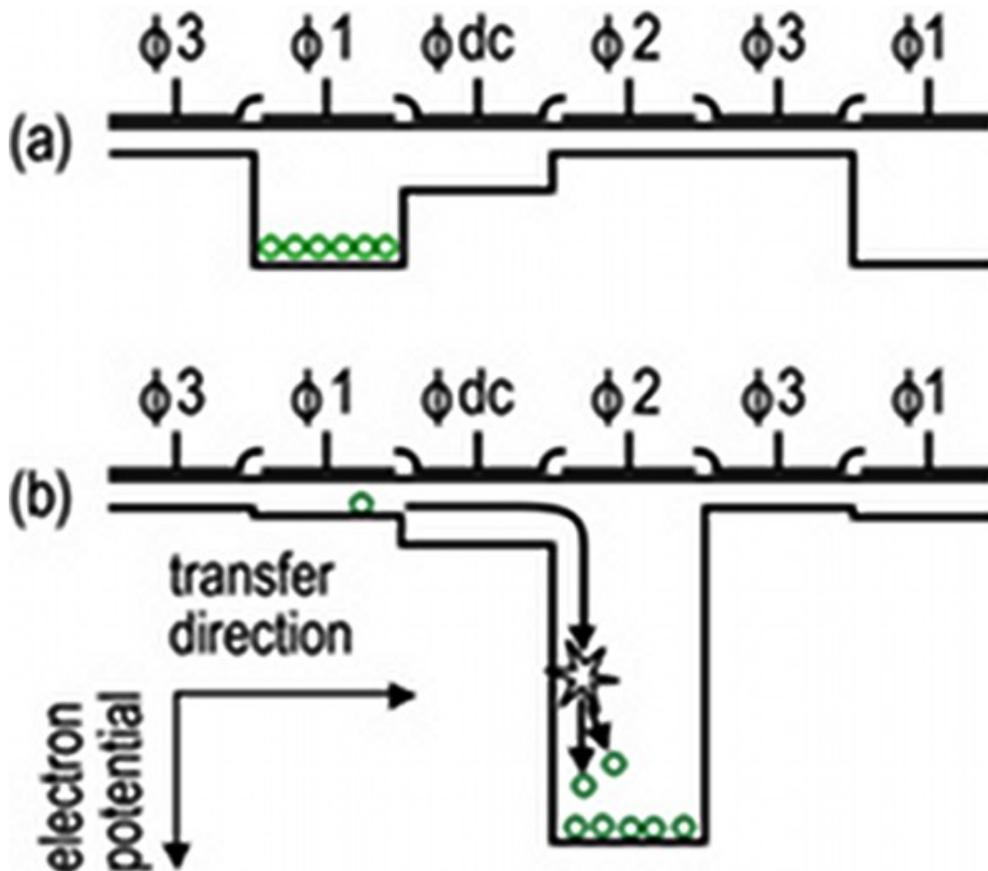


Abb. 8: Potenzialverläufe beim Transport von Ladungen im Verstärkungsregister einer EMCCD¹

Dieser Prozess wird im Register bis zu einige 100 Mal wiederholt. So entsteht ein gut messbares Signal, welches von einem Verstärker ausgegeben werden kann. Die Intensität der Signale, bei denen am Anfang des Registers einzelne Elektronen standen, nimmt dabei exponentiell ab. Der Vervielfachungsprozess gibt dem Histogramm einer Messung

1 http://www.emccd.com/what_is_emccd/emccd_tutorial/Q2_What_Happens_During_The_Electron_Multiplying_Process/

mit EM-Verstärkung seine charakteristische Form (s. [Abb. 6](#)). Das so genannte Ausleserauschen, welches im wesentlichen durch die begrenzte Empfindlichkeit von Verstärkern (in einer gewöhnlichen CCD oder bei der in Abb. 3 gezeigten Messung) die Schwachen Signale Verdeckt, wird durch diese geschickte Anordnung des EM-Registers um ein wesentliches reduziert. Die nun gemessenen Signale sind „nur“ durch einzelne, auftreffende Photonen oder durch Dunkelrauschen entstanden.