

Die photonenzählende Webcam



Eine Jugend forscht Arbeit von Cai-Oliver Thier und Tobias Kaufmann

Gliederung

1. Kurzfassung
2. Einleitung
3. Funktionsweise eines CCD-Sensors
4. Doppelspaltversuch mit einem Laserpointer
5. Das Programm Giotto
6. Röntgenstrahlung auf einen CCD-Sensor
7. Interferenz mittels Röntgenstrahlung
8. Bildverwertung mit dem Programm NeuroCheck
9. Messversuche zu Debbye-Scherrer
10. Fazit
11. Quellen und Bildverzeichnis

1. Kurzfassung

Mit Hilfe einer photonenzählenden Kamera könnte man im Physikunterricht eindrucksvolle und überzeugende Versuche zum Teilchen-Welle-Dualismus von Photonen machen. Leider ist eine solche Kamera für Schulen unerschwinglich. Gelingen solche Aufnahmen aber nicht auch mit einer normalen Digitalkamera? Die Antwort ist ein klares Nein, denn die Elektronik des CCD-Sensors in der Kamera ist nicht empfindlich genug um einzelne Photonen des Lichts zu detektieren. Die Photonen der Röntgenstrahlung sind jedoch wesentlich energiereicher. Kann man also mit einer handelsüblichen Digitalkamera ohne Einsatz eines Leuchtschirmes Röntgenstrahlung detektieren? Die weitverbreitete Meinung lautet ebenfalls Nein. Doch unsere Experimente mit einer Webcam und einem Schülerröntgengerät zeigten, dass bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlung mehrere Pixel pro Einzelbild zu sehen waren. Durch Aufaddieren der einzelnen Bilder mit dem Programm Giotto versuchten wir mithilfe von Kristallen ein Laue-Interferenzmuster aufzuzeichnen. Dies gelang uns nicht, da der CCD-Sensor der Webcam deutlich kleiner als das Interferenzmuster ist. Der Einsatz einer digitalen Spiegelreflexkamera mit größerem CCD-Sensor war uns aus sicherheitstechnischen Gründen verwehrt, da sich bei ihrem Einsatz die Abdeckung des Röntgengerätes nicht mehr schließen ließ. Der Durchbruch gelang uns aber mit unserer Webcam, als wir mittels Braggreflexion und Drehkristallmethode ein Röntgenspektrum aufzeichneten. Die Interferenzreflexion am Kristall lässt sich nur mit dem Wellenmodell erklären. Die registrierten Subpixel zeigen aber, dass die registrierte Strahlung Teilchencharakter besitzt. Addiert man alle Einzelbilder mit Giotto, so erhält man die vertraute Intensitätsverteilung.

Mit unserer preiswerten Methode können Physikschrüler in einer Doppelstunde durch selbstständiges Experimentieren nachvollziehbar erfahren, dass elektromagnetische Wellen weder Wellen im klassischen Sinne sind, noch aus Teilchen im klassischen Sinne bestehen. Sie erleben, dass Photonen Quantenobjekte sind, über deren Auftreffort auf dem CCD- oder CMOS-Chip man nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen kann. Erst bei einer großen Zahl an auftreffenden Photonen erkennt der Schüler das aus der klassischen Physik bekannte Interferenzmuster.

2. Einleitung

Eines der wichtigsten Experimente in der Physik ist die Entstehung eines Interferenzmusters durch Photonen, Elektronen, ... an einem Doppelspalt. Es ist ein überragendes Beispiel dafür, wie die Quantenphysik unser Weltbild verändert hat. Im Physikunterricht besitzt es deshalb einen sehr

hohen Stellwert. Es zeigt, dass es einen Teilchen-Welle-Dualismus gibt und dass das Verhalten von Quantenobjekten nicht mit der Alltagserfahrung von Schülern in Einklang steht. Umso wichtiger ist deshalb ein Experiment, welches diesen Dualismus nachvollziehbar zeigt. Dies könnte mit einer photonenzählenden Kamera gelingen, so wie sie im Deutschen Museum Bonn im Jahre 2000 bei der Ausstellung „h-heute“ gezeigt wurde. Der Kauf einer solchen Kamera übersteigt aber leider jeden Physiketat. Aus diesen Gründen haben wir uns als Ziel gesetzt, ein Experiment zu entwickeln, mit dem

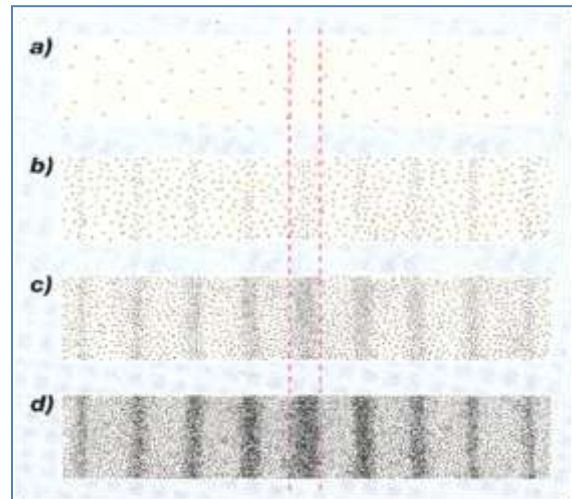


Abb. 1.1: Entstehung eines Interferenzmusters am Doppelspalt.

Quelle: Impulse Physik 2, 1997, S. 193

sich der Teilchen-Wellen-Dualismus in der Schule überzeugend demonstrieren lässt, das in dieser Preisklasse nicht existiert und somit den Physiketat nicht überfordert.

3. Funktionsweise eines CCD-Sensors

Ein CCD-Sensor ist ein lichtempfindliches, elektronisches Bauteil. Er besteht aus einer Matrix lichtempfindlicher Fotodioden mit einer Kantenlänge im μm -Bereich. Jede dieser Fotodioden ist mit Elektroden versehen, an die eine Spannung angelegt wird, wodurch sich eine Potentialsenke im Halbleiter bildet, in der sich Ladungsträger (z.B. Elektronen) sammeln können. Photonen, die auf den Chip fallen, geben ihre Energie an die Elektronen des Halbleiters ab. Dabei werden diese vom Valenzband in das energetisch höher gelegene Leitungsband gehoben. Abhängig vom Halbleiter ist dafür mehr oder weniger Energie nötig. Aus diesem Grund muss die Energie der Photonen mindestens so groß sein, wie die Bandlückenenergie des Halbleiters. Die bei der Belichtung entstandenen Ladungen fließen aber nicht wie bei einer normalen Fotodiode ab, sondern werden in der Potentialsenke gesammelt. Die Menge der Ladungsträger ist proportional zur eingestrahelten Lichtmenge, was bedeutet, dass mehr Elektronen vorhanden sind, wenn mehr Licht einfällt.

Nach der Belichtung des CCD-Sensors müssen die Ladungen aus den Potentialsenken in den Auslesebereich abtransportiert werden. Hierzu nutzt man das sogenannte „Eimerkettenverfahren“. Hierbei wird das Spannungsniveau innerhalb der Speicherzellen (Pixel) verändert, was dazu führt, dass die Ladung von einer Speicherzelle zur nächsten Speicherzelle verschoben wird. Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis alle Pixel ausgelesen sind. Im Auslesebereich wird die Ladung

der einzelnen Pixel gemessen und eine elektrische Spannung ausgegeben, die somit von der eingestrahlten Lichtmenge abhängig ist. Das Spektrum des CCD-Sensors wird durch die Bandlücke des Halbleitermaterials begrenzt. So benötigt Silizium etwa 1,1 eV, um die Bandlücke zu überbrücken.

Neben den klassischen CCD-Sensoren werden in Kameras immer häufiger die sogenannten CMOS-Sensoren verbaut. Galten CMOS-Sensoren früher als minderwertig durch ihr starkes Bildrauschen und ihre geringe Empfindlichkeit, so sind diese Nachteile heute ausgemerzt und der Sensor ist in manchen Bereichen den CCD-Sensoren überlegen. So kann man den CMOS-Sensor beispielsweise schneller und bereichsgesteuert auslesen, außerdem ist der Blooming-Effekt nahezu nicht existent.

4. Doppelspaltversuch mit dem Laserpointer

Um den Doppelspaltversuch mit Licht nachzustellen bauten wir eine Versuchsanordnung auf, die aus einem Laserpointer, zwei Polarisationsfiltern, einem Doppelspalt und einer Webcam bestand. Der Laserpointer strahlte durch die beiden Polarisationsfilter auf den Doppelspalt. Das hinter dem Doppelspalt austretende Laserlicht traf dann auf den CCD-Sensor der Webcam. Wir verdrehten die beiden Polarisationsfilter so gegeneinander, dass nur eine sehr geringe Menge an Licht auf den Sensor fallen konnte.

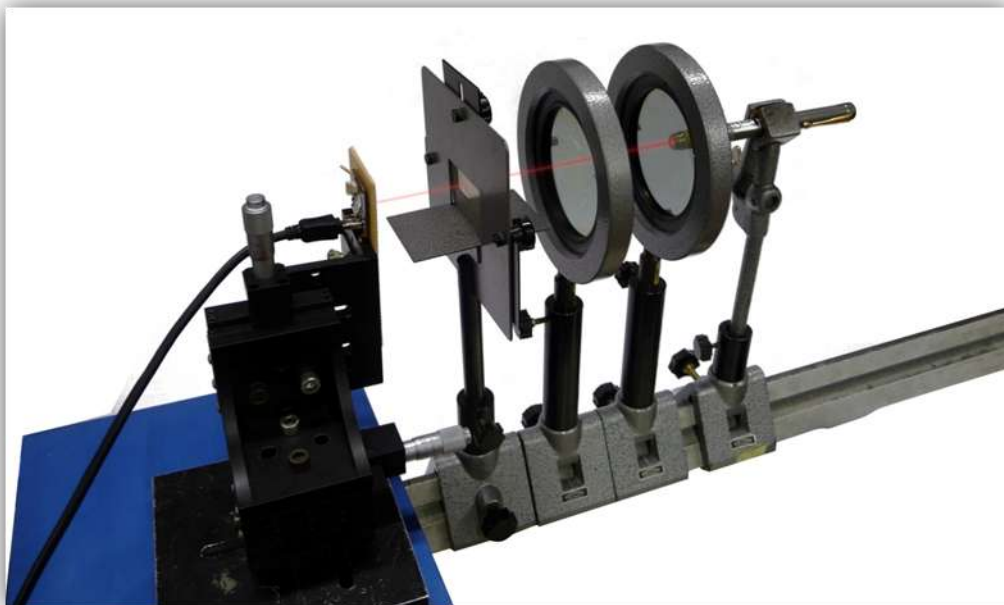


Abbildung 4. 1: Aufbau Doppelspalt mit Laserpointer

Die ganze Apparatur wurde in einen komplett abgedunkelten Raum gestellt, so dass keine Störstrahlung auf den CCD-Sensor fallen konnte. Es zeigte sich jedoch schnell, dass eine gewöhnliche

Webcam nicht empfindlich genug für einen derartigen Versuch zum Welle-Teilchen-Dualismus ist. Sobald man die Polarisationsfilter weit genug abdunkelte fiel so wenig Licht durch den Doppelspalt, dass die Webcam keine Strahlung mehr wahrnahm. Bei weiter geöffneter Polfilterkombination erschien jedoch schon ein Schleier von Licht auf dem Chip. Ein Aufbau des Bildes aus einzelnen Punkten konnte nicht verzeichnet werden. Das ließ uns darauf schließen, dass die Energie eines Photons zwar größer ist als die Bandlückenenergie des CCD-Sensors, allerdings werden viel zu wenige Elektronen ausgelöst. Die nachgeschaltete Elektronik kann einzelne Elektronen nicht zu einem Bild verarbeiten, da ein herkömmlicher CCD-Sensor nur ca. 255 Graustufen pro Pixel hat. Aus diesem Grund muss ein bestimmter Schwellwert an Elektronen im Pixel je Grauwert überschritten werden. Dazu müssten eine ausreichende Zahl von Elektronen ausgelöst werden. Wir mussten somit leider feststellen, dass der Nachweis des Teilchen-Welle-Dualismus nicht mit einem Laser und einer normalen Webcam funktioniert.

Nach weiterer Recherche im Internet erfuhren wir, dass in der Forschung häufig sogenannte Intensified CCDs eingesetzt werden. Bei diesen speziellen CCDs trifft das Photon zunächst auf eine Photokathode. Der aus ihr ausgelöste Elektronenstrom trifft auf eine Platte, die mit vielen kleinen, schrägen Kanälen versehen ist. An dieser sogenannten Mikrokanalplatte ist eine Spannung angelegt. Tritt nun ein Elektron in einen dieser Kanäle ein, trifft es auf die Kanalwand und löst aus ihr weitere Elektronen aus. Diese fallen nun wieder auf die gegenüberliegende Wand. Dieser Vorgang wiederholt sich vielfach, so dass man nach kurzer Zeit die bis zu 20.000 fache Menge Elektronen hat, die eingefallen sind. Diese fallen nun auf einen Leuchtschirm oder je nach Anwendungsgebiet direkt auf den eigentlichen CCD-Sensor.

Da eine Mikrokanalplatte sehr teuer ist und auch nur im Vakuum verwendet werden kann, fiel diese Möglichkeit für uns aus. Eine deutlich günstigere Alternative bot uns ein preiswertes Nachtsichtgerät von ALDI. Nachtsichtgeräte verwenden in ihrem Bildverstärker ebenfalls eine Mikrokanalplatte um das Bild zu erzeugen, von daher sollten nutzbare Verstärkungseffekte auftreten. Für unsere Versuche bauten wir aus diesem Grund wieder den im oberen Abschnitt erwähnten Versuchsaufbau auf. Dieses Mal setzten wir allerdings das Nachtsichtgerät vor unsere mit einem Objektiv versehene Kamera, um die kaum sichtbare Strahlung sichtbar zu machen und entsprechend zu verstärken. Schnell machten wir hierbei die Beobachtung, dass die Auflösung des Nachtsichtgerätes bedingt durch die Mikrokanalplatte nicht besonders groß ist. Deshalb mussten wir das Interferenzbild vergrößern. Nun führten wir zwei Messungen durch: Bei der ersten projizierten wir das Doppelspalt-Interferenzmuster auf einen Schirm und nahmen das Bild indirekt auf. Bei der zweiten Messung projizierten wir das Doppelspalt-Interferenzmuster direkt auf das Nachtsichtgerät, nachdem wir es

vorher mittels zweier Polarisationsfilter abgeschwächt hatten. Bei beiden Messungen nahmen wir rund 15.000 Bilder auf und addierten diese im Nachhinein mit dem Programm Giotto zu einem Bild (siehe Kapitel Giotto). Leider mussten wir bei beiden Messungen feststellen, dass sich zwar ein Interferenzmuster bildet, dieses allerdings schon von Anfang an zu erkennen ist. Wenn wir aber den Laser so abdunkelten, dass selbst auf dem Monitor nichts mehr zu erkennen war, erzeugte die Mikrokanalplatte ein so starkes Rauschen, dass sich nach der Reihenaufnahme und der Addition nichts erkennen ließ. Für eine zufriedenstellende Lösung konnte ein einfaches Nachtsichtgerät also nicht verwendet werden. Professionelle Kameras, mit einem Intensified CCD, könnten dies, allerdings sind diese auch entsprechend teuer. Die andere Frage, die sich uns stellte, ist, ob das Nachtsichtgerät nicht selbst die Aufnahme stört, da es eventuell mit einem Leuchtschirm in Inneren arbeitet. So ein Leuchtschirm hat zwingendermaßen ein gewisses Nachleuchten, das unsere Aufnahmen stören könnte, da wir die auftreffenden Photonen im optimalen Fall einzeln sehen wollen. Wir brauchten somit eine Strahlung, die höher energetisch ist als Licht, damit diese Photonen in einem Akt genügend Elektronen auslösen, die die nachgeschaltete Elektronik verarbeiten kann. Wie wir bereits zeigen konnten, lösen die Photonen von sichtbarem Licht zu wenige Elektronen aus. Diese geringe Anzahl an Elektronen kann mit der Elektronik einer normalen Webcam nicht in eine Bildinformation umgewandelt werden. So kamen wir auf die Idee Röntgenstrahlung zu verwenden. Die einzelnen Photonen der Röntgenstrahlen sind viel höherenergetisch als die von sichtbarem Licht. Doch kann eine Webcam überhaupt Röntgenstrahlung detektieren?

5. Das Programm Giotto

Bevor wir jedoch auf unsere Experimente mit Röntgenstrahlung eingehen, möchten wir kurz das Programm Giotto beschreiben. Giotto hat nichts mit den gleichnamigen Süßwaren zu tun, sondern ist der Name einer Freeware- Software aus dem Internet. Ursprünglich wurde Giotto entwickelt, um interessierten Hobby-Astronomen ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dem sie Langzeitaufnahmen verwerten können, wie sie zum Beispiel bei der Aufnahme eines Planeten am Nachthimmel entstehen. Wie man sich denken kann, sind solche Bilder, die in der Nacht geschossen werden, nur schwach belichtet, da nur wenig Licht auf den Sensor fällt. Aus dieser Bredouille hilft Giotto: Die schwach belichteten Einzelbilder werden übereinander gelegt um so ein besseres Bild zu erhalten. Das Programm kann dabei nicht nur einzelne Bilder übereinanderlegen, sondern auch ganze Bildreihen mit unbegrenzter Länge. Giotto kann sogar Videos in seine Einzelbilder (Frames) zerlegen und aufaddieren. Aus diesem Grund eignet sich Giotto hervorragend für unsere Arbeit.

Zum Aufaddieren bietet Giotto sogenannte Puffer, die als Zwischenspeicher dienen. In ihnen werden die Ergebnisse ausgegeben, bevor man sie speichert. Nun muss man Giotto angeben, was es überlagern soll und wie. Hierzu öffnet man den Dialog „Bildüberlagern“. In dem Fenster, welches sich nun öffnet, bieten sich zahllose Möglichkeiten, eine Bildserie zu addieren. Zunächst muss man die Quelle angeben, woher die Bilder stammen. Dabei kann es sich um eine AVI (Video) – Datei oder Einzelbilder handeln. Giotto bietet nun die Möglichkeit, Bilder zu zentrieren. Es sucht sich dann Fixpunkte in jedem Bild und versucht diese übereinander zu legen. Diese Funktion muss ausgeschaltet bleiben, versucht man Bilder von Röntgenstrahlung zu verwerten! Sie würde sonst die Ergebnisse verfälschen, indem sie die Bilder übereinander verschiebt. Der letzte Punkt, der noch bleibt, ist die Auswahl der Ermittlung des Ergebnisses. Hier bieten sich drei Varianten: „Mitteln“, „Kumulieren (hellstes Pixel einsetzen)“ und „Nur aufaddieren“. Für unsere Bilder bietet sich hierbei die Funktion „Kumulieren“ an. Auf diese Weise wird ein mögliches Hintergrundrauschen weitgehend unterdrückt und nur wirklich belichtete Punkte eines Bildes gelangen in das Ergebnis. Nach dieser Auswahl werden Einzelbilder nun zu einem Bild aufaddiert. So haben wir zum Beispiel rund 20.000 Bilder auf ein einziges Bild reduzieren können.

6. Röntgenstrahlung auf einen CCD-Sensor

Wie in Kapitel 4 schon erwähnt versuchten wir nun mit Röntgenstrahlung unser Ziel zu erreichen, einen preiswerten Versuch zum „Welle-Teilchen-Dualismus“ zu schaffen. Hierzu bauten wir in das Schüler-Röntgengerät unserer Schule eine Webcam ein und verbanden sie mit dem Computer. Entgegen der Informationen aus zahlreichen Quellen, die besagen, dass man keine Röntgenstrahlung mit einem normalen CCD-Sensor detektieren kann, konnten wir schon beim Einschalten der Röntgenröhre einzelne bunte Punkte auf dem Live-Bild der Kamera beobachten. (siehe Abbildung 6.1). D.h., mit einer Webcam kann Röntgenstrahlung detektiert werden!

Die geringe Ansprechwahrscheinlichkeit des CCD-Sensors für Röntgenstrahlung erwies sich hierbei als großer Vorteil, denn so kann der Aufbau eines Interferenzmusters aus zufällig verteilten Bildpunkten in aller Deutlichkeit gezeigt werden. Der Großteil der Photonen durchfliegt den Sensor ohne jegliche Reaktion. So erwies sich ein scheinbarer Nachteil als großer Vorteil für uns.

Die Filter auf den Fotodioden des CCD-Sensors, die sonst nur bestimmte Wellenlängen durchlassen und so eine Farbigkeit erzeugen, sind unempfindlich gegenüber der Röntgenstrahlung und lassen sie passieren. So können in den Subpixeln genügend Elektronen ausgelöst werden, um es der nachfolgenden Elektronik zu ermöglichen einen bunten Bildpunkt zu erzeugen. **So kann der Teilchencharakter der Röntgenstrahlung nachgewiesen werden!** Anhand von Abbildung 6.1 erkennt

man, dass nur einzelne Subpixel ausgelöst werden. Es tritt also kein Blooming-Effekt auf, trotz der hochenergetischen Strahlung.

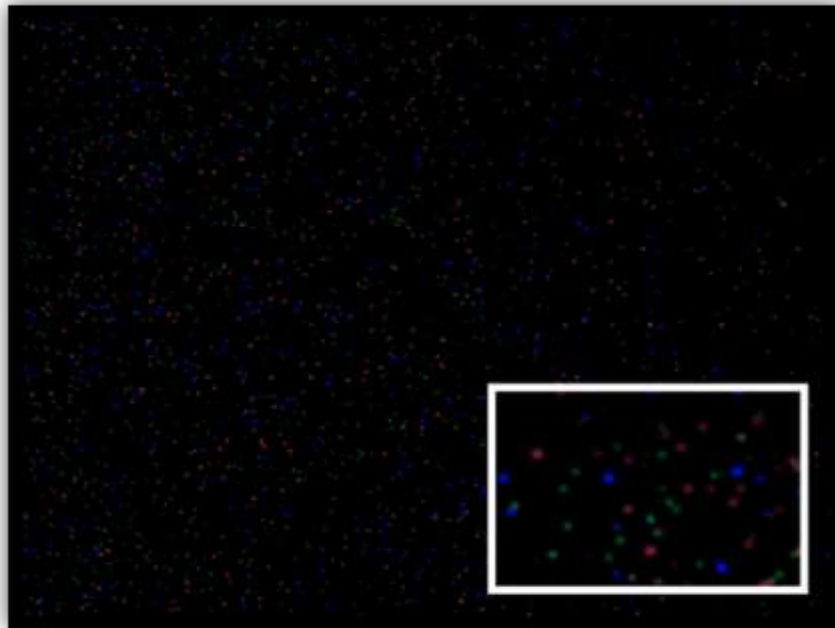


Abb. 6.1: Durch Röntgenstrahlung belichtet Pixel auf einem CCD-

Es fehlt nun nur noch der Nachweis des Wellencharakters. Sichtbares Licht hat eine relativ große Wellenlänge die im Nanometerbereich liegt. Deshalb reicht auch ein relativ großer Doppelspalt aus, um mittels eines Interferenzmusters den Wellencharakter der Strahlung nachzuweisen. Röntgenstrahlung dagegen hat nur eine Wellenlänge im Pikometerbereich. Um eine Interferenz am Doppelspalt zu erzeugen, müsste der Doppelspalt also entsprechend klein sein. Einen so kleinen Doppelspalt hat aber keine Schule; beziehungsweise es dürfte gewiss sehr schwierig sein einen Doppelspalt im Piko- bis Nanometerbereich für Röntgenstrahlung herzustellen. Ein Interferenzmuster mittels Doppelspalt konnten wir also nicht mit Röntgenstrahlung und unseren Mitteln erzeugen. Jedoch sind Interferenzphänomene nicht nur am Doppelspalt zu beobachten, sondern auch mittels einer Gitterstruktur. Daraus folgte für uns, dass wir das Gitter eines Kristalls verwenden müssen.

7. Interferenz mittels Röntgenstrahlung

Nun mussten wir einen Versuch finden, der eine Interferenz mit Röntgenstrahlung sichtbar macht und mit dem man somit den Teilchen-Welle-Dualismus zeigen kann. Im Physikunterricht der Oberstufe wird für eine Interferenz mit Röntgenstrahlung häufig das Debye-Scherrer-Verfahren verwendet. Dabei wird der Röntgenstrahl auf ein kristallines Pulver fokussiert. Treffen die Strahlen ein kristallines Teilchen so, dass die Bragg-Gleichung ($2d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$) erfüllt wird, beobachtet

man eine konstruktive Interferenz in Kreisform auf dem dahinterliegenden Schirm. Dieses Verfahren würde sich somit auch für unsere Versuche anbieten, da es relativ einfach im Aufbau ist und uns schnell ein Ergebnis liefern würde. Allerdings offenbarte sich nach eingehender Recherche ein weiteres Problem für uns: Für das Debye-Scherrer-Verfahren wird monochromatische Röntgenstrahlung benötigt. Da wir keinen entsprechenden Filter besaßen, fiel das Debye-Scherrer-Verfahren, obwohl es sehr gut für uns geeignet wäre, für uns leider aus.

Wenigstens konnten wir nun unser Versuchsfeld näher eingrenzen: Zum Nachweis des Teilchen-Welle-Dualismus eignet sich Röntgenstrahlung. Das Interferenzmuster muss aber mit weißem Röntgenlicht sichtbar gemacht werden können. So stießen wir auf das sogenannte Laue-Diagramm.

Beim Laue-Verfahren wird zur Beugung der weißen Röntgenstrahlung ein Einkristall genutzt. In unserer Sammlung befanden sich ein Natrium-Chlorid- sowie ein Lithium-Fluorid-Einkristall, die wir bei unseren Versuchen benutzten. Das Problem dabei war allerdings, dass wir zwar eine kollimierte Röntgenstrahlung zur Verfügung hatten, jedoch keine Apparatur, mit der wir den CCD-Sensor im Röntgengerät befestigen konnten. Da sich für unsere bisherige Kamera keine einfache Lösung finden ließ, kauften wir uns eine einfache Platinenkamera mit CMOS-Sensor ohne Objektiv, die aber nur Schwarz-Weiß-Aufnahmen machen konnte. Da Röntgenstrahlung keine Farbe besitzt, war dies für die Versuche unerheblich. Den Versuch bauten wir wie folgt auf: Auf die Röntgenröhre schraubten wir einen Kollimator, auf welchen der Einkristall geklebt wurde.

Aus den Aufnahmen in der Literatur, die uns von Laue-Diagrammen von LiF vorlagen, konnten wir den Durchmesser des Interferenzmusters abmessen. Hieraus ergab sich für uns mithilfe von $\tan \alpha = \frac{r}{d}$ für unseren Versuch ein Abstand zwischen Kristall und Chip von nur 0,79mm. Wir brachten deshalb den CMOS-Chip der Webcam direkt vor dem Kristall an. Die Webcam verbanden wir dann mittels USB mit dem Computer und starteten dann das Programm IC Capture. Das Programm IC Capture, welches der Webcam beilag, zeichnet sich durch professionelle Vielfalt aus.

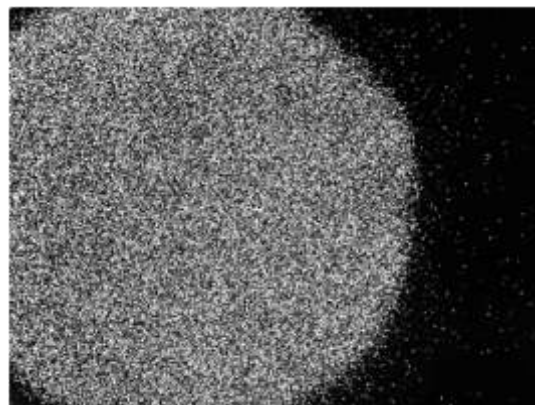


Abbildung 7.1: „Interferenzmuster“ nach der Bildaddition

Mit ihm kann man die Belichtungszeit manuell festsetzen und Einzelbildreihenaufnahmen machen, bei der jeder Frame (also jedes Bild) der aufgezeichnet wird auch einzeln gespeichert wird. Bei bis zu 60 Frames in der Sekunde entstehen so schnell tausende Bilder. Nach Aufnahmen von mehreren zehntausend Bildern, wurden diese mit dem Programm Giotto aufaddiert zu einem Gesamtbild. Uns zeigte sich dabei schnell, dass das Ergebnis nicht so war, wie wir es erhofft hatten. Der CMOS-Chip unserer Webcam war für das Interferenzmuster schlicht und einfach zu klein (siehe Abbildung 7.2).

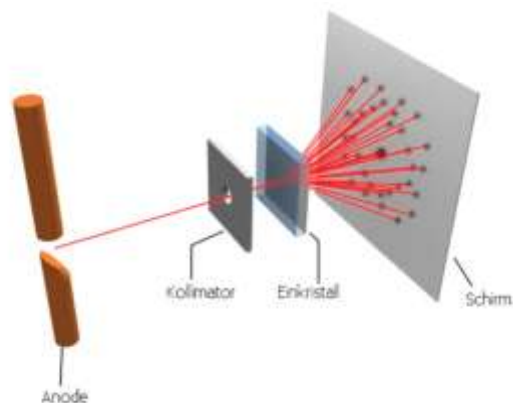


Abbildung 7. 2: Apparatur zur Befestigung des CCD-Sensors

Um eine konkrete Vorstellung davon zubekommen, wie groß das Interferenzmuster von LiF in unserer Apparatur nun wirklich ist, zeichnen wir es mittels eines Röntgenfilms auf. In Abbildung 7.3 sieht man, dass unser CMOS-Sensor deutlich zu klein ist, um das gesamte Interferenzmuster aufzuzeichnen. Wir benötigten also einen größeren Sensor. Einen solch größeren Sensor findet man zum Beispiel in einer digitalen Spiegelreflex-Kamera. Das Gehäuse einer solchen Kamera ist jedoch für unser Schülerröntgengerät zu groß, da sich dann der Deckel nicht mehr schließen lässt und somit das Röntgengerät nicht eingeschaltet werden kann.

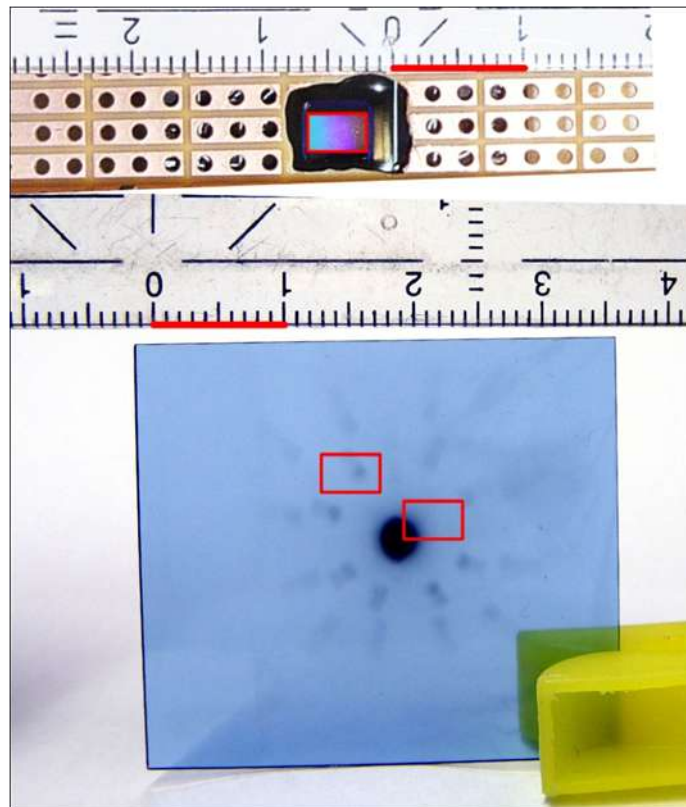


Abbildung 7.3: Größenvergleich CMOS-Chip und Röntgenfilm

Wir mussten also einen neuen Versuch finden, der es erlaubt, mit unserer preiswerten Webcam und mit weißem Röntgenlicht ein Interferenzmuster aufzuzeichnen. Nach längerer Zeit der Ratlosigkeit erinnerten wir uns an den klassischen Bragg-Versuch mit der Drehkristallmethode. Bei diesem Versuch tritt abhängig von Winkel und Wellenlänge Interferenzreflexion auf. Mittels der Drehkristallmethode kann man somit das Röntgenbremsspektrum und die charakteristische Röntgenstrahlung des Anodenmaterials aufzeichnen. Sollte dieser Versuch gelingen, dann hätten wir unser Ziel erreicht, denn die Interferenzreflexion am Kristall lässt sich nur mit dem Wellenmodell erklären. Die registrierten Subpixel auf dem CMOS-Sensor zeigen aber, dass die registrierte Strahlung Teilchencharakter besitzen muss. Addiert man alle Einzelbilder mit Giotto, so sollte man die vertraute Intensitätsverteilung erhalten.

Wir bauten den Versuch wie in Abbildung 7.4 auf. In der Mitte des Röntgengerätes wird ein NaCl-Einkristall angebracht. Unsere Platinenkamera befestigten wir mittels eines Diamagazins an der beweglichen Schiene, die sich um den Kristall drehen kann. Beim Drehen der Schiene dreht sich der Kristall um den

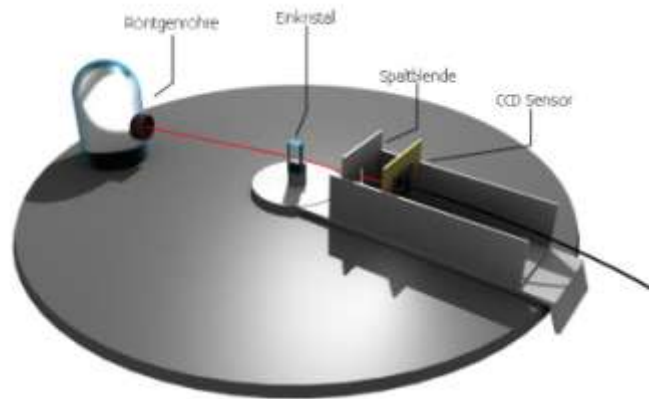


Abbildung 7.4: Drehkristallmethode mit einer Webcam

Winkel α , während die Schiene sich um den Winkel 2α dreht. Dies ist wichtig, damit sowohl das Reflexionsgesetz als auch die Bragg-Bedingung $2 \cdot d \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$ für Interferenzmaxima erfüllt sind. Vor der Röntgenröhre brachten wir weiterhin einen Einfachspalt an, genau wie vor dem CMOS-Sensor, um zu garantieren, dass wir die Röntgenstrahlung nur gradweise registrieren. Bei dem eigentlichen Versuch führen wir nun die Webcam mit der Drehschiene durch das Spektrum der Röntgenstrahlung. Wir machten rund um den Kristall Aufnahmen von je 1000 Bildern und addierten diese auf. Die einzelnen Punkte auf dem addierten Bild zählten wir und übertrugen sie in ein Diagramm. Ein Erfolg! Das Diagramm (Abbildung 7.5), das wir erhielten, entspricht dem aus der Literatur bekannten Diagramm von der Braggschen-Drehkristallmethode. Um ein Optimum zwischen Zeitaufwand und Ergebnis zu erhalten nutzten wir einen 3mm großen Spalt. Der Vorteil hierbei ist, dass ein Schüler dieses Experiment ohne Zeitnot in einer Doppelstunde Physik durchführen kann, da ungleich mehr Photonen detektiert werden, als bei einem 1mm Spalt. Allerdings erhält man so keine saubere Trennung der K_{α} - und K_{β} -Linie.

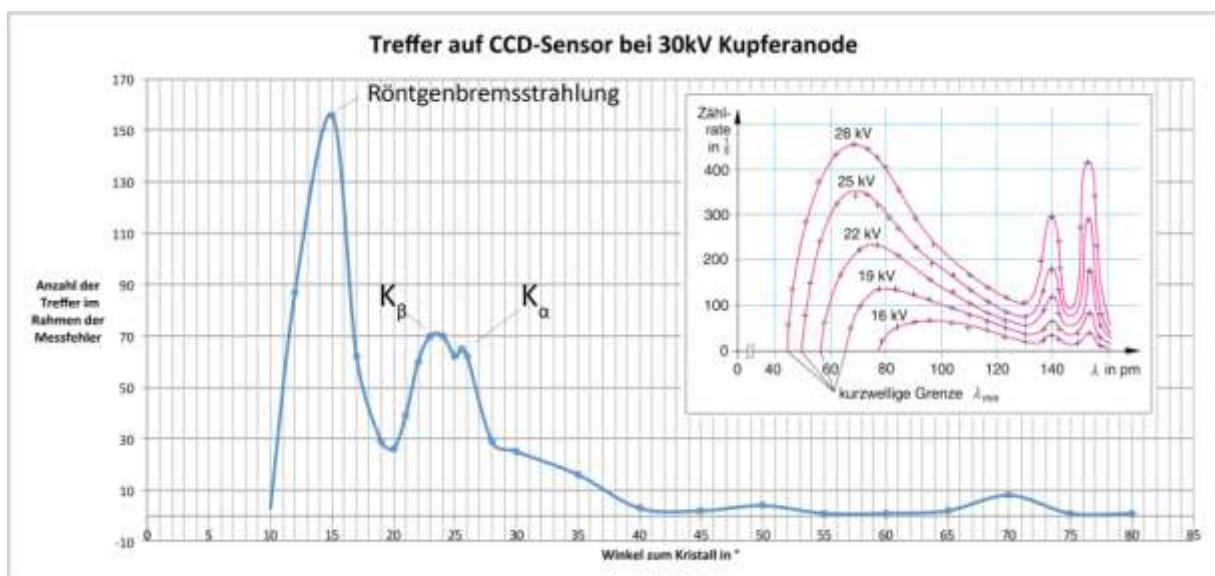


Abb. 7.5: Röntgenspektrum einer Cu-Anode (30 kV), aufgenommen mit einer Webcam

Wie oben schon erwähnt, lässt sich die Interferenzreflexion am Kristall nur mit dem Wellenmodell erklären! Die registrierten Pixel (siehe Abbildung 7.6) zeigen aber, dass die registrierte Strahlung Teilchencharakter besitzen muss.

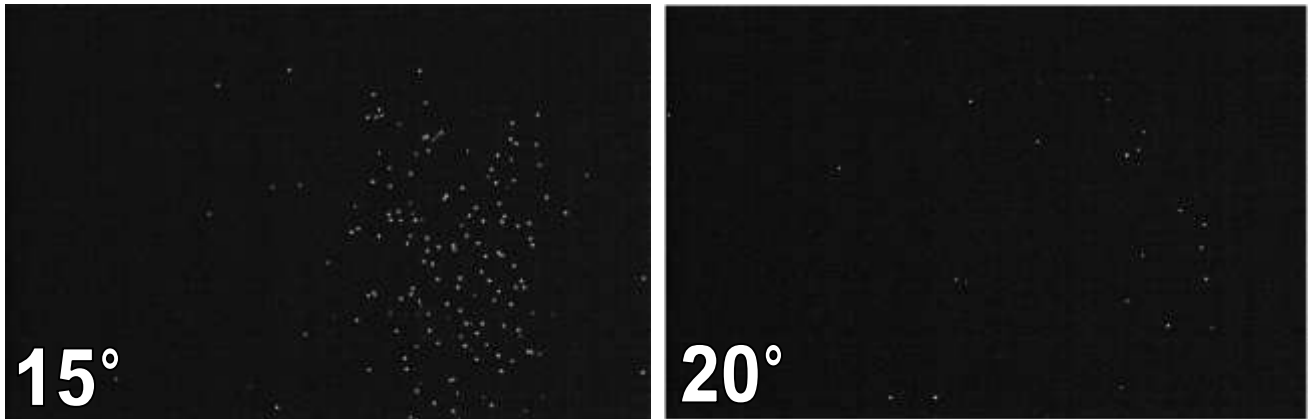


Abbildung 7.6: Aufaddierte Bilder mit Gradangabe.

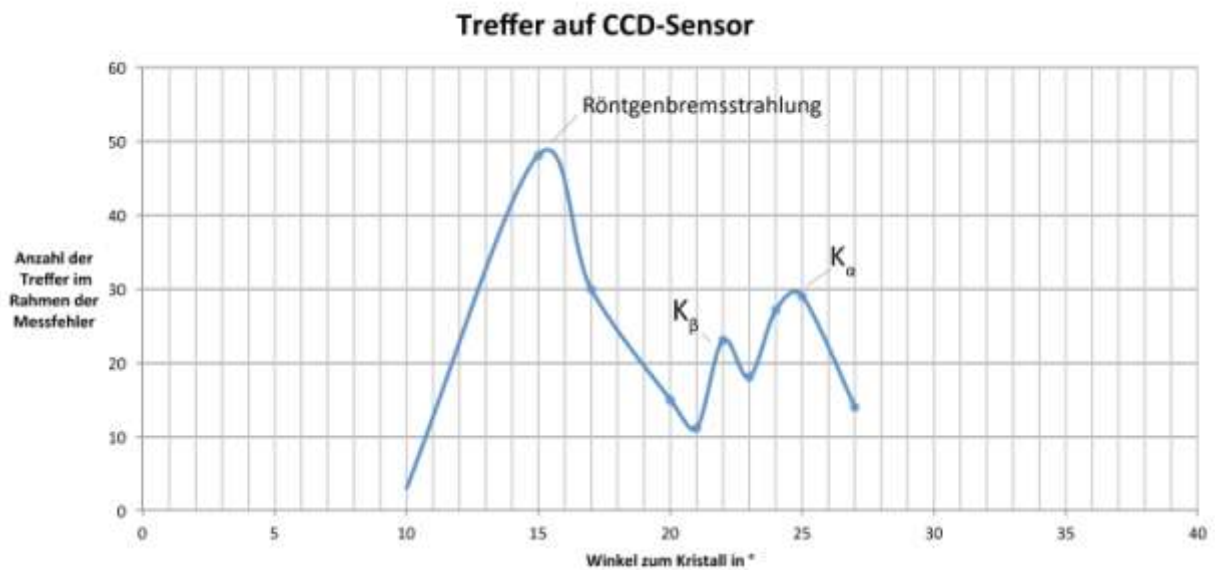


Abbildung 7.7: Bragg-Messung unter verändertem Messaufbau

8. Bildverwertung mit dem Programm NeuroCheck

Bei unseren ersten Aufnahmen mit der Drehkristallmethode konnten wir feststellen, dass je nach Winkel und Anzahl der aufgenommenen Bilder, viele Punkte auf dem addierten Bild erscheinen. Bei 1000 aufgenommenen Bildern sprechen wir von einer Größenordnung um die 160 Treffer im Bereich

des Bremsstrahlungsmaximums. Zwar kann man diese Punkte im Unterricht von den Schülern auszählen lassen (didaktisch wertvoll?), jedoch kann diese Arbeit sehr langwierig und weiterhin nicht objektiv genug sein, da man manchmal nicht genau genug abschätzen kann ob ein Pixel wirklich belichtet ist oder nicht. Um dieses Problem zu umgehen suchten wir eine Lösung um die ausgelösten Pixel automatisch zu zählen. Hierbei stießen wir auf die Software NeuroCheck. Diese wird zum Beispiel in Pfandannahmeautomaten verwendet. Hierbei zählt die Software wie viele Flaschen im Getränkekasten sind und gibt entsprechend zur Anzahl den Pfand aus. NeuroCheck kostet zwar Geld, sobald man eine Kamera aktiv ansteuern möchte, wie es im Fall des Automaten nötig wäre, jedoch ist das Feature der Bildanalyse in der Demoversion kostenlos verwendbar und zeitlich unbegrenzt. Innerhalb von NeuroCheck kann man sogenannte „Einzelprüfungen“ selbst verfassen. Das bedeutet, dass man dem Programm vorgibt, wie es ein Bild verwerten soll. Das Verfassen dieser Einzelprüfung ist nicht ganz einfach, jedoch konnten wir nach einigen Versuchen ein Ergebnis vorweisen, das die addierten Bilder von Giotto so analysieren kann, dass die belichteten Pixel gezählt und ein entsprechendes Ergebnis ausgegeben wird. Zunächst wird das aufaddierte Bild aus Giotto in das Programm NeuroCheck geladen. Dies geschieht über den Schritt „Bild in Speicher übertragen“. Der folgende und wichtigste Schritt ist es, die passende „Binärschwelle“ zu erzeugen. Sie ist verantwortlich dafür, wie empfindlich NeuroCheck auf belichtete Pixel reagiert. Hier sind einige Erfahrungswerte von Nutzen, die wir nach langem hin und her einsetzen konnten. Nach dem Erkennen der belichteten Pixel erzeugt NeuroCheck nun die Arbeitsbereiche binär. Jedes erkannte belichtete Pixel wird somit zu einem Arbeitsbereich und gezählt. Zum Schluss gibt NeuroCheck nun einen Wert aus, den man im Folgenden in ein Excel-Diagramm übertragen kann. Somit konnten wir das Programm so einstellen, dass es objektiv das Bild nach einer Schwellwert Überschreitung untersucht und diese offensichtlich belichteten Pixel zählt. Somit gelingt eine komplette Auswertung der einzelnen Winkel, von der Aufnahme, bis zu den gezählten Pixeln in nur rund 3 Minuten bei einer Bildanzahl von rund 1000 Bildern pro Winkelmessung.

9. Messversuche zu Debbye-Scherrer

Eine weitere Möglichkeit den Wellencharakter von Röntgenstrahlung nachzuweisen haben wir bereits erörtert: Das Debbye-Scherrer-Verfahren. Hierzu benötigt man jedoch monochromatische Röntgenstrahlung. Diese stand uns allerdings bis dahin nicht zur Verfügung, jedoch sind wir zu dem Schluss gekommen, dass die unter einem bestimmten Winkel ausgestrahlte Röntgenstrahlung bedingt durch die Bragg-Bedingung nur eine Wellenlänge besitzt. Dies wollten wir uns zu Nutzen machen und bauten einen entsprechenden Versuchsaufbau auf, der aus der Abbildung 9.1 ersichtlich wird.

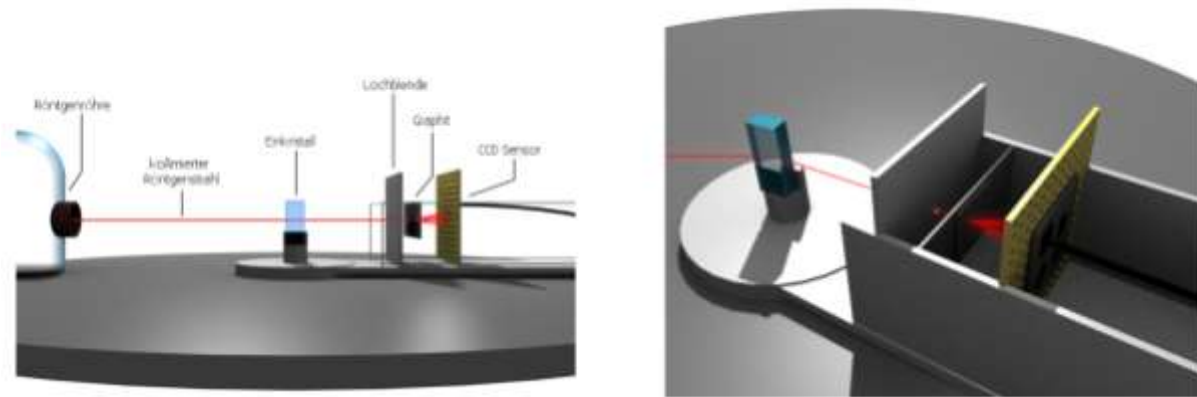


Abbildung 9.1: Debbye-Scherrer-Aufbau

Das weiße Röntgenlicht trifft auf einen NaCl-Einkristall und wird an ihm gebeugt. Mit der Drehkristallschiene bewegten wir den Sensor in das Maximum der Bremsstrahlung. Vor dem Sensor brachten wir weiterhin eine Lochblende an hinter der etwas Graphitpulver angebracht war. Durch die einzelne Wellenlänge erhofften wir, dass ein Debbye-Scherrer Muster entsteht. Nach einer Messung von ca vier Stunden erhielten wir nach Addition das Bild in Abbildung 9.2.



Abbildung 9.2: Messergebnis der Debbye-Scherrer Addition

Eine Ähnlichkeit mit dem bekannten Debbye-Scherrer-Diagramm ist leider nicht erkennbar. Dies liegt nach unserer Überlegung daran, dass die Intensität der Röntgenstrahlung bei der Belichtungszeit von vier Stunden nicht hoch genug ist. Die Strahlung wird anfangs durch die Bragg-Reflexion, anschließend durch die Lochblende deutlich in ihrer Intensität gemindert, da nur eine Wellenlänge hinter dem Einkristall genutzt werden kann, welche schon eine schwache Intensität besitzt, so dass

nur relativ wenige Photonen auf den Sensor treffen bzw. den Sensor erreichen. Bei einer deutlich längeren Belichtungszeit würde ein bekanntes Muster entstehen. Da unser Ziel allerdings in einem Schülerversuch lag, ist eine Messung des Debbye-Scherrer-Diagramms nicht sinnvoll. Nach unserer Meinung haben wir mit der Bragg-Messung bereits eine optimale Lösung gefunden.

10. Fazit

Mit der von uns entwickelten neuen und sehr preiswerten Methode können Physikschrüler nun in einer Doppelstunde durch selbstständiges Experimentieren nachvollziehbar erfahren, dass elektromagnetische Wellen weder Wellen im klassischen Sinne sind, noch aus Teilchen im klassischen Sinne bestehen. Sie erleben, dass Photonen Quantenobjekte sind, über deren Auftreffort auf dem CCD- oder CMOS-Sensor man nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen kann. Erst bei einer großen Zahl von auftreffenden Photonen erkennt der Schüler, dass aus der klassischen Physik bekannte Interferenzmuster. Es gelang uns, einen Versuch zu schaffen, der so in der Literatur noch nicht verzeichnet ist.

11. Quellen und Bildverzeichnis

<http://www.giotto-software.de/>

<http://www.quantenphysik-schule.de/wesenszuege.htm>

http://www.franz-oberthuer-schule.de/html/cms/cms/upload/projekte/homepage_phy/welleiteilchen/dualismus.html

<http://www.ccd-sensor.de/html/spektrum.html>

<http://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor>

http://de.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_Device

Modellierung und Simulation physikalischer Eigenschaften photonenzählender Röntgenpixel-detektoren für die Bildgebung von Jürgen Durst, 2008

Three demonstration experiments on the wave and particle nature of light

von A. Weis*, R. Wynands*; Physik und Didaktik in Schule und Hochschule; PhyDid 1/2 (2003) S.67-73