



Fourieroptik

Enno Middelberg

editiert und erweitert von

Adam Enders

13. Januar 2023

Dieser Versuch soll Eigenschaften der Fourier-Transformation anhand eines Versuchsaufbaus auf einer optischen Bank demonstrieren. Außerdem sollen Eigenschaften des im Versuch benutzten periodischen Gitters ausgemessen werden.

Die mit “Vorbereitung” gekennzeichneten Aufgaben sind *vor* der Durchführung des Versuchs zu erledigen (und werden gegebenenfalls abgefragt), und die Ergebnisse, soweit möglich, sollen im Protokoll beschrieben werden. Die mit “Aufgabe” gekennzeichneten Aufgaben sind Ergebnisse der Versuchsdurchführung. Insbesondere das Experimentieren mit den Java-Applets ist sehr aufschlussreich, und daher notwendiger Bestandteil der Vorbereitung. Wenn Sie keine Möglichkeit haben, die Applets auszuführen, wenden Sie sich bitte an den Versuchsleiter!

Vorkenntnisse: Geometrische Optik, Wellenoptik, Fourier-Transformation, Laser, CCD-Kamera, Fehlerrechnung, experimentelles Geschick

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
2	Versuchsaufbau	2
3	Durchführung	4
3.1	Aufbau	4
3.2	Teilversuch A	5
3.3	Teilversuch B	5

1 Einführung

Die Fourier-Transformation ist von nicht zu unterschätzender Bedeutung in der Physik und der Computertechnik. Eine ihrer Implementationen, die Fast Fourier Transform (FFT), wird gelegentlich als der am häufigsten benutzte Algorithmus auf dem Planeten bezeichnet.

Die Fourier-Transformation ist eine Integraltransformation, die geeignet ist, z.B. ein zeitabhängiges Signal in Frequenzkomponenten zu zerlegen. So kann analysiert werden, welche Frequenzanteile stark vertreten sind und welche nicht.

Ein Sonderfall der Fourier-Transformation ist die Fourier-Reihe. Hier wird eine periodische Funktion mit Hilfe der Summe von Sinus- und Kosinusfunktionen dargestellt.

Vorbereitung 1 Experimentieren Sie mit dem “Fourier Series” Java-Applet¹ (dieses Applet kann auch als Zip-Archiv vom Versuchsleiter bezogen werden). Versuchen Sie, ein Gefühl dafür zu entwickeln, wie sich die Zu- und Wegnahme einzelner Fourier-Komponenten auf das Ergebnis auswirkt. Berechnen Sie die relativen Amplituden der ersten 8 Koeffizienten der Fourier-Entwicklung einer Sägezahnfunktion:

$$f(t) = \frac{2h}{\pi} \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t \mp \dots \right] \quad (1)$$

und setzen Sie eine Sägezahnfunktion “von Hand” zusammen (Koeffizienten und Screenshot ins Protokoll).

Wie verändert sich die Zusammensetzung der Fourier-Komponenten, wenn eine Funktion entlang der x -Achse verschoben wird? Wann besteht die Fourier-Reihe ausschließlich aus Sinus- bzw. Kosinuskomponenten?

Im allgemeinen handelt es sich bei der “Frequenz” um den bekannten Frequenzbegriff. In diesem Versuch jedoch wird kein zeitliches Signal in ein Frequenzsignal umgewandelt, sondern es wird ein zweidimensionales Bild in Fourier-Komponenten zerlegt, diese werden manipuliert und anschließend wieder zurücktransformiert, um den Effekt zu beobachten. Daher spricht man hier auch von “Raumfrequenzen”.

Vorbereitung 2 Experimentieren Sie mit dem “Discrete Fourier Transform Viewer” Java-Applet². Hier können Sie ein Bild hochladen (rechte Menüleiste, “Load Image”) und Fourier-transformieren, die Transformation manipulieren (zweites Drop-Down-Menü, “Mouse = Draw [shape]”) und die Auswirkungen in der Rücktransformation beobachten.

Wie sieht die Fouriertransformation einer Delta-Komponente (ein weißer Pixel in einem ansonsten schwarzen Bild) aus? Wo in der Fourierebene sind welche Informationen enthalten (große / kleine Strukturen)? Wie funktionieren der Hochpass- und Tiefpassfilter? Finden Sie alltägliche (und ich meine alltäglich!) Beispiele für die Anwendung der Fourier-Transformation.

2 Versuchsaufbau

Das Licht eines Helium-Neon-Lasers ($\lambda=632.8$ nm) wird durch eine Optik aufgeweitet und mit dem Licht ein Kreuzgitter G beleuchtet. Die Linse L1 im Abstand f_{L1} bildet das Gitter in der Brennebene ab. Dies ist die Fourier-Ebene, in der die Fourier-Transformation des Gitters manipuliert werden kann. Nach Umlenkung durch zwei Planspiegel sorgt eine zweite Linse L2

¹<http://www.falstad.com/fourier>

²<http://www.falstad.com/fft/>

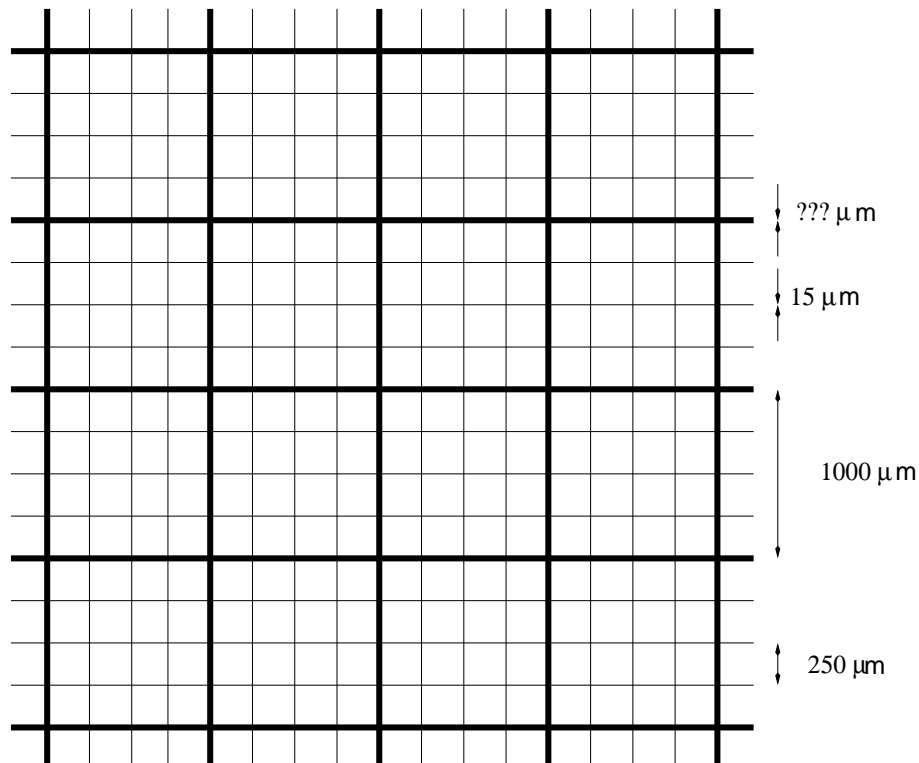


Abbildung 1: Schematische Darstellung des im Versuch verwendeten Gitters. Der Abstand zwischen den Strichmitten beträgt $250 \mu\text{m}$, die Periodizität $1000 \mu\text{m}$, die Breite der dünnen Striche $15 \mu\text{m}$ und die Breite der dicken Striche soll im Versuch durch Ausmessen der Strukturfunktion bestimmt werden.

für die Rücktransformation aus der Fourier-Ebene. Eine CCD-Kamera nimmt das Bild auf und stellt es auf einem Bildschirm dar. Zwischen dem Strahlaufweiter und dem Gitter befindet sich noch ein Polarisationsfilter, mit dem die Intensität des Lichtes reguliert werden kann.

Das Kreuzgitter G besteht aus einer Abfolge von jeweils drei dünnen ($15 \mu\text{m}$) und einem dickeren Strich, dessen exakte Breite im Versuch bestimmt werden soll. Alle Strichmitten haben sowohl in x- als auch in y-Richtung einen Abstand von $250 \mu\text{m}$ voneinander. Die Gitterkonstante ist also $d = 250 \mu\text{m}$, jedoch ist die Periodizität des Gitters $1000 \mu\text{m}$.

Vorbereitung 3 *Informieren Sie sich über die prinzipielle Arbeitsweise eines He-Ne-Lasers und einer CCD-Kamera. Welchen Grund kann es haben, wenn auf dem Bildschirm kein Bild zu sehen ist? Warum kann die Intensität des Laserlichtes mit Hilfe eines Polarisationsfilters verändert werden (recherchieren Sie, ob das Licht eines He-Ne-Lasers polarisiert ist)? Wie können Sie feststellen, ob dieser spezielle Laser polarisiert ist oder ob das Licht erst im Polarisator polarisiert wird?*

Im Unterschied zur Abbildung einer herkömmlichen Lichtquelle jedoch treten hier Effekte auf, die auf die Kohärenz des Laserlichtes zurückzuführen sind. Da zwei Lichtstrahlen, die von verschiedenen Punkten des Gitters ausgehen, eine stabile relative Phase haben, ist das von ihnen ausgehende Interferenzmuster stabil. In der Fokalebene von L1 entsteht durch diese stabile Interferenz der zahlreichen Lichtstrahlen die Fourier-Transformation des Gitters, und mit Hilfe einer zweiten Linse kann das Ursprungsbild wieder hergestellt werden.

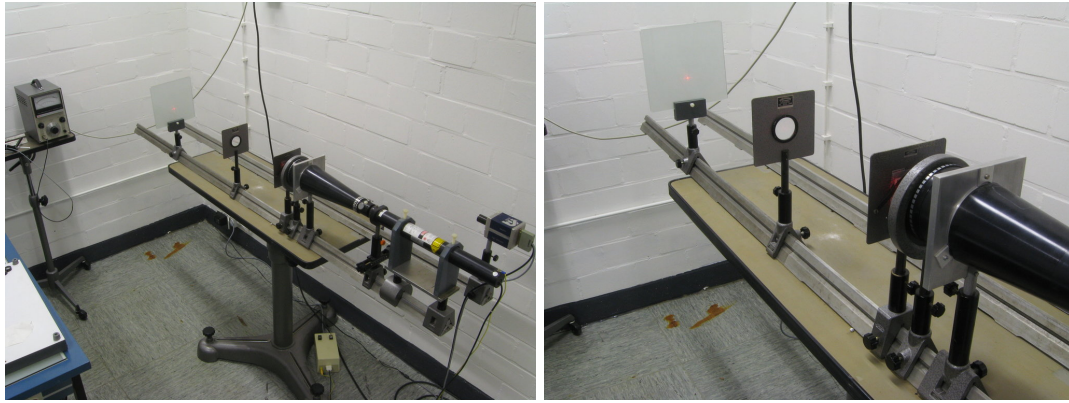


Abbildung 2: *Links:* Übersicht des Arbeitsplatzes. *Rechts:* Erster Aufbau. Auf dem Schirm sollten Sie die Fouriertransformation des Gitters sehen, die von einem Kreuz von Punkten dominiert wird.

3 Durchführung

3.1 Aufbau

Bauen Sie den ersten Teil des Versuches auf wie in Abbildung 2 gezeigt: Laser - Polarisationsfilter - Gitter - Linse L1 - Schirm. Bei geeigneter Wahl der Abstände der Komponenten sehen Sie auf dem Schirm die Fouriertransformation des Gitters.

Aufgabe 1 *Beschreiben Sie das Muster. Beleuchten Sie danach das Gitter mit der Natriumdampfampe. Stellen Sie dazu die Lampe direkt vor dem Polfilter auf und rücken Sie Gitter, Linse und Schirm um einen entsprechenden Abstand nach links. Beschreiben Sie die Veränderung der Abbildung und erklären Sie Ihre Beobachtung.*

Entfernen Sie nun den Schirm und bauen Sie die weiteren Komponenten des Versuchs - die Planspiegel, die Linse L2 und die Kamera - so auf, dass Sie auf dem Bildschirm das Gitter erkennen (Abbildung 3). Gegebenenfalls muss dazu die Intensität des Laserlichtes reguliert werden. Bringen Sie dann die Maskenhalterung in die Fourierebene. Je präziser Sie die Maskenhalterung in x,y und z plazieren, desto besser werden die Ergebnisse im folgenden Versuchsteil.

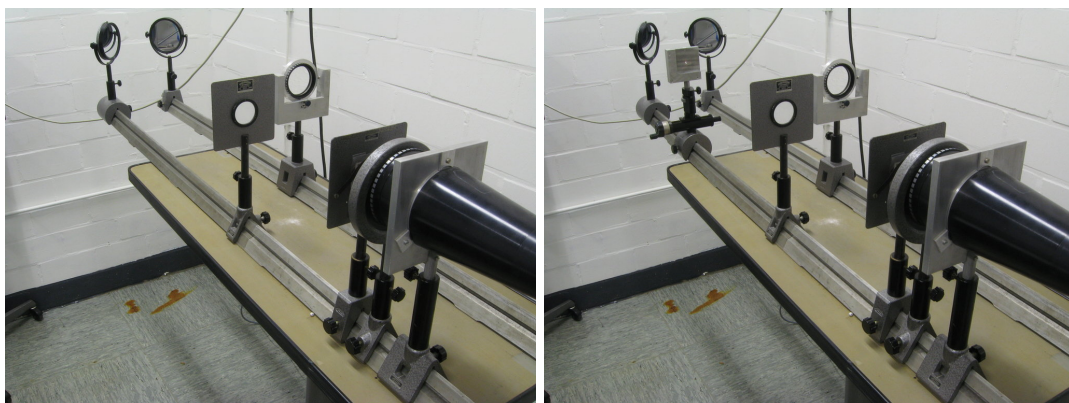


Abbildung 3: Zweiter Aufbau. *Links:* Mit diesem Aufbau und geeignet gedimmtem Laser sollten Sie ein Bild des Gitters auf dem Monitor sehen. *Rechts:* Die Folgen der Manipulation mit Masken in der Fourier-Ebene können auf dem Monitor beobachtet werden.

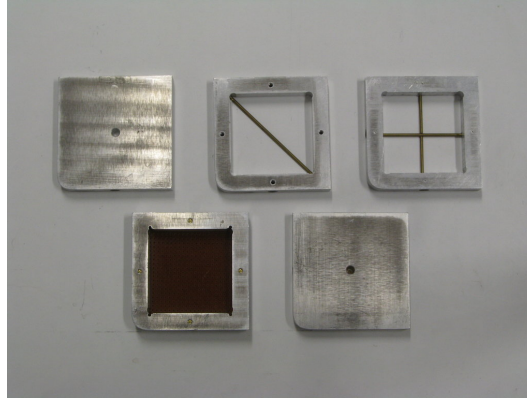


Abbildung 4: Die im Versuch verwendeten Masken.

3.2 Teilversuch A

Nun manipulieren Sie mit den Masken (Abbildung 4) den Anteil der Fouriertransformation, der durch L2 zurücktransformiert wird. Halten Sie ein Stück Papier direkt hinter die Blende um zu veranschaulichen, welche Ordnungen genau noch in die Rücktransformation eingehen.

1. MA: Ausblenden höherer Ordnungen. Denken Sie bei der Interpretation an Ihre Versuche mit dem 2D Java Applet.
2. MB: Ausblenden der nullten Ordnung. Überlegen Sie hier, welche physikalische Größe in der Fourier-Ebene manipuliert wird, und welche von der CCD-Kamera registriert wird.
3. MC: Ausblenden des Beugungskreuzes
4. MD: Ausblenden aller Ordnungen mit $(2m+1, 2n+1)$, $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Überlegen Sie, wie die Fourier-Transformation eines anderen (engeren/weiteren) Gitters aussehen würde.
5. ME: Ausblenden der nullten und höherer Ordnungen (hier sollen nur die Maxima mit $m, n = \pm 1$ durchgelassen werden, was geschickte Justage erfordert). Blenden Sie zusätzlich mit Hilfe von Papierschnipseln paarweise die verbleibenden Maxima aus.

Aufgabe 2 *Beschreiben Sie genau, welches Muster Sie nach dem Einbringen jeder Maske auf dem Bildschirm beobachten. Versuchen Sie zu erklären, wie es zu dem beobachteten Effekt kommt.*

3.3 Teilversuch B

Das Interferenzbild eines Strichgitters kann aufgefasst werden als die Multiplikation zweier Funktionen. Die erste repräsentiert das Interferenzbild eines aus unendlich schmalen Strichen bestehenden (=idealisierten) Gitters, und die zweite repräsentiert die Verteilung des Lichtes wie sie durch die Beugung an einem Einfachspalt zustande kommt. Die genaue Intensitätsverteilung des Lichtes in der Fourier-Ebene lässt also Rückschlüsse auf die Breite der Striche des Gitters zu. Durch präzises Ausmessen der Intensitäten der Interferenzmaxima soll in diesem Versuchsteil die Dicke der breiteren Striche des Gitters bestimmt werden.

Erst jenseits des ersten Minimums der Strukturfunktion, zwischen dem 23. und 31. Maximum des Interferenzbildes, kann diese Messung durchgeführt werden, denn hier ist die Strukturfunktion relativ stark abhängig von der Dicke der breiten Striche des Gitters. Andererseits ist die Intensität der Maxima in diesem Bereich eher gering, und eine Intensitätsmessung ohne vorherige Kenntnis der Positionen der Maxima wird sich schwierig gestalten. Daher sind einige vorbereitende Schritte notwendig, die im Folgenden erläutert werden.

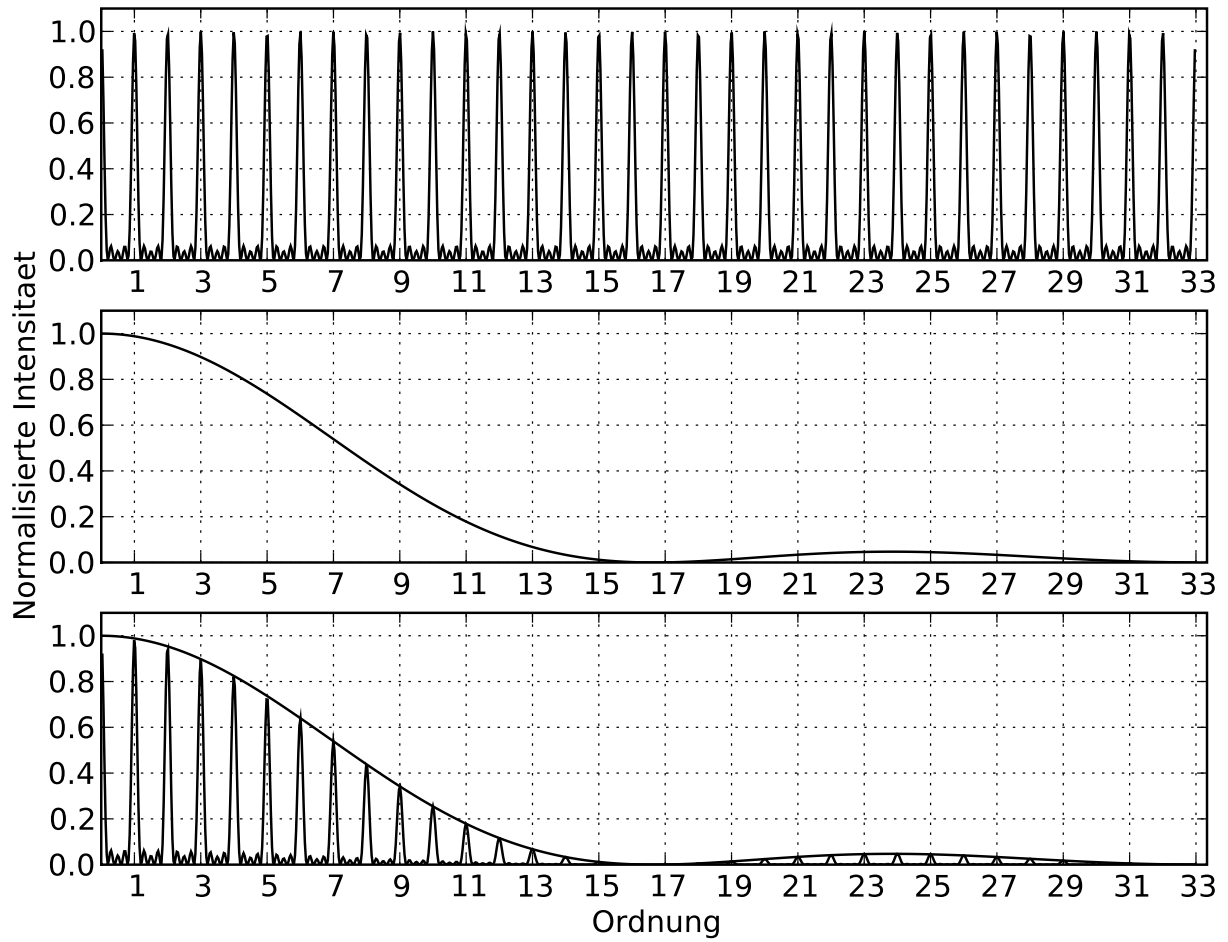


Abbildung 5: *Oben:* Intensitätsverlauf eines idealisierten Gitters mit unendlich dünnen Strichen; *Mitte:* Intensitätsverlauf eines Einfachspaltes; *unten:* Intensitätsverlauf eines realen Gitters. Die Kurve aus der mittigen Abbildung ist zur Verdeutlichung ebenfalls eingetragen.

3.3.1 Aufnahme des Interferenzmusters

Positionieren Sie die Linse L1 direkt vor dem Gitter, und bringen Sie den teildurchlässigen Schirm in die Fourier-Ebene. Setzen sie anschließend die Systemkamera in die dafür vorgesehene Halterung zwischen Schirm und Planspiegel und schließen sie den Fernauslöser an (Abbildung 6). Der Monitor wird für den weiteren Versuch nicht mehr benötigt und kann abgeschaltet werden.

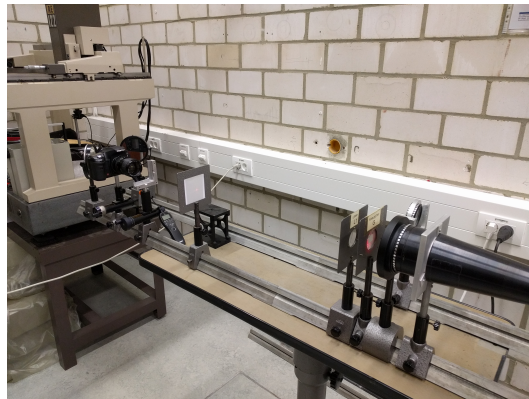


Abbildung 6: Dritter Aufbau. Beachten Sie, dass die Linse L1 direkt vor dem Gitter steht.

Stellen Sie nun am Kameraobjektiv die maximale Zoom-Stufe ein und wählen Sie eine Blende von $f/11$. Nehmen Sie (bei ausgeschaltetem Laser!) einige Probeaufnahmen des Schirms auf, wobei Sie den Kamerafokus variieren. Wiederholen Sie dies so lange, bis Sie die optimale Bildschärfe im Bereich des Schirms erzielt haben.

Vorbereitung 4 Welche Objektiveigenschaft wird mit der Blendenzahl f ausgedrückt? Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Werte von f auf das resultierende Bild?

Mit den so experimentell ermittelten Einstellungen kann nun Versuchsteil B durchgeführt werden. Schalten Sie die Raumbelichtung aus und den Laser ein, und fotografieren Sie unter Zuhilfenahme des Fernauslösers das Interferenzmuster auf dem Schirm. Um bei der Auswertung möglichst gute Ergebnisse zu erzielen, sollten die Intensitäten der Interferenzmaxima höherer Ordnung möglichst groß sein, jedoch ohne dass eine Sättigung der CCD im Bereich der Maxima niedriger Ordnung auftritt. Um dies gewährleisten zu können, machen Sie eine Serie von Aufnahmen unter Variation der Belichtungszeit ($t_{\text{exp}} \in [0.05 \text{ s}, \dots, 2 \text{ s}]$), aus der Sie später die zur Auswertung am Besten geeignete Aufnahme ermitteln.

Schalten Sie anschließend alle noch verwendeten Geräte (Laser, Kamera, Fernauslöser) ab und übertragen Sie Ihre Daten von der SD-Karte der Kamera auf ein Speichermedium Ihrer Wahl (ein Lesegerät für SD-Karten ist vor Ort vorhanden). Der Laborteil des Versuchs ist hiermit abgeschlossen.

3.3.2 Bildbearbeitung und -konversion

Zur Bildanalyse und Intensitätsmessungen³ werden wir das unter Astronomen weit verbreitete Programm ALADIN⁴ nutzen. Da unser Bild noch das falsche Dateiformat aufweist und zudem überflüssige Informationen enthält, sind noch ein paar Vorbereitungen notwendig.

³Streng genommen messen wie hier mit der an der CCD abgegriffenen Spannung die Anzahl an gebildeten Elektronen-Loch-Paaren, was eine dimensionslose Größe ist. Man spricht hier auch von *counts*. Da diese Größe unter der Annahme einer konstanten Detektoreffizienz direkt proportional zur Intensität ist, werden wir aus Gründen der Lesbarkeit auch im Folgenden von Intensitäten sprechen, auch wenn dies formell inkorrekt ist.

⁴<https://aladin.u-strasbg.fr/>

Die hier verwendete Kamera speichert ihre RAW (d.h. verlustfreie) Bilder im .dng-Format, das wir aus pragmatischen Gründen mit der unter Amateurastronomen beliebten Freeware IRIS⁵ in ein ALADIN-taugliches Dateiformat konvertieren werden. In der Astronomie ist das vor über vier Jahrzehnten entwickelte Flexible Image Transport System (FITS) bis heute absoluter Standard.

Um eine RAW-Datei entsprechend zu konvertieren öffnen Sie IRIS und laden ihre Bilddatei über “File → Load a RAW file” in das Programm. *Hinweis: Stellen Sie sicher, dass Sie nicht den regulären Öffnen-Dialog verwenden, da dies in einer ungewünschten FITS-Dateiausgabe mit mehreren Ebenen endet.*

Vorbereitung 5 *Machen Sie sich Gedanken dazu, wie Farbbilder in der Fotografie zustande kommen und recherchieren Sie, welche Rolle die Bayer-Matrix im Kontext von CCDs dabei spielt. Was erwarten Sie auf dem RAW-Bild an der Position der Interferenzmaxima zu sehen? Decken sich die Beobachtungen mit ihren Erwartungen?*

Bevor wir die Datei nun als FITS speichern, werden wir aufgrund der zuvor angestellten Überlegungen zur Bayer-Matrix die “überflüssigen” Informationen aus unserem Bild entfernen. Dies lässt sich wie hier im Fall eines monochromatischen Bildes am einfachsten durch sogenanntes Binning der einzelnen 2×2 Bayer-Elemente erzielen. Sie finden diese Funktion im Menüreiter “Geometry → Binning”. Wählen Sie in dem erscheinenden Dialogfeld einen Binning-Faktor von Zwei, um die Pixelintensitäten der einzelnen 2×2 -Bereiche aufzusummieren. Schließlich speichern Sie ihr Bild mittels “File → Save”, wobei Sie im Speichern-Dialog FITS als Dateiformat auswählen.

Führen Sie das oben beschriebene Prozedere für jede Ihrer Aufnahmen durch.

3.3.3 Bildanalyse mit ALADIN

Die im vorherigen Abschnitt generierten FITS-Dateien können nun mit ALADIN eingehend untersucht werden. Dieses Kapitel dient dazu, die hier relevanten Grundfunktionen ALADINS zu erläutern. Die fett gedruckten Ziffern und Buchstaben beziehen sich auf die entsprechend markierten Bereiche in der GUI (Abbildung 7).

Das Laden von Dateien funktioniert simpel via Drag & Drop. Ziehen Sie dazu Ihre Datei in den Bildebenenbereich **[A]** am rechten unteren Rand des Fensters. Gegebenenfalls hat ALADIN beim Start ein astronomisches Beispielbild geladen. Dies können Sie getrost löschen, indem Sie die entsprechende Bildebene auswählen und auf “Del” **[2]** klicken. *Tipp:* Sie können ohne Weiteres mehrere Bilder gleichzeitig in ALADIN geöffnet haben. Ziehen Sie dazu einfach Ihre weitere(n) Datei(n) in die Liste der Bildebenen. Sie können eine Bildebene im Hauptfenster anzeigen lassen, indem Sie den Haken vor der entsprechenden Ebene setzen. Beachten Sie untenstehende Hinweise zur Kalibration!

Für die spätere Intensitätsmessung benötigt ALADIN ein astrometrisch kalibriertes Bild. Astrometrie spielt für unsere Aufnahme offensichtlich keine Rolle, weswegen es genügt, ALADIN ein vollständig kalibriertes Bild “vorzugaukeln”. Wählen Sie dazu das zu kalibrierende Bild aus der Liste und wählen Sie den Menüpunkt “Image → Astrometrical calibration” **[B]** aus. Die konkreten Werte sind hier unerheblich, daher können Sie die voreingestellten Standardwerte übernehmen und mit einem Klick auf “Create” im neu erschienenen Fenster ist dieser Schritt abgeschlossen. Schließen Sie das Dialogfenster anschließend.

Wichtig: Die astrometrische Kalibration muss *als erster Schritt* nach dem Öffnen eines neuen Bildes und *für jedes Bild* durchgeführt werden. Wird z.B. erst eine Messung mit dem Photometry-Werkzeug versucht und dann die Kalibration durchgeführt, scheitern die weiteren

⁵<http://www.astrourf.com/buil/iris-software.html>

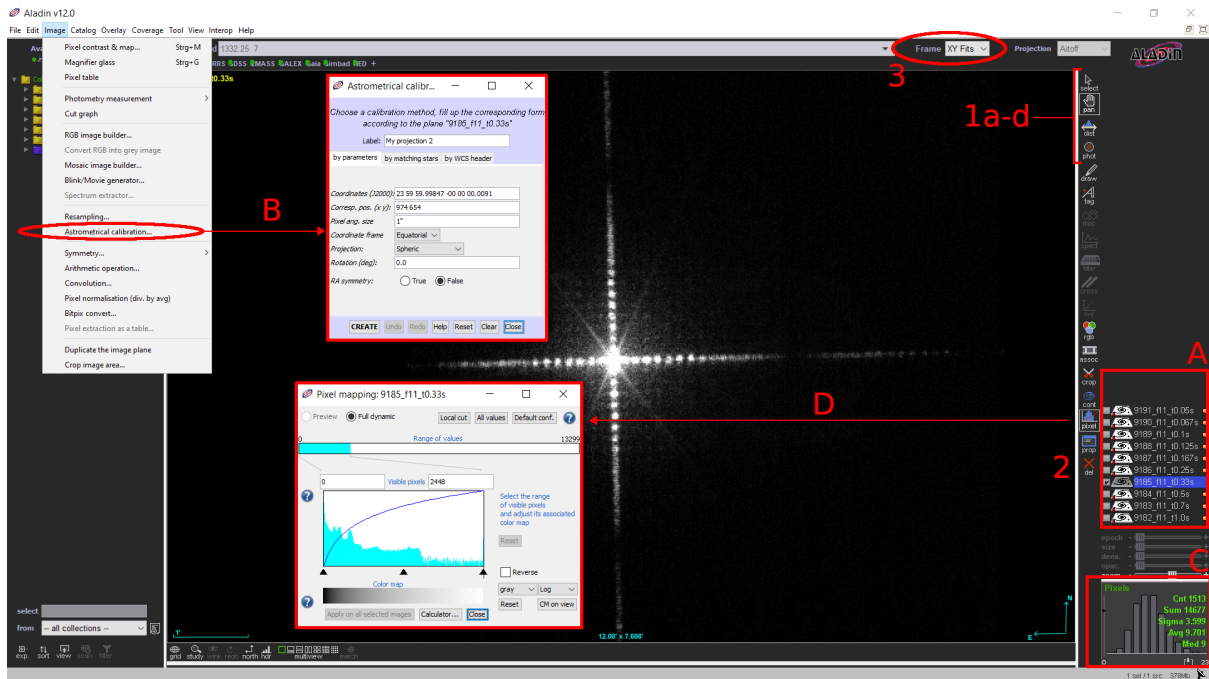


Abbildung 7: ALADINS GUI. Rot markierte Bereiche beziehen sich auf die entsprechenden Verweise im Text.

Messungen und liefern keine sinnvollen Werte. Einzig sichere Abhilfe verschafft dann ein Neustart von ALADIN.

Links neben den Bildebenen finden Sie eine Leiste mit verschiedenen Werkzeugen. Für uns sind hier vor Allem die ersten Vier relevant, die im Folgenden kurz erläutert werden:

- **select [1a]:** Hiermit können Sie von Ihnen gezeichnete Objekte (wie z.B. einen Entfernungsmaßstab oder eine photometrische Apertur, siehe unten) auswählen, skalieren und verschieben. Wollen Sie mehrere solcher Objekte gleichzeitig auswählen, ziehen Sie mit dem Select-Werkzeug einen Rahmen darum.
- **pan [1b]:** Verschiebt die aktuelle Bildansicht.
- **dist [1c]:** Ein "Lineal" zur Entfernungsmessung in der Bildebene. Da wir in diesem Versuch an den Abständen in Einheiten von Pixeln interessiert sind, müssen wir in Aladin noch die entsprechende Skala auswählen. Wählen Sie dazu in der oberen Menüleiste neben "Frame" die Option "XY Fits" [3] aus.
- **phot [1d]:** Mit diesem Werkzeug können sie einen kreisförmigen Bereich auf dem Bild als "photometrische Apertur" definieren und erhalten eine Statistik über die Intensitäten der Pixel innerhalb dieses Bereichs. Diese wird im unteren rechten Bereich des Fensters angezeigt [C] und umfasst Anzahl der Pixel, Summe, Standardabweichung, Durchschnitt und Median der Intensitäten.

Zuletzt sei erwähnt, dass die Darstellung verschiedener Intensitäten prinzipiell arbiträr ist und von der gewählten Skalierungsfunktion abhängt. ALADIN nutzt als Standardeinstellung eine lineare Skala. Um insbesondere schwache Features auf einem Bild besser sichtbar zu machen, bietet es sich an, niedrigen Intensitäten (relativ zur linearen Skala) überhöht darzustellen. In ALADIN können Sie dies mit dem Pixel-Werkzeug bewerkstelligen. Sie können z.B. im Drop-Down Menü am unteren rechten Rand des Dialogfelds [D] die Skalierungsfunktion auswählen;

hier stechen die schwachen Maxima bereits durch einfaches Ändern auf eine log- oder arcsinh-Darstellung weitaus deutlicher heraus.

3.3.4 Datenselektion

Wie weiter oben bereits erwähnt, verwenden wir zur Messung der Intensitäten idealerweise eine Aufnahme mit möglichst stark ausgeprägten Maxima höherer Ordnungen, ohne dass die hellen Maxima niedriger Ordnungen die CCD sättigen.

Zunächst wollen wir ein Gefühl für mögliche Störfaktoren für unsere Messungen bekommen. Hierzu eignen sich besonders gut die (farbigen) RAW-Bilder, die Sie mit vielen gängigen Bildbetrachtungsprogrammen⁶ öffnen können. Betrachten Sie zunächst eine der Aufnahmen mit moderat langer Belichtungszeit (z.B. 0.5 s), insbesondere in der Nähe des Zentrums des Beugungsmusters. Fallen Ihnen Phänomene auf, die eine Intensitätsmessung signifikant beeinflussen könnten? Welche Maxima sind hier besonders betroffen?

Entscheiden Sie aufgrund dieser Überlegungen, welches Maximum (möglichst niedriger Ordnung) Sie für die nachfolgende Aufgabe verwenden werden.

Legen Sie mit dem **phot**-Werkzeug eine Apertur so um das von Ihnen gewählte Maximum, dass Sie dies vollständig erfassen. Beachten Sie dabei, dass Sie keine zu große Ausdehnung für ihre Apertur wählen, da sich zwischen den Hauptmaxima noch mehrere Nebenmaxima niedriger Intensität befinden (vgl. Abb. 5). *Hinweis:* Wenn Sie vor Ihrer Messung sämtliche Bilder in ALADIN laden, genügt das Zeichnen einer einzigen Apertur. Durch Wechsel zu einem anderen Bild in der Ebenenansicht werden die mit dem **phot**-Werkzeug erfassten Werte automatisch aktualisiert, wenn Sie den passenden Bereich auf dem Bild auswählen.

Wenn Sie die Intensitäten auf diese Weise bestimmen, werden Sie mit Ihrer Messung nicht nur das Laserlicht, sondern auch zusätzliche Hintergrundeffekte erfassen. Welche solcher Effekte sind Ihnen bekannt oder fallen Ihnen hier auf? Wie können Sie anhand Ihrer Aufnahmen diese Effekte näherungsweise quantifizieren und Ihre Messdaten korrigieren? Diskutieren Sie kurz(!), wie es möglich wäre, diese Korrektur zu verbessern. Recherchieren Sie hierzu auch die Begriffe *flat-field*, *bias*- und *dark frame*.

Aufgabe 3 *Plotten Sie nun die (korrigierten) durchschnittlichen Intensitäten in Abhängigkeit der Belichtungszeit. In welchem Bereich stellt sich ein Zusammenhang dar, der Ihren Erwartungen entspricht? Fitten Sie eine entsprechende Funktion in diesem Bereich. Wie ändert sich die Güte des Fits, wenn Sie eine längere Belichtungszeit mit einbeziehen?*

Da spätere Messungen mit dem ersten Maximum beginnen, sollte auch dies nach Möglichkeit nicht gesättigt sein. Betrachten Sie das von Ihnen vermessene Maximum auf den gesättigten und ungesättigten Bildern. Welche Unterschiede fallen Ihnen auf?

Kombinieren Sie nun Ihre Erfahrungen und entscheiden Sie per Auge, bei welcher Belichtungszeit Sie alle Messungen der Maxima $n \geq 1$ ohne Berücksichtigung der Sättigungseffekte durchführen können. Begründen Sie Ihre Entscheidung.

3.3.5 Bestimmung der Strukturfunktion

Mit den vorhergehenden Vorbereitungen haben Sie nun alles in der Hand, um anhand einer Aufnahme mit geeigneter Belichtungsdauer die Intensitäten der Maxima zu bestimmen und mit den hier gegebenen Strukturfunktionen zu vergleichen.

⁶z.B. IrfanView, <https://www.irfanview.com/>

Vorbereitung 6 *Wie berechnet man Standardabweichung und Standardfehler? Und viel wichtiger: was bedeuten diese beiden Größen? Wie verändern sie sich, wenn mehr Messungen durchgeführt werden (z.B. 80 statt 8)?*

Für die Auswertung werden besonders die Intensitätsmessungen der Maxima höherer Ordnungen relevant sein werden. Aufgrund der schwachen Intensitäten der Maxima um $n \approx 16$ lässt sich die Ordnung eines der (bei geeigneter Skalierung sichtbaren, s.o.) Maxima im für uns interessanten Bereich nicht durch "Abzählen" bestimmen. Es muss also eine Vorhersage für die Position dieser Maxima getroffen werden, was sich anhand der deutlich detektierten Ordnungen $n = 1 - 9$ bewerkstelligen lässt.

Aufgabe 4 *Bestimmen Sie die Positionen der Interferenzmaxima der Ordnungen 1-9. Geben Sie eine realistische Einschätzung Ihres Messfehlers an.*

Hinweis: Beachten Sie, dass das Beugungsmuster in ihrer Aufnahme höchstwahrscheinlich nicht perfekt parallel zu den CCD-Reihen ihres Detektors läuft und die Maxima insbesondere für höhere Ordnungen einen deutlichen Versatz in y -Richtung aufweisen können.

Tragen Sie anschließend die Abstände der Maxima relativ zu einem geeigneten Referenzpunkt in ein Diagramm und leiten Sie mittels linearer Regression einen Funktionalzusammenhang her, der die Position eines Maximums in Abhängigkeit seiner Ordnung vorhersagt. Können Sie Ihre Vorhersage unter Zuhilfenahme der Maxima höherer Ordnungen noch verbessern?

Berechnen Sie zudem den mittleren Abstand \bar{x} zweier benachbarter Maxima. Wie können Sie gewährleisten, dass der Fehler möglichst gering wird?

Messen Sie nun zunächst die Intensitäten der Maxima $n = 1 - 9$. Zur Quantifizierung des Messfehlers vollführen Sie mindestens acht unabhängige Messungen des fünften Maximums unter der Annahme, dass dieser Fehler repräsentativ für die Maxima $n = 1 - 9$ ist. Korrigieren Sie ihre Messungen analog zu 3.3.4 für Hintergrundeffekte.

Mittels der aus der zuvor ermittelten Funktion abgeleiteten Positionen können Sie zudem die Intensitäten der schwachen Maxima ($n = 23 - 31$) messen. Schätzen Sie hier Ihren Messfehler analog zu oben unter Verwendung des 27. Maximums ab.

Aufgabe 5 *Tragen Sie die Intensitäten nun in das Diagramm aus Abbildung 8 ein, wobei Sie ihre Messwerte auf die Intensität des ersten Maximums normieren. Beachten Sie den zusätzlichen Fehlerterm durch die Normierung!*

Anhand des Vergleichs mit den gegebenen Strukturfunktionen können Sie nun entscheiden, welches Gitter mit welcher Strichdicke in diesem Versuch verwendet wurde.

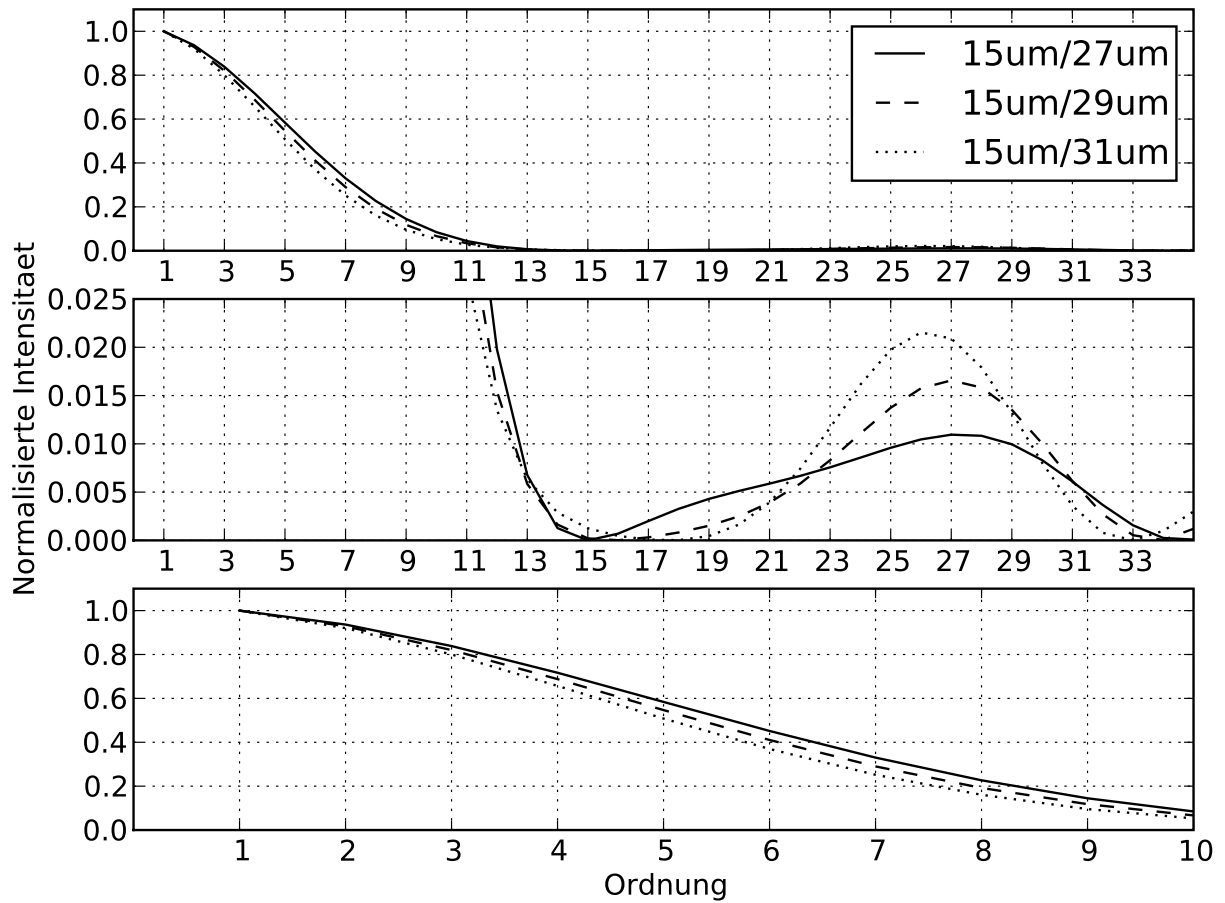


Abbildung 8: *Oben:* Strukturfunktion des im Versuch verwendeten Gitters. *Mitte und unten:* Ausschnittsvergrößerungen des obersten Diagramms.