

Protokoll: Spektroskopie der Sonne

Clemens Anschütz
Markus Pawellek

26. Januar 2016

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgaben	1
2 Grundlagen	2
2.1 Gitterspektrograph	2
2.2 CCD-Detektor	3
2.3 Sonnenspektrum	5
3 Aufbau und Durchführung	6
3.1 Bestimmung des Ausleserauschens des CCD-Detektors	6
3.2 Dunkelstromaufnahme	6
3.3 Überprüfung der Linearität	7
3.4 Kalibrierung des Spektrometers	8
3.5 Aufnahme des Sonnenspektrums	8
4 Messwerte und Auswertung	10
4.1 Bestimmung des Ausleserauschens	10
4.2 Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes	11
4.3 Linearität der CCD-Kamera	13
4.4 Vergleichsspektren von Hg-Cd und Ne	14
4.5 Auflösevermögen des Gitterspektrographen	15
4.6 Spektren des Sonnenlichts	15
5 Zusammenfassung	16
A Vergleichsspektren	18
B Beispiele des Sonnenspektrums	19

1 Aufgaben

- Messen Sie das Ausleserauschen des CCD-Detektors anhand von Bias-Aufnahmen.
- Bestimmen Sie den Dunkelstrom des CCD-Detektors bei verschiedenen Detektortemperaturen mit Hilfe von Dunkelbildern mit fester Belichtungszeit.
- Bestimmen Sie aus der Temperaturabhängigkeit die Bandlückenenergie des Halbleitermaterials der CCD.
- Überprüfen Sie die Linearität des CCD-Detektors.
- Bestimmen Sie die Eigenschaften des Gitterspektrographen, indem Sie durch die Aufnahme eines bekannten Spektrums die Dispersion und das spektrale Auflösungsvermögen für jeden der drei Spalte berechnen.
- Nehmen Sie ein Sonnenspektrum mithilfe des Gitterspektrographen auf und analysieren Sie es.

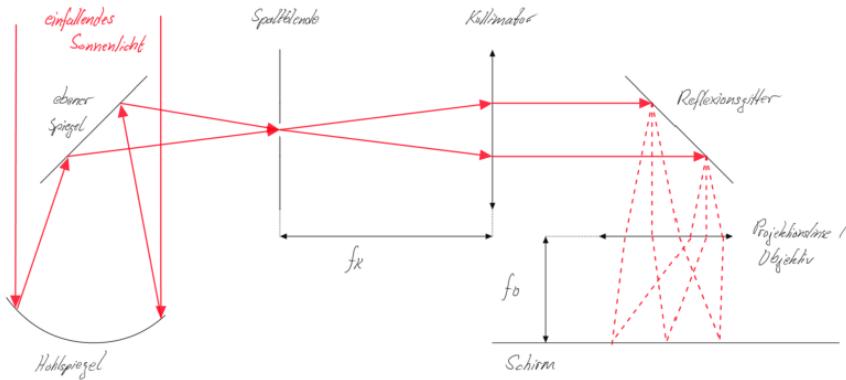


Abbildung 1: Skizze zum Aufbau des verwendeten Gitterspektrographen

f_K ...Brennweite Kollimator

f_O ...Brennweite Objektiv

2 Grundlagen

Für den durchgeführten Versuch stützen wir uns im Allgemeinen auf die folgenden Grundlagen des Gitterspektrographen und des CCD-Detektors. Die Theorie des Sonnenspektrums soll hier nur angerissen werden, da sie den Rahmen dieses Protokolls sprengen würde.

2.1 Gitterspektrograph

Der grundsätzliche Aufbau des im Versuch verwendeten Gitterspektrographen ist in Abbildung 1 gezeigt. Hierbei wird das Sonnenlicht durch einen Hohlspiegel gebündelt und durch eine Spaltblende zum Kollimator weitergeleitet. Durch den Spalt werden die Anteile des Lichts herausgefiltert, die nicht parallel zum Hohlspiegel eingefallen sind. Im Anschluss wird nun dieses divergierende Strahlenbündel mithilfe des Kollimators in ein rein paralleles Lichtbündel umgewandelt. Dieses trifft dann auf das Reflexionsgitter, welches wie ein typisches Gitter wirkt. Das Licht wird mit sich selbst interferieren, wodurch Beugungsmuster entstehen. Für große Entfernung des Schirm interferieren näherungsweise parallele Strahlen miteinander. Die auftretenden Phänomene sind damit vergleichsweise leicht durch die Fraunhofer-Beugung berechenbar. Der Aufbau befindet sich jedoch in einem relativ kleinen geschlossenen System. Um die Bedingung, dass parallele Strahlen interferieren, dennoch nicht zu verletzen, werden durch eine Projektionslinse (auch Objektiv) parallel verlaufende Strahlen in einem Punkt auf dem Schirm fokussiert. Der Schirm zeigt also gerade

die Spektrallinien des einfallendes Lichtes.

Für den Abstand $x(n, \lambda)$ von der nullten Ordnung der Spektrallinie n .Ordnung mit Wellenlänge λ ergibt sich dann näherungsweise

$$x(n, \lambda) = \frac{s}{g} n \lambda$$

Dabei beschreibt s den Abstand vom Gitter zum Schirm und g die Gitterkonstante. Für das Auflösungsvermögen folgt dann

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda(n)} = \frac{x(n, \lambda)}{\Delta x(n, \lambda)} = nN$$

wenn N die Anzahl der beleuchteten Spalte am Reflexionsgitter beschreibt.

Alle Berechnungen beruhen darauf, dass es sich um einen idealen Spektrographen handelt. Das heißt vor Allem, dass dabei die Spaltbreite der Spaltblende als gegen Null tendierend angenommen wird. Dies kann im Allgemeinen allerdings nicht realisiert werden, da sonst die Lichtintensität zu klein wäre. Aus diesem Grund wird das eigentliche Auflösungsvermögen stark durch die Spaltbreite bestimmt. Jede Spektrallinie ist dann eine Abbildung des Spalts.

2.2 CCD-Detektor

Um die Spektrallinien am Spektrograph messen zu können, wird der in Abbildung 1 beschriebene Schirm durch einen CCD-Detektor ersetzt. CCD-Detektoren bestehen aus einer Matrix lichtempfindlicher Fotodioden. Eine einfache Darstellung ist in Abbildung 2 sichtbar. Einfallendes Licht überträgt durch den inneren photoelektrischen Effekt seine Energie auf die Elektronen der Halbleiter. Dabei entstehen gleichzeitig negativ geladene freie Elektronen und positiv geladene „Löcher“, die sich aufgrund einer angelegten Spannung voneinander trennen. Die Ladungen fließen jedoch nicht wie bei einer normalen Fotodiode sofort nach außen ab, sondern werden in der Speicherzelle selbst, in einem sogenannten Potentialtopf gesammelt, der wie ein Kondensator Ladungen speichert. Die Ladungsmenge ist dabei proportional zur eingestrahlten Lichtmenge, wenn rechtzeitig ausgelesen wird, bevor die Leerlaufspannung der Fotodiode erreicht ist. Nach der Belichtung werden die Ladungen schrittweise verschoben, bis sie schließlich als Ladungspakete, eines nach dem anderen, den Ausleseverstärker erreichen. Es wird eine von der Ladung und somit der Lichtmenge abhängige elektrische Spannung ausgegeben. Das Ausgangssignal des Sensors

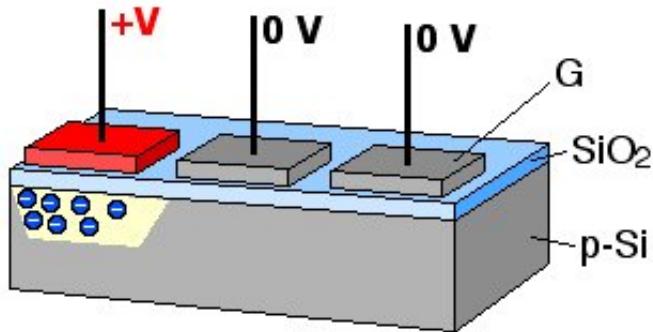


Abbildung 2: Schema eines CCD-Sensors (Quelle:
https://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor#/media/File:CCD_charge_transfer_animation.gif)

ist somit seriell. Durch Anwendung dieser Technik reicht es, bei der technischen Herstellung des CCD-Sensors einen Ausleseverstärker für die gesamte Matrix von Fotodioden zu verwenden.

Fotodioden eines CCD-Sensors können rechteckig, quadratisch oder polygonal sein, mit Kantenlängen von $1.4 \mu\text{m}$ bis über $20 \mu\text{m}$. Je größer die Fläche der Pixel, desto höher sind die Lichtempfindlichkeit und der Dynamikumfang, desto kleiner ist aber, bei gleicher Sensorgröße, die Bildauflösung. Bei Überbelichtung können Ladungen aus dem Potentialtopf einer Zelle in die Nachbarzellen übertreten. Die Messung von hohen Lichtintensitäten ist damit begrenzt. Abhilfe schaffte während des Versuches ein Papierfilter und die Einstellung einer kürzeren Belichtungszeit.

Um nun mit dem CCD-Detektor auch Abstände oder Positionen messen zu können, muss ein bereits bekanntes Spektrum aufgenommen werden. So lassen sich dann mithilfe charakteristischer Spektrallinien die Skalierung α (Wellenlängenzunahme pro Pixel) und das Offset β (Wellenlänge des linken äußersten Pixel) bestimmen. Näherungsweise können alle Funktionen als linear angesehen werden. Seien nun für zwei Wellenlängen λ_1, λ_2 mit $\lambda_1 < \lambda_2$ die Position bzw. die Pixel p_1, p_2 der Spektrallinien gegeben. Dann ergibt sich

$$\alpha = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{p_2 - p_1}$$
$$\beta = \lambda_1 - \alpha p_1$$

Für die Wellenlänge eines beliebigen Pixels folgt dann, wenn alle Einstellungen am CCD-Detektor und am Spektrographen konstant bleiben

$$\lambda(p) = \alpha p + \beta$$

Für gewisse Einstellungen und untersuchte Bereiche könnte diese Näherung verletzt werden. Um dies zu untersuchen, werden die gerade angegebenen Kalibrierungen nicht nur mit zwei Spektrallinien, sondern mit Mehreren an verschiedenen Stellen durchgeführt.

Zur Auswertung der Intensitäten von Spektrallinien oder anderen Peaks ist es notwendig systematische und zufällige Fehler des CCD-Detektors zu kennen oder zu bestimmen. Hierfür spielen vor Allem die Kenngrößen Biaslevel, Rauschen und Dunkelstrom eine wichtige Rolle.

Um ein Spannungssignal für verschiedene Pixel vom CCD-Sensor zu erhalten, werden, die Ladungen seriell ausgelesen, indem man die Ladungen von Diode zu Diode verschiebt. Bei dieser Verschiebung entsteht ein systematischer Fehler und eine statistische Abweichung (auch Rauschen) für jeden Pixel. Nach Beendigung des Auslesevorgangs wird zu jedem erhaltenen Wert ein sogenanntes Offset hinzugefügt. Das Biaslevel eines Pixels ist dann gerade dieses Offset plus der systematische Fehler.

Treffen keine Photonen auf den CCD-Sensor, so werden dennoch in jeder Fotodiode weitere Elektronen freigesetzt. Dieser Effekt entsteht durch die temperaturbedingte Bewegung der Elektronen, welche durch die geringe Bandlücke im Halbleiter ausreicht die Potentialbarriere zu überwinden. Die Anzahl der Elektronen pro Zeiteinheit, die so entstehen, wird Dunkelstrom genannt. Er ist jedoch unabhängig vom Photoneneinfall bzw. der Lichtintensität und somit ein Fehler in der Aufnahme.

2.3 Sonnenspektrum

Das elektromagnetische Spektrum der Sonne hat die größte Intensität im Bereich des sichtbaren Lichts. Abhängig von der Wellenlänge wird die Sonnenstrahlung von der Atmosphäre mehr oder weniger stark absorbiert. Die an der Erdoberfläche eintreffende Intensität hängt zudem stark vom Wetter und vom Sonnenstand ab. Beispiele des Sonnenspektrums zeigen die im Anhang B sichtbaren Abbildungen 15 und 16. Das Spektrum ist von etwa 140 nm bis etwa 10 cm näherungsweise das eines Schwarzen Strahlers bei einer Temperatur von knapp 6000 K, der Temperatur der Photosphäre. Im Bereich von naher Infrarotstrahlung bis ins UV enthält das Spektrum eine Vielzahl von Absorptionslinien, die sogenannten Fraunhoferlinien. Sie entstehen durch Strahlungsabsorption in der Chromosphäre der Sonne.

3 Aufbau und Durchführung

Zur Messung der ersten beiden Versuchsteile wurden hauptsächlich ein CCD-Detektor und ein Computer mit dem installierten Programm *MaxIm DL Pro 6* verwendet. Der CCD-Detektor wurde durch eine vorhandene Kappe abgedunkelt, um es zu ermöglichen Bias- und Dunkelstrombilder aufnehmen zu können und an den Rechner angeschlossen. Das Programm ermöglichte die Steuerung der CCD-Kamera und die Verarbeitung von gesendeten Signalen. Das Spektrometer bestand wie in den Grundlagen beschrieben aus der CCD-Kamera mit einem vorangestellten Gitter und drei übereinander liegenden Blenden. Über eine eingebaute Mechanik ließ sich der Winkel zwischen Gitter und CCD und somit der betrachtete Wellenlängenbereich einstellen. Um die Abhängigkeit der Auflösung von der Gitterkonstanten zu ermitteln, wurden abwechselnd zwei Gitter mit 200 bzw. 900 Linien pro mm verwendet.

3.1 Bestimmung des Ausleserausches des CCD-Detektors

Das Ausleserauschen des CCD-Detektors wurde mit Hilfe von Bias-Aufnahmen bestimmt. Diese entstanden bei geschlossener Blende und sehr kurzer Belichtungszeit und ergeben Bilder, die nur aus dem Bias-level und zufälligen Rauschen bestehen. Um das Biaslevel aufzunehmen, wurden nacheinander einhundert Bias-Aufnahmen bei konstanter Temperatur erstellt, gemittelt und im BIAS-Mean-Bild gespeichert. Die Intensität des zufälligen Rauschens konnte durch Abzug des Bias-Mean von einer willkürlichen Bias-Aufnahme gemessen werden.

3.2 Dunkelstromaufnahme

Hierzu wurde die Blende der CCD geschlossen gehalten und nacheinander bei steigender Temperatur und konstanter Belichtungszeit von 5 Minuten wurden die verschiedenen Dunkelstrombilder erzeugt. Nach Abzug einer anschließend geschossenen Bias-Aufnahme konnte die Intensität des thermischen Dunkelstromes ermittelt werden. Die Einstellung auf die gewünschte Temperatur erfolgte mit Hilfe eines Peltier-Elements. Diese erreichen für gewöhnlich Temperaturen von bis zu 30 Grad Celsius unter Umgebungstemperatur. Die CCD-Kamera wurde mit einer zusätzlichen Abdeckung versehen um neben der geschlossenen Blende das Umgebungslicht abzuschirmen. Der Aufbau ist in Bild

3 zu sehen.



Abbildung 3: CCD-Kamera mit geschlossener Blende und Abdeckung bei Aufnahme der Dunkelstrombilder

3.3 Überprüfung der Linearität

Um den linearen Zusammenhang zwischen eingestrahlter Energie und gemessenen CCD-Signal zu zeigen, wurden Bilder bei stets gleicher Beleuchtung aber von Bild zu Bild steigender Belichtungszeit aufgenommen. Die Beleuchtung erfolgte wie in Abbildung 4 zu sehen über eine Mikroskoplampe und durch eine Lochblende vor der Kamera um Überbelichtung zu vermeiden.

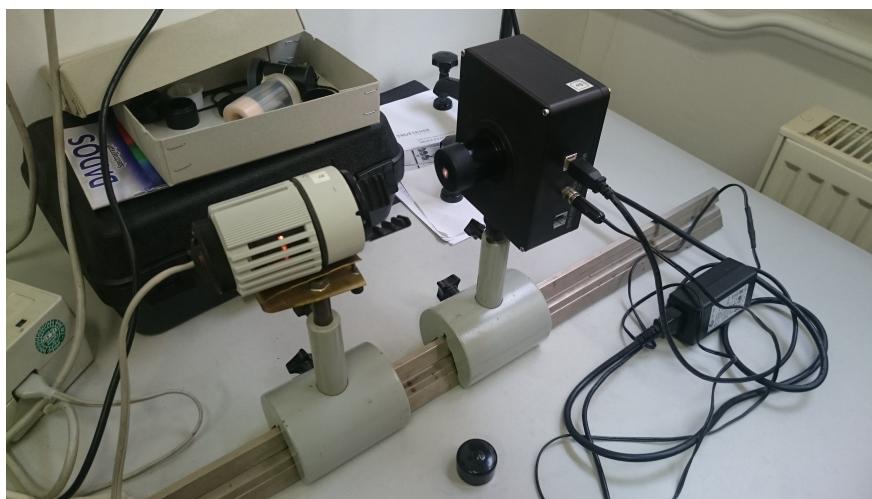


Abbildung 4: CCD-Kamera mit beleuchteter Lochblende vor Mikroskoplampe zur Messung der Linearität mit Balsamico und Lachstreifen in Soße Hollandaise

3.4 Kalibrierung des Spektrometers

Um einen Zusammenhang zwischen beleuchteten CCD-Pixel und entsprechender Wellenlänge herzustellen, wurde vor jeder Aufnahme eines Sonnenspektrums zuerst ein Vergleichsspektrum einer bekannten Quelle aufgenommen. Die hierbei verwendeten Quellen waren eine Quecksilber-Cadmium-Entladungslampe sowie eine Neon-Glimmlampe. Ihre Spektren befinden sich unter B im Anhang am Ende des Protokolls. Ein Foto der Hg-Cd-Lampe, sowie der abbildenden Optik samt Gitter und angeschlossener CCD-Kamera ist in Abbildung 5 zu sehen:



Abbildung 5: von links nach rechts: Quecksilber-Cadmium-Lampe, abbildende Optik mit Gitter und CCD-Kamera bei Aufnahme eines Vergleichsspektrums

3.5 Aufnahme des Sonnenspektrums

Die Aufnahme des Sonnenspektrums erfolgte analog zur Aufnahm der Vergleichsspektren. Das indirekte, gestreute Sonnenlicht wurde dabei aus dem Himmel über einen Umlenkspiegel auf das Gitter geleitet. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt:



Abbildung 6: Das durch das Fenster hereinstrahlende, gestreute Sonnenlicht wird über den Spiegel in die Optik und auf das Gitter geworfen, ehe das Spektrum mit der CCD-Kamera erfasst wird

Direkt im Anschluss an jede Spektrumsaufnahme, wurde der Spiegel durch eine der beiden Vergleichsquellen ersetzt und ein Bild zur Kalibrierung, sowie ein Biasbild aufgenommen. Durch Abzug des Bias-levels und Aufnahme bei 0 °C konnten die systematischen Fehler gering gehalten werden.

4 Messwerte und Auswertung

4.1 Bestimmung des Ausleserauschens

Zur Bestimmung des systematischen Fehlers und des Rauschens mussten mehrere Biasbilder aufgenommen werden. Abbildung 7 zeigt ein Beispiel eines solchen Biasbildes, wie es von uns verwendet wurde.

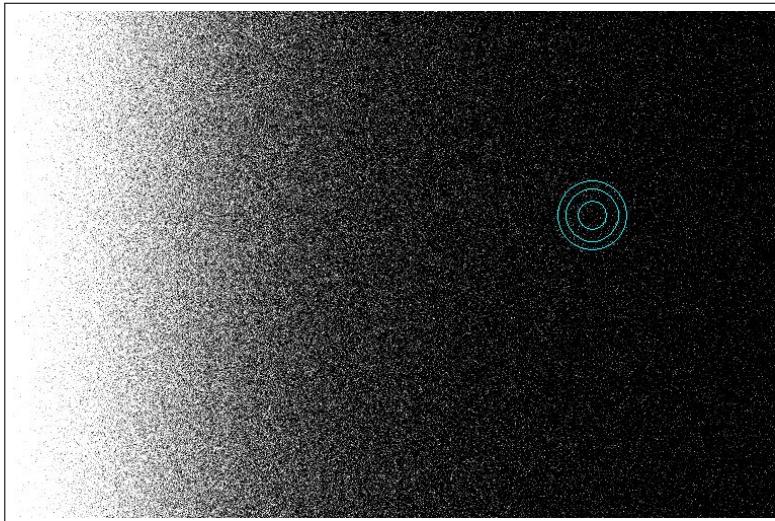


Abbildung 7: Beispiel einer Biasaufnahme bei -8°C mit eingefügtem Messcursor

Für den weiteren Versuchsteil wurden genau 100 Biasbilder aufgenommen. Über diese Bilder wurde für jeden Pixel der Mittelwert gebildet, sodass ein Mittelwertbild entstand. Dieses ist in Abbildung 8 gezeigt. Es wird deutlich, dass sich der systematische Fehler entlang der Abzisse verändert. Durch Abzug dieses Bildes von anderen Aufnahmen kann der Einfluss des systematischen Fehlers bei Messungen näherungsweise als Null angenommen werden.

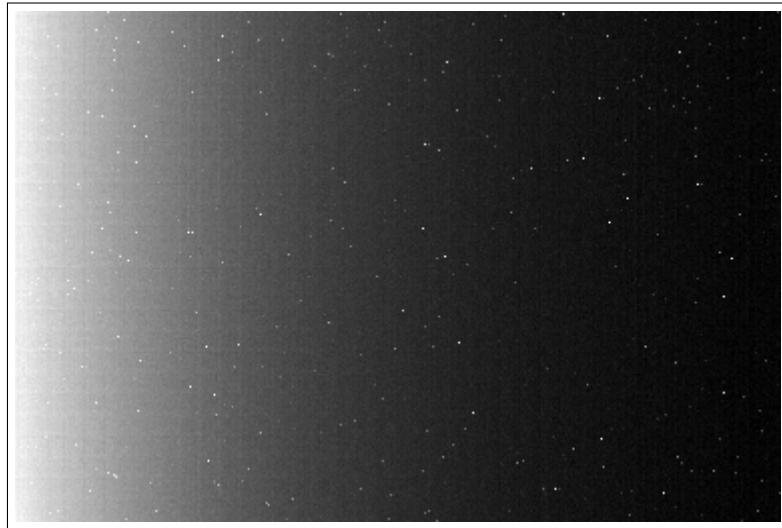


Abbildung 8: Mittelwertbild von 100 aufgenommenen Biasbildern bei Raumtemperatur

Die minimale Standardabweichung wurde über das Programm und mit Hilfe des Messcursors zu circa 11.2 bestimmt. Da uns in diesem Versuch aber mehr die Lage der Peaks im Spektrum als ihre Intensität interessiert, ist dieser Wert für die weitere Auswertung eher unerheblich. Im folgenden werden alle weiteren Aufnahmen auch immer, wenn nicht ausdrücklich anderes gesagt, nach Abzug des entsprechenden Biaslevels gezeigt und ausgewertet.

4.2 Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes

Die Dunkelstrombilder wurden wie unter 3.2 gezeigt erstellt und im Anschluss wurde stets eine Bias-Aufnahme abgezogen. Als Beispiel sind in den Abbildungen 9 und 10 die Intensitätsverteilungen des reduzierten Dunkelstrombildes bei 2 °C zu sehen.



Abbildung 9: Dunkelstrombild bei geschlossener Blende und 5 Minuten Belichtungszeit nach Abzug des Biaslevels bei 2 °C

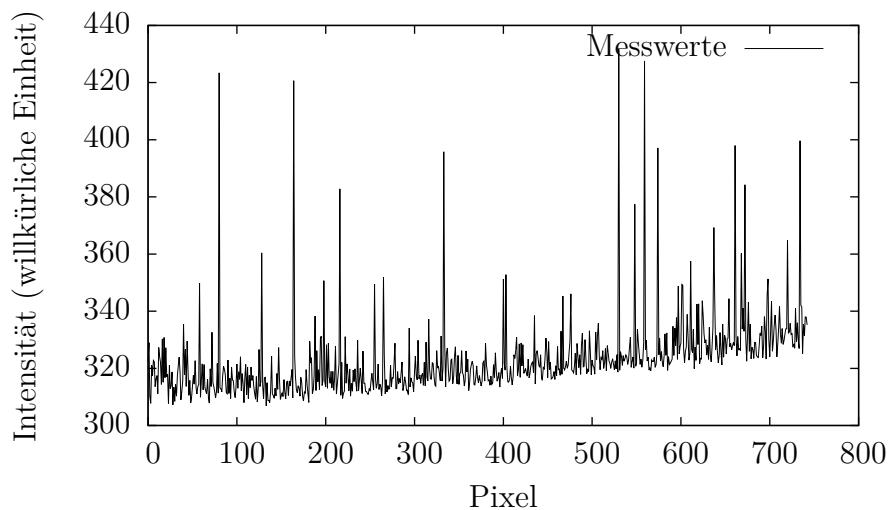


Abbildung 10: Intensitätsverteilung über die Pixelreihen bei geschlossener Blende und 5 Minuten Belichtungszeit nach Abzug des Biaslevels bei 2 °C

Zu erkennen ist klar ein Grundlevel um 320 und einzelne zufällige Spitzen. Diese können durch Temperaturveränderungen während der Aufnahme oder durch durchdringende Strahlung (natürliche Radioaktivität, kosmische Strahlung, etc.) entstanden sein. Trägt man nun die jeweiligen gemittelten Grundlevel der einzelnen Aufnahmen über der Temperatur auf, so ergibt sich der in Abbildung 6789 gezeigte Zusammenhang:

GRAPH Grundlevel, Temperatur, exp Fit

wie erwartet exponentieller Verlauf, aus dem anstieg die Bandlückenenergie, gute Übereinstimmung blabla, elektronen pro Pixel über gain ermittelt

4.3 Linearität der CCD-Kamera

Zur Überprüfung der Linearität wurde wie unter 3.3 beschrieben vorgegangen. Die Temperatur wurde dabei konstant auf 0°C gehalten und Biasaufnahmen wurden stets abgezogen. In Abbildung 11 ist eine Beispielaufnahme dargestellt.

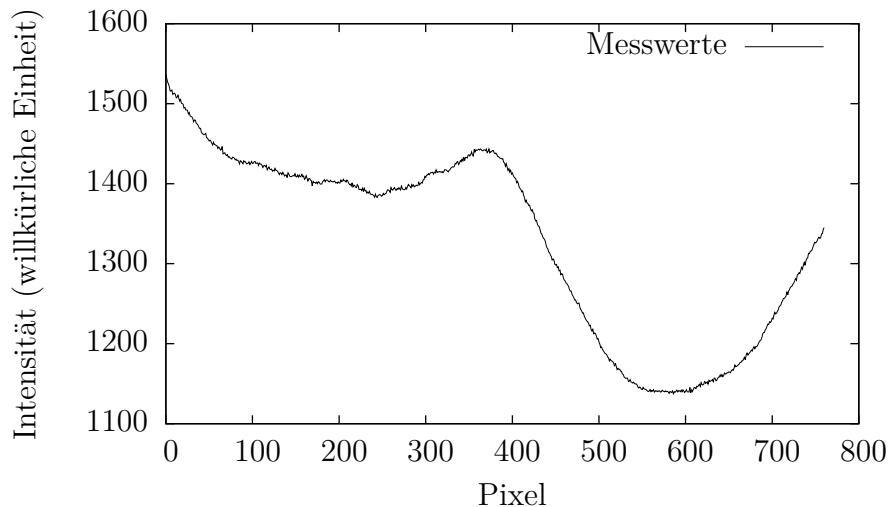


Abbildung 11: CCD-Aufnahme bei Beleuchtung mit Mikroskoplampe und vorgesetzter Lochblende, gemessen bei 0°C, Belichtungszeit 0.5s

Im Weiteren Vorgehen wurde stets das mittlere Maximum als Bezugspunkt gewählt. Da alle Aufnahmen unabhängig von der Belichtungszeit den gleichen (qualitativen) Verlauf aufwiesen, ist es völlig ausreichend nur die Werte an diesem Punkt zu untersuchen. Die jeweiligen Intensitätswerte am Maximum wurden über der Belichtungszeit in Abbildung 12 zusammengefasst.

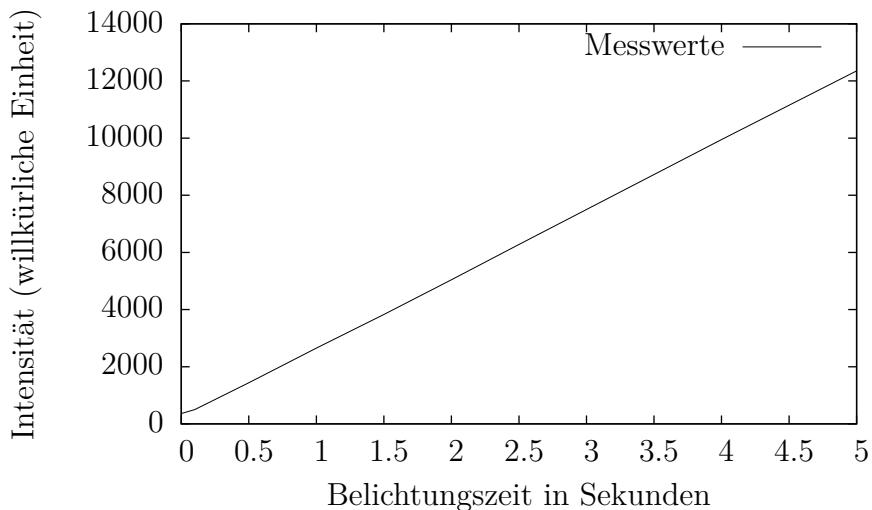


Abbildung 12: CCD-Signal am mittleren Peak in Abhängigkeit der Belichtungszeit, gemessen bei 0°C, Maximum mit Hilfe von Gnuplot ausgemessen

Die lineare Anstiegsgerade ist offensichtlich und bestätigt in sehr guter Weise die Annahme und Forderung, dass die CCD-Zellen Elektronen proportional zur eingestrahlten Energie ansammeln. Der minimale Knick und das Offset um den Nullpunkt wird plausibel, wenn man den endlichen Dunkelstrom bedenkt und vor allem das stets aufgezählte Offset von 200 pro Pixel, was beim Abzug des Bias aus Sicherheitsgründen zugegeben wird, mit einbezieht. Abbildung 12 zeigt somit eindeutig, dass die CCD über einen sehr weiten Bereich linear arbeitet und somit für unsere Zwecke bestens geeignet ist.

4.4 Vergleichsspektren von Hg-Cd und Ne

Zur Kalibrierung und zum besseren Verständnis der Arbeitsweise des Gitterspektrographen wurden die Spektren einer Quecksilber-Cadmium-Entladungslampe sowie einer Neon-Glimmlampe aufgenommen, da diese gut zu erkennende und zuzuordnende Spektrallinien in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen aufweisen. Da die Lampen erst zur Kalibrierung dienen, kann ihr Spektrum in diesem Abschnitt natürlich nur qualitativ ausgewertet werden. Die aufgenommenen Spektrallinien der Hg-Cd-Lampe sind in Abbildung 13 zu sehen. Weil das Licht der Lampe sehr intensiv war, wurde ein Papierfilter zwischen Optik und Lampe gebracht. Dieser verändert zwar durch sein Absorptionsverhalten die Intensität der Peaks jedoch nicht deren Lage.

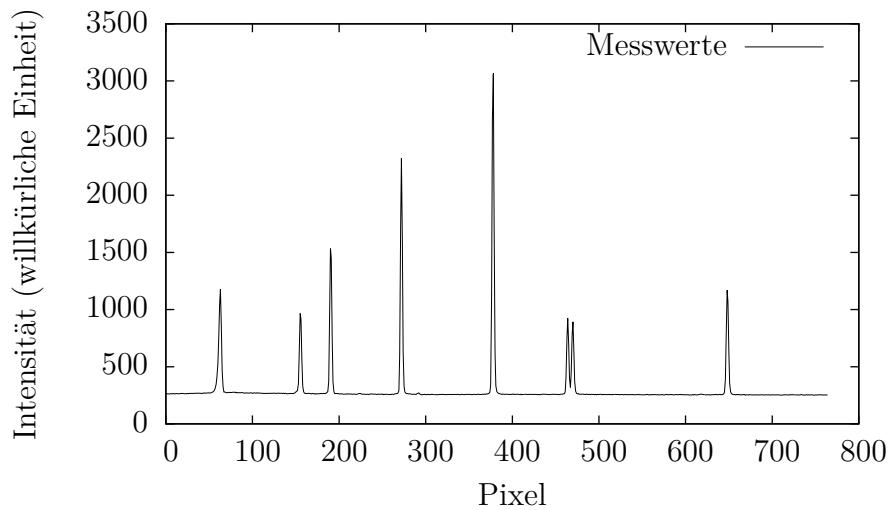


Abbildung 13: Spektrum der Quecksilber-Cadmium-Entladungslampe betrachtet durch die mittlere Blende bei verwendetem Gitter mit $g = 200$, vorangestellten Papierfilter und Temperatur von 0°C

Zu sehen sind alle charakteristischen Linien von Quecksilber und Cadmium von 405 bis 644 nm wie sie auch in der Referenz im Anhang zu finden sind. Die verminderte Intensität des Doppelpeaks und der übrigen ist wie oben erklärt der Absorption des Papierfilters verschuldet. Wie wir sehen reicht hier die Auflösung des groben Gitters vollkommen aus, um alle relevanten Linien zu zeigen und es bringt zu dem den Vorteil, das gesamte Spektrum auf eine Aufnahme zu projizieren. Nach Anpassung des Winkels an den

4.5 Auflösevermögen des Gitterspektrographen

4.6 Spektren des Sonnenlichts

5 Zusammenfassung

Im Versuch ging es im Wesentlichen darum, die Umgangsweise mit dem Spektrographen und der CCD-Kamera zu lernen. Die genaue Messung des Sonnenspektrums erforderte eine gute Kalibrierung des CCD-Sensors, welche durch Bestimmung des Dunkelstroms und des Biaslevels erreicht werden konnte. Das Sonnenspektrum konnte bis auf die typischen Abweichungen durch Zeit, Ort und Wetter nachvollzogen werden, indem charakteristische Absorptionslinien vermessen wurden.

Die erreichte Auflösung entsprach allerdings nicht der Theorie der Fraunhoferschen Beugung noch einer Eingrenzung durch den CCD-Sensor. Durch die endliche Spaltbreite der Spaltblende wird das Auflösungsvermögen des Spektrographen stark eingegrenzt. Die Spektrallinien also stellen eine Art Abbild des Spaltes dar. Je größer dabei die Spaltbreite ist, desto geringer ist das Auflösungsvermögen.

Die Linearität der Dispersionsrelation, wie sie in den Grundlagen angenommen wurde, konnte nicht für alle Punkte nachvollzogen werden.

A Vergleichsspektren

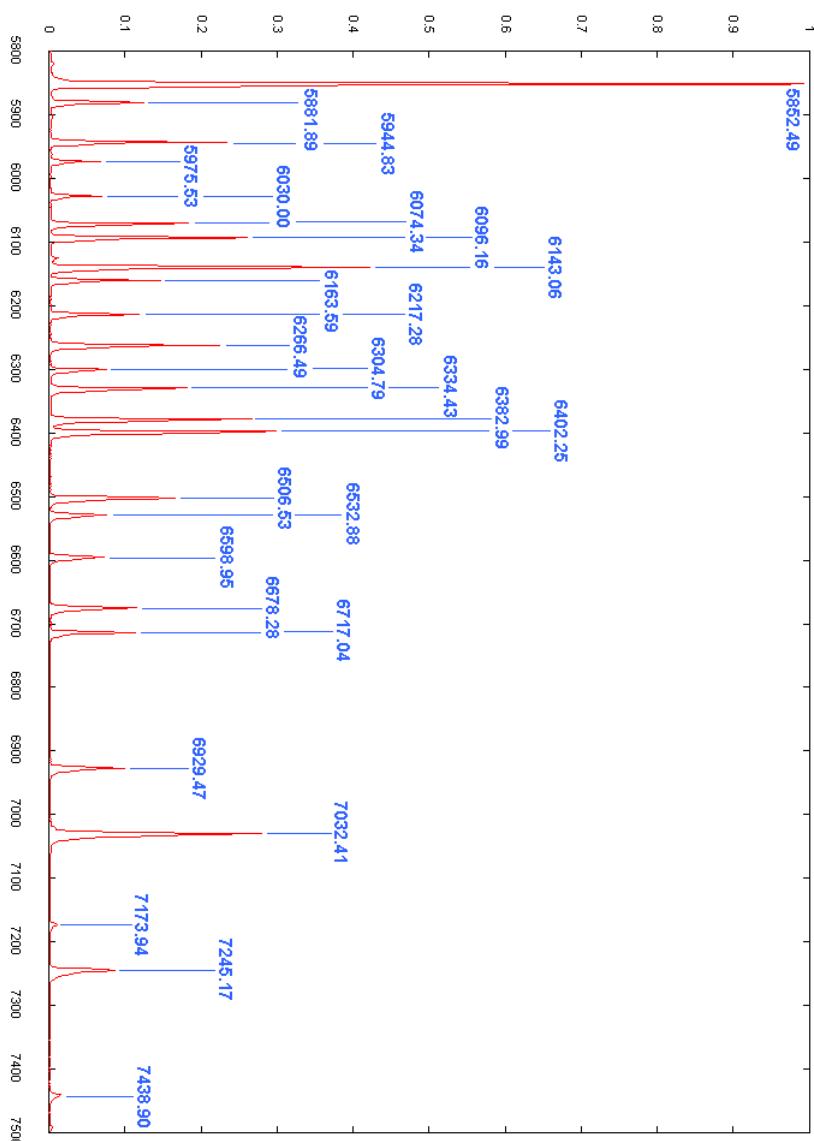


Abbildung 14: Spektrum einer Neon-Glimmlampe

B Beispiele des Sonnenspektrums

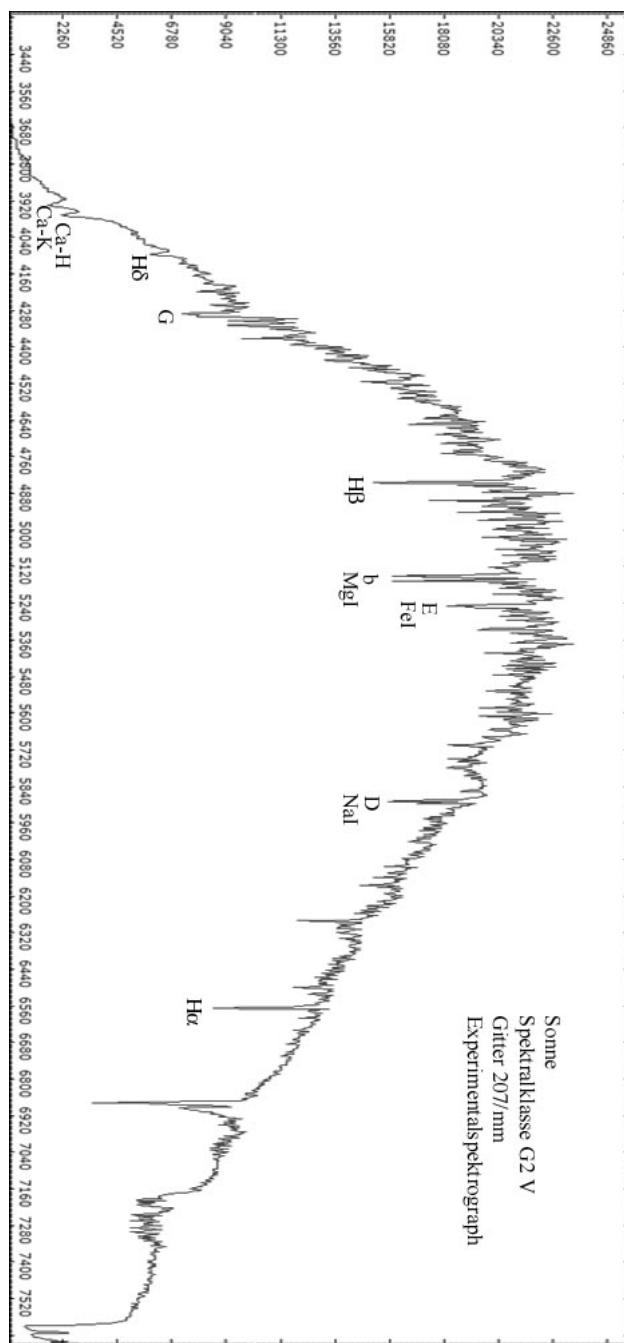


Abbildung 15: Beispiel eines Sonnenspektrums

Quelle: [http://www.sternwarte-habichtswald.de/astromania/
galerie/Spektren/Sonne-grafik.jpg](http://www.sternwarte-habichtswald.de/astromania/galerie/Spektren/Sonne-grafik.jpg)

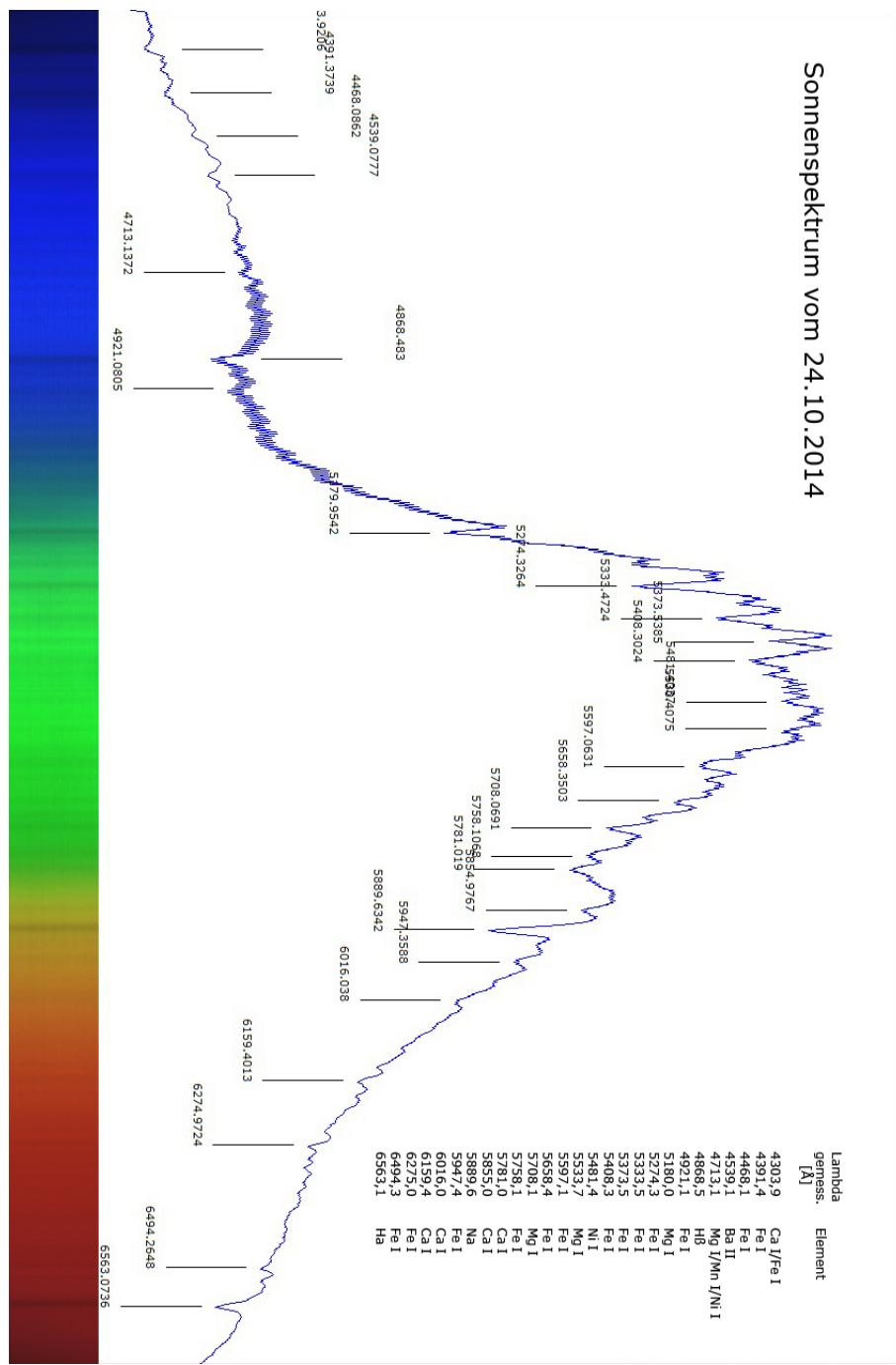


Abbildung 16: Beispiel eines Sonnenspektrums
Quelle: http://www.deep-sky-images.de/albums/userpics/10002/Sonnenspektrum_text.jpg