FRIEDRICH-SCHILLER-UNIVERSITÄT JENA

Physikalisch-Astronomische Fakultät Fortgeschrittenenpraktikum

Versuch:

Spekt	roskopie (der Sonne			
durchgeführt von:	Tobias Buche	er, Johannes Wild	9		
Ausarbeitung erstellt von: Tobias Bucher, Johannes Wilde					
erster Versuchstag:	07.04.2014	letzter Versuchstag:	15.04.2014		
Gesamtversuchstage:	4	abgegeben am: 22.	04.2014		
Aufgabenstellung:	gemäß Versuc Änderungen:	chsanleitung: ja			

Betreuer:

- wird vom Betreuer ausgefüllt -		
Bewertung der Ausarbeitung:	Note:	

Protokollführung und Form:

Ergebnisse, Auswertung und Interpretation:

Bemerkungen/Hinweise des Betreuers:

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	1
2	Grundlagen und Experimentelles 2.1 Die Sonne 2.2 Die Kamera 2.3 Der Gitterspektrograph	1 1 2 4
3	Versuchsaufbau und -durchführung 3.1 Aufbau	5 5 6
4	Messergebnisse	7
5	Diskussion	9
6	Zusammenfassung	17
7	Literatur	17
8	Anhang	18

1 Aufgabenstellung

- 1. Charakterisierung des CCD-Detektors
 - a) Messen Sie das Ausleserauschen des CCD-Detektors anhand von Bias-Aufnahmen.
 - b) 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 des CCDs.
 - c) Überprüfen Sie die Linearität des Signals des CCD-Detektors auf die Belichtungszeit.
- 2. Bestimmung der Eigenschaften des Spaltspektrographen
 - a) Führen Sie zum Kennenlernen des Spaltspektrographen einige Beobachtungen mit visueller Beobachtung aus (Spektrallampen, Tageslichtspektrum). Sehen Sie sich die verschiedenen Spalte und verschiedenen Ordnungen des Spektrographen an.
 - b) Befestigen Sie das CCD am Spaltspektrographen, justieren und fokussieren Sie das Beugungsbild auf das CCD; benutzen Sie dazu die Linien der Neon-Glimmlampe. Kalibrieren Sie dann den Spektrographen mit Hilfe der Neon-Glimmlampe. Tragen Sie die Wellenlängen über die zugehörigen Pixelkoordinaten der Spektrallinien auf. Fitten Sie eine Kalibrierungskurve an und bestimmen Sie damit die Dispersion des Spektrographen in Ångström/Pixel. Vermessen Sie die Halbwertsbreiten der einzelnen Ne-Linien, um so das mit den drei Spalten erreichte spektrale Auflösungsvermögen des Spektrographen in Abhängigkeit von der Wellenlänge zu ermitteln.
- 3. Spektrale Messungen
 - a) Nehmen Sie ein Sonnenspektrum in einem Wellenlängenbereich auf und korrigieren Sie das Bild mit entsprechenden Dunkel- und Flatfield-Bildern.
 - b) Nehmen Sie im selben Spektralbereich ein Spektrum der Ne-Glimmlampe bzw. Hg-Cd-Spektrallampe auf und kalibrieren Sie damit Ihr Sonnenspektrum. Identifizieren Sie die detektierten Fraunhofer-Linien in dem von Ihnen aufgenommenen Sonnenspektrum.
 - c) Wiederholen Sie 3.a) und 3.b) mit höherer spektraler Auflösung (900 Linien/mm-Reflexionsgitter) in ausgewählten Spektralbereichen. Bestimmen Sie die Dispersion wie auch auch das Auflösungsvermögen, das mit diesem Gitter und allen Spalten erreicht wird.
 - d) Nehmen Sie ein Iodabsorptionsspektrum auf und bestimmen Sie aus der Konvergenzstelle im Blaugrünen die Dissoziationsenergie des Iodmoleküls.

2 Grundlagen und Experimentelles

2.1 Die Sonne

Die Sonne ist der zur Erde nächstgelegene und am besten untersuchte Stern. Überlieferte Beobachtungen haben bereits vor 2000 Jahren stattgefunden, das Verständnis vom Aufbau und damit der Erscheinung der Sonne hat sich jedoch erst im 20. Jahrhundert mit Aufkommen der modernen Theorien entwickelt. Das Modell der Sonne geht dabei von einem schalenförmigen Aufbau aus, wobei die einzelnen Schichten eher dem Verhalten physikalischer Größen wie Druck, Temperatur, Dichte etc. denn einem festen Radialabstand zum Kernpunkt zuzuordnen sind.

Das Zentrum der Sonne bildet die sogenannte Kernzone, welche jenen inneren Bereich der Sonne umfasst, in

dem Teilchendichte und Temperatur ausreichend hoch sind, sodass Wasserstoff zu Helium fusioniert [etwa bis 25% des Sonnenradius R_S]. Die dabei freiwerdende Energie wird von emittierten Neutrinos und Photonen getragen. Erstere durchdringen die Sonne als schwach wechselwirkende Teilchen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit, wohingegen die Photonen ständig mit den übrigen Plasmateilchen stoßen und einen Zufallslauf beschreiben. Dabei werden sie ständig absorbiert und reemittiert und das in jede beliebige Richtung, so dass deren Weg aus der Kernzone sehr lange dauert [mehrere Jahrtausende].

Um die Kernzone legt sich damit die sogenannte *Strahlungszone* [etwa bis 71 % R_S], in der die Temperatur und damit die Photonenenergie so hoch sind, dass die Energie im Strahlungsfeld von Kern zu Kern weitergegeben wird.

Anschließend folgt die *Konvektionszone*, in der die Temperatur so weit abgenommen hat, dass sie für Strahlung undurchlässig ist. Die Energie wird über Konvektionsströmungen nach außen getragen.

Die Dichte nimmt nun nach außen stetig ab, sodass ein Übergang zwischen der nichtstrahlenden Konvektionszone zur strahlenden *Sonnenatmosphäre* stattfindet, worunter man alle Schichten der Sonne zusammenfasst, die wir beobachten können. Die unterste Haut der nur wenige 1000 km dicken Sonnenatmosphäre bildet die *Photosphäre*. Diese emittiert das eigentliche thermische Spektrum der Sonne und beherbergt den als Sonnenradius definierten Radialbstand zum Zentrum sowie die bei 5778K festgelegte Oberflächentemperatur [entsprechende Temperatur zu Energiestromdichte von der Sonne].

Im weiteren Verlauf definiert ein Umkehrpunkt der Temperatur den Beginn der sich anschließenden *Chromosphäre*. In dieser befindet sich hauptsächlich Wasserstoff und Helium, welche das thermische Spektrum des Photosphärenhintergrundes charakteristisch absorbieren. Die Chromosphäre ist somit der Entstehungsort der meisten Fraunhoferlinien.

Den Übergang von Sonnenatmosphäre zu interstellarem Raum bildet die *Korona*, welche sich vor allem durch die Absorptionslinien von hochionisiertem Eisen im Spektrum bemerkbar macht und nur bei totalen Sonnenfeinsternissen separat beobachtbar ist.

2.2 Die Kamera

Die Kamera bestand im Wesentlichen aus einem kühlbaren CCD mit Ausleseelektronik und elektronischen Shutter.

Das CCD besteht aus 765 vertikalen, eindimensionalen CCDs mit jeweils 520 Pixeln. Hier wurde ein "Full-Frame-CCD" verwendet, in dem die CCDs sowohl die optisch aktiven Elemente sind, als auch zur Ladungsspeicherung und zum Transport benutzt werden.

Jeder der Pixel besteht aus 2 Elektroden auf dem dotierten Silizium-Trägermaterial, wovon eine optisch transparent ist. Darüber befindet sich außerdem eine Mikrolinse, um das einfallende Licht möglichst effektiv durch die Transparente Elektrode zu leiten.



Abbildung 1: Schematische Skizze zweier Pixel des KAF-0402ME. [aus [6]]

Als Phase wird hier eine Elektrode [auch "Gate"] mit darunterliegender, hier nicht eingezeichneter Sperr- und Speicherzone bezeichnet. Diese sind aber in folgender Zeichung vorhanden:



Abbildung 2: Schematische Skizze zweier Pixel allgemein [oben] und die angelegte Spannung beim Ladungstransport [unten]. [aus [5]]

Zwischen den Elektroden und dem Halbleiter ist ein elektrischer Isolator.

Man kann sowohl ein p-dotiertes Substrat an den Speicher-Zonen n-dotieren ["buried-channel CCD"], wobei dabei der Ladungseinfang an der Isolator-Halbleiter-Grenzschicht geringer ist, als auch ein n-dotiertes Substrat an den Sperr-Zonen p-dotieren ["n-type buried-channel CCD"], wobei der Ladungsträgertransport hier besser ist.

In Abbildung 2 ist nun eine an der Sperr-Zone p-dotierter Halbleiter, der an beiden Pixeln gleichmäßig belichtet wurde, gezeigt. Die Elektronen werden dabei durch den inneren photoelektrischen Effekt freigesetzt. Dabei entstehen Elektronen-Loch-Paare im Leitungs- und Valenzband des Halbleiters.

Durch Anlegen einer Bias-Spannung wurde dabei die Entstehung von Dunkelstrom unterdrückt.

Zum Auslesen wird nun an Phase 2 eine größere Spannung als an Phase 1 angelegt, so dass die Elektronen sich zu Phase 2 bewegen. Anschließend wird die Spannung wieder herabgesetzt, wobei durch die Sperr-Zone die Ladungsträger nicht zurückfließen.

Durch sequentielle Fortführung dieser Methode kann die Ladung eines jeden Pixels sequentiell zum AD-Wandler transportiert und ausgelesen werden.

Bei dem zweidimensionalen Array des KAF-0402ME wurden die Ladungen der Pixel der vertikalen CCDs zweilenweise in eine eindimensionale Auslese-CCD verschoben und anschließend dort ausgelesen.

Der Dunkelstrom verhält sich aufgrund der Boltzmann-Verteilung der thermischen Geschwindigkeit von Elektronen in einem Halbleiter der Bandlückenenergie E_{gap} folgendermaßen [5]:

$$I_{\text{dark}} \propto e^{-\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}}$$
 (1)

Hieraus wird ersichtlich, dass das CCD möglichst gut gekühlt sein sollte. Dazu wurde im Versuch ein Peltier-Element verwendet, welches bis zu 30° unter Umgebungstemperatur abkühlen konnte.

Dabei wird der Peltier-Effekt genutzt, welcher in etwa der Umkehrung des Seebeck-Effekts entspricht.



Abbildung 3: Schematische Skizze eines Peltier-Elements. [aus Wikipedia - Thermoelektrizität]

Durch einen Stromfluss durch den Kontakt zweier Metalle unterschiedlicher Peltierkoeffizienten treten Elektronen vom gelben [rechten] in das blaue [linke] Material. Die Peltierkoeffizienten beschreiben den Einfluss des Leitungsmaterials auf die Leitungselektronen und sind empirisch zu bestimmende Größen. Sie stellen so etwas wie die Energie eines Elektrons dar.

Ist nun die Energie der Elektronen des gelben [rechten] Materials geringer, so müssen sie zum Übergang in das blaue [linke] Material Energie aufnehmen: Diese kommt aus der Temperatur der Umgebung, so dass dort eine Kühlung eintritt.

2.3 Der Gitterspektrograph

Der Gitterspektrograph ist einzig ein vom Umgebungslicht abgeschirmtes, geblaztes Reflexionsgitter, dessen höheren Interferenzordnungen im Fernfeld das Frequenzspektrum des einfallenden Lichtes darstellen.

Ein geblazetes Gitter besitzt angeschrägte Gitterlinien, die im Blazewinkel θ_B zur Gitterfläche stehen.



Abbildung 4: Schematisches Blazegitter mit Gitterperiode d, Blazewinkel θ_B , Einfallswinkel α und Ausfallswinkel β . [aus Wikipedia - Blazegitter]

Die Eigenschaften bezüglich der Interferenz abhängig vom Winkel eines solchen Gitters sind prinzipiell die gleichen; nur die Intensität höherer Ordnungen ist abhängig von θ_B und d für eine Wellenlänge optimiert. Gleichzeitig ist auch die Intensität in nullter Ordnung stark abgeschwächt.

Mathematisch ergibt sich die Interferenz hinter einem Gitter mit Spaltbreite d und Spaltanzahl N einer einfallenden ebenen Welle mit Wellenzahlvektor \vec{k} mit Betrag $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ im Unendlichen [Fernfeld] in Richtung p

zu Folgendem [3]:

$$I(p) \propto \underbrace{\left[\frac{\sin(\frac{Nkdp}{2})}{\sin(\frac{kdp}{2})}\right]^2}_{I_{\text{Gitter}}(p)} I_{\text{Einzelspalt}}(p), \tag{2}$$

Die globalen Maxima von $I_{\text{Gitter}}(p)$ liegen bei $\frac{kdp}{2} = m\pi \iff p = m\frac{\lambda}{d}, m \in \mathbb{Z}$; die Minima bei $\frac{Nkdp}{2} = z\pi \iff p = z\frac{\lambda}{dN}, z \in \mathbb{Z} \& \frac{z}{N} \neq m$.

Zur Definition von "aufgelöst" benutzten wir das Rayleighkriterium, nach dem zwei Interferenzen der Wellenlängen λ und $\lambda + \Delta \lambda$ aufgelöst sind, wenn das erste Nebenminimum zur *m*-ten Interferenzordnung von λ maximal so weit entfernt von dessen lokalen Maximum ist, wie das lokale Maximum der *m*-ten Interferenzordnung von $\lambda + \Delta \lambda$. Aus den vorigen Überlegungen sieht man, dass für alle Ordnungen *m* das erste Nebenminimum um $\Delta p = \frac{\lambda}{dN}$ gegen das *m*-te globale Maximum bei $p_0 = m \frac{\lambda}{d}$ verschoben ist.

Das *m*-te globale Maximum der Interferenz der Wellenlänge $\lambda + \Delta \lambda$ liegt nun bei $p = m \frac{\lambda + \Delta \lambda}{d}$ und ist somit um $\Delta' p = m \frac{\Delta \lambda}{d}$ gegen p_0 verschoben.

Setzt man $\Delta p = \Delta p'$, so erfüllt man gerade das Rayleighkriterium und erhält für $AV = \frac{\lambda}{\Delta \lambda}$

$$4V = Nm. (3)$$

Da das Interferenzbild theoretisch vollkommen symmetrisch zu m=0ist und negative Auflösungsvermögen nicht ohne besondere Behandlung Sinn ergeben, betrachtet man hier nur $m \ge 0$.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

3.1 Aufbau

Es wurden folgende Geräte verwendet:

- CCD-Kamera ST-402ME mit integrierter, regulierbarer Peltier-K
 ühlung [maximal 30 °C unter Umgebungstemperatur],
- Neon-Glimmlampe [Ne-Lampe],
- Quecksilber-Cadmium-Spektrallampe [HgCd-Spektrallampe],
- DADOS-Gitterspektrograph mit 2 Reflexionsgittern [200 Linien/mm bzw. 900 Linien/mm].

3.2 Durchführung

<u>zu 1:</u>

Die Bilder [16-bit, max. 765×510 Pixel] wurden mit dem Programm MaximDL aufgenommen und bearbeitet. Hier war es außerdem möglich die Temperatur der Kamera und das hardwareseitige Zusammenfassen von Pixeln [Binning] einzustellen.

Zur Bestimmung des Ausleserauschens wurden jeweils 100 Bias-Aufnahmen mittels "Autosave" im "Camera Capture Tool" aufgenommen und diese anschließend mittels "Stack" überlagert.

Zur Messung des Dunkelstroms wurde die Temperatur der CCD verändert. Um zu gewährleisten, dass das CCD die gleiche Temperatur hatte, wie der Sensor anzeigte, wurden vor der Aufnahme jeweils ungefähr 2 Minuten gewartet; außerdem wurde die Temperatur von minimal -8 °C aus schrittweise erhöht.

Um die Linearität des CCDs bezüglich der Belichtungszeit zu überprüfen, wurde eine Mikroskoplampe [sehr breites Spektrum] durch ein weißes Blatt Papier gestrahlt, welches sich vor einem Graufilter mit einer sehr schmalen Öffnung $[\emptyset \approx 1 \text{ mm}]$ befand. Die Temperautr des CCDs wurde hier, wie bei allen folgenden Messungen, auf -8 °C festgelegt.

Um ein Übersteuern der Kamera zu vermeiden wurde zuerst eine Testmessung mit einer Aufnahmezeit von 300s durchgeführt und die eingestrahlte Intensität durch Verschieben der Lampe entsprechend angepasst. Anschließend wurde die Messzeit verkleinert.

<u>zu 2:</u>

Durch Öffnen der Eintrittsöffnung des Spektrographen und Einsetzen eines Okulars am anderen Ende, war die visuelle Beobachtung der Spektren möglich.

Zum Verstellen des beobachtbaren Bereichs wurde die Arretierschrabe des Gitters gelöst und dieses mit Hilfe einer Verstellschraube gedreht.

Anschließend wurde das Okular entfernt und stattdessen die Kamera dort spaltfrei befestigt. Nach angepasster Fokussierung, wurden Spektren von Neon beziehungszweise Quecksilber und Kadmium aufgenommen.

Die Neon-Lampe war dabei schwach genug und vom Umgebungslicht abgeschirmt, so dass deren Aufnahme durch Variieren der Belichtungszeit ohne Abschwächung möglich war.

Die Quecksilber-Cadmium-Spektrallampe hingegen musste durch Vergrößern der Entfernung der Lampe zur Eintrittsöffnung des Spektrometers agbeschwächt werden. Das dabei außerdem einfallende Streulicht im Raum wurde durch die Ausrichtung des Spektrometers versucht zu minimieren.

Die Korrektur der aufgenommenen Bilder erfolgte dabei durch pixelweise Subtraktion des zuvor aufgenommenen und gemittelten Hintergrundrauschens. Da das Bildformat jedoch keine negativen Pixelwerte unterstütze, wurden zuvor jeweils ein Wert von 1000 auf alle Pixel addiert, was bei der 16-Bit-Auflösung der Kamera einer absoluten Verschiebung von 1,5% des Wertebereichs entsprach.

<u>zu 3:</u>

Die Aufnahme von Flatfield-Bildern war aufgrund der Sensitivität des CCDs nicht möglich. Daher konnten Fehler [optische Verzerrungen, Staubeinflüsse] nur visuell durch entsprechende Auswahl des Auswertebereichs entfernt werden.

Das Auslesen der aufgenommenen Spektren erfolgte mit Visual Spec, die Auswertung durch Darstellung mittels Origin Origin.

Die Disperion des Gitters wurde mittels eines linearen Fits der - über die Kalibrierung mittels Neon beziehungsweise Quecksilber-Kadmium aufgenommenen Spektren - Beziehung von Pixelkoordinate zu Wellenlänge ausgewertet.

Die Halbwertsbreiten der Spektrallinien wurden ebenfalls mittels Visual Spec ausgelesen und mittels der ermittelten Dispersion in $\Delta\lambda$ umgerechnet.

Das Iod-Absorptionsspektrum wurde nach visuellem Auffinden der Konvergenzstelle mit Hilfe der Quecksilber-Kadmium-Spektrallampe kalibriert und anschließend ausgewertet.

4 Messergebnisse

- 1. a) Ausleserauschen des CCDs bei –8 °C: $q_{\rm rausch}=27,1\,e\pm0,5\,e.$
 - b) Der Dunkelstrom verhält sich über der Temperatur wie folgt:



Abbildung 5: Dunkelstrom über der Temperatur.

Die daraus bestimmte Bandlückenenergie des CCD-Detektormaterials ergibt sich zu $E_{\rm gap}$ = 0,96 eV±0,15 eV

c) Das Verhalten des CCDs bezüglich der Belichtungszeit ist sehr linear und im Folgenden dargestellt.



Abbildung 6: Signal des Detektors über der Belichtungszeit.





Abbildung 7: Dispersion links des 2001/mm-Gitters, rechts des 9001/mm-Gitters mit dem mittleren Spalt.

3. c) Die aufgenommenen Sonnenspektren sehen wie folgt aus und lösen die eingezeichneten Linien auf:



Abbildung 8: Sonnenspektren links mit dem 2001/mm-Gitter, rechts mit dem 9001/mm-Gitter.

d) Die Anregungsenergie für Iod ergab sich zu $~E_{\rm anregung}=0.88\,{\rm eV}\pm0.02\,{\rm eV}.$

5 Diskussion

Das aus 100 Aufnahmen gemittelte Ausleserauschen, welches von den Messaufnahmen abgezogen wurde, sah wie folgt aus:



Abbildung 9: Ausleserauschen bei voller Auflösung.

Die Helligkeit ist dabei zur Anzeige angepasst; absolut gesehen sind die Werte klein gegen normale Messwerte bei angepasster Beleuchtung und Aufnahmedauer.

Da das Auslesen durch ein zeilenweises Kopieren der Information in ein ein-dimensionales CCD unter dem photosensitiven, zwei-dimensionalen CCD-Array erfolgte [[6]], vermuten wir, dass die vielen Elektronen [weiße Flächen im Bild] sich beim Auslesen des ein-dimensionalen Arrays durch nicht vollständig abtransportierte Elektronen am Wandler ansammeln.

Das Ausleserauschen der CCD wurde aus der Standardabweichung der Messwerte einer Bias-Aufnahme [entspricht einer Dunkelfeld Aufnahme mit einer Messzeit von 1s] bei –8 °C nach Korrektur bestimmt. Es war mit $q_{\text{rausch}} = 27.1 e \pm 0.5 e$ klein gegen die maximale Kapazität eines Pixels von ca. $157 \cdot 10^3 e^1$.

Der den Dunkelstrom , der durch den Mittelwert aller Pixel repräsentiert wird, ergab sich bei dieser Messung zu $I_{\rm dark} = -0.5 \, e/{\rm s} \pm 0.2 \, e/{\rm s}$, so dass dieser hier sehr gut vernachlässigt werden kann.

Der Dunkelstrom über der Temperatur verhielt sich wie folgt:



Abbildung 10: Dunkelstrom über der Temperatur.

¹Nach [6] sollte das Rauschen nur 15*e* betragen und die maximal Ladung eines Pixels nur $100 \cdot 10^3 e$ sein; vielleicht ist der uns gegebene Umwandlungsfaktor von Signal zu Elektronenzahl nicht korrekt. Laut [2] beträgt dieser auch 1.5 e/ADU.

Man erkennt den exponentiellen Verlauf, der nach (1) zu erwarten war.

Es ist jedoch anzumerken, dass einige Messungen sehr stark nach oben abweichende Werte lieferten und deshalb hier nicht dargestellt sind. Diese Abweichungen werden darauf zurück geführt, dass der DADOS-Spektrograph vor den Schlitzen einen zweiten optischen Zugang aufwies, wodurch man das Nahfeld an den Schlitzen hätte beobachten können. Dies taten wir jedoch nicht, weshalb er mit einer weißen Plastikkappe verschlossen war. Diese erwies sich im Verlauf des Versuchs als nicht absolut lichtundurchlässig. Dadurch führten natürliche Schwankungen der Lichtintensität der Sonne aufgrund von Wolkenbewegungen zu Intensitätsschwankungen auf der CCD und verfälschten das Ergebnis.

Durch die sehr starken Abweichungen dieser Falschmessungen gehen wir jedoch davon aus, dass alle hier dargestellten Werte davon unbeeinflusst sind.

Aus einem exponentiellen Fit ergab sich die Bandlückenenergie des Halbleitermaterials zu $E_{gap} = 0.96 \text{ eV} \pm 0.15 \text{ eV}$; laut [6] handelt es sich bei dem unterliegenden Halbleitermaterial um Silizium, wessen Bandlückenenergie 1,12 eV bei Raumtemperatur beträgt. Diese starke Abweichung nach unten führen wir auf das obig beschriebene Problem zurück.

Die Linearität des CCDs bezüglich der Belichtungszeit jedoch war zumindest für die kurzen Messungen von obigem Problem befreit und war wie folgt:



Abbildung 11: Signal des Detektors über der Belichtungszeit.

Über die visuelle Beobachtung war eine wesentlich größerer Bereich als mit dem CCD sichtbar; so konnte auch beim 9001/mm-Gitter visuell das gesamte Spektrum erfasst werden, ohne das Gitter verdrehen zu müssen. Drehte man das Gitter, so konnte die 1. Interferenzordnung des Gitters oder auch die zweite betrachtet werden. Aufgrund des Farbeindrucks war es visuell grob möglich, die Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum abzuschätzen. Auch der spektrale Gehalt der Beleuchtung des Monitors erschien für einen solchen typisch. Die Mikroskoplampe lieferte ein kontinuierliches Spektrum, die Quecksilber-Cadmium- und die Neonlampe Spektrallinien. Der mittlere Spalt schien bei richtiger Fokussierung die schärfsten Linien zu zeigen; der untere schien die Linien am stärksten zu verschmieren. Aufgrund dessen gehen wir davon aus, dass der obere Spalt der 35 µm-, der mittlere der 25 µm- und der untere der 50 µm-Spalt ist.

Das zur Kalibrierung verwendete Neon-Spektrum sah für das jeweilige Gitter ausschnittsweise wie folgt aus:



Abbildung 12: Ausschnitt des Neon-Spektrums links mit 2001/mm-Gitter, rechts mit 9001/mm-Gitter; beide durch den mittleren Spalt.

Das Spektrum der Quecksilber-Kadmium-Spektrallampe war ausschnittsweise folgendermaßen:



Abbildung 13: Ausschnitt des Quecksilber- und Kadmium-Spektrums links mit 2001/mm-Gitter, rechts mit 9001/mm-Gitter; beide durch mittleren Spalt.

Diese sind alle in sehr guter Übereinstimmung mit den Referenzspektren aus der Versuchsanleitung [siehe Abbildung 21 auf Seite 18 und Abbildung 22 auf Seite 18], betrrachtet man den Abstand der einzelnen Linien. Auch die Kalibrierung mittels Neon- und die mittels Quecksilber-Kadmium-Lampe lieferten sehr gut übereinstimmende Beziehungen zwischen Pixeln und Wellenlängen.

Jedoch stellte sich die hohe Auflösung des 9001/mm-Gitters für die Kalibrierung mittels Quecksilber-Kadmium-Lampe als Problem heraus, da die in der Referenz als einzelne Linien Eingezeichneten hiermit als zwei oder mehr aufgelöst wurden, die sich aber noch überlagerten.

Aufgrund dieser Überlagerung war es mittels Visual Spec nicht möglich, die Halbwertsbreiten aller Linien konsistent aufzulösen.

Um die Linearität der Dispersion zu zeigen, ist hier beispielhaft die mittels Neon gewonnen Kalibrierung mit dem 2001/mm-Gitter der Pixel über der Wellenlänge dargestellt:



Abbildung 14: Dispersion des 2001/mm-Gitters.

Da hier außerdem die Dispersion aller drei Spalte aufgetragen ist, sieht man die Unabhängigkeit der Dispersion von diesen. Einzig das Auflösungsvermögen [und die Intensität] wird durch die Größe der Spalte beeinflusst.

Das Auflösungsvermögen der drei Spalte ist wesentlich durch die Auswertung der Linienbreiten mittels Visual Spec beeinflusst. Aufgrund der Probleme dieses Programms mit zwei zusammenhängenden Spektrallinien und außderm der Auswertung sehr schwacher Spektrallinien, schwankte das berechnete Auflösungsvermögen besonders beim 9001/mm-Gitter sehr stark. Besonders an der Aufspaltung in "drei Linien" für alle Schlitze beim 9001/mm-Gitter sieht man diese Effekte.

Beim 2001/mm-Gitter waren diese Bestimmungsprobleme aufgrund der breiteren Spektrallinien noch nicht so groß, so dass sich folgende, gut trennbare Zusammenhänge ergaben. (3) gemäß ergaben sich recht konstante Werte über den gesamten Messbereich.



Abbildung 15: Auflösungsvermögen links des oberen, in der Mitte des mittleren und rechts des unteren Spaltes mit dem 2001/mm-Gitter.

Beim 9001/mm-Gitter ist prinzipiell auch zu sehen, dass der mittlere Spalt am höchsten, die anderen beiden jedoch schlechter auflösen. Die starke Schwankung ist, wie schon geschrieben, auf die Auswertung mittels Visual Spec zurückzuführen und stellt keinerlei physikalische Eigenschaften des Spektrographen dar!

Durch die farblichen Markierungen sind die unterschiedlichen Messungen gekennzeichnet. Im Gegensatz zum 2001/mm-Gitter mit einem spektralen Bereich von ca. 290 nm, bildete das 9001/mm-Gitter nur ca. 90 nm mit einer Aufnahme ab. Laut [1] sollten es 328 nm bezienungsweise 87 nm sein; die Abweichungen kommen durch die verwendete Kamera und den Aufbau zustande.



Abbildung 16: Auflösungsvermögen links des oberen, in der Mitte des mittleren und rechts des unteren Spaltes mit dem 9001/mm-Gitter.

Absolut ist die Auflösung eines jeden Spaltes mit dem 900 l/mm-Gitter gegenüber dem 200 l/mm-Gitter mindestens vier mal so groß.

Geht man davon aus, dass nach dem Umbau der Gitter und der leicht verschiedenen Drehung zum Strahl dieser beiden die beleuchtete Fläche immer noch ungefähr gleich groß ist, so hätte nach (3) das Auflösungsvermögen mit dem 9001/mm-Gitter viereinhalb mal so groß sein sollen. Dies ist sehr gut erfüllt.

Bei diesen großen Auflösungsvermögen und einem immer noch recht großen Spektralbereich auf der Kamera spielt auch die Größe der Pixel eine Rolle. Diese sind hier $9\,\mu\text{m} \times 9\,\mu\text{m}$ groß. Bei einem gesamt betrachteten Spektralbereich von 90 nm und bei 765 Pixeln ist das erzielbare Auflösungsvermögen also mit $8,5\lambda$ [nm] begrenzt, nimmt man einen Pixel als ausreichend für eine Spektrallinie an.

Verlangt man jedoch 3 Pixel je Linie, so ist das Auflösungsvermögen durch $2,8\lambda$ [nm] und somit bei 600 nm durch 1700 beschränkt. Die Forderung kann hier schon nicht mehr erfüllt werden.

Da wir alle Beobachtungen in erster Interferenzordnung durchgeführt haben, sollten beim mittleren Spalt $4 \,\mathrm{mm}$ des Gitters beleuchtet sein.

Beim oberen Spalt lässt sich dies konsistent für beide Gitter auf 3mm abschätzen.

Beim unteren jedoch ist dies nicht möglich. Warum diese Abweichungen hier so groß sind, können wir uns nicht erklären; anmerken möchten wir jedoch, dass bei den Messungen mit dem 9001/mm-Gitter das Interferenzbild des unteren Spalts an den Rand des CCDs abgebildet wurde.

Auch waren alle Interferenzbilder nicht parallel zu den horizontalen Pixellinien, sondern leicht verkippt [weniger als 0,5°].

Um die Sonnenspektren nicht falsch zu interpretieren, ist zuerst einmal die Sensitivität des CCDs wichtig; bei den atomaren Spektren ist im betrachteten Bereich dieser Einfluss nicht wichtig gewesen, da es nur um die Kalibrierung des CCDs ging und die Intensität der einzelnen Linien nicht wichtig war.

Laut [6] verhält sich das CCD wie folgt:



Abbildung 17: Spektrale Sensitivität des CCDs; hier KAF-0402ME verwendet.

Bei dem hier verwendeten KAF-0402ME wurden Mikrolinsen vor dem CCD-Array angebracht, um das vorhandene Licht auf die sensitiven Bereiche zu lenken. Man erkennt gegenüber dem CCD ohne Mikrolinsen eine gesteigerte Sensitivität.

Jedoch treten auch periodische Schwankungen auf, was auf schwache Reflexionen in den Linsen hinweist, die dann über Interferenz zu periodischen Intensitätsverminderungen an der CCD führen.

Es sei hier vor allem auf den Sensitivitätseinbruch bei ca. 730 nm hingewiesen, welcher auch in den Sonnenspektren gut sichtbar ist.

Um wirklich nur das Sonnenspektrum zu messen, hätten wir zuvor noch die spektrale Sensitivität des CCDs bestimmen müssen und das Messignal entsprechend kalibrieren.

Im mit dem 2001/mm-Gitter aufgenommen sind vor allem die vom terrestrischen Sauerstoff herrührenden Spektrallinien zu sehen [A,B,a]. Außerdem die H_{α} -Linie der Balmer-Serie des Wasserstoffs [C bei $\lambda_{H_{\alpha}} = 656,3$ nm nach [4]] extraterrestrischen Ursprungs, sowei die Na - D-Linien [D], wobei diesie nicht aufgelöst wurden.

Die von extraterrestrischem Quecksilber herrührende Fraunhoferlinie e bei $\lambda = 546$ nm ist hier, aufgrund von Streulicht der HgCd-Lampe, nicht zu sehen. Im Gegenteil ist sie hier sehr stark ausgeprägt.

Der sehr starke Intensitätseinbruch ist, wie schon oben erwähnt, auf die Sensitivität des CCDs mit den Mikrolinsen zurückzuführen.



Abbildung 18: Sonnenspektrum aufgenommen mit dem 2001/mm-Gitter.

Alle im mit dem 2001/mm-Gitter aufgenommenen Sonnenspektrum sichtbaren Spektrallinien sind auch in dem mit dem 9001/mm-Gitter aufgenommenem zu sehen.

Hier jedoch ist das Auflösungsvermögen so hoch, dass die Na - D-Linien [589,0 nm und 589,6 nm nach [4]] aufgelöst sind und auch noch eine dritte, in [4] unerwähnte Linie bei etwas kleinerer Wellenlänge sichtbar ist. Diese rührt wahrscheinlich von solarem Helium [$\lambda = 587,6$ nm].

In folgendem Spektrum sind noch viele weitere eingezeichnet und auch zu erkennen, jedoch sind die daneben

noch so viele andere zu sehen, so dass wir nur folgende aus diesen Aufnahmen auch ausgelesen hätten:

- bei 517 nm von Magnesium Herrührende [b],
- bei 486,1 nm die H_{β} -Linie der Balmerserie [F],
- bei 431 nm von Eisen und Calcium Herrührende [G].



Abbildung 19: Sonnenspektrum aufgenommen mit dem $900\,l/{\rm mm}\mbox{-Gitter}.$

Das Iod-Spektrum gemessen mittels Transmission des Lichtes einer Mikroskoplampe durch ein mit Iod gefülltes Glasrohr von ca. 1m Länge bei Raumtemperatur ist folgendermaßen:



Abbildung 20: Iodspektrum aufgenommen mit dem 9001/mm-Gitter.

Aus der Konvergenzstelle bei $\lambda=507\,\mathrm{nm}\pm2\,\mathrm{nm}$ ergibt sich die Summe aus Anregungs- und Dissoziationsenergie zu 2,45 eV \pm 0,02 eV. Aus der Bindungsenergie von 151 kJ/mol für I_2 ergibt sich die Bindungsenergie [betragsmäßig gleich der Dissoziationsenergie] eines Moleküls zu 1,57 eV . Somit ergibt sich die Anregungsenergie zu 0,88 eV \pm 0,02 eV .

Die Schwingungsenergien ergaben sich zu $0,007 \,\mathrm{eV} \pm 0,001 \,\mathrm{eV}$.

6 Zusammenfassung

Die sehr guten Eigenschaften des CCDs wurden überprüft und bestätigt. Er war sehr sensitiv, verhielt sich linear zur Belichtungszeit und hatte ein sehr geringes Ausleserauschen. Die meisten Fehler waren bis auf kleine statistische Effekte mittels einfacher Operationen am Computer im Nachhinein korrigierbar.

Die Dunkelstromabhängigkeit von der Temperatur war exponentiell, so dass sich die Kühlung als sehr wichtig für länger dauernd Aufnahmen herausstellt.

Der Gitterspektrograph lieferte zusammen mit dem CCD ein sehr gut aufgelöstes Spektrum im sichtbaren Spektralbereich. Durch Kalibrierung mittels atomarer Spektren am Computer war nach einiger Nachbearbeitung ein beliebiges Spektrum im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 800 nm auflösbar.

So auch das Sonnenspektrum; zumindest die dominanteste Linien des Fraunhoferspektrums.

7 Literatur

- [1] BAADER DADOS Spaltspektrograph. Web, April 2014.
- [2] APLEGEN: ST-402ME Typical Specifications. Web, 2011.
- [3] EMIL WOLF UND MAX BORN: Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light. Butterworth-Heinemann, 1980.
- [4] HELMUT SCHEFFLER: Physik der Sterne und der Sonne (German Edition). BI-Wissenschaftsverlag, 1990.
- [5] JOACHIM PIPREK: Optoelectronic Devices: Advanced Simulation and Analysis. Springer, 2005.
- [6] KODAK: KAF-0402ME Device Performance Specification, 1 Auflage, January 2003.
- [7] ROLF PELSTER, REINHARD PIEPER, INGO HÜTTL: Thermospannung viel genutzt und fast immer falsch erklärt! PhyDid 1/4 (2005) S.10-22, 2005.

8 Anhang

• Spektren der Kalibrationslampen



Abbildung 21: Spektrum der Ne-Glimmlampe [aus der Versuchsanleitung].



Cd

Abbildung 22: Spektrum der Hg-Cd-Spektralampe [aus der Versuchsanleitung].

• Handschriftliches Protokoll