

Mitteilungsblatt der

Fachgruppe

S P E K T R O S K O P I E

der Vereinigung der
Sternfreunde e.V.

Rundbrief Nr. 18 (1999)

Einzelheft: 3,50 DM (plus Porto)
Herausgeber: Ernst Pollmann
Charlottenburgerstraße 26c
51377 Leverkusen

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Dipl. Phys. Th. Bauer	Beobachtungsmethoden in der CCD-Spektroskopie	1
Dr. J. Draeger	Zur experimentellen Bestimmung wesentlicher Parameter von optischen Bauteilen	13
Prof. Dr. E. H. Geyer	Die instrumentelle Entwicklung der Astrospektroskopie (I)	16
F. Knappmann	Oberflächenveredlung von Aluminium	26
E. Pollmann	Zu diesem Rundbrief	26

Beobachtungsmethoden in der CCD-Spektroskopie

Vortrag zum
Spektroskopie-Workshop
7.-9. Mai 1999
Bonn

Dipl.-Phys. Thilo Bauer

Inhalt:

Die Grundfrage:

„Wie sieht der optimale Spektrograph aus?“

Optische Grundlagen

Grundprinzip eines Spektrographen
Praktische Varianten

Meßtechnische Randbedingungen

Abbildung auf dem CCD
Meßgenauigkeiten

Schlußfolgerungen

Die Grundfrage: „Wie sieht der optimale Spektrograph aus?“

Bei den Vorarbeiten zur Entwicklung des Radialgeschwindigkeits-Spektrographen *REVRABEL* war eine Reihe von technischen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Genauer gesagt war die allererste Aufgabe, ein Gerätedesign zu optimieren, hinsichtlich Parameter wie Spektralbereich, Abbildungsmaßstab, optische Abbildungsschärfe und Reichweiten.

Zum einen mußte die Frage geklärt werden, ob das zugrundeliegende, neue Bauprinzip seiner Aufgabe gerecht werden kann. Viel wichtiger jedoch war die Optimierung des gesamten optischen Hardwareaufbaus.

Der Ausgangspunkt:

Vor dem Bau des Spektrographen war bereits klar, daß für die Beobachtung statt der herkömmlichen Photographie ein hochwertiger CCD-Detektor eingesetzt werden sollte. Hauptgründe waren vor allem die hohe Dynamik, Linearität und, nicht zuletzt auch die weitaus bequemere Handhabung der digitalen Rohdaten mit Hilfe des Computers. Wichtig beim Design eines optischen Systems, das sich die Eigenschaften eines CCD-Detektors zunutze machen soll, sind in erster Linie die **optische Anpassung des Detektors**. Dabei ist insbesondere die Auflösung des Detektors zu berücksichtigen:

Typische Pixelgröße eines CCD: 10-25 μ

Eine wichtige Frage war demnach die optische Abbildungsqualität des Systems, insbesondere die Punktbildabbildung. Aus der interferometrischen Beobachtungstechnik (Fourier-Methoden, Speckle-Interferometrie) ist insbesondere das sogenannte **Sampling-Theorem** ausschlaggebend:

Sampling-Theorem:
periodische Signale müssen mindestens
mit der doppelten Abtastrate erfaßt werden.

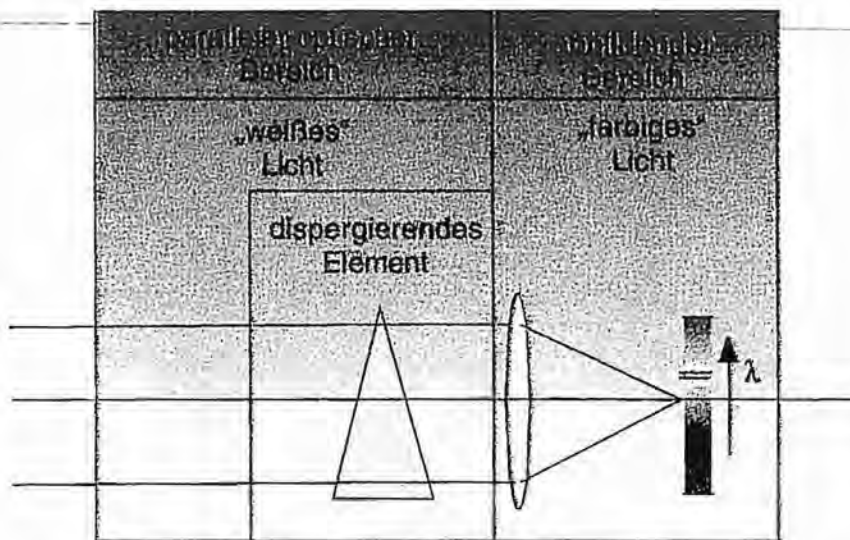
Da die Auswertemethoden für die Radialgeschwindigkeitsspektroskopie algorithmisch noch nicht genau definiert waren, wurde das System zunächst derart optimiert, daß das Sampling-Theorem zumindest erfüllt sein sollte. D.h. **die Punktbildabbildung einer Quelle sollte auf mindestens zwei Pixel fokussiert sein.** Wie wichtig diese Randbedingung für „normale“ (nicht-periodische) Signale ist, auch dann wenn sie nicht mit Fouriermethoden ausgewertet werden, sahen wir zu unserer Überraschung allerdings erst aus den umfangreichen Simulationsrechnungen, deren Ergebnisse erst mit der Fertigstellung des Geräts vorlagen. Nach diesen Vorgaben hatten die Optiker der Fa. Carl Zeiss, Jena die abbildenden Optiken optimiert.

Weitere interessante Punkte, die in dieser Kurzabhandlung besprochen werden sollen sind die Einflüsse der optischen Abbildungsqualität (Bildschärfe) auf die zu erwartenden Meßgenauigkeiten bei Positionsmessungen und Linienparameterbestimmungen.

Optische Grundlagen

Grundprinzip eines Spektrographen

Das Grundbauforn eines Spektrographen findet sich in nahezu allen modernen Varianten des klassischen Spektrographen wieder. Die optischen Bereiche dieses Grundprinzips lassen sich auch als Blockdiagramm darstellen:

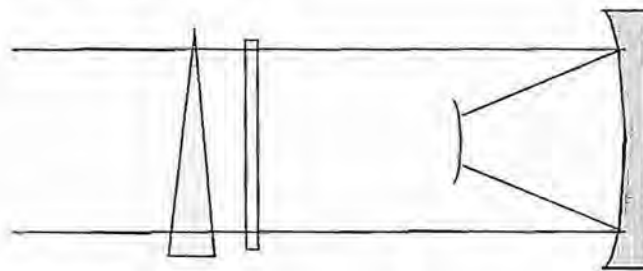


Das Wesentliche bei diesem Prinzip ist, daß sich das dispargierende Element immer in einem parallelen Strahlengang befindet. Dies ist sehr wichtig für die Abbildung des Spektrums. Läge das dispargierende Element nicht im Parallelstrahl, hätte es wohl verheerende Auswirkungen auf die Abbildung des Spektrums. Denn die optischen Fehler, die sich durch ein dickes, optisches Element wie etwa ein Prisma oder ein Gitterprisma (grism) innerhalb des konvergenten Strahls einer abbildenden Optik wären wohl nur sehr aufwendig zu korrigieren.

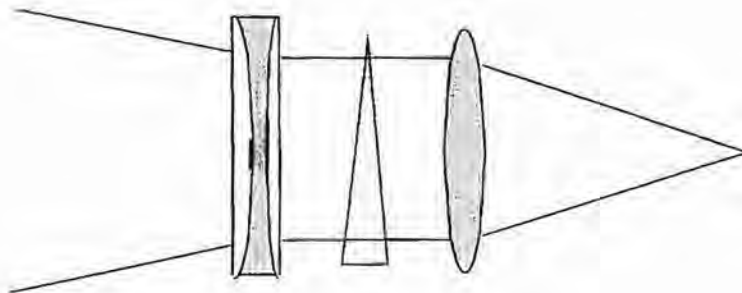
Praktische Varianten

Die Vorzüge des Einsatzes des dispergierenden Elements im Parallelstrahl hat man wohl bereits sehr früh erkannt und so waren die ersten Bauformen eines Spektrographen die sogenannten Objektiv-Prismen-Spektrographen. Diese Bauform ist sehr gut als sogenannter Feldspektrograph geeignet, also zur Beobachtung von ganzen Sternfeldern. Die spektrale Verbreiterung bei diesen Bauformen für die Ablichtung auf einer Photoplatte realisierte man zumeist mit einer Dejustage der Rektaszensionsbewegung oder einer zusätzlichen Deklinationsbewegung während der langen Belichtungszeit.

Diese Bauform findet sich in unzähligen Varianten wieder, etwa beim der Schmidt-Kamera mit Objektivprisma.

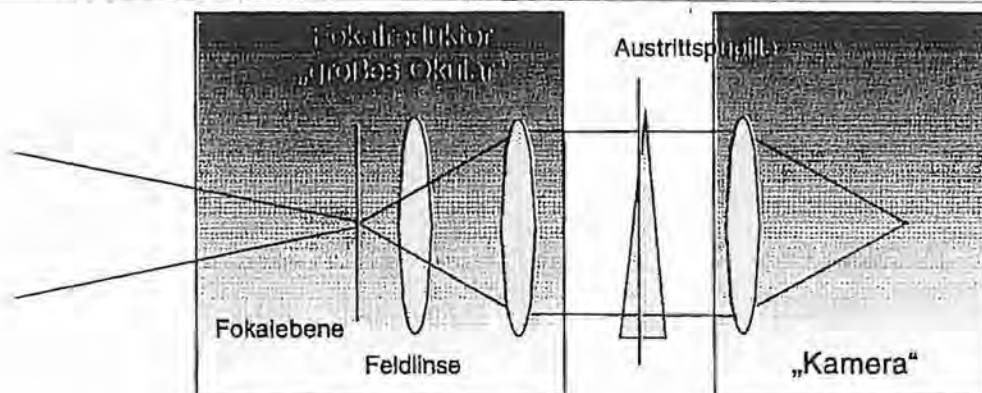


Später ersann man den klassischen Spektrographen als Zusatzgerät. Eine **unifunktionale** Einheit, die, zumeist hinter dem Fokus angebracht, den Lichtstrahl wieder parallelisiert und anschließend mit einem Spektrographenmodul koppelt. Etwas modifiziert finden wir so das Prinzip etwa in speziellen Bauformen wieder, wie dem bekanntem Spektrographen nach Lichtenknecker:



Diese Bauform ist recht preiswert zu realisieren, denn sie kommt mit zwei simplen Linsen aus dem gleichen Material aus. Die Negativlinse hat dabei die gleiche absolute (=negative) Brennweite wie die abbildende Sammellinse. Somit korrigieren sich die Farbfehler der beiden Linsen wechselseitig.

Eines der wohl praktischsten Beispiele für ein **multi-funktional** einsetzbares Gerät wurde später erdacht – hier wohl federführend von E. H. Geyer, zu Beginn der achtziger Jahre – der sogenannte **Fokalreduktor**. Strenggenommen ist es keine neue Erfindung, sondern die konsequente Weiterentwicklung einer – wie ich es gerne nenne – **universalen, optischen Standard-Schnittstelle**. Eine Art Analogon zu dem was wir in der Elektronik unter einer Schnittstelle kennen. Die Schnittstelle bildet dabei der eigentliche Parallelstrahl zwischen dem Fokalreduktor und der Kamera. Das Abbildungsverhältnis (Verkleinerung/Vergößerung) ist bestimmt durch das Verhältnis der Brennweiten des Fokalreduktors und der Kamera. Da man auch Vergrößerungen realisieren kann ist der Begriff **Universalschnittstelle** passender.



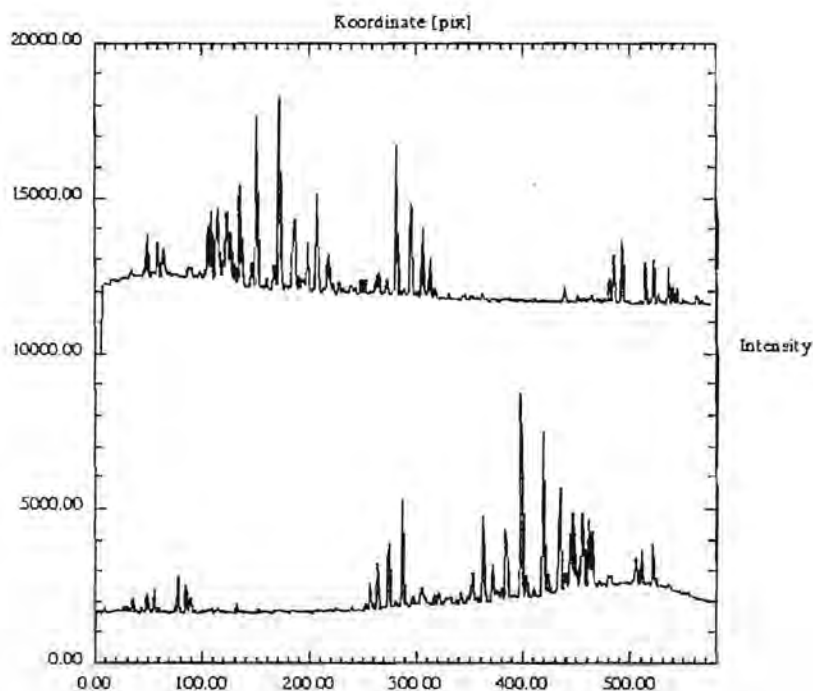
Die Vorzüge des recht aufwendigen Fokalreduktors werden durch dessen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten aufgewogen. So lassen sich etwa in der außen zugänglichen Fokalebene Lochmasken anbringen, mit deren Hilfe man unerwünschte Objekte, bei der Feldspektroskopie ausblenden kann. In der ebenfalls zugänglichen Ebene der **Austrittspupille** kann man das dispersierende Element durch Farbfilter, Polarisatoren etc. austauschen. Dies eröffnet diesem Gerät das wohl breiteste Anwendungsfeld. Der Multi-Objekt-Spektrograph (MOS), den man in der neueren Fachliteratur findet, basiert strenggenommen ebenfalls auf dem Fokalreduktorprinzip.

Meßtechnische Randbedingungen

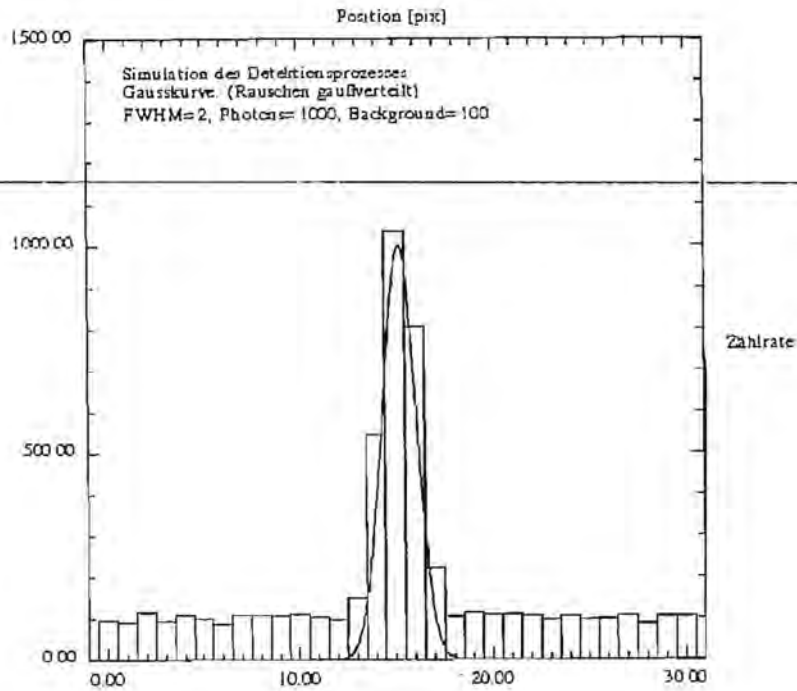
Abbildung auf dem CCD

Einer der wichtigsten Punkte bei der Vermessung von Lichtsignalen, die mit einem CCD oder einem geometrisch ähnlich aufgebauten Detektor aufgenommen worden sind, ist der **Abbildungsmaßstab**. Von besonderem Interesse ist hierbei der Einfluß der **Punktbildgröße** und des **Signal-Zu-Rausch-Abstands** auf die Meßergebnisse. Aus diesem Grunde wurden umfangreiche Simulationen gerechnet, die eindeutige Ergebnisse für die Klärung dieser Frage erbracht haben.

Für die Berechnungen wurde das Abbild einer Spektrallinie auf dem CCD-Detektor als gaußverteilt angenommen, was den praktischen Beobachtungen am nächsten kommt. In der folgenden Abbildung sind zwei typische Eichspektren (Eisenbogen, Fe) des Reversion-Radialgeschwindigkeitsspektrographen REVRAVEL dargestellt. Die Spektrallinien dieser Eichspektren sind naturgemäß scharf. Deutlich wird jedoch die Gauß-verteilte Form der einzelnen Linien, deren Halbwertsbreite etwa zwei Pixel beträgt.

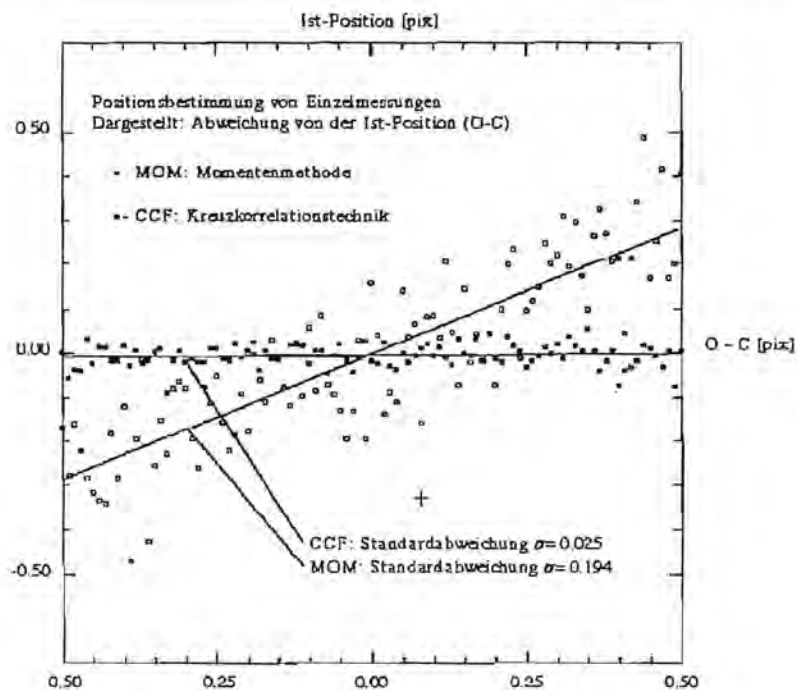


Für die Simulationen wurde diese physikalische Abbildung nachgebildet und durch eine entsprechende Gaußsche Glockenkurve genähert. Zusätzlich wurde der idealen Gaußform ein additives, und poissonverteiltes Rauschen hinzugefügt. Hier ist schematisch die simulierte Intensitätsverteilung einer solchen berechneten Linie dargestellt.

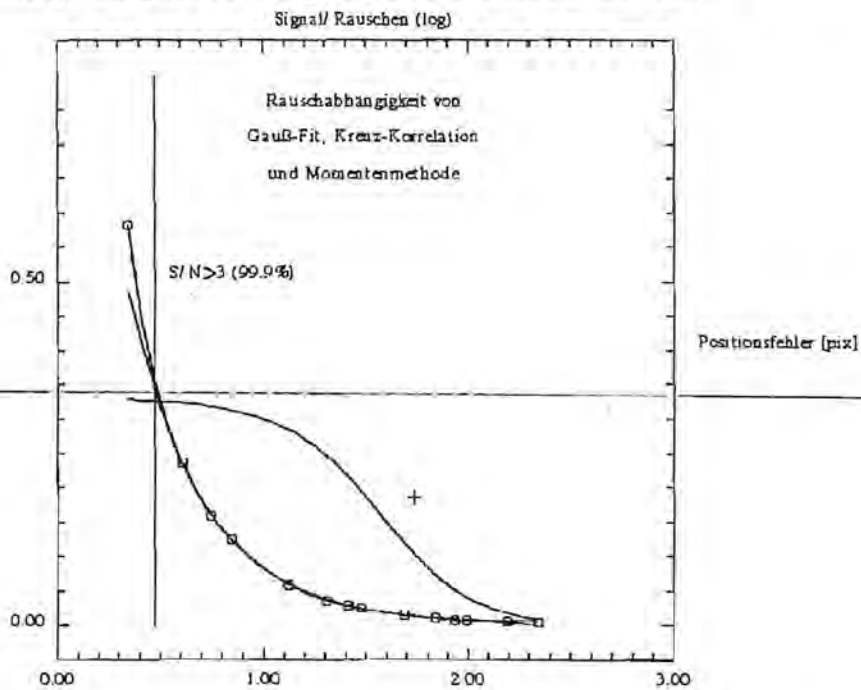


Meßgenauigkeiten

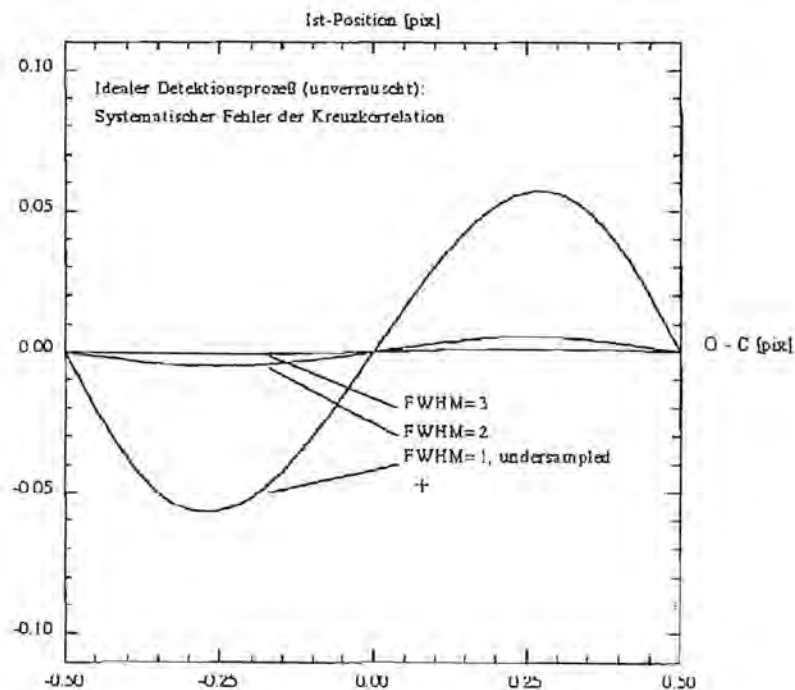
Es war die Aufgabe mit verschiedenen Methoden die Position einer Linie in Abhängigkeit vom gewählten, simulierten Signal-Zu-Rauschen wieder zu detektieren. Um Aussagen über die Brauchbarkeit der Methoden zu erhalten wurden die Abweichungen der Soll-Position zur detektierten Ist-Position ermittelt und ausgewertet. Die Simulationen wurden jeweils mit drei Methoden durchgeführt: **Schwerpunktsbestimmung** der Spektrallinie, **Gaußfit** und **Kreuzkorrelation** mit einer idealen Gaußfunktion. Dabei stellte sich eine leichte Überlegenheit der Kreuzkorrelationsmethode gegenüber dem zumeist verwendeten Gaußfit heraus, wenn auch der Gaußfit für die allgemeine Spektroskopie geeigneter ist, da er auch andere Parameter wie die wichtige Spektrallinienbreite zurückliefert. Die Schwerpunktmethode zur Bestimmung einer Linienposition ist definitiv die ungeeigneteste Methode um Linienpositionen zu bestimmen, wie die folgende Grafik veranschaulicht:



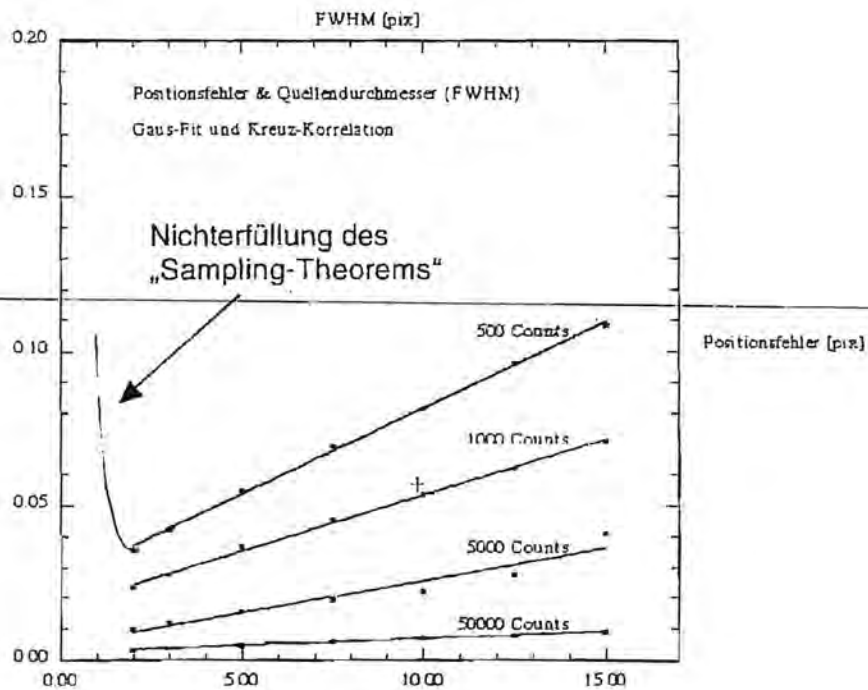
Ein wichtiges Ergebnis ist jedoch, daß sich eine eindeutige Abhängigkeit der Positioniergenauigkeit vom Signal-Zu-Rauschabstand ergibt:



Auch systematische Fehler der beiden Methoden Gaußfit und Kreuzkorrelation konnten festgestellt werden, diese sind ferner abhängig von der Linienbreite. Für die Darstellung dieser Abhängigkeit wurden die Methoden mit idealen Gaußverteilungen ohne Rauschen überprüft:



Schließlich ist in der folgenden Grafik auch die Abhängigkeit der Positionsfehler von dem jeweiligen Sampling, d.h. der Aufweitung der Linie, z.B. durch die Optik oder durch die natürliche Linienbreite einer Spektrallinie eines Sterns dargestellt.



Daraus kann gefolgert werden, daß die Abbildungsqualität in signifikanter Weise Einfluß auf die Ergebnisse spektroskopischer Messungen nimmt, was nicht anders zu erwarten war. Überraschend ist jedoch, daß auch bei Auswertemethoden, die sich nicht der Fourieranalyse bedienen, das anfangs erwähnte Sampling-Theorem in mehr als signifikanter Weise in die Meßmethoden eingeht. In der obigen Grafik ist der Verlauf der Fehlpositionierung bei sogenanntem Undersampling, also zu scharfer Linienabbildung skizziert.

Schlußfolgerungen

Allgemein können aus diesen Analysen wertvolle Rückschlüsse auf die gesamte Beobachtungsmethodik gezogen werden. So ist das optische Design eines Spektrographen besonders wichtig. Dabei spielt insbesondere die Anpassung der optischen Abbildung auf den Detektor eine entscheidende Rolle. Designs wie den zu Anfang vorgestellten ist grundsätzlich der Vorzug zu geben. Bei Linsenoptiken ist ferner noch die starke infrarote Empfindlichkeit von „schwarzweiß“ detektierenden Detektoren zu berücksichtigen. So ist der Spektralbereich – in dem ein GGD – gute Empfindlichkeit – aufweist – bis weit ins infrarote ausgedehnt, was die Auswahl von achromatisierten Linsensystemen einschränkt und prinzipiell den apochromatischen Optiken der Vorzug zu geben ist.

Ferner sind die betrachteten Abhängigkeiten von Signal-Zu-Rauschen nicht unerheblich. Denn es kann gefolgert werden, daß eine Verbreiterung der Spektren (senkrecht zur Dispersion) zwar „nett aussieht“, jedoch einen negativen Einfluß auf die zu erwartende Genauigkeit der Ergebnisse hat. Besser ist es, die Spektren möglichst „eindimensional“, d.h. als fadenförmige Spektren aufzunehmen, was den altgedienten Spektroskopiker sicher überraschen mag. Denn nur so erhält man von vorneherein das beste Signal für das aufzunehmende Spektrum. Eine nachträgliche Rückprojektion künstlich verbreiteter Spektren ist zu vermeiden.

Je nachdem ob man reine Positionsmessungen vornimmt oder parametrische Bestimmungen an den Linien vornimmt ist, ist jeweils der Kreuzkorrelation oder dem Gaußfit der Vorzug zu geben. Die Ergebnisse der beiden Methoden sind in etwa gleich.

Eine allgemeine Faustformel konnte ebenfalls aus den Simulationen abgeleitet werden: Positionsbestimmungen können mit einem CCD-Detektor theoretisch auf bis zu 1/100 pix bestimmt werden. Die systematischen Abweichungen der Positionen von Linien ist methodisch bedingt und liegt bei weniger als 1% ($\leq 0.5\%$). Die systematischen Effekte der Methoden können somit vernachlässigt werden. Damit könnte auch die Radialgeschwindigkeitsanalyse in der Amateurastronomie ein interessantes Forschungsgebiet werden. Die Randbedingungen einen Spektrographen zu bauen, der Geschwindigkeiten von weniger als 1 km/sec messen kann sind damit nicht allzu eng gesteckt und die Beobachtung der Dynamik von Sternhaufen kann sich durchaus als reizvoll und lohnenswert erweisen.

Zur experimentellen Bestimmung wesentlicher Parameter von optischen Bauteilen

J. Draeger

1 Einführung

Gerade Amateure sind aus finanziellen Gründen oft auf Schenkungen oder den Kauf gebrauchter Geräte angewiesen. Auf Datenblätter und detaillierte schriftliche Unterlagen muß man unter solchen Bedingungen leider meist verzichten. Um dennoch Kenntnis über spezielle Parameter des optischen Systems zu erlangen, ist die experimentelle Bestimmung der gewünschten Daten erforderlich. In dem vorliegenden Artikel sind entsprechende Verfahren für die Brennweite von Off-Axis-Spiegeln sowie für die Gitterkonstante und den Blazewinkel von Reflektionsgittern geschildert. Um einem Leser die Nachahmung zu erleichtern, ist die Darstellung vergleichsweise ausführlich gehalten. Die hier beispielhaft untersuchten Bauteile gehören zu einem hochauflösenden Monochromator, den der Autor durch Vermittlung von Herrn E. Pollmann geschenkt bekam; dem Spender sei an dieser Stelle nochmals ganz herzlich gedankt.

2 Brennweite von Kollimator/Kamera

Neben dem dispersiven Element sind Kollimator und Kamera essentielle Bestandteile vieler Spektrographen. In Monochromatoren haben sie oft die Gestalt parabolischer Off-Axis-Spiegel, welche eine Czerny-Turner-Anordnung bilden. Die Bestimmung der Brennweite solcher Spiegel kann mit folgender Versuchsanordnung geschehen: Das monochromatische parallele Licht eines Lasers wird durch eine Zerstreulinse Z mit 5cm Brennweite aufgeweitet. Es trifft dann auf den zu untersuchenden Off-Axis-Spiegel S , welcher von der Zerstreulinse Z die Entfernung d besitzen möge. Der Durchmesser s_1, s_2 des am Spiegel S reflektierten

Lichtbündels ist nun an zwei unterschiedlichen Meßpunkten m_1, m_2 zu bestimmen, wofür man beispielsweise ein Plastiklineal verwenden kann. Um eine große Genauigkeit zu erreichen, sollten m_1, m_2 möglichst weit voneinander entfernt sein. Durch Variation von d läßt sich die Bedingung $s_1 = s_2$ erfüllen. Im konkreten Fall galt dies für $d = 97\text{cm}$. Unter Berücksichtigung der Brennweite von Z ergibt sich daraus eine Spiegel-Brennweite von $97\text{cm} + 5\text{cm} = 102\text{cm}$ mit einem Fehler von etwa 0.2cm.

3 Gitterkonstante

Gitterkonstante und Blazewinkel eines Reflektionsgitters sind oft auf dessen Rückseite eingraviert. Fehlen diese Angaben, verfährt man im Falle der Gitterkonstante wie folgt: Das Reflektionsgitter wird senkrecht mit einem Laser beleuchtet. Zur Kontrolle des Einfallswinkels läßt sich recht gut die Gitterreflektion der nullten Ordnung verwenden. Indem durch Veränderung der Gitterorientierung diese Reflektion mit dem einfallenden Signal zur Deckung gebracht wird, kann ein verschwindender Einfallswinkel sichergestellt werden. Diese spezielle Konfiguration hat den Vorteil, daß sich die herkömmliche Gittergleichung vereinfacht zu

$$\lambda = \frac{1}{kn} \sin \beta, \quad (1)$$

wobei n die Gitterkonstante, k die Ordnung, λ die Wellenlänge und β der Ausfallwinkel ist. Wir beschränken uns in den folgenden Ausführungen auf die erste Ordnung $k = 1$; diese Annahme ist durch Betrachtung der Gesamtheit aller Gitterreflektionen leicht zu kontrollieren. Um die gesuchte Gitterkonstante zu erhalten, genügt nun offenbar die Bestimmung des Ausfallwinkels β einer auf das Gitter fallenden Strah-

lung bekannter Wellenlänge λ . Der Winkel β läßt sich bequem mit Hilfe eines durchsichtigen Plastiklineals feststellen, das man zwischen Lichtquelle und Gitter in den Strahlungsgang einbringt; durch die Transparenz wird eine Unterbrechung des Strahlungsflusses verhindert. Bei paralleler Orientierung des Lineals zum Gitter ergibt sich β anhand einfacher elementargeometrischer Überlegungen aus dem Abstand d des Lineals von dem Gitter und dem Abstand s der Gitter-Reflektion 1. Ordnung von der Gitter-Reflektion 0. Ordnung auf dem Lineal gemäß

$$\sin \beta = s / \sqrt{d^2 + s^2}. \quad (2)$$

Die parallele Ausrichtung des Lineals ist gewährleistet, wenn auf dem Lineal die beiden Gitter-Reflektionen 1. und -1. Ordnung von der Gitter-Reflektion nullter Ordnung jeweils denselben Abstand haben. Als monochromatische Strahlungsquelle ist ein Laser bekannter Wellenlänge λ zu empfehlen. Das beispielhaft untersuchte Reflektionsgitter lieferte folgende Meßwerte:

λ	d	s
457nm	229mm	151mm
514nm	229mm	181mm
632nm	149mm	165mm

Aus ihnen erhält man durch Einsetzen in die Gleichung (1) übereinstimmend jeweils 830 ± 2 Linien/mm.

4 Blazewinkel

Der zuvor geschilderte Versuchsaufbau läßt sich gleichzeitig dazu benutzen, den Blazewinkel ϕ eines Gitters zu bestimmen. Zu diesem Zweck mißt man die Intensität $I(\alpha, \beta)$ der Gitterreflektionen mit einem geeichten Photometer in Abhängigkeit von dem Einfallswinkel α bzw. β des verwendeten Laserlichts mit Wellenlänge λ . Ein analytischer Ausdruck zur Berechnung von $I(\alpha, \beta)$ aus den Gitterparametern liefert daraus den Winkel ϕ . Eine entscheidende Erleichterung stellt in unserem Fall dar, daß α gleich Null ist. Damit vereinfacht sich der

Ausdruck

$$I(\alpha, \beta) = I_0 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(\alpha - \phi) + \sin(\beta - \phi))\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda}\right)^2((\sin(\alpha - \phi) + \sin(\beta - \phi))^2)} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{W\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta)\right)}{\left(\frac{a\pi}{\lambda}(\sin \alpha + \sin \beta)\right)} \quad (3)$$

zur Berechnung der Intensitätsverteilung $I(\alpha, \beta)$ bedeutend; darin bedeuten I_0 die unmodulierte Intensität, b die Breite des reflektierenden Anteils einer Gitterlinie, a den Abstand der Gitterlinien und W die Gitterbreite. Eine weitere Simplifikation ist bei Betrachtung des Intensitätsverhältnisses I_1/\bar{I}_1 der 1. und -1. Ordnung anstelle einer absoluten Intensität möglich; denn so fallen einige störende Parameter weg und brauchen nicht mehr berücksichtigt werden. Unter Ausnutzung von $\alpha = 0$ erhält man so

$$\sqrt{\frac{I_1}{\bar{I}_1}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(-\phi) + \sin(\beta - \phi))\right)}{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda}(\sin(-\phi) + \sin(-\beta - \phi))\right)} \cdot \frac{\sin(-\phi) + \sin(-\beta - \phi)}{\sin(-\phi) + \sin(\beta - \phi)} \quad (4)$$

Die Ausnutzung verschiedener Winkeladditionstheoreme liefert schließlich

$$\sqrt{\frac{I_1}{\bar{I}_1}} = \frac{\sin\left(\frac{2\pi b}{\lambda}(\sin(\beta/2 - \phi) \cos(\beta/2))\right)}{\sin\left(\frac{2\pi b}{\lambda}(\sin(-\beta/2 - \phi) \cos(-\beta/2))\right)} \cdot \frac{\sin(-\beta/2 - \phi)}{\sin(\beta/2 - \phi)} \quad (5)$$

Durch Bestimmung von β entsprechend den Ausführungen im vorangegangenen Abschnitt über Gleichung (2) und durch Messung der Intensitäten I_1 und \bar{I}_1 lassen sich in Gleichung (5) alle Unbekannten mit Ausnahme des Blazewinkels ϕ und des Parameters b festlegen. Der Parameter a ist als Kehrwert der Gitterkonstante mit den im letzten Abschnitt beschriebenen Methoden festlegbar. Das als Beispiel untersuchte Blazegitter mit $a = 1/830$ ergab die folgenden Werte:

λ	β	I_1	\bar{I}_1
457nm	33.5°	0.95mW	1.45mW
514nm	38.2°	0.46mW	0.67mW
632nm	49.5°	0.42mW	0.77mW

Setzt man das typische Sägezahnprofil eines Blaze-Gitters voraus, so gilt für kleine Blazewinkel ϕ die Näherung $b \approx a$; die Plausibilität dieser Annahme ist nachträglich anhand des für ϕ ermittelten Wertes und anhand der Konsistenz der einzelnen Lösungen für verschiedene Wellenlängen überprüfbar. Stellt sie sich als unzulässig heraus, muß anstelle des verwendeten einparametrischen ein aufwendigeres mehrparametrisches Approximationsverfahren auf der Grundlage entsprechend vieler Meßpunkte ausgeführt werden. Typischerweise wird ein solches Vorgehen etwa für Echelle-Gitter erforderlich sein. In dem vorliegenden einfacheren Fall ist wegen $b \approx a$ der Ausdruck $\cos(\beta/2) \cdot (2\pi b/\lambda)$ bei $\lambda = 457\text{nm}$ gleich 909, bei $\lambda = 514\text{nm}$ gleich 797 und bei $\lambda = 632\text{nm}$ gleich 623. Nach Einsetzen dieser Zahlenwerte in (5) entsteht eine nichtlineare implizite Gleichung, die mit Hilfe numerischer Standardverfahren leicht den gewünschten Blazewinkel ϕ ergeben. Konkret ergibt sich im Beispiel:

λ	ϕ
457nm	4.36°
514nm	4.68°
632nm	6.43°

Der erhaltene Wert von $\approx 5^\circ$ sichert nachträglich die Plausibilität der Näherung $b \approx a$ zu. Seine Variationsbreite ist zwar relativ groß, aber erträglich. Zu den dafür verantwortlichen Ursachen gehört, daß (3) lediglich eine Näherung ist. Der aus dieser Beziehung hergeleitete Blazewinkel ist folglich ohnehin mit einem mehr oder minder großen Fehler behaftet. Außerdem hängt der Blazewinkel ϕ in (5) sehr empfindlich vom Intensitätsverhältnis I_1/\bar{I}_1 ab; weil letzteres nur mit geringer Präzision bestimmt werden konnte, sind die Schwankungen des berechneten Blazewinkels entsprechend groß. Schließlich trägt auch die nicht exakt geltende Näherung $b \approx a$ zur Vergrößerung des Fehlers bei. Die erreichte Genauigkeit sollte

jedoch für die meisten praktischen Zwecke ausreichen.

5 Danksagung

Herrn Dr. Beisker sei an dieser Stelle für die geleistete Unterstützung bei der praktischen Durchführung der Messungen sehr herzlich gedankt.

Die instrumentelle Entwicklung der Astrospektroskopie

Edward H. Geyer, D-54552 Brockscheid

1. Einführung:

In Bonn befinden wir uns auf historischem Boden was die Spektroskopie der elektromagnetischen Strahlung vor 100 Jahren im allgemeinen und auch die Astrospektroskopie anbetrifft:

Am physikalischen Institut wirkte *Heinrich Kayser (1853 - 1940)*, der in Fortführung der Arbeiten von *J.J. Balmer (1825 - 1898)* sich um die Erstellung der Spektrallinienserien anderer Elemente verdient machte und in Zusammenarbeit mit *C. Runge (1856 - 1927)* die Ähnlichkeiten der Spektrenserien mit den Gruppen des Periodischen Systems aufdeckte. In dem umfangreichen Werk '*Handbuch der Spektroskopie*' (7 Bde. Leipzig 1900 - 1924) hat er zusammen mit einer Reihe von Kollegen das gesamte damalige spektroskopische Wissen zusammengetragen. Es bildete die Ausgangsbasis für die Quantenphysik der Atomhülle und die Linienidentifikation vor allem auch bei spektroskopischen Untersuchungen kosmischer Objekte.

Neben dem Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam unter dem führenden Astrospektroskopiker *H.C. Vogel (1841 - 1907)*, hatte sich auch an der Bonner Sternwarte unter ihrem 3. Direktor, *K. F. Küstner (1856 - 1936)*, die Astrospektroskopie ein wesentliches Zentrum in Deutschland gebildet. Mit den spektroskopischen Arbeiten Küstners und seiner Mitarbeiter - allen voran die Radialgeschwindigkeitsbestimmungen an über 250 Sternen mit dem 3-Prismen Spektrographen am 30/36 cm Doppelrefraktor (aufgestellt 1899), der 1901 nach den Vorbild der Potsdamer Spektrographen konstruiert worden war, hatte sich auch die Bonner Sternwarte auf diesem Gebiet einen Namen gemacht. Aus

diesem Grund fand die 5. internationale Tagung der 'Solar Union' 1913 in Bonn statt, an der u.a. die Einführung des Harvard (= Henry Draper) Spektralklassifikations-System beschlossen wurde.

Das wesentliche Bindeglied zu den kosmischen Objekten ist die elektromagnetische Strahlung, deren Richtung (= Astrometrie), Quantität (= Photometrie) und Qualität (= Spektroskopie) die astronomische Forschung mit z.T. höchst aufwendigen Teleskopen und Instrumenten zu analysieren versucht, um daraus ein schlüssiges physikalisches Weltbild zu errichten.

Die Astro-Spektroskopie ist unter diesen 3 Hauptgebieten der Astronomie das jüngste und hat die eigentliche Astrophysik auf den Weg gebracht.

Sie hat ab dem 2. Drittel des 19. bis Mitte des 20. Jahrhunderts durch die qualitative und quantitative Analyse der Spektren kosmischer Objekte und deren Radialgeschwindigkeiten die theoretischen und beobachtungsmäßigen Grundlagen für unser heutiges Wissen über die Zustände der Materie im Kosmos und seiner Struktur geschaffen.

Über die dabei stattgefundenen technischen Entwicklungen der Spektralapparate möchte ich Ihnen berichten.

2. Die Anfänge im 17. Jrdh.

Seit urdenklichen Zeiten sind die Spektralfarben durch die Beobachtung des Regenbogens bekannt gewesen; man hat sich aber seit der Antike bis etwa 1750 über das Wesen des Lichtes und die Regenbogenfarben kaum Gedanken gemacht. Obwohl die Griechen das Reflexionsgesetz kannten, wurde das Brechungsgesetz erst um 1620 von *W. Snellius* (1591 - 1626) experimentell gefunden. *R. Descartes* (1596 -1650) gab eine Erklärung an Hand seiner Vorstellung, daß das Licht aus winzig kleinen geschleuderten Teilchen bestehe. Er formulierte damit die

Korpuskulartheorie des Lichtes, die dann von *P. de Fermat* (1601 - 1665) zum 'Prinzip des kürzesten Lichtweges' ausgebaut wurde.

In diese Zeit fällt auch die Entdeckung der Interferenzerscheinungen ('Farben dünner Blättchen' bzw. 'Newtonsche Ring') durch *F.M. Grimaldi* (1618 - 1663) und unabhängig von *R. Boyle* (1626 - 1691) sowie *R. Hooke* (1635 - 1703). Letzterer fand auch die 'Lichtbeugung', also das Auftreten von Licht im geometrischen Schatten. Im Gegensatz zur

Korpuskulartheorie vertrat er als erster die Wellentheorie des Lichtes, die von *Ch. Huygens* (1629 - 1727) in Form des 'Lichtäthers' als Wellenträger ('Undulationstheorie') 1678/90 formuliert wurde, nachdem er die Polarisation des Lichtes 1678 an Hand der Entdeckung der Doppelbrechung des Kalkspats durch *E. Bartholinus* (1625 - 1698) feststellte. Ebenso fällt in diese Zeit (1675) die Entdeckung der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes durch *O. Römer* (1644 - 1710).

Um 1666 stellte *I. Newton* (1642 - 1727) mittels Prismen umfangreiche Experimente am Sonnenlicht an und fand damit die experimentelle Farbzerlegung des Lichtes. Dies war die Geburtsstunde der Astrospektroskopie bzw. der Spektroskopie im allgemeinen. Seine zunächst einfache experimentelle Anordnung bestand aus einer kleinen runden Öffnung im Fensterladen, durch die er im abgedunkeltem Zimmer wie mit einer Lochkamera (camera obscura) das Sonnenbild auf ein Prisma projizierte (Abb. 1a) und das austretende Licht mittels einer Linse auf einen weißen Schirm abbildete.

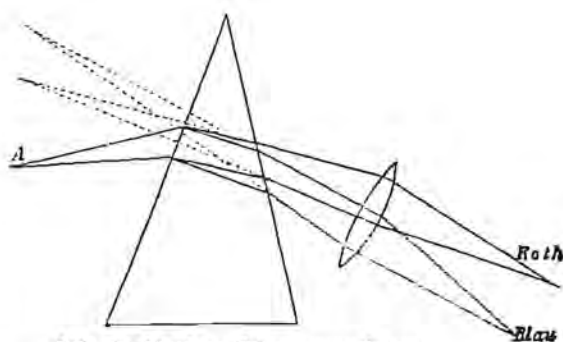
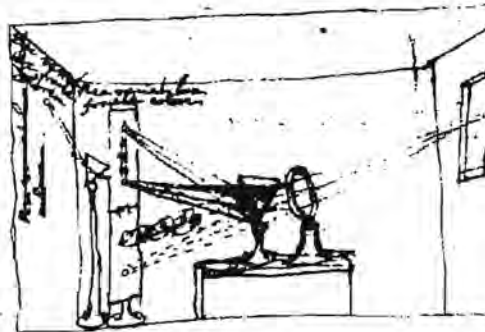


Abb. 1a: Newtons Prismenanordnung

Auf diese Weise erhielt er ein ovales Sonnenbild, dessen in Dispersionsrichtung liegender oberer Rand rot, der untere Rand blau gefärbt war. Die sonstigen Teile des oval sich abbildenden Sonnenbildes erschienen jedoch weiß. Da Newton nicht das Kollimationsprinzip (d. h. homozentrische Parallelstrahlenbündel) anwandte bzw. kannte, lag die Ursache auch darin, daß die einzelnen farbigen (monochromatischen) Sonnenbilder sich längs der Dispersionsrichtung überlagern und somit zum weißen Gesamtlicht aufaddieren. Nur die beiden in der Dispersionsrichtung liegenden Sonnenrandpartien bleiben rot bzw. blau. Um nun die Regenbogenfarben auch mit dem Prisma zu verwirklichen ersann Newton einen Versuch - das 'experimentum crucis' wie er es nannte (Abb. 1b) - und das wir mit Recht als Vorläufer des Doppelmonochromators bezeichnen können:



Skizze Newtons zum experimentum crucis

Abb. 1b

Durch das kleine Loch im Fensterladen ließ er das Sonnenlicht, wie in Abb. 1a (aber ohne abbildende Linse), auf das erste Prisma fallen. Im Abstand von 12 Fuß (3.65 m) befand sich ein Brett mit einem weiteren kleinen Loch (oder abdeckbaren Löchern), hinter dieses er ein zweites Prisma (nach Abb. 1a) aufstellte. Das Brettloch bildet er über dieses 2. Prisma mittels einer Linse auf die Zimmerwand scharf ab. Sodann drehte er das erste Prisma schrittweise um seine Achse (im Hauptschitt), sodaß nach und nach verschiedene Teile des über Prisma 1 projizierten ovalen Sonnebildes auf das Loch im Brett fielen, die durchgelassenen Strahlen

nunmehr das Prisma 2 passierten und an verschiedene Stellen der Wand mit der Linse das mehr oder minder monochromatisch erscheinende Brettloch scharf abbildeten. Lassen wir Newton mit eigenen Worten das Ergebnis dieses Experiments beschreiben:

„Aus der Verschiebung dieser Stellen sah ich, daß das Licht von demjenigen Ende des Bildes, zu dem die Brechung des ersten Prismas hin erfolgte, im zweiten Prisma eine beträchtlich größere Brechung erfuhr als das Licht, das vom anderen Ende kam. Damit war die Ursache der Länge dieses Bildes aufgedeckt; sie besteht in nichts anderem, als darin, daß das Licht aus unterschiedlich brechbaren Strahlen besteht, die, unabhängig von der Verschiedenheit des Einfallswinkels, je nach ihrem Grade der Brechbarkeit zu verschiedenen Stellen der Wand geleitet werden.“

Damit gelang auch Newton der Nachweis, daß sich Licht einer Spektralfarbe nicht weiter zerlegen läßt. Er unterlag jedoch eines entscheidenden Fehlers infolge seiner Auffassung, daß die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Farbe, also die Dispersion, für alle Gassorten die gleiche sei. Dies führte zwar zur Erfindung der Spiegelteleskope, verhinderte aber für fast 100 Jahre den Bau achromatischer Linsensystemen.

Newton, der sich die Korpuskulartheorie zu eigen gemacht hatte, trug sein optisches Wissen bereits 1672 zusammen, aber es wurde erst in der erweiterten Fassung *‘Opticks’* als 3-teiliges Buch 1704 (nach dem Tod seines wissenschaftlichen Kontrahenten Hook) veröffentlicht. Durch dieses Buch und durch die Autorität Newtons selbst wurde fast das gesamte 18. Jahrh. hindurch das Gebiet der Optik beherrscht und England auf optisch-feinmechanischem Gebiet zur führenden Nation gemacht. Nur *J. W. Goethe* (1749 - 1827) stellte sich mit seiner idealistischen *‘Farbenlehre’* 1791 gegen Newtons Autorität.

3. Der Beginn der spektroskopischen Instrumentenentwicklung:

Fraunhofer und seine Zeit.

In den ersten zwei Jahrzehnten des 19. Jahrh. wurden durch die Entdeckungen der ultraroten (infraroten) Sonnenstrahlen um 1800 durch *F. W. Herschel* (1738 - 1822) und 1801 der ultravioletten durch *J. W. Ritter* (1776 - 1810) dem Sonnenspektrum wieder Aufmerksamkeit zuteil: Galt in Nachvollziehung der Newtonschen Prismaversuche das Sonnenspektrum als kontinuierlich, so stellte 1802 *W. H. Wollaston* (1766 - 1828) mit seinen Prismenversuchen an der Sonne, die er bereits im kollimierten Strahlengang (großer Abstand des Prisma von einer schmalen Spaltöffnung durch die das Licht auf das Prisma fällt) 7 Absorptionsgebiete im Spektrum fest. Er hielt sie für die Abgrenzungen der einzelnen Regenbogenfarben und schenkte ihnen keine weitere Aufmerksamkeit. Die Wollastonsche Versuchsanordnung ist in Abb. 2 dargestellt:

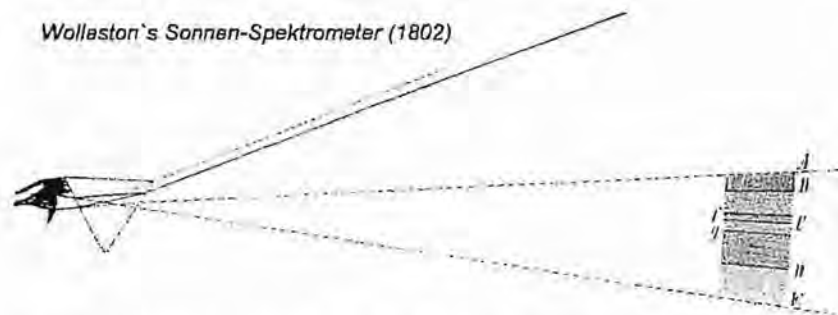


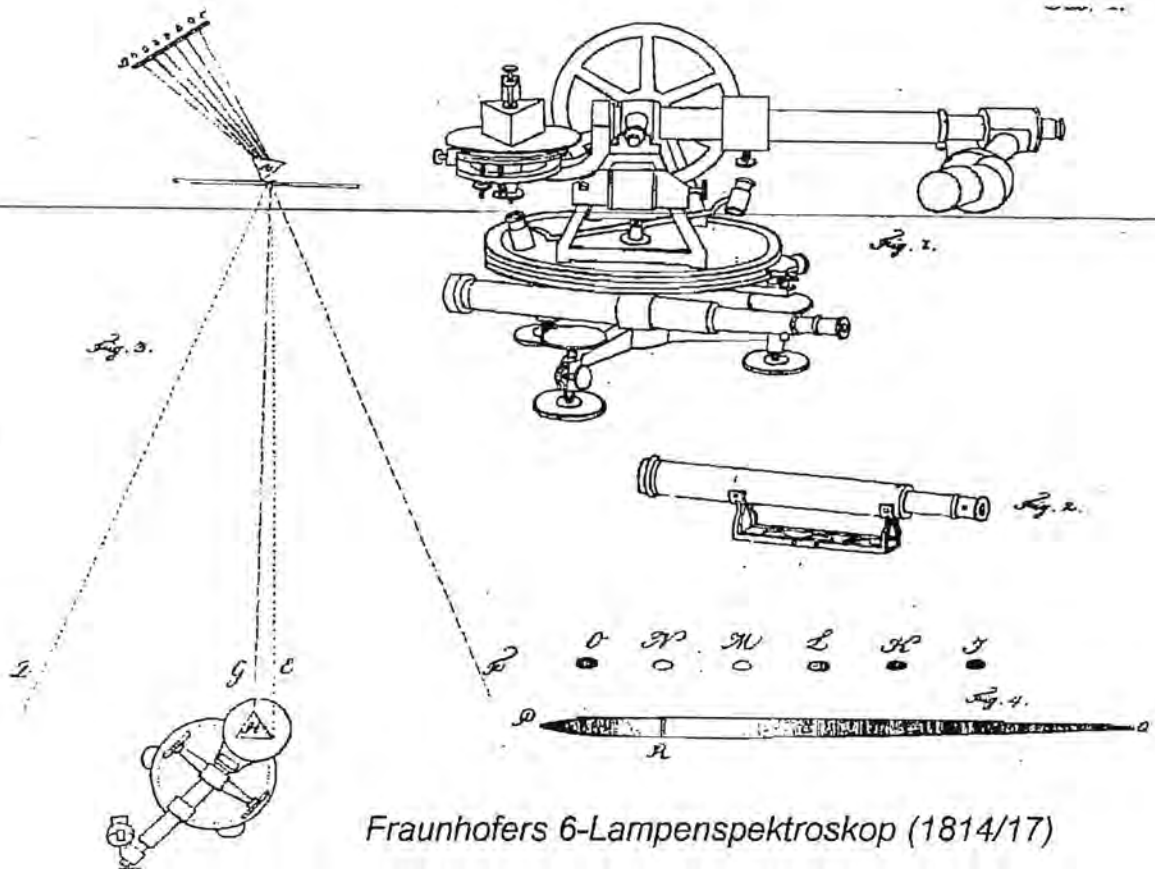
Abb. 2: Wollaston's virtuelle Beobachtung des Sonnenspektrum

Durch die 1806 beginnende napoleonische Kontinentalsperre gegen England und den damit verbundenen 'Wirtschaftskrieg' war das westeuropäische Festland von den englischen optisch-feinmechanischen Werkstätten abgeschnitten, allen voran von der Zufuhr optischen Glases. Dies war die günstige Gelegenheit für den Unternehmer *J. Utzschneider* (1763 - 1840), zusammen mit dem begabten Techniker *G. Reichenbach*

(1772 - 1826) und dem Mechaniker-Uhrmacher *J. Liebherr* (1767 - 1840) um 1804 einen optisch-feinmechanischen Betrieb in dem säkularisierten oberbayrischen Kloster Benediktbeuren zu gründen. Durch den angeworbenen Schweizer P. L. Guinand (1748 -1824), der ein Verfahren zur Erschmelzung schlierenfreien optischen Glases erfunden hatte, konnte der Glasmangel überwunden werden. In diesen Betrieb tritt der 20 jährige Autodidakt *J. Fraunhofer* (1787 - 1826) - er hatte keinerlei Schulausbildung - als Optiker ein. Durch seine erste wissenschaftliche Arbeit über Spiegelteleskope (erst 1929 in Z. f. Instrumentenkunde gedruckt) und seine Erfindungen (Poliermaschine, Probeglas, Pendelschleifmaschine, Fühlhebel und Sphärometer) wird er bereits 2 Jahre später (1809) zum Teihaber in dem Betrieb.

Er war ein Meister der Experimentierkunst und erkannte sehr schnell die Unzulängigkeit der Messung bzw. des Wissens über die farbabhängigen Brechungsindizes (Dispersion) der verschiedenen Glassorten und Schmelzen. Mit einer genialen Anordnung, dem 6 Lampen Spektrometer, versuchte er ab 1811 an verschiedenen Stellen des Spektrums sich feste Marken zu schaffen. Er übernimmt zwar Newtons 'experimentum crucis' aber unter Anwendung eines kollimierten Strahlengangs, den er durch große Abstände der Lochmasken bzw. Spalte von den Prismen erreichte (Abb. 3a): Der Abstand der Lochmaskenschablone mit kleinen Löchern, vor denen 6 Lampen angeordnet waren, zum Prisma 1 betrug etwa 4,3 m, jener vom schmalen Spalt (im Fensterladen) hinter Prisma 1 zum Prisma 2 etwa 225 m! Letzteres wurde auf einem dreh- und justierbarem Tischchen eines umgebauten Theodoliten aufgesetzt und die durch Prisma 2 entworfenen ovalen monochromatischen, in festem Winkelabstand voneinander stehenden Lampenlochmasken (rot bis blau) mit dem auf unendlich gestellten Theodolitenfernrohr beobachtet. Die Winkelabstände konnten somit auf wenige Bogensekunden genau vermessen und daraus die

relativen Brechungsindizes des Glases von Prisma 2 berechnet werden. Zugleich fand er in dem Lampenlicht ein helles Band, das im gelb-orangen Lochbild gelegen war.



Fraunhofers 6-Lampenspektroskop (1814/17)

Abb. 3a:

Mit diesem Gerät beobachtet er auch das Sonnenlicht, das er auf den Spalt im Fensterladen fallen ließ und entdeckte die nach ihm benannten Absorptionslinien im Sonnenspektrum, von deren festen gegenseitigen Winkelposition er sich durch viele Versuche (im Anschluß an den Lampenapparat) überzeugte und ihre Ursache richtig dem Sonnenlicht selbst zuschrieb. Weiterhin stellte Fraunhofer fest, daß sich eine starke Absorptionslinie, die sich auch noch als doppelt erwies, genau an der Winkelposition befand, an der er auch das helle Band im gelb-orangen Lampenlicht beobachtet hatte. Die stärksten Absorptionslinien bzw. Bänder bezeichnete er mit den Buchstaben A, B, K, I; das gelb-

orange Liniendublett erhielt den Buchstaben D (Element Na, das in den Öl-, Gas- und Alkohollampen stets in Spuren vorhanden ist).

Mit der gleichen Anordnung - der sechs Lampen Apparat hatte sich erübrigt, da ja die festen Bezuglinien im Sonnenspektrum mit wesentlich höherer Genauigkeit die relativen Brechungsindizes zu bestimmen gestatteten - untersucht Fraunhofer nachts die Venus sowie Sirius, „ohne das Licht durch eine kleine Öffnung einfallen zu lassen“ wie er schreibt (da ja das Licht kosmischer Objekte von vornherein kollimiert ist), d.h. nur mit dem kleinen 'Objektivprismen'- Theodolitenfernrohr. Da aber die fadenförmig erscheinenden Sternspektren keine Linien zeigen, verbreitert er diese mit Hilfe einer Zylinderlinse. Er ist somit auch der Erfinder des Objektivprismen bzw. -Gitterspektroskops, das bis zur Einführung der Astrophotographie mit lichtstarken Porträtobjektiven (ab etwa 1875) nun als Objektivprismenkamera eine wesentliche Rolle bis in unsere Zeit für die Astro-Spektroskopie spielen sollte und uns die Fülle der Erkenntnisse über stellare Spektren bescherte.

Im Spektrum der Venus findet er einige Absorptionslinien wie im Sonnenspektrum und zwar an den gleichen Stellen, jedoch im Spektrum des Sirius sieht er nur 3 dunkle Linien (eine im Grünen = H_{β} ; und zwei im Blauen = H_{γ} & H_{δ}).

Weiterhin entdeckt Fraunhofer bei seinen Untersuchungen des Sonnenspektrums den Farbfehler des Auges. Dies veranlaßt ihn, die Farbempfindlichkeit des Auges zu bestimmen, um damit auch die richtige spektrale Kompensation der Achromate für das visuelle Beobachten zu erreichen. Mit einem von ihm erfundenen Spektralphotometer (Abb.: 3b), das auf dem Abstandsquadrat beruht, bestimmt er diesen funktionellen Zusammenhang (die Kurve stellt eigentlich die Faltung der spektralen Intensitätsverteilung des Sonnenlichtes mit der Farbempfindlichkeit des Auges dar). Damit ist Fraunhofer auch der Begründer der

Spektralphotometrie, die ja für die Astrophysik fundamentale Bedeutung hat.

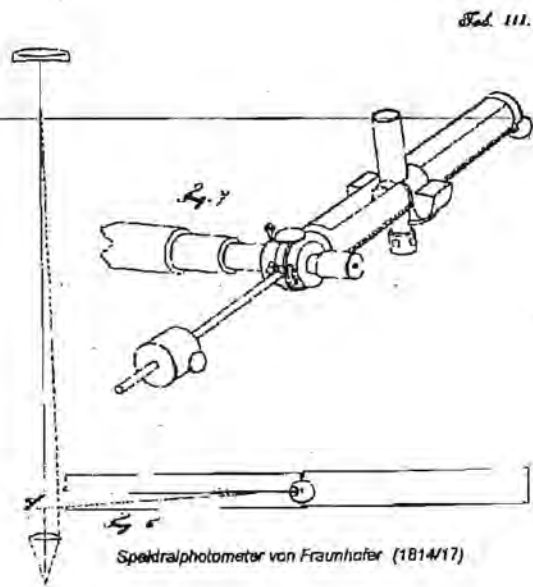


Abb.3b: Fraunhofers Spektralphotometer

Der Beitrag wird in SPEKTRUM Nr. 19 fortgesetzt.

Oberflächenveredlung von Aluminium

(v. Ferdinand Knappmann, Bochum)

Wie sich auf unserer letzten Tagung in Freige-richt herausstellte, besteht Interesse, selbst eloxieren zu können. Hier noch einmal die Zusammenfassung meines Vortrages:

Das Eloxieren ist ein elektrochemischer Vor-gang, eine sogenannte anodische Oxidation der Aluminiumoberfläche im μ -Bereich. Die Al_2O_3 -Schicht (Korund) ist glashart und ein-färbbar. Auf Sauberkeit der Bäder und der zu eloxierenden Teile achten. Die Teile während des gesamten Prozesses nicht mit den Fingern berühren (Fleckenbildung). Kein anderes Me-tall außer Aluminium hat etwas in den Bädern zu suchen (Verunreinigung). Eine eventuelle Schwarzfärbung des Aluminiums schon im Heizbad bedingt durch Kupferlegierung, hat keine Bedeutung. Sie verschwindet im Eloxierbad.

Gefäße: Für das Beizbad z.B. eine alte Kaffee-kanne aus warmfesten Glas; für das Eloxierbad ein Kunststoffgefäß, innen mit Alu-Blechen (1mm oder dicker) ausgekleidet (Kathode). Für das Färbebad ein Glasgefäß, das zur Erwär-mung auf 50 °C in ein Wasserbad gesetzt wird.

Heizung: Beizbad: Kocher oder Herdplatte; Eloxierbad: 1 oder 2 Aquarienheizungen; Was-serbad für das Färbebad (kleine Badewanne): 2 Tauchsieder von je 1000 Watt. Thermostaten erleichtern die Arbeit.

Temperaturüberwachung: 3 Thermometer

Stromversorgung: 1 stabilisiertes, evtl. regelba-res Netzgerät (für beste Ergebnisse: 16 V, DC). Achtung! Je größer das zu eloxierende Teil ist, um so höher muß die Leistung sein.

Prozeß:

- 1) Beizen bei 50 °C 1-5 Min.; Schäumung muß stattfinden. Je länger das Beizen, um so besser das Eloxieren. Doch Achtung! Material wird abgetragen.
- 2) Spülen unter fließendem Wasser und 5 Min. wässern.
- 3) Eloxieren: Pluspol an das Teil anschlie-ßen, an den Blechen der Badauskleidung ist der Minuspol angeschlossen, das Teil an einem Stativ hängend ins 18-20°C temperierte Bad eintauchen, Strom ein-

schalten (16V) und für eine Stunde im Bad belassen.

- 4) Spülen unter fließendem Wasser und 5 Min. wässern.
- 5) Färben: das Teil in das 50 °C temperierte Färbebad eintauchen und für 30 Min. darin belassen.
- 6) Spülen unter fließendem Wasser und 5 Min. wässern.
- 7) Verdichten: Teil in 100 °C kochendem Wasser eintauchen und 1 Stunde kochen.
- 8) Das Teil mit einem Tuch oder Papier trocken reiben, um den überflüssigen Farbstoff zu entfernen. Der Prozeß ist be-endet.

Für das Anhängen der Teile in die Bäder haben sich Chemiestative- und Klammern bestens bewährt. Das zu eloxierende Teil darf nur mit einer Klemmvorrichtung aus Aluminium ins Bad getaucht werden. Schutzbrille und Gum-mihandschuhe tragen!

Zusammensetzung der Bäder:

Beizbad: 50g NaOH in 1l Wasser/50°C

Eloxierbad: 20%ige H_2SO_4 auf 18-20°C tempe-rieren; Spannung 12-16 Volt DC.

Färbebad: 10-20g Alficolor Schwarz 611 in 1l Wasser bei 20 °C auflösen und auf 50-60 °C temperieren.

Bezugsquelle für Alficolor Schwarz 611:

Alufinish GmbH & Co KG

Otto Wolf Straße

5470 Andernach

Tel: 02632-493015

Zu diesem Rundbrief

(v. Ernst Pollmann)

Dem Leser wird es nicht entgangen sein: das Layout der Seiten 1-25 weicht vom bisher gewohnten ab. Dies hat seinen Grund darin, daß die Autoren bei der Verfassung ihrer Bei-träge Formate gewählt haben, die nicht mit meinem Textverarbeitungssystem konvertiert werden konnten. Ich bitte um Verständnis, wenn ich mir aus Gründen eines noch gerade vertretbaren Arbeitsaufwandes hier nicht die Mühe des Abschreibens gemacht habe.

Darüber hinaus sei darauf hingewiesen, daß der Artikel von Herrn Thilo Bauer außerdem im Internet unter: <http://www.bwmc.net> veröf-fentlicht worden ist.