

Rolf Riekher

Fraunhofer und der Beginn der Astrospektroskopie

Im Jahr 2008 wurde in den Niederlanden der 400. Geburtstag des Fernrohrs gefeiert. Ende September 1608 hatte der Brillenmacher Hans Lipperhey aus Middelburg dem Prinzen Moritz von Nassau ein Instrument überreicht, mit dem man vom Turm in Den Haag die 6 km entfernte Kirchturmuhre in Delft und auch die Fenster der Kirche in Leiden in 18 km Abstand deutlich sehen konnte. Das geht aus einem damals gedruckten kleinen Nachrichtenblatt in französischer Sprache hervor. Darin heißt es weiter: „...und selbst Sterne, die wegen ihrer Kleinheit und der Schwäche unserer Augen unsichtbar sind, können mittels dieses Instrumentes gesehen werden.“¹

Durch Persönlichkeiten die zu Waffenstillstandsverhandlungen in Den Haag weilten und bei der Präsentation des Instrumentes anwesend waren, wurde das Instrument sehr schnell in Europa bekannt. Auch die Verbreitung des kleinen Nachrichtenblattes hat zum Bekanntwerden beigetragen. Bereits im November 1608 hielt der angesehene Historiker Paolo Sarpi in Venedig ein Exemplar dieser Schrift in den Händen.

Galilei, der in Padua lebte und mit Sarpi bekannt war, bemühte sich ab Mitte 1609 um die Herstellung von Fernrohren. Im Herbst 1609 begann er das Fernrohr für astronomische Beobachtungen zu nutzen.²

Galileis aufregende Entdeckungen am Himmel veranlassten wiederum Kepler, sich ab April 1610 gründlich, sowohl theoretisch, als auch praktisch, mit dem Fernrohr zu befassen.³

1 Stillman Drake: *The Unsung Journalist and the Origin of the Telescope*. Los Angeles 1976. *Embassies of the King of Siam sent to His Excellency Prince Maurits, arrived in The Hague on 10 September 1608*. Transl. from the French orig. by Henk Zoomers, ed. by Huib Zuidervaart. Wassenaar 2008

2 Galilei, Galileo: *Sidereus Nuncius*. Venedig 1610; deutsche Übers. von H. Blumenberg. Frankfurt a.M. 1965

3 Kepler, Johannes: *Schriften zur Optik 1604–1611 Eingeführt und ergänzt durch historische Beiträge zur Optik und Fernrohrgeschichte von Rolf Riekher*. Frankfurt am Main 2008 (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften; 198)

Mit diesen Ereignissen beginnen

1. der Siegeszug des Fernrohrs in der Astronomie,
2. unablässige Bemühungen um die Verbesserung der Fernrohre und
3. eine vertiefte Beschäftigung mit optischen Problemen.

Im Folgenden soll der Beginn der *Astrospektroskopie* skizziert werden. Diese Forschungsrichtung ist – zwei Jahrhunderte nach Lipperhey, Galilei und Kepler – direkt den Bemühungen um die Verbesserung der Fernrohre zu verdanken. Unser heutiges Wissen über den Aufbau des Kosmos und der Materie wurde durch sie in entscheidendem Maße gefördert.

Am Beginn der Astrospektroskopie steht der Optiker, Teleskopbauer und Physiker Joseph Fraunhofer (Bild 1). Die von ihm im Sonnenspektrum entdeckten viele hundert feinen Linien tragen den Namen „Fraunhofersche Linien“.



Bild 1: Joseph Fraunhofer (26.3.1787–7.6.1826)

Doch zuvor ein kurzer Rückblick zur Vor- und Frühgeschichte der Beobachtung von Spektren:

Ende 1610 hat Kepler seine *Dioptrik* fertiggestellt. Es ist das erste moderne Buch über geometrische Optik. Nicht nur die Funktion des holländischen Fernrohrs wird im Zusammenwirken mit dem Auge richtig beschrieben. Auch drei neue Instrumente: das astronomische Fernrohr, das terrestrische Fernrohr und das Teleobjektiv werden bekannt gemacht.

Kepler zeigt in der *Dioptrik* wie bei einem gleichseitigen (60°) Prisma ein Lichtstrahl an den Ein- und Austrittsflächen gebrochen und reflektiert wird und fügt hinzu: „Bei einer solchen Größe der Brechung erscheinen die Regenbogenfarben in herrlichster Weise, gleichgültig ob nun das Auge hindurchsieht oder die Sonne hindurchleuchtet.“⁴

An etwas späterer Stelle weist Kepler darauf hin, daß bei einer zu großen Konkavlinse als Objektiv eines Fernrohrs das Bild durch „Regenbogenfarben“ und „Nebel“ verschlechtert wird und wie durch Ablenden der Objektivlinse eine Verbesserung erfolgen kann.⁵ Weiter ist Kepler nicht auf diesen, später als chromatische Aberration bezeichneten Abbildungsfehler eingegangen.

1648 beschrieb Johannes Marcus Marci (1595–1667) wie durch ein Prisma vor einer Lochkamera ein Sonnenstrahl in ein farbiges Spektrum ausbreitet wird. Ein durch eine kleine Öffnung im Bildschirm herausgeblendeter farbiger Strahl läßt sich jedoch durch ein zweites Prisma nicht weiter zerlegen.⁶

Isaac Newton (1643–1727) erkannte um 1665, daß die chromatische Aberration ein entscheidendes Hinderniß für die Verbesserung der Linsenfernrohre ist. Durch seine berühmten Prismenversuche hat er wichtige Erkenntnisse über die Natur des Lichtes gewonnen.⁷ Versuche, in denen Newton Glas- und Wasserprismen kombinierte, führten ihn zu der Annahme, daß mit einer Ablenkung des Lichtes durch Refraktion prinzipiell immer eine Dispersion, also Farbenzerstreuung, verbunden ist. Er zog daraus den Schluß, daß die Beseitigung der chromatischen Aberration bei Linsenfernrohren nicht möglich sei.

Diese Schlußfolgerung Newtons ist falsch. Aber weil sie von einem großen Gelehrten statuiert wurde, hat dieser Irrtum den Fortschritt um Jahrzehnte verzögert. Zweifel brachten David Gregory und Leonhard Euler vor: Sie hielten achromatische Objektive für möglich, weil sie irrtümlicherweise annahmen, daß das Auge eine von Farbenfehlern freie Abbildung leistet.

Überwunden wurde Newtons Irrtum in England durch Chester Moor Hall um 1730 und dann durch John Dollond 1758. Ihnen gelang es, achromatische

4 Wie Anm. 3, S. 452

5 Wie Anm. 3, S. 511

6 Marci, Johannes Marcus: *Thamantias liber de arcu coelesti deque colorum apparentium natura, ortu, et causis*. Prag 1648

7 Newton, Isaac: *Optics, or a treasure of the reflexions, inflexions and colours of light*. London 1704; Boegehold, H.: *Der Glas-Wasser-Versuch von Newton und Dollond*. In: *Forsch. z. Gesch. d. Optik* 1 (1928)

Objektive zu realisieren. Dollonds Achromate wurden ein großer wissenschaftlicher und auch ökonomischer Erfolg. Sie waren der wichtigste Fortschritt der Linsenfernrohre, aber durch sie wurden die ausführenden Optiker vor fundamentale neue praktische und theoretische Probleme gestellt. Die zwei (oder drei) Linsen eines Achromaten mußten aus Gläsern mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften hergestellt werden. Neben der chromatischen Aberration mußte auch die sphärische Aberration bei der Konstruktion des Objektivs berücksichtigt werden. Die Vorausbestimmung aller Linsenradien ging nicht ohne eine sehr genaue Kenntnis der Glasdaten.⁸

Aus historischer Sicht können wir zwei Entwicklungsphasen unterscheiden:

In der ersten wurden keilförmige Prismen aus Kronglas und aus Flintglas kombiniert und dann einer der Winkel solange verändert, bis durch die Prismenkombination eine Ablenkung, jedoch keine Dispersion erfolgte. Das Verhältnis der Winkel der beiden Prismen zueinander diente als Grundlage für die Bestimmung der Brechkräfte der sammelnden Kronglas- und der zerstreuenden Flintglaslinse eines achromatischen Objektivs. Verbleibende Restfehler wurden durch „Pröbeln“, also durch probeweise Änderung von Radien oder durch die Retusche einer Linsenfläche korrigiert. Das „Pröbeln“ erforderte große Erfahrung und hohe Geschicklichkeit des ausführenden Optikers.

In der zweiten Entwicklungsphase erfolgte eine sehr genaue Messung der Lichtbrechung für ausgewählte Spektralfarben als Grundlage für die exakte Vorausberechnung des Objektivs und dann die meßtechnische Kontrolle aller Fertigungsschritte. Diesen Weg mußte Fraunhofer beschreiten, weil er in Bayern über keine im „Pröbeln“ erfahrenen Optiker verfügte, sondern mit ungelerten jungen Kräften arbeiten mußte.

Das mathematisch-mechanische Institut in München und das optische Institut in Benediktbeuern⁹

1802 hatten Georg Reichenbach (1771–1826) und Joseph Liebherr (1767–1840) in München eine mathematische Werkstätte gegründet; 1804 schloss sich Joseph Utzschneider (1763–1840) den beiden an. Die drei beschlossen den Betrieb als mathematisch-mechanisches Institut zu vergrößern und geodätische und astronomische Messinstrumente herzustellen. Die mechanische Seite war mit dem genialen Ingenieur Reichenbach und dem viel-

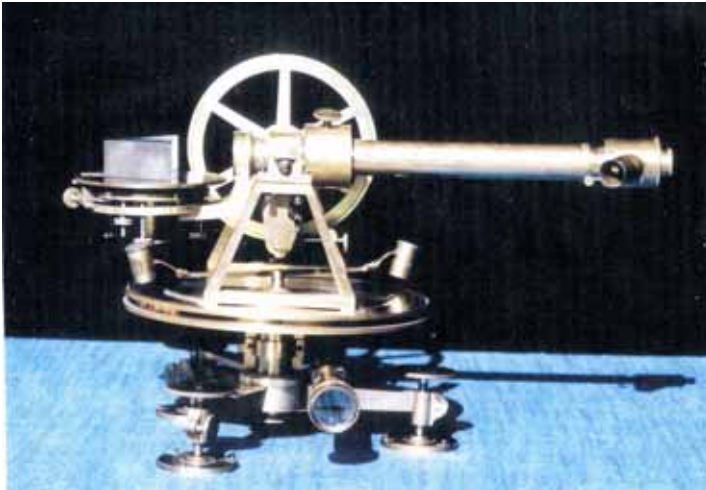
⁸ Riekher, Rolf: Fernrohre und ihre Meister. Berlin 1990

⁹ Wie Anm. 8, S. 144–177

seitigen Mechaniker und Uhrmacher Liebherr gut abgesichert. Ein offenes Problem war die Herstellung der für die Instrumente benötigten Objektive. Auch die Beschaffung des zur Herstellung achromatischer Objektive benötigten Flintglases war ungelöst. Utzschneider unternahm folgende Aktivitäten:

- 1805 engagierte er in der Schweiz den Glasschmelzer Pierre Louis Guinand (1748–1824).
- Im gleichen Jahr kaufte er das säkularisierte Kloster Benediktbeuern und errichtete dort mit Guinand eine Glashütte.
- Um die Herstellung achromatischer Objektive hatte sich kurze Zeit der Optiker Johannes Niggli (1778–1835) bemüht. Dann wurde seit 1806/7 der junge Joseph Fraunhofer mit dieser Aufgabe betraut.
- 1808 wurde in Benediktbeuern das optische Institut eingerichtet. Es wurde für 11 Jahre Fraunhofers Wirkungsstätte und dann ab 1819 nach München verlegt.

Bemühungen um hochgenaue Brechzahlmessungen



*Bild 2: Fraunhofers Prismenspektrometer (Theodolitfernrohr mit Teilkreis)
(Original Deutsches Museum München)*

Zur Berechnung hochwertiger achromatischer Fernrohrobjektive suchte Fraunhofer nach Möglichkeiten Brechzahl und Dispersion optischer Gläser mit wesentlich gesteigerter Genauigkeit zu messen. Für Winkelmessungen an

Prismen und deren unterschiedliche Ablenkung des Lichtes verschiedener Farben benutzte er ein Theodolitfernrohr mit Teilkreis (Bild 2, 3). Seine Versuche, bei diesen Messungen Sonnenlicht anzuwenden, führten ihn zur Entdeckung hunderter feiner Linien in dem durch ein Prisma erzeugten Sonnenspektrum. Die Gruppierung und Lage dieser Linien hat er untersucht und vermessen und in einer sehr genauen Zeichnung dargestellt (Bild 4). Besonders auffallende Linien hat er mit großen und kleinen Buchstaben bezeichnet. Ausgewählte „Fraunhoferscher Linien“ dienten Fraunhofer als definierte und reproduzierbare Meßmarken im Farbenspektrum. In Verbindung mit den eingesetzten technischen Mitteln zur Winkelmessung und der Beobachtung des Spektrums mittels Fernrohr war Fraunhofer in der Lage, Brechzahl und Dispersion optischer Medien mit einer bis dahin unvorstellbaren Genauigkeit zu bestimmen.

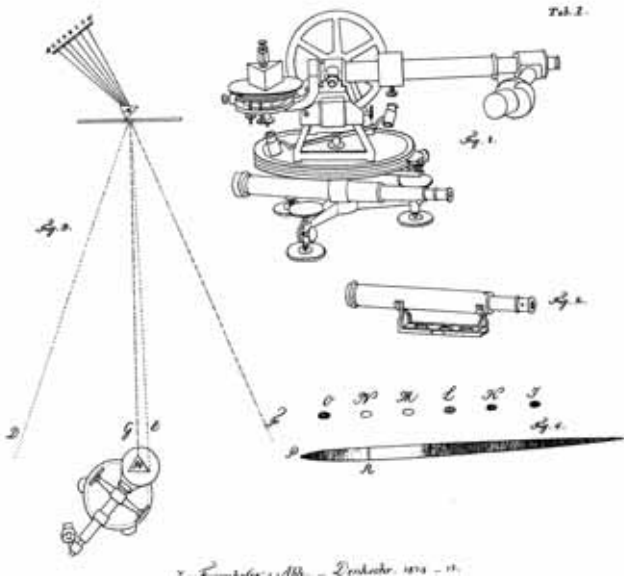


Bild 3: Fraunhofers Zeichnung zur Messung von Prismen und Beobachtung von Spektren (1817)

Weder Newton, noch Wollaston konnten diese vielen feinen Linien im Sonnenspektrum entdecken. William Hyde Wollaston (1766–1828) hatte 1802 in den *Philosophical Transactions* eine Arbeit unter dem Titel *A method of examining refractive and dispersive Powers, by prismatic Reflection* veröffent-

licht.¹⁰ Er beschreibt hier die Beobachtung des Grenzwinkels der Totalreflexion in Verbindung mit einem geometrischen Mechanismus zur Anzeige der mittleren Brechzahl auf zwei bis drei Dezimalstellen. Am Schluß dieser Arbeit schildert er die Beobachtung eines von Sonnenlicht beleuchteten Spaltes von 1,3 mm Breite aus einer Entfernung von ca. 3 bis 3,5 m durch ein direkt vor das Auge gehaltenes Prisma. Er will zeigen, daß das Sonnenspektrum weder aus 7 noch aus 3, sondern aus 4 Farben besteht, deren Grenzen er durch Linien in einer kleinen Skizze beschreibt. Die Spaltbreite ist zu groß und das Auflösungsvermögen des Auges nicht hinreichend, um die vielen feinen Fraunhoferschen Linien zu beobachten. Fraunhofer äußert sich am 21. Januar 1823 darüber in einem Brief an H. C. Schumacher: „Hätte auch Wollaston zwey oder fünf Linien im Spectrum als das erkannt was sie sind /: welches aber nicht der Fall ist /:, so bliebe mir noch die Entdeckung der übrigen 569 Linien. Wollaston sah mit freiem Auge durch das Prisma, was in diesem Falle zu sehen ist, ist leicht zu begreifen.“¹¹

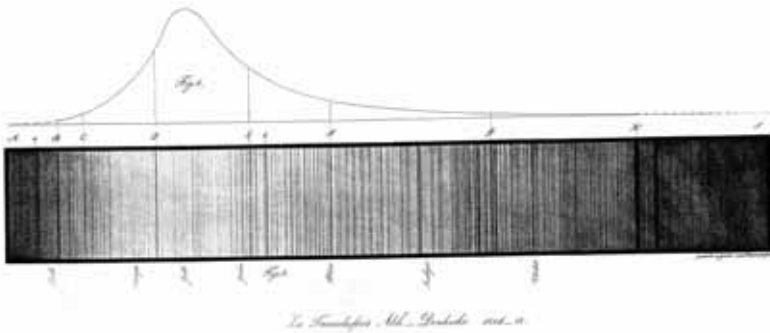


Bild 4: Fraunhofers Zeichnung des Sonnenspektrums (Ausschnitt)

Erst die gegenüber dem Auge vergrößerte Apertur durch Fraunhofers Benutzung eines Fernrohrs und die Anwendung von Prismen aus schlierenfreiem Glas brachten die hinreichende Auflösung zur Entdeckung hunderter feiner Linien im Sonnenspektrum.

10 Wollaston, William Hyde: A Method of examining refractive and dispersive Powers, by prismatic Reflection. In: Phil. Trans. of the Royal Society 92 (1802), 365–380, s. auch die deutsche Darstellung von Karl Brandan Mollweide in: Ann. d. Physik 31 (1809), 235–415

11 Fraunhofer an Heinrich Christian Schumacher, Brief vom 21. Januar 1823. Staatsbibliothek Preuß. Kulturbesitz (SBPK) Berlin, NL Schumacher

Seine wichtigen Entdeckungen hat Fraunhofer 1817 veröffentlicht.¹²

Erste Beobachtungen des Spektrums der Venus und heller Fixsterne

Am Schluß seiner Arbeit von 1817 fügte Fraunhofer einige Beobachtungen des Spektrums der Venus und einiger heller Fixsterne hinzu. Er benutzte sein Theodolit-Fernrohr mit 29,3 mm Öffnung in Verbindung mit einem vor dem Objektiv befindlichen Prisma. Das Licht der Gestirne lenkte er mit einem Spiegel in das Instrument.

Im Planetenlicht fand er die gleichen Linien, die er schon im Spektrum der Sonne entdeckt und mit Buchstaben bezeichnet hatte. Vor allem die Linien *D*, *E*, *b* und *F* waren klar zu erkennen. Er überzeugte sich, dass diese Linien die gleiche Position wie im Sonnenspektrum besaßen. Erkannt wurde auch, dass die Linie *b* aus einer stärkeren und einer schwächeren Komponente besteht. Die Aufspaltung der stärkeren in zwei Komponenten, so wie im Sonnenspektrum, konnte nicht gesehen werden. Die Linien im violetten und äußersten roten Bereich waren schwer zu erkennen.

Im Spektrum des Sirius stellte er drei breite Streifen fest, einen im grünen Bereich und zwei im blauen. Eine Ähnlichkeit mit dem Sonnenspektrum war nicht gegeben. Auch die Spektren anderer Sterne 1. Größe zeigten Streifen, die von Stern zu Stern verschieden waren.

Dieser erste Beitrag zur Sternspektroskopie bildet in Fraunhofers Veröffentlichung von 1817 nur eine kurze, am Schluß hinzugefügte Ergänzung.

Astrospektroskopische Beobachtungen 1819 in Benediktbeuern mit einem Fernrohr mit großem Objektivprisma

Obwohl Fraunhofer mit anderen Aufgaben stark belastet war setzte er die Versuche fort. Am 30. März 1819 schrieb er an den Instrumentenbauer Johann Georg Repsold in Hamburg und fast gleichlautend auch an den Astronomen Heinrich Christian Schumacher in Kopenhagen: „Ich habe verflorenen Winter einen neuen Apparat zu Versuchen über die Natur des Lichtes der Fixsterne vollendet und mich mit demselben völlig überzeugt, daß das Licht dieser Sterne, in Bezug auf die Streifen des Farbenspectrums, unter sich und vom Lichte der Sonne verschieden sey.“¹³

12 Fraunhofer, Joseph: Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre. In: Ann. d. Physik 56 (1817), 264–313

Fraunhofer hat 1823 als Zusatz zu einer Veröffentlichung über Beugungserscheinungen diesen „neuen Apparat“ kurz beschrieben, aber nicht abgebildet.¹⁴ Er spricht von einem achromatischen Fernrohr von 108 mm Öffnung vor dessen Objektiv Fraunhofer ein Prisma von gleichem Durchmesser angeordnet hat. Für das Prisma gibt er einen brechenden Winkel von $37^{\circ} 40'$ an. Er hat es ins Minimum der Ablenkung gestellt. Zum Einstellen des Sternes und auch zu Winkelmessungen war das Fernrohr mit einem zweiten, kleineren Sucherfernrohr unter einem Winkel von ca. 26° fest verbunden. Ein Fadenkreuz im Sucherfernrohr, bzw. fünf Fäden bekannter Distanz, sowie ein Schraubenmikrometer am Prismafernrohr ermöglichten genaue Winkelmessungen. Von einem Stern wurde im Gesichtsfeld des großen Fernrohrs ein linienförmiges Spektrum von über 3,5 cm Länge erzeugt, das er durch eine Zylinderlinse verbreiterte.

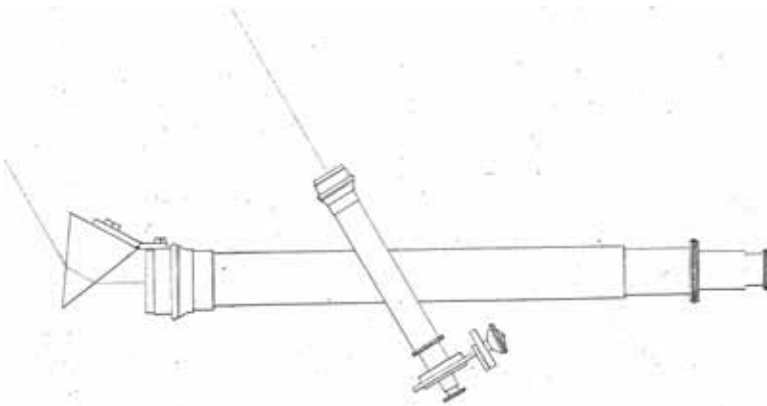


Bild 5: Fraunhofers „Prisma-Fernrohr“ von 1819

Erste Anwendung eines Objektivprismas zur Beobachtung von Sternspektren (Zeichnung im Archiv der Sternwarte Bogenhausen, aufgefunden im September 2003 durch den Autor)

Bei meinen Recherchen im Archiv der Sternwarte Bogenhausen hatte ich im September 2003 das Glück, eine bisher unbekannte Zeichnung dieses Instru-

- 13 Fraunhofer an Johann Georg Repsold, Brief vom 30. März 1819, Staatsarchiv Hamburg, Best. Repsold 621-1, AV al; Brief Fraunhofers an Schumacher, 30. März 1819, SBPK Berlin, Slg. Darmstaetter, NL Fraunhofer
- 14 Fraunhofer, Joseph: Kurzer Bericht von den Resultaten neuerer Versuche über die Gesetze des Lichtes, und die Theorie derselben. In: Annalen der Physik 74 (1823), Zusatz S. 374–378 vom 14. Juli 1823

menten zu finden (Bild 5).¹⁵ Sie befand sich unter ganz anderen Dokumenten, stammt aber offensichtlich von Fraunhofer.

Auf dieser Zeichnung ist der Winkel des Prismas jedoch mit 46° und der zwischen Sucherfernrohr und dem Prismafernrohr mit 60° gezeichnet. Beide Winkel sind also größer als von Fraunhofer 1823 angegeben.

In handschriftlichen Aufzeichnungen Fraunhofers¹⁶ von Anfang März 1819 fand ich folgende Notiz: „Da das gebrauchte Prisma einen großen Winkel hat, so ist es nur geeignet die Streifen in den helleren Farben zu entdecken; für die übrigen Farben müßte der Winkel kleiner seyn.“ Dieser Unterschied spricht dafür, daß die Zeichnung das Instrument so darstellt, wie es im Februar/März 1819 beschaffen war. Fraunhofer hat also bei seinen ersten Beobachtungen 1819 noch ein Prisma mit einem größeren Winkel verwendet und dieses später ausgetauscht oder umgeschliffen.



Bild 6: Manuskript Fraunhofers über physisch-optische Versuche, 1819–1820
Ausschnitt mit Beobachtungen von Sternspektren mit dem großen „Prismenfernrohr“ von 108 mm Öffnung (SBPK Berlin, NL Fraunhofer)

- 15 Häfner, Reinhold: Die Universitäts-Sternwarte München im Wandel ihrer Geschichte. München 2003, S. 17 u. 100. Häfner, Reinhold und Rolf Riekher: Die Pioniere der Sternspektroskopie: Die stellarspektroskopischen Untersuchungen von Fraunhofer (1816–1820) und Lamont (1836). In: Beiträge zur Astronomiegeschichte, Band 6. Frankfurt a. M. 2003 (Acta Historica Astronomiae; 18), hrsg. Wolfgang R. Dick und Jürgen Hamel, S. 137–165
- 16 Fraunhofer (Manuskript), Tagebuch für die physisch-optischen Versuche von Febr. 1819 bis [5.4.1820]. SBPK Berlin, Slg. Darmstaetter, NL Fraunhofer, Kasten 2

Das Prisma hat Fraunhofer aus einer besonders gelungenen Flintglasschmelze von 1817 hergestellt. Nur Fraunhofer war damals als Glasschmelzer und auch als Optiker in der Lage ein so homogenes und genaues Prisma herzustellen um die feinen Linien in Spektren von Planeten und Fixsternen zu beobachten.

Fraunhofers Ziel bei der Anwendung seines „Prismafernrohrs“ war es festzustellen, wie sich die von ihm entdeckten Linien in den Spektren des Lichtes verschiedener Sterne untereinander und vom Licht der Planeten und der Sonne unterscheiden. Die handschriftlichen Aufzeichnungen Fraunhofers aus der Zeit von Februar 1819 bis April 1820 geben einen Einblick in seine Aktivitäten zur Sternspektroskopie (Bild 6).

Am 20. Februar 1819 notierte Fraunhofer: „An dem Fernrohr zur Untersuchung des Fixsternlichtes wurden die nöthigen Correctionen mittels Lampenlicht gemacht, und dazu das 3^{te}ige Cylindrische Glas gebraucht. Es wurde beobachtet, daß das Öllicht die helle Linie im Farbenbild nicht so deutlich zeigt wie Talglicht.“

Am 1. und 2. März 1819 konnte er mit seinem neuen Prismafernrohr Sternspektren von Sirius, Beteigeuze, Capella, Rigel und Aldebaran beobachten. Obwohl die Beobachtungsbedingungen nicht sehr gut waren, stellte er typische Unterschiede in den Spektren fest und beschrieb sie zutreffend.

„Das Farbenbild des roten Sternes Beteigeuze ist voll von Linien und Streifen, die sich jedoch ganz anders zu gruppieren scheinen als die von Sonnenlicht.“

2. März: „Die Capella hat im Farbenbild sehr kenntliche Spuren von Streifen. Der Rigel scheint viele Streifen zu haben. Auch Aldebaran scheint Streifen zu haben...Die Streifen von Beteigeuze waren heute sehr kenntlich; es scheinen deren im ganzen Farbenbilde zu seyn.

Im Sirius war heute der dunkle Streifen im Grünen sehr gut zu sehen; die Form desselben scheint dem Streifen H im Sonnenlicht sehr ähnlich. Ich erkannte heute in diesem Lichte im blauen einen Streifen, aber nur undeutlich. Auch am Ende der rothen Farbe glaubte ich einige mal einen Streifen wahrgenommen zu haben; doch nicht immer, woran vielleicht die Ondulation schuld seyn mag...“.

Am 15. März 1819 hat Fraunhofer wieder das Spektrum des Sirius beobachtet. Ocular und cylindrisches Glas hatte er ausgetauscht. Die Streifen im Siriuusspektrum waren sehr gut zu sehen. „Ich sah außer dem breiten Streifen im Grünen und den beyden großen Streifen im Blauen noch einen breiten Streifen tiefer im Blauen so daß in dieser Farbe drey Streifen sind wovon die letzten beyden nicht sehr weit von einander entfernt sind. Ich habe auch an

einem Stern 2 ter Größe östlich vom Sirius in der grünen Farbe einen sehr deutlichen Streifen gesehen.“

Am 9. April 1819 findet sich eine Eintragung über die Beobachtung des Mondes, die jedoch wegen der flächenhaften Ausdehnung mit seinem stationären Spektrometer wie bei der Untersuchung des Sonnenspektrums erfolgte. „Ich sah heute im Farbenbild vom Lichte des Mondes, welches ich durch das Heliostat einfallen ließ, all die Linien und Streifen die im Spectrum von Sonnenlicht gesehen werden. Ich erkannte die Linien D, E, b, F, G und selbst H noch schwach, auch einen großen Theil der zwischen diesen Räumen liegenden schwächeren Linien. Man erkennt schon im ersten Augenblick, daß alle Linien sich eben so wie im Sonnenlicht gruppieren.“

Ende Mai 1819 mußte Fraunhofer seine Versuche in Benediktbeuern abbrechen. Utzschneider mußte 1819 die Klostergebäude an den Staat verkaufen und das optische Institut nach München verlegen. Das war für Fraunhofer als Leiter eine hohe Belastung. Etwa 40 Mitarbeiter arbeiteten an astronomischen Fernrohren, Handfernrohren und Mikroskopen. Vorbereitung und Umzug stellten Fraunhofer vor viele Probleme, sodaß ihm keine Zeit für seine wissenschaftlichen Interessen blieb. Erst im März 1820 konnte er die Beobachtung von Sternspektren wieder fortsetzen.

Fortsetzung der Beobachtungen 1820 auf der Sternwarte Bogenhausen.

Am 26. März 1820 notierte Fraunhofer: „Ich habe vorige Woche das große Prisma Fernrohr nach Bogenhausen auf den westlichen Thurm gestellt und vorher noch die Entfernung der Fäden im Sucher gemessen...“.

Die Bogenhausener Sternwarte (Bild 7) war durch Fraunhofers Aktivität ab März 1820 die erste Sternwarte der Welt auf der spektroskopische Beobachtungen der Gestirne durchgeführt werden konnten. Direktor der neuen Sternwarte war J. G. Soldner (1776–1833) (Bild 8). Zwischen Soldner und Fraunhofer bestand seit längerer Zeit ein freundschaftlicher Kontakt. Es war naheliegend, daß der Optiker Fraunhofer den Astronomen Soldner für seine sternspektroskopischen Entdeckungen interessieren wollte.

Soldner hatte sich mit Positionsmessungen befaßt. Ihm ging es um das damals diskutierte Problem, ob bei Positionsmessungen verschiedenfarbiger Sterne unterschiedliche Refraktionstabellen verwendet werden müssen.

Bei der Untersuchung von Sternspektren mit Fraunhofers Prismafernrohr mußten zwei Personen gleichzeitig beobachten. Fraunhofer und Soldner haben gemeinsam die Spektren einer Reihe heller Sterne beobachtet. Die Ergebnisse wurden nur von Fraunhofer in seinen handschriftlichen Aufzeichnungen beschrieben.



Bild 7: Die Kgl. Sternwarte zu Bogenhausen im Jahre 1820



Bild 8: Johann Georg Soldner (16.7.1776–18.5.1833)

Fraunhofer fährt am 26. März fort: „Ich habe am Abend der Aufstellung noch die Venus und Beteigeuze besehen, doch so, daß die Axe des cylindrischen Glases parallel mit der Axe des Prismas lief. Im Farbenbilde vom Lichte der Venus sah ich die Linien D, E, b, und F sehr gut, auch noch einige zwischen D und E liegende Linien. In der blauen Farbe war das Bild sehr schmal. In Beteigeuze sah ich sehr viele Linien. Auch im Sirius sah ich den breiten Streifen im Grünen sehr gut und auch die im Blauen.“

Sirius gehörte wegen seiner Helligkeit und wegen des von der Sonne stark abweichenden Spektrums zu den bevorzugten Objekten.

Durch Messung der Differenzen der Ablenkungswinkel hat er für vier Linien deren Abstände von der D-Linie bestimmt. Die D-Linie ist nicht im Siriuusspektrum vorhanden und kann auch bei der Beobachtungstechnik mittels Objektivprisma nicht durch ein Vergleichsspektrum in das Gesichtsfeld gebracht werden. Das Instrument mußte deshalb zunächst durch Beobachtung der Venus im Sucherfernrohr und gleichzeitige Einstellung des Mikrometerfadens im Prismafernrohr auf die D-Linie im Venusspektrum justiert werden. Danach wurde in gleicher Weise Sirius beobachtet und die Abweichung der zu messenden Linie im Siriuusspektrum von dem einjustierten Wert der D-Linie im Venusspektrum des Prismafernrohrs bestimmt.

26. März: „Wenn ich den breiten Streifen in der grünen Farbe des Sirius mit dem corrigierten Faden des Micrometers in Berührung brachte, so berührte im Sucher Sirius den 3^{ten} Faden so daß also dieser Streifen 34' 3" von der Linie D des Lichtes der Venus entfernt ist“.

30. März: „Im Sirius ist der erste Streifen im Blauen 56' 17" von D des Sonnenlichtes entfernt; der zweyte ohngefähr 1° 12' 13"“.

5. April: „Im Sirius ist der dritte Streifen im Blauen ohngefähr 1° 18' 7" von D des Sonnenlichtes entfernt. Der große Streifen am Ende des Grünen im Sirius ist, soweit ich mich bis jetzt versichern konnte mit F der Venus an einem Ort. Gegen's Ende im Rothen erkannte ich heute sehr gut eine Linie.“

Fraunhofers Aufzeichnungen des Siriuusspektrums vom 26. und 30. März und vom 5. April zeigen, dass er die Absorptionslinien der Balmerreihe des Wasserstoffs: H α (C) $\lambda = 6562,78$; H β (F) $\lambda = 4861,32$; H γ (G') $\lambda = 4340,46$; H δ (h) $\lambda = 4101,74$ und H ϵ (H) $\lambda = 3970,07$ nicht nur gut beobachtet hat, sondern auch, mit Ausnahme der roten H α (C)- Linie, deren Abstände von der D-Linie im Sonnen-, bzw. Venusspektrum gemessen hat.

Um eine Vorstellung von Fraunhofers Messungen zu bekommen, habe ich für sein Objektivprisma die Ablenkungswinkel der D-Linie und der Linien des Wasserstoffspektrums neu berechnet und deren Differenzen mit Fraunho-

fers gefundenen Werten verglichen. Dabei ergaben sich folgende Abweichungen: H β $-1''$; H γ $-7' 41''$; H δ $-8' 41''$; H ϵ $-15' 57''$. Wenn man bedenkt, dass die Ablenkungswinkel des Objektivprimas zwischen ca. 26° und $27^\circ,6$ liegen und die Messungen nacheinander an verschiedenen Tagen und auf komplizierte Weise gemacht wurden, so ist es erstaunlich wie klein die Differenzen sind.

Viel Zeit verging bis zu neuen Beobachtungen des Siriuspektrums. Die Zeichnungen 1860 von G.B. Donati (1826–1873),¹⁷ von L.M. Rutherford (1816–1892)¹⁸ aus dem Jahre 1863 sowie aus dem gleichen Jahr von W. Huggins (1824–1910),¹⁹ enthalten nicht mehr Informationen als Fraunhofers Beobachtungen. Die von Fraunhofer bereits 1820 beobachtete und gemessene Linie H ϵ fehlt bei allen drei Beobachtern. Fraunhofer war seiner Zeit weit voraus.

Mit den letzten Beobachtungen am 5. April 1820 enden Fraunhofers handschriftliche Aufzeichnungen über die Beobachtung von Sternspektren. Fraunhofer ließ das Prismafernrohr in Bogenhausen. Ob Soldner es weiter für die Beobachtung von Sternspektren nutzte und was später aus dem Instrument wurde konnte nicht festgestellt werden.

Fraunhofers Beginn der Herstellung von Beugungsgittern und der Untersuchung von Beugungsspektren

Fraunhofers handschriftliche Aufzeichnungen enthalten außer den geschilderten Beobachtungen von Sternspektren auch Notizen über andere „physische-optische Versuche“ die er in dieser Zeit durchgeführt hat. Eine Aufzeichnung vom 9. März 1819 soll hier kurz erwähnt werden, weil sie am Beginn einer Entwicklung zur Spektroskopie von historischer Bedeutung steht: „Ich habe heute die Vorrichtung auf welcher eine große Zahl Fäden in geringer Entfernung voneinander gespannt sind, vor das Objectiv des Theodolith Fernrohrs gestellt, während dasselbe auf die schmale Öffnung am Fensterladen, durch welche das Licht vom Heliostat einfiel, gerichtet war; dieses gab einen frappanten Anblick.“

17 Donati, Giovanni Battista: *Intorno alle Strie degli Spettri Stellari*. Nuovo Cimento 15 (1862), pp. 292–303, 366–376

18 Rutherford, Lewis Moris: *Astronomical Observations with the Spectroscope*. In: *The American Journal of Science and Arts* 35 (1863), pp. 71–77, Tab.

19 Huggins, William: *Notes on the Lines in the Spectra of some of the Fixed Stars*. In: *Proc. Roy. Soc. London* 12, 1863

Fraunhofer beschreibt dann sehr korrekt Aussehen, Größe und Helligkeit farbiger Beugungsspektren 1. bis 5. Ordnung, die er rechts und links von einem weißen Bild des Eintrittspaltes beobachten konnte. Danach fügte er hinzu: „Die Linien und Streifen des Farbenbildes wie sie durch ein Prisma gesehen werden, erkennt man auch in dem ersten und dritten obiger Spectra sehr bestimmt; in dem dritten, weil es breiter ist, noch leichter als in dem ersten. Diese Linien machen die Erscheinung noch interessanter; ihre Gruppierung ist eben so wie durch Prismen.“

Diese Entdeckung war für Fraunhofer der Anlaß diese Richtung intensiv weiter zu verfolgen. Er bemühte sich erfolgreich immer bessere Beugungsgitter herzustellen, ihre Eigenschaften zu untersuchen und theoretisch zu untermauern. 1823 war er in der Lage die Wellenlängen von Fraunhoferschen Linien mit einer noch heute beeindruckenden Genauigkeit zu messen.

Fraunhofer und sein Prophet Chladni

Leider muß man sagen, daß das Echo auf Fraunhofers stellarspektroskopische Untersuchungen damals gering war. Wie Soldner, so waren die Astronomen seiner Zeit in erster Linie an Positionsastronomie interessiert. Erst Jahrzehnte später wurde erkannt, welche grundlegenden Erkenntnisse sich durch stellarspektroskopische Untersuchungen gewinnen lassen.



Bild 9: Ernst Florens Friedrich Chladni (30.11.1756–4.4.1827)

Eine frühe Ausnahme möchte ich erwähnen. Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827) (Bild 9), bekannt durch seine akustischen Untersuchungen und als Begründer der wissenschaftlichen Meteoritenkunde, äußert sich in einem Brief am 30. Januar 1818²⁰ mit fast prophetischem Weitblick:

„Herrn Fraunhofers zu Benediktbeurn Entdeckung der verschiedenen Systeme von Streifen in dem Lichtspektrum der Sonne und anderer Sterne, wovon in Ihren Annalen Nachricht gegeben wird, scheint mir unter die wichtigsten zu gehören, die seit geraumer Zeit zum Vorschein gekommen sind. Der wackere Entdecker scheint selbst nicht einmal ganz zu ahnen, welches weite Feld, nicht etwa nur für Untersuchungen über die verschiedene Brechbarkeit des Lichts, sondern auch für Erweiterung unserer physisch-astronomischen Kenntnisse dadurch eröffnet worden ist.“

Chladni schlägt vor, von recht vielen Fixsternen Beobachtungen der Streifensysteme durch Zeichnungen und möglichst auch Winkelmessungen zu dokumentieren. Man könne so, vielleicht noch nach Jahrhunderten, Veränderungen feststellen.

„Denn es scheinen (nach Herschel) abgesehen von den Fixsternen, welche sich periodisch verändern, manche andere Fixsterne an Licht ab- oder zugenommen, manche auch ihre Farbe verändert zu haben...“.

Chladni meint, daß man Fraunhofer, oder einem anderen, für eine solche Arbeit noch in spätesten Zeiten danken würde.

Ich möchte zum Schluß noch eine Aufnahme zeigen (Bild 10), an der Chladni als Meteoritenforscher seine helle Freude hätte. Es ist ein Meteor-spektrum von 1961, dessen Kontaktkopie der Originalplatte mir Dr. Ceplecha bei meinem Besuch auf dem Observatorium Ondrejov 1962 verehrt hat. Das Spektrum wurde mit einem Beugungsgitter erzeugt, also mit der Forschungsmethode, deren Entwicklung Fraunhofer zu verdanken ist. Man sieht unten links die Spur des Meteors, d.h. die 0. Ordnung in einer Höhe zwischen 74 und 66 km. Rechts davon sind die Spektren der 1. und 2. Ordnung zu sehen. Auf der Originalplatte kann man die Linien gut vermessen und Elementen zuordnen.

Chladni wäre sicher beeindruckt, wenn er erfahren könnte, daß man an Hand eines Meteorspektrums feststellen kann woraus das Objekt besteht, welches auf die Erde zu fliegt.²¹ Dr. Ceplecha, dem ich die Aufnahme verdanke, ist es mit seinen Kollegen 1959 gelungen, durch Auswertung von Auf-

20 Ernst Florens Friedrich Chladni, Brief an Ludwig Wilhelm Gilbert. In: *Annalen der Physik* 1818, 5. Stück, S. 1ff.

21 Chladnis Meteoritensammlung befindet sich im Museum für Naturkunde Berlin.

nahmen die Bahn eines Meteoriten zu bestimmen und Trümmer davon auf der Erde zu bergen.



Bild 10: Meteor-Spektrum, South Taurid S 526, 1961 Nov. 13/14; Aufn. Tessar 1:4,5 f' = 36 cm, Gitter Bausch & Lomb 400 gr/mm, Observatorium Ondrejov

Durch Fraunhofer ausgelöste Entwicklungen zur Spektroskopie

Fraunhofer hatte schon bei seinen ersten spektroskopischen Beobachtungen festgestellt, daß sich dort, wo sich im gelben Teil des Sonnenspektrums die von ihm mit *D* bezeichnete dunkle feine Doppellinie befindet, im Licht von Flammenspektren eine feine helle gelbe Doppellinie auftritt. Gustav Kirchhoff (1824–1887) hat 1859 unter dem Titel „Ueber die Fraunhoferschen Linien“ seine grundlegenden physikalischen Arbeiten über Emission und Absorption²² begonnen und damit die richtige Erklärung gegeben. Im Jahr 1860 erschien von ihm gemeinsam mit dem Chemiker Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899) die Arbeit *Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen*.²³

22 Kirchhoff, Gustav Robert: Ueber die Fraunhoferschen Linien. Ueber den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme. In: Monatsberichte der Academie der Wissenschaften zu Berlin 1859; Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften; 100, hrsg. von Max Planck

Im Laufe der folgenden Jahrzehnte konnten immer mehr Fraunhofersche Linien chemischen Elementen zugeordnet werden. Mit den Mitteln der Astrospektroskopie wurde es möglich, Aussagen über Zusammensetzung und Zustand kosmischer Körper zu machen.

Die von Fraunhofer im Siriuspektrum beobachteten und auch gemessenen Linien hatten wir schon als Balmerreihe des Wasserstoffspektrums bezeichnet. Dem Schweizer Johann J. Balmer (1825–1898) war es 1885 gelungen, deren Wellenlängen, bzw. Wellenzahlen durch eine mathematische Formel darzustellen. Für Niels Bohr war Balmers Formel hilfreich bei der Auffindung seines Atommodells. So haben die „Fraunhoferschen Linien“ zu grundlegenden Erkenntnissen über den Atombau geführt.

Fraunhofer hat nicht nur ab 1817 eine Reihe wichtiger spektroskopischer Phänomene entdeckt und beschrieben. Er hat auch den Spektroskopikern mit Prismenspektrometer, Objektivprisma und Beugungsgittern die wichtigsten technischen Mittel für ihre Untersuchungen in die Hand gegeben.

23 Kirchhoff, Gustav Robert; Bunsen, Robert Wilhelm: Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. In: Poggendorfs Annalen 110 (1860), Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften; 72, hrsg. von Wilhelm Ostwald