

Inhaltverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theorie	1
2.1. Was ist eigentlich Spektroskopie?	1
2.2. Was passiert am Spalt?	1
2.3. Entstehung eines Absorptionsspektrums	3
2.4. Fraunhofersche Linien	3
2.5. Tellurische Linien	4
2.6. Dopplereffekt	4
2.7. Radialgeschwindigkeit	5
2.8. Radialgeschwindigkeiten im System Sonne-Erde-Venus	7
3. Technik des Spektroskopierens	9
4. Messergebnisse	11
5. Zusammenfassung und Ausblick	13
6. Quellenverzeichnis	15

1. Einleitung

"Wichtig ist, dass man nicht aufhört zu fragen." (Albert Einstein)

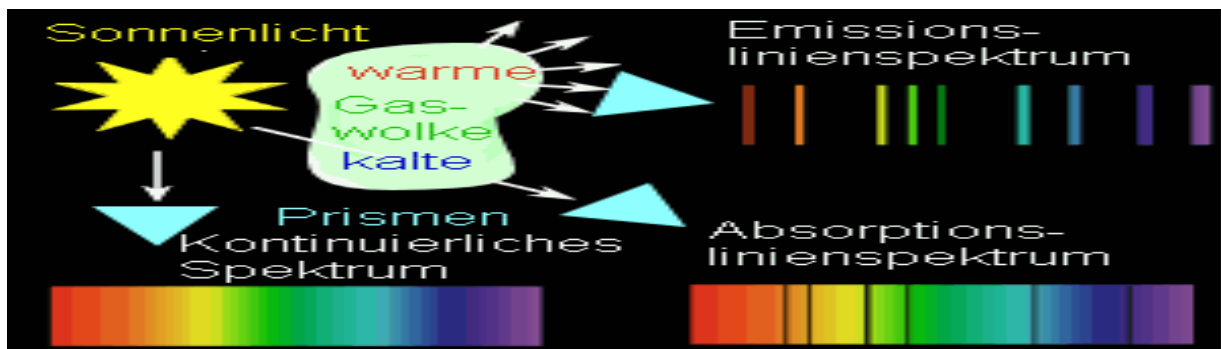
Getreu diesem Motto haben wir uns mit einem Zusammenhang beschäftigt, der uns seit geraumer Zeit keine Ruhe mehr gelassen hat. Unser Interesse gilt der Bewegung der Planeten um die Sonne. Aufgrund der Relativgeschwindigkeit (Radialgeschwindigkeitskomponente zwischen Erde und Planet) erfolgt im Sonnenlicht, das an einem Planeten reflektiert wird, eine Dopplerverschiebung der meisten der Fraunhoferschen Spektrallinien ins Rote oder Blaue. Ausgenommen sind hier die so genannten Tellurischen Linien, die durch die irdische Atmosphäre verursacht werden und deshalb unverschoben bleiben. Sie sind als Referenzlinien zur präzisen Bestimmung der Dopplerverschiebung brauchbar.

Wir haben mit einem hochauflösenden Gitterspektrometer zunächst das Spektrum der Sonne hinsichtlich geeigneter Tellurischer Absorptionslinien vermessen. Im nächsten Schritt werden in Planetenspektren benachbarte scharfe Absorptionslinien der Sonnen-Photosphäre gesucht. Deren Dopplerverschiebungen repräsentieren die jeweiligen Radialgeschwindigkeiten der Planeten bezüglich der Erde. Saturn und Venus ergeben im Beobachtungszeitraum die günstigsten Voraussetzungen zur Messung dieser Verschiebungen, und damit zur Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten.

2. Theorie

2.1. Was ist eigentlich Spektroskopie?

Jeder hat schon einen Regenbogen am Himmel bestaunt und sich gefragt, wie dieser zustande kommt. Das Licht der Sonne fällt auf einen Regentropfen und dieser zerlegt das Sonnenlicht in seine einzelnen Bestandteile, also in seine Farben. Das Resultat ist der Regenbogen, ein Spektrum der Sonne. Das ist Spektroskopie im einfachen Sinne.¹

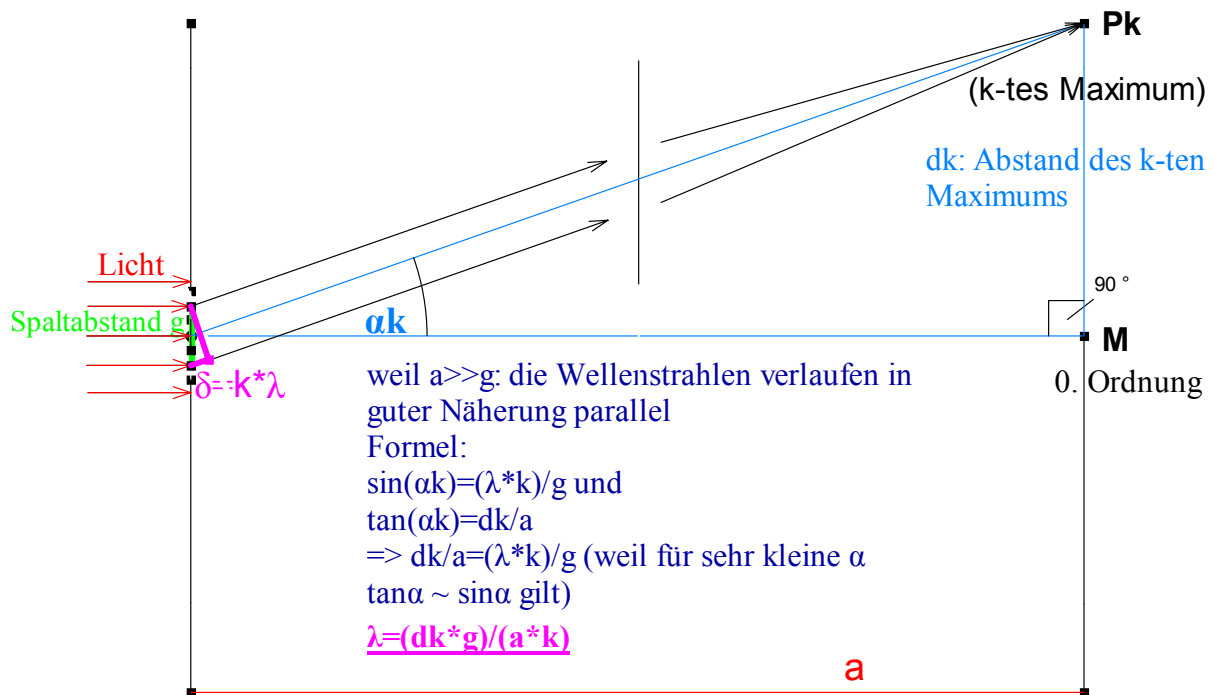


Die optische Spektroskopie, mit der wir uns hier befassen, ist eine Reihe experimenteller Verfahren, bei denen durch die Farbzerlegung einer Lichtquelle Rückschlüsse auf die Licht aussendende Materie gezogen werden können. So kann anhand des Spektrums die Beschaffenheit der lichtaussendenden Gashölle eines Sterns, die Temperatur, die chemische Zusammensetzung bis hin zur Bewegung der Lichtquelle analysiert werden und Atome oder Moleküle können an ihrem charakteristischen Spektrum identifiziert werden

2.2. Was passiert am Spalt?

Um ein Spektrum zu erhalten, welches eine genügende Schärfe für astronomische Analysen aufweist wird ein Beugungsgitter mit sehr kleinem Spaltabstand verwendet. Zur Erklärung, wie hier ein Spektrum entsteht, verwenden wir den Doppelspalt.

¹ Abbildung: <http://leifi.physik.uni-muenchen.de/>



Bei diesem Versuch machen wir uns den Wellencharakter des Lichts zu Nutze. Nach dem Huygensschen Prinzip bilden sich hinter dem Doppelspalt zwei Elementarwellen aus, die sich gegenseitig überlagern. Der Abstand von den beiden Spalten zum Punkt M ist gleich, folglich ist der Gangunterschied Null und es ist ein weißer Streifen an der Wand sichtbar.

Sobald man sich aber entlang des Schirms vom Punkt M entfernt, müssen die Elementarwellen unterschiedliche Wege bis zu einer bestimmten Stelle auf der Wand zurücklegen und es entsteht ein Gangunterschied δ . Wenn der Gangunterschied δ nicht mehr exakt $k \cdot \lambda$ groß ist, dann ist die Interferenz destruktiv und an dieser Stelle auf dem Schirm bleibt es dunkel: ein Minimum. Geht man weiter die Leinwand entlang, so trifft man wieder auf eine helle Stelle: ein Maximum. Minima und Maxima wechseln sich gegenseitig ab, doch werden sie, je weiter sie von M entfernt sind, unschärfer, überlagern sich gegenseitig und werden somit unbrauchbar für astronomische Zwecke. Die Maxima und Minima werden als Ordnungen bezeichnet und es wird der Punkt M als Maxima nullter Ordnung bezeichnet. Von diesem Punkt aus nummeriert man sowohl nach oben als auch nach unten durch.

Ein Maximum entsteht genau dort, wo der Gangunterschied wieder $k \cdot \lambda$ groß ist und die Interferenz also konstruktiv ist. Hier treffen Wellen aufeinander, überlagern und verstärken sich gegenseitig und machen ein Spektrum sichtbar, welches die einzelnen Bestandteile des aufgefächerten Lichtes aufzeigt.

Bei zwei Spalten ist das Spektrum sehr grob, zu Verbesserung wird ein Gitter verwendet, in das durch Laser tausende ganz feine Vertiefungen geritzt wurden. Dieses Gitter wird zur Lichtbeugung verwendet und erstellt ein sehr viel feineres Spektrum als ein Doppelspalt, da sich hier wesentlich mehr Wellen konstruktiv überlagern müssen um ein Maximum zu erzeugen. Die Maxima und Minima werden schärfer und sind besser zu analysieren. Entweder verwendet man Transmissionsgitter, bei denen das Spektrum im durchgelassenen Licht besteht, oder man verwendet ein Reflexionsgitter, bei dem das Spektrum aus dem reflektierten Licht besteht.²

² Vgl. Kaler: Sterne und ihre Spektren. S. 73-81.

2.3. Entstehung eines Absorptionsspektrums

Zur Erklärung verwende ich das Wasserstoffatom, da es mit seinem einen Elektron das unkomplizierteste Element ist. Die Elektronen befinden sich auf so genannten Schalen, wobei das Elektron immer bestrebt ist, möglichst nahe am Kern zu sein. Um ein Elektron in eine höhere Schale anzuheben, muss Energie zugeführt werden.

Licht besteht aus Photonen mit unterschiedlichen Wellenlängen. Trifft ein Photon mit einer bestimmten Wellenlänge auf das Elektron und hat es exakt die Energie, die nötig ist, um das Elektron vom Zustand m in einen Zustand n zu heben, so gibt das Photon seine ganze Energie ab (es kann nur seine ganze Energie abgeben oder gar keine) und hebt das Elektron in einen höheren Zustand. Die Folge davon ist, dass im Spektrum das Licht der zu den Photonen gehörenden Farbe fehlt, da es ja seine Energie abgegeben hat und daher befindet sich im Spektrum an dieser Stelle nun eine schwarze Linie, eine Absorptionslinie.

Zur Berechnung der Energie, die beim Wasserstoffatom aufgewendet wird, gilt:

$$E=hf \quad [E= \text{Energie, } h=4,135 \times 10^{-15} \text{ eV (Plancksches Wirkungsquantum), } f= \text{Frequenz}]$$

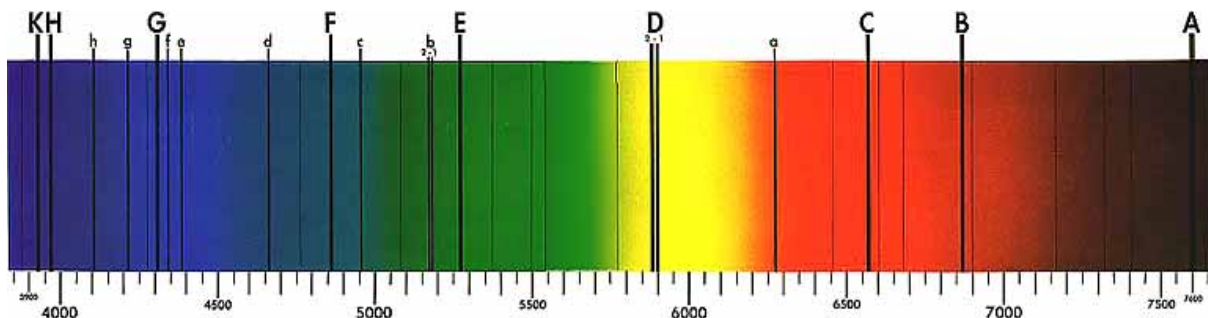
Um die Frequenz des Photons zu ermitteln, gilt:

$$f = f_R (1/m^2 - 1/n^2) \quad [\text{hier: } m=2 \text{ und } n=3, f_R=3,29 \times 10^{15} \text{ Hz (Rydbergfrequenz)}]$$
$$f = 4,57 \times 10^{14} \text{ Hz, } c = \lambda f \Leftrightarrow \lambda = c/f = 656 \text{ nm, } E = 1,89 \text{ eV}$$

Um ein Elektron des Wasserstoffatoms aus der zweiten in die dritte Schale anzuheben, muss ein Photon mit einer Wellenlänge von 656nm auf das Elektron treffen, um es anzuheben. Das Photon gibt seine ganze Energie, also 1,89eV, an das Elektron ab, welche dieses benötigt, um in die dritte Schale zu springen.

2.4. Fraunhofersche Linien

Die Fraunhoferlinien³ wurden nach ihrem Entdecker Fraunhofer benannt und entstehen durch Absorption. Diese kommt dadurch zu Stande, dass Gase in der Photosphäre eine bestimmte Wellenlänge des Sonnenlichts absorbieren. So ist es dann auch möglich, dass bei der Sonne kein vollständiges Kontinuum-Spektrum zu sehen ist. Dort wo das Spektrum lückenhaft ist, sind dunkle Linien zu erkennen. Diese Absorptionslinien werden Fraunhoferlinien genannt. Zudem bleibt noch festzuhalten, dass die Annahme, dass alle diese Absorptionslinien absolut (gleich) dunkel sind, nicht richtig ist. Vielmehr ist diese ‚Dunkelheit‘ hinsichtlich der Breite und Tiefe einer Linie ein besonderes Charakteristikum. Denn letztendlich nimmt die Intensität der Fraunhoferlinien bedingt durch die Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des absorbierenden Gasgemisches so ab,



(Die wichtigsten Fraunhoferlinien sind mit Großbuchstaben mar-

³ vgl. Kaler: Sterne und ihre Spektren: S. 85f., Abbildung Fraunhoferlinien:
http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Fraunhofer_lines.jpg

dass unser Auge die feinen Helligkeitsunterschiede nicht genau wahrnehmen kann. Dieses Phänomen, dass die Intensität bei jedem Gasgemisch unterschiedlich ist, gibt den Wissenschaftlern dann wiederum die Möglichkeit auf die chemische Zusammensetzung der Photosphäre zu schließen. Deshalb können wir heute genau sagen, welche Gase in der Photosphäre enthalten sind und welche nicht. Ohne diese Entdeckung wäre unser Wissen über die Sonne keineswegs so fortgeschritten wie es heute ist.

2.5. Tellurische Linien

Doch nicht alle Linien, die wir im Sonnenspektrum sehen, entstehen auch in der Gashülle des Sterns. Beim Durchgang des Sonnenlichts durch die Erdatmosphäre werden genau wie in der Sternhülle Photonen von den Gasmolekülen absorbiert, die so entstandenen Absorptionslinien werden als 'tellurische Linien' bezeichnet. So sind drei der auffälligen Fraunhofer'schen Linien (A, a und B im roten Bereich des Spektrums) auf irdischen molekularen Sauerstoff bzw. Wasserdampf zurückzuführen.⁴

Anders als 'normale' Absorptionslinien sind die Wellenlängen der tellurischen Linien konstant, da sie nicht aufgrund des Dopplereffekts verschoben werden: Egal, mit welcher Radialgeschwindigkeit sich die Sterne auf die Erde zu- bzw. von ihr wegbewegen, die Moleküle der irdischen Lufthülle absorbieren immer Photonen derselben Wellenlänge. Aus diesem Grund können die tellurischen Linien als (nicht verschobene) Referenzlinien bei Dopplermessungen dienen (Vergleicht man den Abstand der Laborwellenlänge einer Spektrallinie und der gemessenen Wellenlänge jeweils von einer solchen Referenzlinie, so kennt man die Dopplerverschiebung, s. Kapitel 'Dopplereffekt' und 'Radialgeschwindigkeit').

Allerdings ist anzumerken, dass bei tiefstehender Sonne der Lichtweg des Sonnenlichts viel größer ist, als wenn sie z.B. im Zenit steht. Dabei trifft das Licht mehr Moleküle der Erdatmosphäre, die Absorption dieser Linien ist folglich stärker. Bei den Wasserdampflinien spielt gleichzeitig auch noch die Luftfeuchtigkeit eine Rolle. Die Wellenlänge ändert sich jedoch nicht.

2.6. Dopplereffekt

Dieses Phänomen kennt jeder aus dem täglichen Leben: Wir hören einen höheren Ton, wenn sich uns z. B. ein Krankenwagen mit Martinshorn nähert. Entfernt sich das Fahrzeug wieder, nehmen wir einen tieferen Ton wahr.

Allgemein kann man sich den Dopplereffekt mit folgendem Gedankenexperiment verdeutlichen:

Eine ruhende Quelle sende gleichmäßig Wellen (Schallwellen, elektromagnetische Wellen), deren Frequenz f von einem ruhenden Beobachter gemessen wird. Für die Wellenlänge λ gilt dann:

$$\lambda = c \times T \quad (T: \text{Schwingungsdauer}) \quad (1)$$

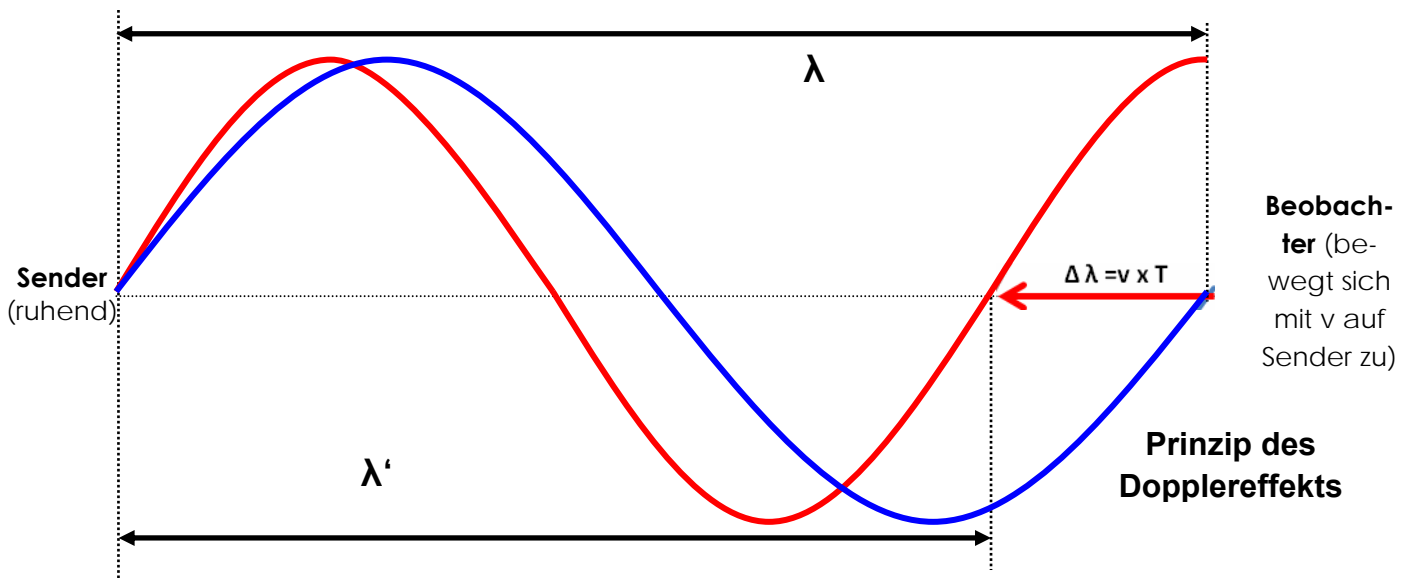
Bewegt sich der Beobachter auf den Sender der Frequenz f zu, so wird er mehr Wellen pro Zeiteinheit (d.h. eine höhere Frequenz) messen. Ist seine Geschwindigkeit v , so misst der Beobachter eine um $\Delta\lambda = v \times T$ verkürzte Wellenlänge:

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda \quad \leftrightarrow \quad \lambda' = \lambda - v \times T \quad (2)$$

Es folgt:
$$v = \frac{\lambda - \lambda'}{T} \quad (3)$$

⁴ Vgl. Kaler: Sterne und ihre Spektren. S. 85f.

Mit (1) erhält man: $v = \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda} \times c \leftrightarrow v = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \times c$ (4)



Bewegt sich der Beobachter auf den Sender zu, misst er eine höhere Frequenz, d.h. eine kleinere Wellenlänge. Eine Spektrallinie des am Saturn reflektierten Sonnenlichtes wird also im Spektrum blauverschoben erscheinen, wenn sich die Erde auf ihn zubewegt, andernfalls ist sie in Richtung der roten Seite des Spektrums verschoben (dann gilt: $\lambda' = \lambda + v \times T$).

Dabei gilt: Ist v positiv, so entfernt sich der Beobachter vom Sender (Rotverschiebung), ist v negativ, so bewegt sich der Beobachter auf den Sender zu (Blauverschiebung).

Aus (4) wird deutlich, dass die Spektrallinierverschiebung $\Delta \lambda$ proportional zur Relativgeschwindigkeit v von Sender und Empfänger ist, d.h. mit steigendem v sind die Linien immer stärker verschoben.⁵

2.7. Radialgeschwindigkeit

Die Radialgeschwindigkeit ist die Komponente der Bewegung von Sternen entlang der Sichtlinie von der Erde zum betreffenden Stern und bewirkt folglich Dopplerverschiebungen in den Sternspektren. Kennt man die wirkliche Wellenlänge einer Spektrallinie aus Laborversuchen, so lässt sich die Dopplerverschiebung als Differenz zwischen Laborwellenlänge und gemessener Wellenlänge und daraus die Radialgeschwindigkeit des Sterns berechnen. Diesen Beobachtungen ist ein sehr großer Teil des heutigen Wissens über die Bewegungen von Sternen, Galaxien (z.B. ihren Rotations- und Fluchtgeschwindigkeiten) und z.B. Doppelsystemen zu verdanken. Bei letzteren sind dann z.B. in Verbindung mit Entfernungsbestimmungen Rückschlüsse auf deren Sternmassen und Bahnelemente wie die großen Halbachsen und die Umlaufperiode möglich.⁶

Im System Sonne-Saturn-Erde bewegt sich der Saturn (als Sender) im Vergleich zur Erde mit einer geringen Tangentialgeschwindigkeit (mittlerer Wert: 9,6724 km/s). Dabei bewegt er sich senkrecht zu seiner großen Halbachse und (aufgrund der großen Entfernung zur Erde und des folglich sehr kleinen Winkels γ (s. Abb.2)) auch fast senkrecht zur Erde. Aus diesem Grund ist die Radialgeschwindigkeitskomponente zur Erde sehr gering, weshalb der Saturn vereinfacht als ruhend betrachtet werden kann. Der Saturn wird sich also während der Messungen nur sehr wenig auf die Erde zubewegen.

⁵ Für den Dopplereffekt vgl. http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/versuche/12dopplereffekt/dopplereffekt.htm

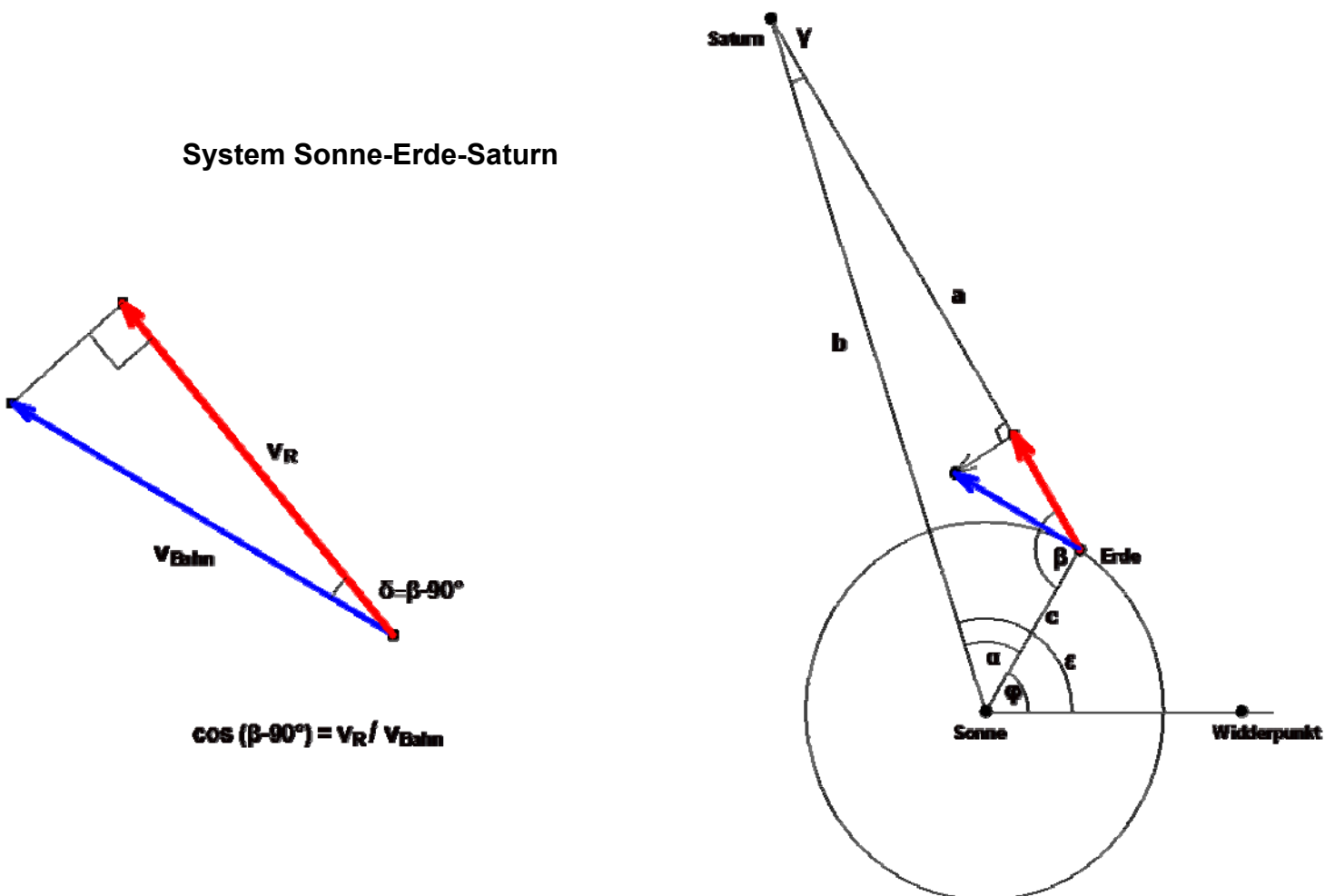
⁶ Vgl. Kaler: Sterne und ihre Spektren. S. 34, 72, 192f. und 197

Die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Planeten ist dann die Geschwindigkeit, mit der sich die Erde auf den Saturn zubewegt, also die Radialgeschwindigkeit der Erde. Sie kann man durch Vektorenzerlegung als Komponente der Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne auffassen. Dabei kann man die Radialgeschwindigkeit v_R in Abhängigkeit von der Position der Erde darstellen (da die Erde in der Ekliptik liegt und der Saturn nur um $2,484^\circ$ gegen sie geneigt ist⁷, genügt es, die Längenkoordinaten (gemessen jeweils als Winkel zur Verbindungslinie Sonne-Widderpunkt) zu berücksichtigen).

Mithilfe der folgenden (nicht maßstabsgetreuen) Abbildung soll dieser Zusammenhang und insbesondere die in der Herleitung benutzten Winkel- und Seitenbeziehungen näher erläutert werden. Aufgrund der geringen Exzentrizität (0,0167) ist hier die Bahn der Erde idealisiert als Kreisbahn gezeichnet. Für das Dreieck Sonne-Erde-Saturn gelten folgende Längen:

Sonne-Erde c: 1 AE (große Halbachse der Erde)
 Saturn-Sonne b: 9,537 AE (große Halbachse des Saturn)

System Sonne-Erde-Saturn



Die Entfernung Saturn-Erde a kann man nun mittels des Cosinus-Satzes für allgemeine Dreiecke ($c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \times \cos \alpha$) berechnen:

Saturn-Erde a:
$$\sqrt{b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos \alpha} \quad (5)$$

⁷ Für die in dieser Herleitung benutzten Werte der Bahnelemente der Planeten vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Planeten_des_Sonnensystems_%28Tabelle%29

α ist dabei die Differenz der Winkel des Saturn bzw. der Erde zur Verbindungslinie Sonne-Widderpunkt:

$$\alpha = \varepsilon - \varphi \quad (6)$$

Mithilfe des Sinussatzes für allgemeine Dreiecke ($\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$) und der Winkelsumme im Dreieck lassen sich die restlichen Winkel bestimmen, z.B.

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{c \times \sin \alpha}{a}\right) \quad (7)$$

Der Vektor der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} (dessen Betrag zwar variiert, da die Erdbahn keine ideale Kreisbahn ist, doch nur geringfügig) lässt sich in zwei Komponenten zerlegen, die Radialgeschwindigkeit v_R und eine senkrechte Komponente.

Es gilt für den Winkel $\delta = \beta - 90^\circ$ (8)

Ferner: $\cos \delta = \frac{\text{Radialgeschwindigkeit}}{\text{Bahngeschwindigkeit}} \leftrightarrow v_R = \cos \delta \times v_{\text{Bahn}}$ (9)

Nun folgt aus (8): $v_R = v_{\text{Bahn}} \times \cos(\beta - 90^\circ)$ (10)

und aus der Winkelsumme im Dreieck:

$$v_R = v_{\text{Bahn}} \times \cos(180^\circ - \alpha - \gamma - 90^\circ) = v_{\text{Bahn}} \times \cos(90^\circ - \alpha - \gamma) \quad (11)$$

Aus (5), (6) und (7) folgt dann für die Radialgeschwindigkeit der Erde in Abhängigkeit vom Winkel φ :

$$v_R = v_{\text{Bahn}} \times \cos\left[90^\circ - (\varepsilon - \varphi) - \sin^{-1}\left(\frac{c \times \sin(\varepsilon - \varphi)}{\sqrt{(b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos(\varepsilon - \varphi))}}\right)\right] \quad (12)$$

2.8. Radialgeschwindigkeiten im System Sonne-Erde-Venus

Die Relativgeschwindigkeit zwischen der Erde und dem zweiten von uns gewählten Planeten, der Venus, ist schwieriger zu berechnen, da keiner der beiden Planeten als ruhend betrachtet werden kann (mit 35km/s bewegt sich die Venus sogar schneller um die Sonne als die Erde mit knapp 30km/s). Die Relativgeschwindigkeit der beiden Planeten ist also die Differenz der beiden Radialgeschwindigkeiten. Da beide Vektoren auf einer Geraden liegen, genügt es, die vorzeichenbehafteten Werte der Vektoren zu benutzen. Da die Relativgeschwindigkeit kleiner wird, wenn beide Vektoren in dieselbe Richtung zeigen (d.h. sie das gleiche Vorzeichen haben), muss man die Werte der Radialgeschwindigkeiten voneinander abziehen. Es gilt also:

$$v_{\text{Relativ}} = v_{\text{Radial-Venus}} - v_{\text{Radial-Erde}} \quad (13)$$

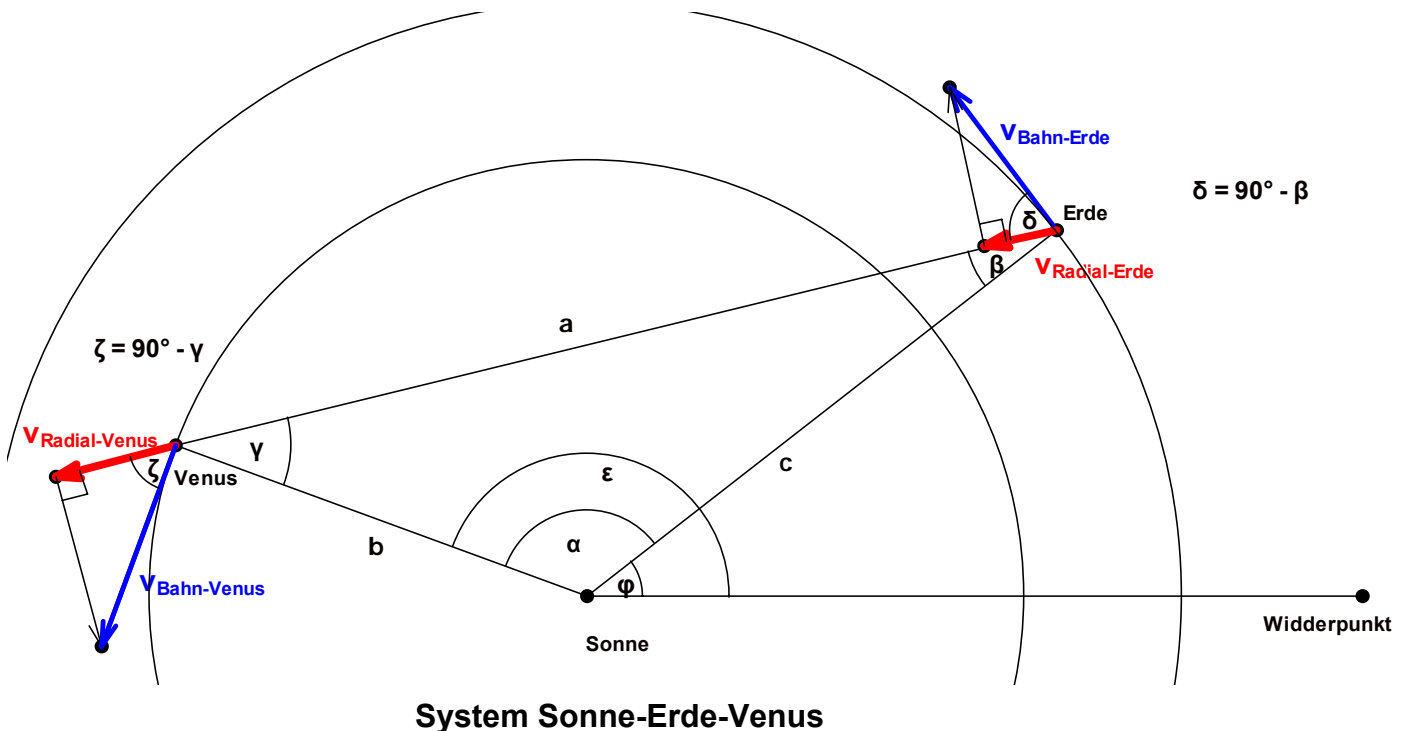
Dabei gilt im Dreieck Venus-Sonne-Erde:

Sonne-Venus b: 0,7233 AE (große Halbachse der Venus)

Mithilfe ähnlicher Überlegungen wie beim Saturn gelangt man schließlich zu folgenden Gleichungen für die Radialgeschwindigkeiten von Venus und Erde:

$$v_{\text{Radial-Venus}} = v_{\text{Bahn-Venus}} \times \cos\left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{c \times \sin \alpha}{\sqrt{(b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos \alpha)}}\right)\right] \quad (14)$$

$$V_{\text{Radial-Erde}} = V_{\text{Bahn-Erde}} \times \cos \left[90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{b \times \sin \alpha}{\sqrt{b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos \alpha}} \right) \right] \quad (15)$$



Aus (13) folgt dann für die Relativgeschwindigkeit von Venus und Erde:

$$V_{\text{Relativ}} = V_{\text{Bahn-Venus}} \times \cos \left[90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{c \times \sin \alpha}{\sqrt{b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos \alpha}} \right) \right] - V_{\text{Bahn-Erde}} \times \cos \left[90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{b \times \sin \alpha}{\sqrt{b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos \alpha}} \right) \right] \quad (16)$$

Dabei gilt wieder: $\alpha = \varepsilon - \varphi$ (17)

(\sin^{-1} ist im Allgemeinen zwar nicht eindeutig, in diesem Fall aber schon, da die Winkel β und γ stets $\leq 90^\circ$ sind.)

Für unsere Messung am 31.12.2007 / 13.01.2008 um jeweils 7^{h} liefert Redshift folgende Winkel:

φ (Winkel Erde-Widderpunkt) = $98.35^\circ / 112.42^\circ$ und ε (Winkel Venus-Widderpunkt) = $183^\circ / 203.13^\circ$

Daraus folgt für die Relativgeschwindigkeit zwischen Erde und Venus nach (16):

$V_{\text{Relativ}} = 11.33 \text{ km/s}$ bzw. 10.85 km/s (d.h. Venus entfernt sich von der Erde)

Eingesetzt in (4) ergibt sich für die Spektrallinie bei 628nm eine theoretische Rotverschiebung von

$$\Delta \lambda = \frac{v}{c} \times \lambda = 0.0237 \text{ nm bzw. } 0.0227 \text{ nm.}$$

Diesen Wert gilt es jetzt experimentell zu bestätigen. Berücksichtigt man Ungenauigkeiten aufgrund der vorgenommenen Vereinfachungen und Messfehler, so ist mit einer betragsmäßigen Dopplerverschiebung von 0.02-0.03nm bei dieser Spektrallinie zu rechnen.

3. Technik des Spektroskopierens

Für unsere Arbeit stand das hoch auflösende Gitterspektrometer (Jobin Yvon Vorläufertyp des Modells TRIAX 550; Technische Daten: f 640 mm; f/5.6; Auflösung: ~0.02 nm) der Schulsternwarte zur Verfügung. Die Masse/Größe des Gerätes erforderte die Einkoppelung des Lichts vom Teleskop via Lichtfaser⁸ (Durchmesser 100 µm) von etwa 10 Meter Länge. Die für Schulsternwarten hochkomplexe Technologie der Einkoppelung befindet sich noch in der Entwicklung durch Prof. em. Dr. Ulrich (TUHH), der unsere Sternwarte in technologischen Dingen fördert.

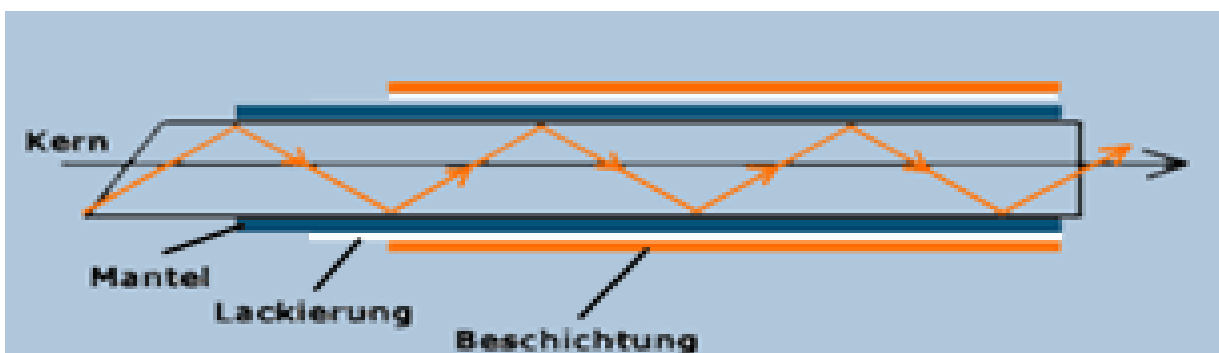
Die kritische Stelle der Komponentenkette Teleskop-Lichtfaser-Spektroskop-Kamera liegt in der Platzierung der Beugungsscheibe eines Sterns (von ca. 10 µm) im Fokus des Teleskops in das teleskopseitige Faserende. Aufgrund des Gleichlauffehlers der Antriebschnecke der Teleskopmontierung (bei unserem Schulteleskop ~ +/- 15 Bogensekunden/ 8 Min.!) muss unter hohem Aufwand die Lichteinkopplung ständig kontrolliert/korrigiert werden.

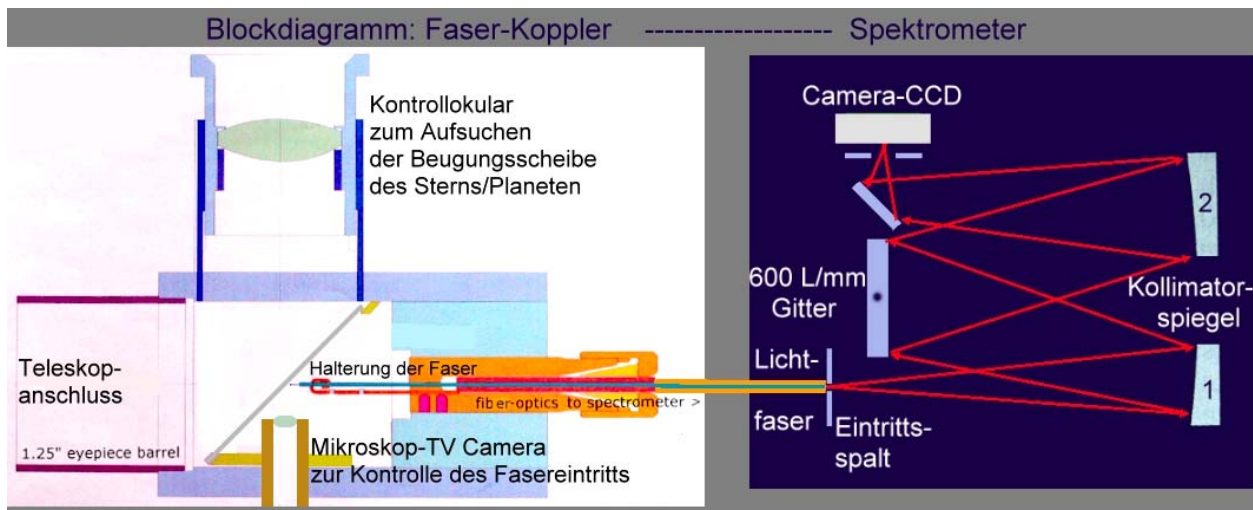
Die Grafik weiter unten zeigt dieses Bauteil. Ziel ist, das Faserende mit dem Beugungsscheibchen von Sternen/Planeten bis zur 2. Größenklasse mittels einer Mikroskopkamera auf einem Monitor darzustellen und entsprechend das Teleskop nachführen zu können.

Das Spiegelteleskop der Schulsternwarte (Typ Maksutov mit 250 mm Öffnung und mit einer Brennweitenreduzierlinse im Öffnungsverhältnis ~f/5 betrieben) wird durch die parallaktische Montierung auf den Planeten gerichtet und feinmotorisch nachgeführt. Das mit der Faser aufgenommene (Teil-)Licht des Planeten wird zum Eintrittspalt des Spektrometers geleitet. Spalt (~12 - 60 µm)* und Gitter (600 L/mm geblazed; in 2. Ordnung) des Spektrometers bewirken am Austritt ein Spektrum, das von einer DSLR-Camera (Nikon D 50; Sensorabmessungen: 15.6 x 23.6 mm) aufgenommen wird. Durch die Größe des Sensors (und die Optik des Spektrometers) ergibt sich eine theoretische Auflösung von ~20 nm/3000 Pixel.

*(In den Grenzbereichen des Spektrums wurde zwecks Kontrasterhöhung der Spalt auf 60 erweitert.)

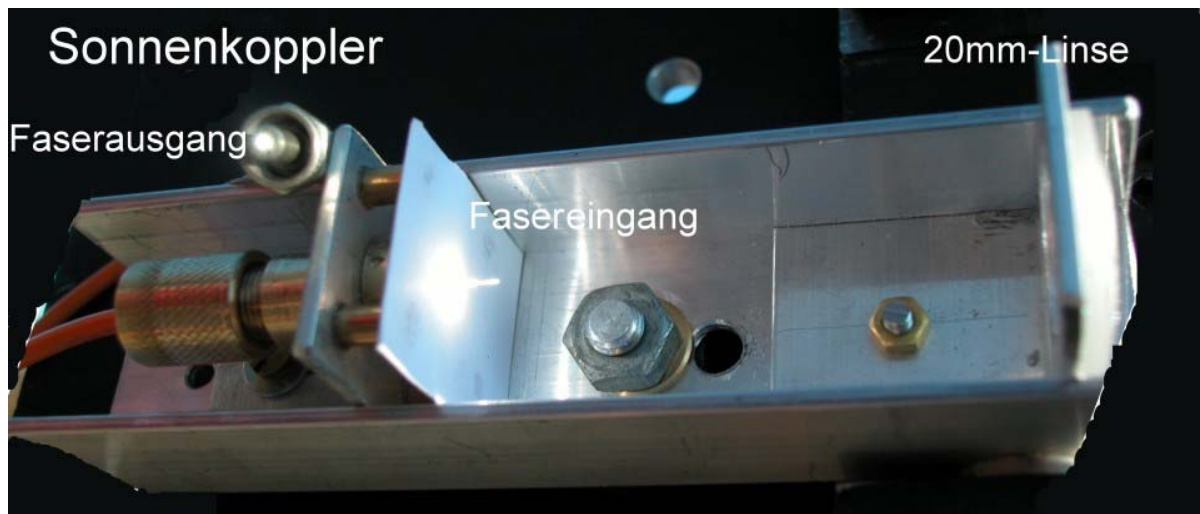
⁸ Glasfaserkabel sind aus einem Kern, einer Beschichtung und einem Mantel aufgebaut. Der Kern (Durchmesser: 100 µm und weniger) dient dabei zur Übertragung des Signals. Der Mantel ist auch lichtführend, unterscheidet sich aber insofern vom Kern, dass er eine niedrigere Brechzahl (Brechzahl: Faktor, um den c im freien Raum kleiner ist als im Vakuum) hat. Der Mantel bewirkt dadurch eine Totalreflexion und somit eine Führung der Strahlung im Glasfaser-Kern. Die aus Kohlenstoff bestehende Beschichtung wiederum ist für den Schutz vor mechanischen Beschädigungen vorgesehen. Zwischen Mantel und Beschichtung befindet sich zudem noch eine 2 bis 5 µm dicke Lackierung, die dazu da ist, Einflüsse der Atmosphäre von der Glasfaser fernzuhalten. Der Kern und der Mantel werden hauptsächlich aus Quarzglas hergestellt.





An der diagonalen Glasscheibe im Faserkoppler werden die prozentualen Streuungsanteile des Sternen-/Planetenlichts beim Durchgang durch die Scheibe für die Nachführungskontrolle genutzt.

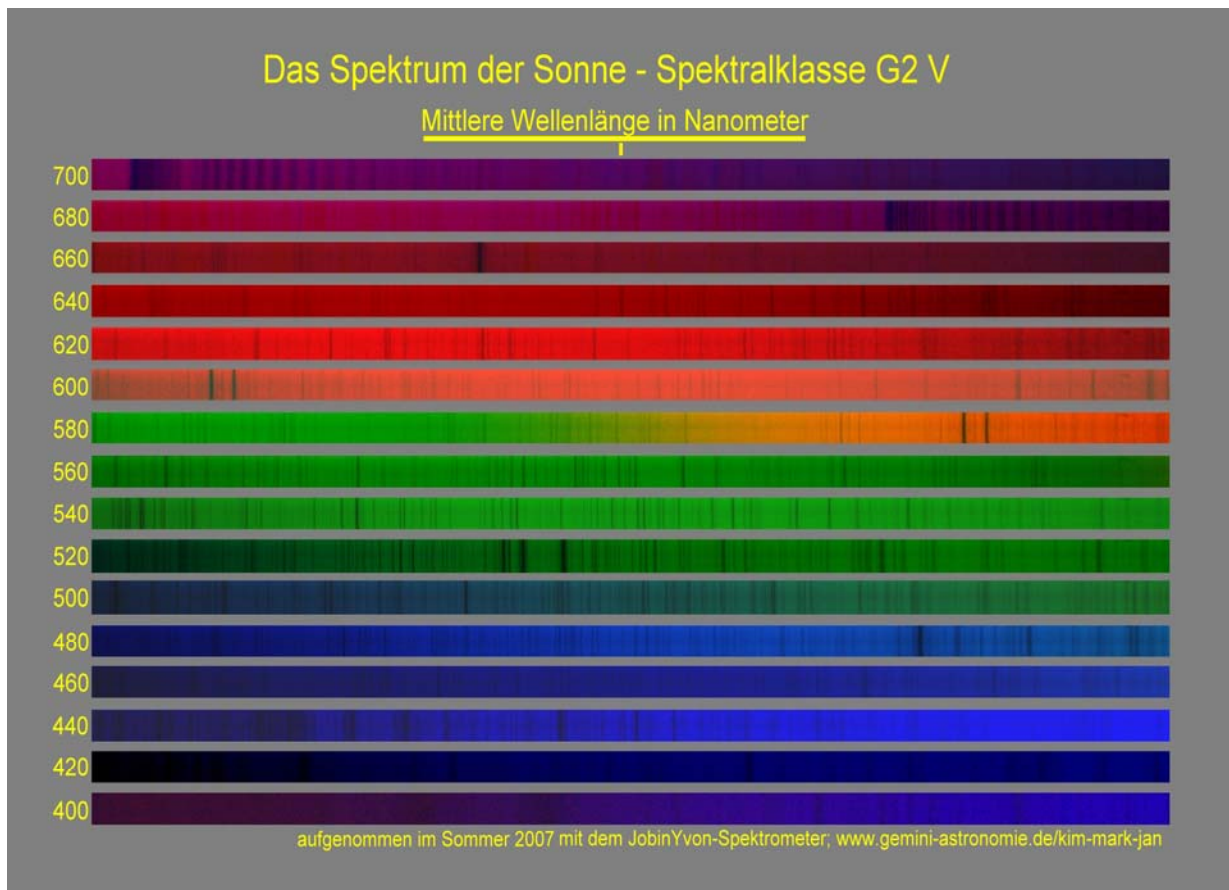
Für die Spektralanalyse des Sonnenlichts war eine weitere Sonderanfertigung erforderlich, wobei eine einfache 20 mm Plankonvex-Linse mit 60 mm Brennweite die Sonne direkt auf die fest montierte Faser projiziert. Dieser „Sonnenkoppler“ (fertig gestellt im Frühjahr 07) wird an der Teleskopmontierung befestigt und so während der Fotografie des Sonnenspektrums der Sonne motorisch nachgeführt.



(Für das Bild wurde der Faseraustritt auf das Gerät gelegt, um die Transmission der Faser zu zeigen.)

Das gesamte visuelle Spektrum von 400 bis 700 nm wurde in 10- bzw. 20-Nanometerschritten in vielen Einzelbildern mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommen. Unser Hauptaugenmerk war dabei zunächst auf hohe visuelle Schärfe und Kontrast der Absorptionslinien gerichtet. In Einzelfällen im Bereich der **Tellurischen Linien** haben wir im Winter – bei besonders langem Weg des Lichts durch die Atmosphäre - weitere Detailaufnahmen des Spektrums angefertigt.

Am Computer (Software Photoshop) wurde dann eine Gesamtübersicht der Spektrenabschnitte zusammengestellt, ähnlich der Übersichtsspektren in der Fachliteratur. Die Bildauflösung im Sonnenspektrum ergibt bei einem Eingangsspalt von $\sim 20\mu\text{m}$ eine realistisch erzielbare **Auflösung von $\sim 0.02 \text{ nm/Pixel}$** (siehe nachfolgendes Farbbild):



4. Messergebnisse

Hinsichtlich Wellenlänge, Linienbreite und –tiefe sowie Verschiebung der Linie erfolgte die Auswertung unserer Spektren mit Hilfe der IRIS-Software, die für Amateurastronomie eine erstaunliche Genauigkeit ermöglicht. Da wir uns aber an der unteren Grenze der Nachweisbarkeit der Linienverschiebung bewegten, baten wir um eine alternative Auswertung der Bildstreifen mit einer professionellen Spektrometersoftware, was uns mittels eines Notebooks der TUHH ermöglicht wurde. Die IRIS Auswertung wird weiter unten am Beispiel der Venus gezeigt.

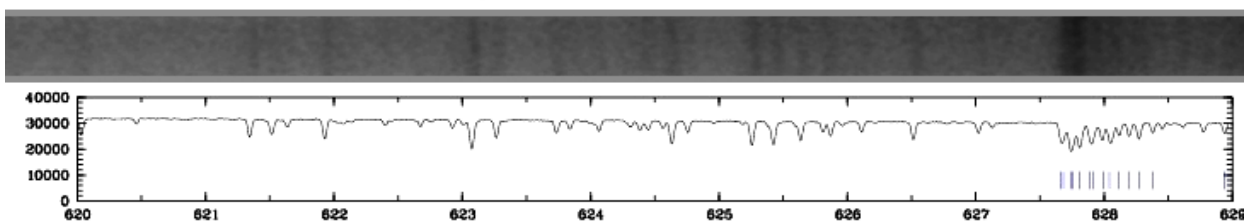
Zur Bestimmung der Tellurischen Linien (TL) als Referenzlinien nutzten wir zunächst die GIRAFFE-Grafik der Website der ESO. In die 627nm-Grafik montierten wir den entsprechenden Spektralbereich unseres Sonnenspektrums (s. Bild). Die TL ab 627.7 nm sind markiert:

FLAMES/GIRAFFE: Solar (sky) spectra

Configuration: Medusa1 HR13 627.3 o9 (H627.3); EXPTIME: 10.0 sec

Product: GI_SRBS_2004-09-28T22:18:54.946_Medusa1_H627.3nm_o9.fits

Details: central fibre (@60)



Eine detaillierte Liste der TL steht bei <http://www.eso.org/observing/dfo/quality/GIRAFFE/> bzw. Hanuschik (unpublished)/ESO im Internet zur Verfügung.

Die Praxis: Warten auf Saturn und Venus

Die Zeit der Planetenkonstellationen mit den größten Radialgeschwindigkeiten im Herbst/Winter 2007 zwischen Erde/Saturn zerrann in Wolken verhangenen Nächten bis wir endlich am 29.12. feststellen mussten, dass die Mikroskop-Kamera das visuell einfach zu findende Scheibchen des Saturn nicht anzeigen konnte. Die ~ 0 mag des Saturns, noch eine halbe Größenklasse von seiner Oppositionshelligkeit entfernt, war zu schwach. (Im Gegensatz zu einem Stern nimmt die Faser ja nur einen Bruchteil des Lichtes der Scheibe auf.)

Der -1mag leuchtende Mars ließ sich – zum Trost - leicht aufzeichnen, der Glanz des Mars in Opposition zur Sonne offenbart aber keine Linienverschiebung, da $V_{\text{Radial}} = \sim 0$ Km/s beträgt. Dennoch war das Spektrum im Bereich der Tellurischen Linien (~ 627 nm) beeindruckend, sodass wir es hier im Vergleich mit dem Teil der Sonne zeigen.

Spektrum mit Tellurischen Linien ~ 627 nm bei Mars in Opposition (o.) und Sonne

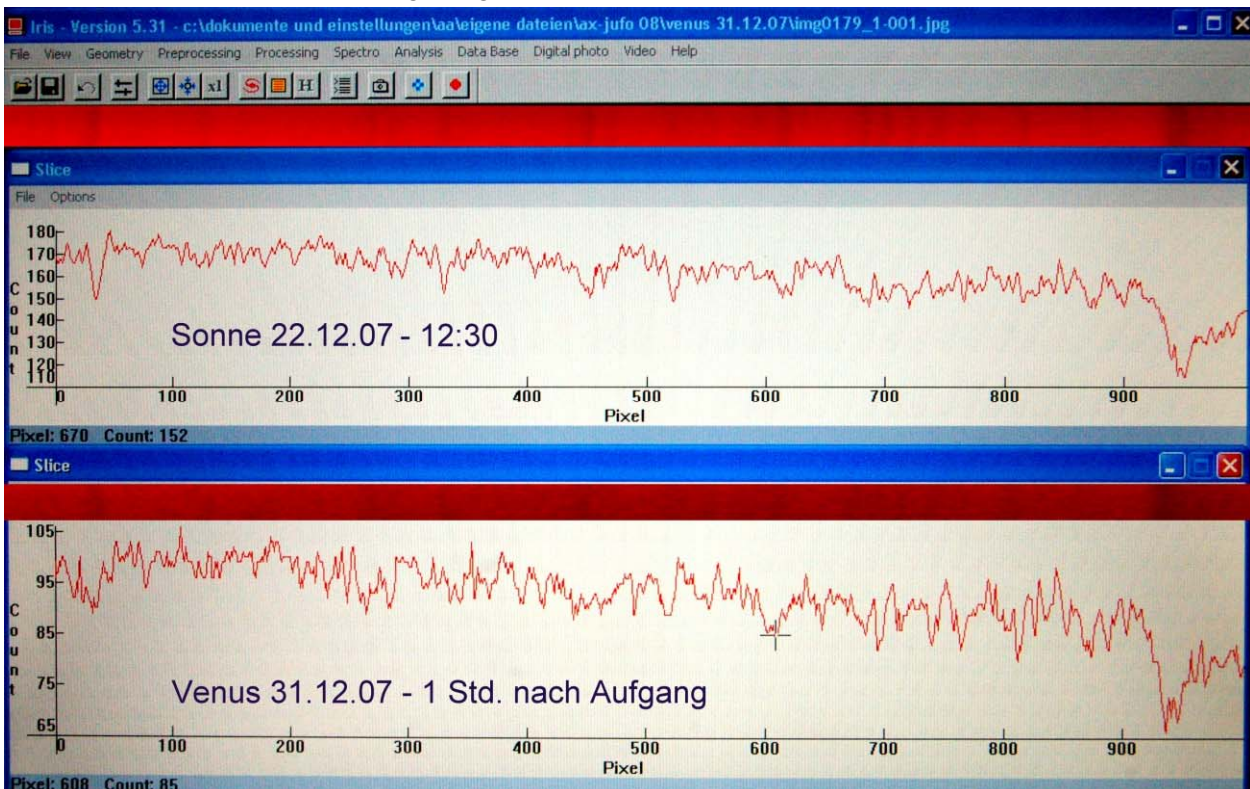


Das Marsfoto wurde 70 Sek. belichtet, für das Sonnenfoto reichte 1/100 Sekunde.

Die -4mag helle Venus versprach eine Rotverschiebung, da sie im November 2007 das Maximum der Radialgeschwindigkeit von +13.5 km/s durchlaufen sollte. Am frühen Morgen des Sylvestertages war es soweit:

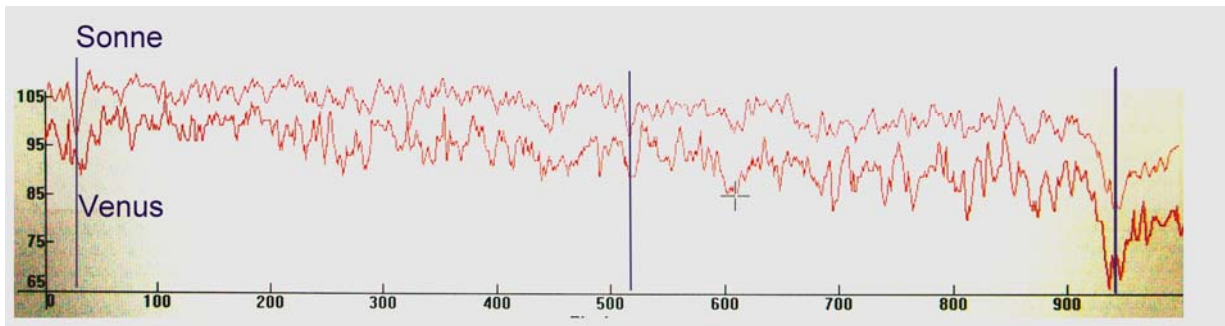
Wir nahmen das Spektrum auf, hatten V_{Radial} zu +11.328 km/s = einer Rotverschiebung von 0.0237 nm berechnet und erwarteten eine Verschiebung von knapp 2 Pixel.

Genau das trat ein: aber die Verschiebung war visuell nicht erkennbar, die Pixelauswertung mit IRIS ergab keine eindeutige Verschiebung und auch die Auswertung mit der Spektrometersoftware zeigte eine zu schwache Vertiefung bzw. Verschmierung der Absorptionslinien, sodass sich die Verschiebung lediglich andeutete. (siehe Bild)



Eine „tatsächliche“ Verschiebung um ~ 3 Pixel lässt sich im IRIS-„Pixelcount“ aufgrund der relativen Breite der Absorptionslinien erst „beweisen“, wenn man die Graphen von Venus

und Sonne an der breiten Tellurischen Linie bei 627.7nm überlagert:



Der Hauptgrund für den nicht überzeugenden „Liniensprung ins Rote“ muss in einem zu breiten Eingangsspalt liegen, (den wir wählten, um den Signalrauschabstand der CCD-Fotokamera nicht unnötig zu verringern). Eine Spaltbreite von $\sim 10\mu\text{m}$ mit der erforderlichen Belichtungszeit von mehreren Minuten ist nach der Umrüstung auf eine Monochromatische CCD-Kamera mit ähnlichem Pixelabstand ($\sim 8\mu\text{m}$) und mit sehr hoher Rotempfindlichkeit erzielbar. Da die Venus sich im Januar nur sehr langsam von der „kritischen Grenze“ von $\sim 10\text{ Km/s}$ entfernt, werden wir uns auf den Jupiter im Frühjahr 2008 konzentrieren (max. $V_{\text{Radial}} \sim 30\text{ Km/s}$) und bis dahin noch an der Venus üben.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Vermessung der Planetenbahnen mit Hilfe der Dopplerverschiebungen im reflektierten Sonnenlicht bringt uns in der Schulastronomie an die Grenzen des Machbaren. Zwar ist uns das Herantasten bis $\pm 10\text{ Km/s}$ Radialgeschwindigkeit in den Spektren der hellsten Planeten gelungen, jedoch sind die Dopplerverschiebungen der Fraunhoferschen Linien in Referenz zu Tellurischen Linien nur zu erahnen. Der ersehnte Sprung um mehr als 2-3 Pixel, ist aber bei höheren Radialgeschwindigkeiten als Messergebnis gesichert. Wir hoffen, dieses im Frühjahr 08 am Jupiter zeigen zu können.

Mit empfindlicheren Kameras sollte unsere Nachfolger der große Bereich der Vermessung spektroskopischer Doppelsterne reizen. Unsere Spektren der Sonne und der Planeten zeigen, dass die hohe Leistungsfähigkeit /Auflösung grundsätzlich gegeben ist.

Wir bedanken uns als erste Nutznießer des Spektrometers und der Lichtfasertechnik herzlich für die technologische Unterstützung der Schulastronomie bei Herrn Prof. Ulrich und für den „Antrieb“ durch unseren Betreuungslehrer.

P.S.: Pünktlich zum Abgabetermin – und außer Konkurrenz – gelang am frühen Morgen des 13.1.08 Herrn Ulrich und Herrn Falk der Durchbruch: Die o. a. Mono-Kamera (MEADE DSI II) bestand ihren ersten Test als Spektrographenkamera an der Venus und die Kamerasoftware lieferte eine x.tif-Datei, die mit einem Bildauswertungsprogramm aus der TUHH weiterverarbeitet werden konnte. Im belichteten Bereich wurde über jede Pixel-Spalte der Mittelwert gebildet und in einer Grafik dargestellt. Die TL nach Hanuschik wurden mit Hilfe eines Emissionsspektrums einer Neon-Glimmlampe so im Bildfeld geeicht, dass sie eindeutig in den aufgenommenen Spektren der Sonne/Venus identifiziert werden konnten. Im Ergebnis wurden im Bereich von 628-633nm 36 Linien als tellurisch identifiziert. Dazwischen gibt es mindestens sechs scharfe, isoliert liegende Linien im Venusspektrum, die allesamt eine Rotverschiebung zeigen. Diese werden als Absorptionslinien der Sonne angesehen und haben im Mittelwert eine Rotverschiebung von 0.019nm. Daraus folgt eine Fluchtgeschwindigkeit der Venus relativ zur Erde von $\sim 9\text{ km/s}$. Das entspricht einer Abweichung von 17% vom theoretischen Wert. (s. Grafik folgende Seite)

Wir freuen uns darauf, am Jupiter mit einer ähnlichen Abweichung einer Blauverschiebung aufwarten zu können!

6. Quellenverzeichnis

Internetquellen:

www.eso.org; 08.01.2008

<http://leifi.physik.uni-muenchen.de/>; 05.01.2008

www.wikipedia.org; 14.01.2008

Hanuschik – ESO 2006 (unpublished), E-Mail-Adresse: rhanusch@eso.org

Kaler, James B.: Sterne und ihre Spektren. Astronomische Signale aus Licht. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1994.

Software:

Euklid Dyna Geo. Geometrie (wie) mit Zirkel und Lineal. Version 2.6d 1994/2004.

Iris. Version 5.51 2007. (Internet: www.astrosurf.com/buil)

Redshift 4. München: United Soft Media Verlag 2000. (Internet: www.usm.de)