



## Merkblatt zur Geschichte und Theorie der Astro-Spektroskopie – Falk/AEG-Astronomie

### vor ca. 1820:

Physische Experimente mit **Prismen** (Newton und Huygens) und (sehr primitiven) Beugungsgittern. Entdeckung der Brechungs- und Beugungsgesetze; **Fraunhofer** beschreibt Absorptionslinien der Sonne.

### bis ca. 1859

Die Vermutung entwickelt sich, dass Linien auf chemischer Zusammensetzung der Lichtquellen basieren. Das (nur teilweise erkannte) Problem: kleinste Verunreinigungen ergeben schon eine spektrale Signatur => man erkennt noch nicht, dass jedes Element seine eigenen, einzigartigen Absorptionslinien hat. Weitere Probleme sind Prismen aus unterschiedlichen, (unbekannten) Glassorten; Prismen haben daher eine jeweils unterschiedliche Dispersion; Ergebnisse sind kaum untereinander vergleichbar. Eine "Wellenlängenkalibration" ist mangels bekannter Referenzen nicht möglich. *Dies treibt die Entwicklung von Beugungsgittern voran, da hierbei die Wellenlänge aus der Theorie bestimmt werden kann. Qualitativ sind diese den Prismen noch lange Zeit weit unterlegen. Erst Mitte 20. Jahrhundert sind spezielle Maschinen in Einsatz, die ~500 Linien/mm in Glasplatten ritzen, mit anschließender Verspiegelung der Platte. Heute sind Reflexionsgitter mit ~2500L/mm kein Problem!*

### Durchbruch 1859: Kirchhoff und Bunsen

stellen extrem reine Substanzen her; zeigen dass jedes Element seine eigene spektrale Signatur hat. Im Oktober 1859 hält Kirchhoff seine weltberühmte Vorlesung: er stellt fest, dass diese Elementlinien zusammenfallen mit den **Fraunhofer(schen) Linien** des Sonnenlichts.

Bis **1861** werden 30 Elemente spektroskopisch analysiert, Identifikation von Fe, Mg, Cu, Sn, Ba, Ni im Sonnenspektrum.

*In den bürgerlichen Salons werden Wissenschaftsamateure stimuliert, selbst zu experimentieren; man baut Spektroskope und richtet diese auch auf Sterne. Wissenschaftler bleiben eher kritisch. (In den astronomischen Observatorien beschäftigt man sich weiter mit Positions- und Bahnbestimmungen. Ausnahmen: Donati, Secchi, Airy )*

Herausragend unter den vielen Amateuren: **Huggins** und **Miller**;

Ab **1862** erste hochgenaue Beobachtungen von Sternspektren (Zeichnungen); erste Beschreibung von Emissionslinien in Planetarischen Nebeln (1864); Novae (1866)

Bau innovativer Geräte in den Werkstätten der Observatorien; diese erreichen hohe Dispersion mit einer Reihe von Prismen (s.Ausstellung Großer Refraktor Potsdam).

**1868** erste **Radialgeschwindigkeitsmessung** an Sirius.

**1872** gelingt **Henry Draper** (1837-1882; Arzt und Amateurwissenschaftler) erstes Foto eines Sternspektrums (Vega); **1880** erstes Foto vom Orionnebel ( 11" Refraktor; T:50 min); als Draper 1882 unerwartet stirbt, gründet Ehefrau Anna Palmer eine Stiftung zur Unterstützung weiterer spektroskopischer Studien.

**1886-1887** Erste Objektiv-Prisma Durchmusterung des Nord-Himmels in Harvard (USA); Team um **Edward Pickering** (**P.s Harem!!** weil Frauen genauer gucken können, so lange sie nicht verheiratet sind und ständig Sorgen um Familie haben) **finanziert von Henry Drapers's Witwe**.

Entwurf eines Klassifikation-Schemas und Katalog von Sternspektren; zunächst 10.000 Sterne in **17 Klassen**, alphabetisch geordnet von **A-Q**,

**1911-1915 Annie Jump Cannon** katalogisiert 220.000 Sterne!: Sie **findet' die heute gültige Reihe O,B,A,F,G,K,M**; heute erweitert um (**RNS**),**L,T**, hauptsächlich für „Braune“ Zergsterne. Die Klassifikation bleibt erhalten, die Reihenfolge wird durch Erkenntnis der Masse-Leuchtkraftbeziehung neu bestimmt.

*Heute können bereits Amateure mit der modernen und zeitsparenden Digital-Technik farbige Sternspektren-Aufnahmen herstellen, die sich kaum von den damaligen Profi-Aufnahmen unterscheiden. Hier zwei Beispiele aus dem Archiv der AEG-Astronomie/Sternwarte:*



0. Ordnung ist das Abbild des Sterns als Strichspur; in der 1. Ordnung zeigen sich die M-L-Beziehung und die Wiensche Verschiebung des Energiemaximums: heiß=massereich=blauer; kühler=masseärmer=röter!!

**1912** Erste extragalaktische **Radialgeschwindigkeit** [M31] durch **V. Slipher**; 60cm Teleskop (Lowell), Spektrograph mit einem 64° Flintprisma im Fokus (T: ~7h!!)

**1964** Erste **Quasar**(quasi-stellare-Radioquelle)-Rotverschiebung von **Maarten Schmidt** mit Objektiv-Prisma

**1984-98 H(E)S (Hamburg/ESO Objektiv-Prisma - „Survey“)**; Identifikation von ~350 Quasaren (aktive Galaxien im frühen Universum) mit dem ESO -1m- Schmidt-Teleskop von Calar Alto (E) mit 40-Zoll-Objektivprisma; (T: ~75 min auf Kodak IIIa-J -Ultraviolett-Platten, Dispersion 145 nm/mm bei H-gamma; spektrale Abdeckung 325 - 540 nm). Automatische Digitalisierung und Extraktion von Spektren. Magnituden 12.5<B<17.5 (korrespondiert mit B<14mag für ein 20cm Teleskop mit modernen CCD-Cameras).

Damit endet die Geschichte der Sternspektroskopie und die Spektralanalyse wird wichtigstes Werkzeug in der Kosmologie und der Suche nach Exosolaren Planeten.

## Die kosmologische Rotverschiebung der Spektrallinien

Das eigentümliche Spektrum, das der **Quasar**-Entdecker Maarten Schmidt 1963/4 interpretieren musste, unterschied sich von „normalen“ Sternspektren durch starke Emissionslinien, die nicht an den Positionen/den Wellenlängen der bekannten Elemente - besonders der Wasserstoff-Linien - zu finden waren.

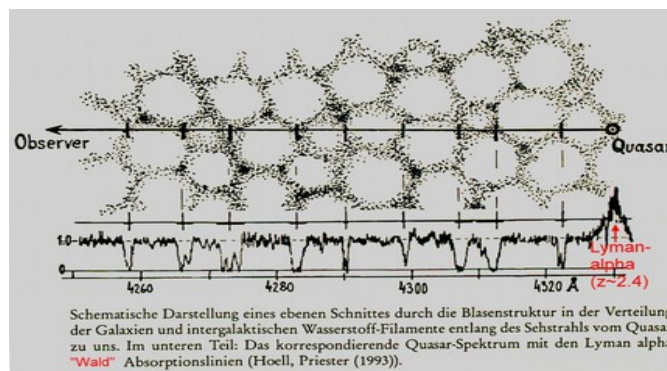
Erst die Interpretation der **Rotverschiebung** (von 16%) dieser Wasserstoff-Linien ergab Sinn.

*Seither gilt bei Quasaren (für alle Quellen im frühen Universum), dass bei ihrem geringen Alter und ihrer enormen Strahlungsleistung die Wasserstoff-Linien überwiegen müssen, weil die Fusion von schweren Elementen (in den Sternen) erst am Anfang steht.*

Für Astronomische Beobachtungen im Visuellen (380-700nm) ist daher das Spektrum des **Wasserstoffs** - das Urmaterial des Universums - bedeutsam und hier speziell die Linien im Ultravioletten (nach ihrem Entdecker Lyman benannt). Die H-alpha bis H-delta Linien im sichtbaren Wellenlängenbereich (Balmer-Serie) sind in Quasar-Spektren meist soweit ins Infrarote verschoben, dass eine (Normal)Kamera kein Signal erhält. Die stärkste Linie ist daher meist die **Lyman-alpha** (vgl. Wasserstoff-Spektren) Linie (im Labor, bzw. emittiert bei 121.5nm).

*Diese Emissions!-Linie wird auf der Ultraviolett-Seite – vor dem steilen Anstieg - von (sehr vielen) Absorptionslinien begleitet, die zum Begriff des „**Lyman-Alpha-Waldes**“ führten. Die Erklärung des Phänomens folgt der „Blasenstruktur der Galaxienverteilung“: Der Quasar strahlt durch die „Wände“ der blasenartigen Anordnung der Galaxien hindurch und jede „Wand“ hinterlässt im Spektrum eine Absorptionslinie entsprechend ihrer Entfernung/z-Wert.*

*Unsere AEG-Versuche zu Quasaren werden am Ende des Theorie-Teils beschrieben.*

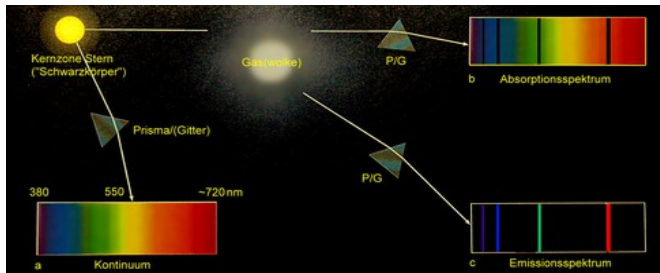


## Spektralanalyse in der Erforschung Exosolarer Planeten (seit 1995 bis heute)

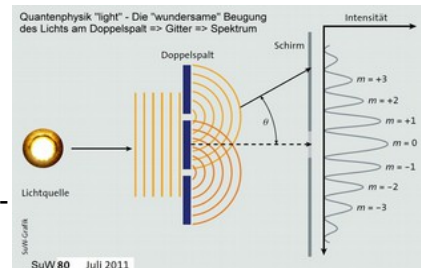
Moderne Spektrographen an Großteleskopen haben ein extrem hohes Auflösungsvermögen. Rot-Blau-Verschiebungen im Spektrum können damit gemessen werden, die lt. Dopplerformel **Radialgeschwindigkeiten** von **~1m/sek!!** entsprechen. Erst im Bereich von Metern/sek sind Radial-Verschiebungen bei Sternen messbar, deren Massenzentrum von umlaufenden Planeten (periodisch) auf der Sichtlinie Erde-Stern hin und her verschoben werden – sog. „**wobbling**“. Daraus lassen sich die Parameter der Exo-Planeten errechnen. Die nächste Spektrographen-Generation soll ~10cm/sek erreichen. *Auch die ausstehende Welt-Sensation wäre eine spektroskopische Entdeckung: während eines Planetentransits haben die Sauerstoff/Ozon-Linien im Stern-Spektrum eine entsprechend größere Halbwertsbreite (s.u.) - der Planet wäre „belebt“!!*

### Zur Theorie der Spektralanalyse:

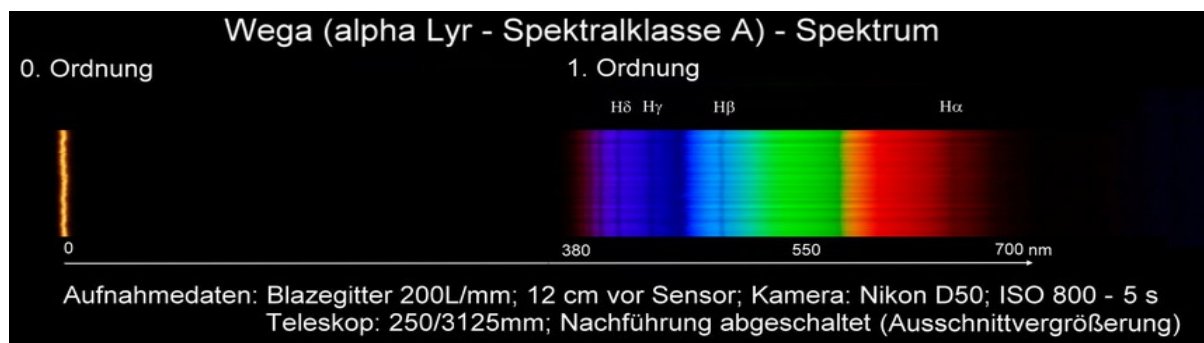
Die Lichtquellen und ihre Spektren-Typen



Am Gitter eines Spektrometers muss das meist weiße Mischungslicht sich in seine Farben =Energie-Anteile aufteilen lassen.

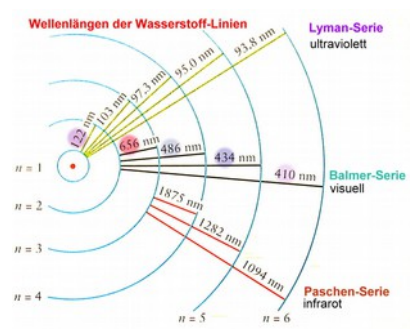
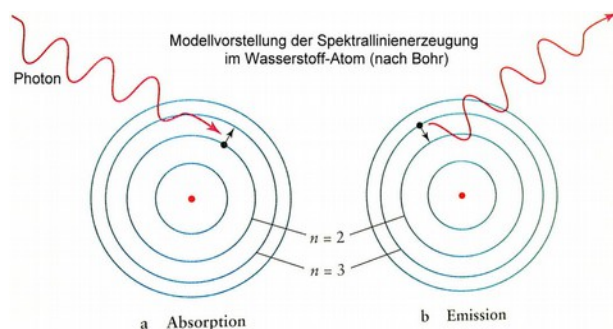


Unser Ergebnis mit dem preiswertesten (€ 200.-) Spektrometer:



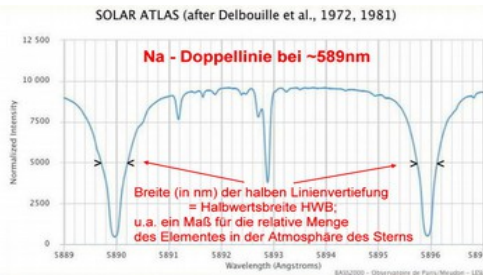
Wenn ein Photon aus dem Inneren des Sterns auf ein Atom der Photosphäre/Gashölle trifft, nimmt ein Elektron in der „Schale“ (Orbital) die Photonenenergie auf, sucht sich passend zu seinem neuen Energieniveau ein „äußeres“ Orbital und kehrt augenblicklich in sein angestammtes Orbital zurück, in dem es das Energiepaket(Quant) in eine neue Richtung schickt. Dass das neue Photon in die gleiche Richtung weiter fliegt, ist allerdings höchst unwahrscheinlich. Daher sehen wir im Spektrum viele „schwarze“ Linien. (Die Linien sind eigentlich ein Abbild des Spalts, weil kein Licht mit dieser Wellenlänge ankommt! Je enger der Spalt, umso genauer die Information. Aber auch: engerer Spalt=längere Belichtungszeit!)

Im Wasserstoff-Modell-Atom sind die „Quantensprünge“ so exakt ermittelt worden, dass die entsprechenden Linien in der Astronomischen Forschung als Referenzen gelten, zumal der Wasserstoff ja auch das häufigste Element im Universum ist. Veranschaulicht hier als Grafik des (nicht ganz korrekten) Modells nach Bohr aus der Standardliteratur:





Die Linien im realen Spektrum lassen sich nur genau vermessen, wenn man sie mit Hilfe eines Grafikprogramms als Abweichung von der mittleren Helligkeit des Spektrumabschnittes darstellt. Mit dem **IRIS-Programm** gelingt das, indem der Cursor das Spektrumbild entlang gleitet und jede Pixelhelligkeit in einer Intensitätskurve aneinander reiht. Anhand der o.a. Referenzlinien lässt sich jede Kurvenposition berechnen. So wird die sog. **Halbwertsbreite** der Linien ermittelt; die **Fraunhofer-Linien** der Sonne sind die Standard – Vergleichslinien; auch hinsichtlich der rel. konstanten Entfernung (1 AE) Sonne-Erde sind sie Referenzen.



Denn:

Alle Bewegungen der Quellen in Bezug auf die bewegte Erde erkennt man an der Rechts-Links-Verschiebung der Linien. Die sog. **Dopplerverschiebung** resultiert aus einer geringfügig veränderten Energie der Quanten, wenn die Quelle ihre Relativgeschwindigkeit in Erdrichtung dem Licht „aufmoduliert“: kommt die Quelle näher, ergibt sich eine **Blauverschiebung**; entfernt sie sich, kommt die berühmtere **Rotverschiebung** ins Spiel. Letztere ist der Schlüssel für die Dimensionen des sich

ausdehnenden Universums. In einer Arbeit unseres AG-Schülers werden die wichtigsten Zusammenhänge der Astrospektroskopie mit der Kosmologie veranschaulicht:

**Der Dopplereffekt zur Berechnung astronomischer Relativ-Radial-Geschwindigkeiten**

Beim Dopplereffekt entsteht die Wellenlängen-/Frequenzverschiebung dadurch, dass der Senderwellenlänge die „Reisestrecke“ des Sterns (innerhalb einer Schwingungszeit  $1/f$ ) hinzugefügt wird.

Um den Dopplereffekt anwenden zu können, misst man die Verschiebung des Spektrums.

$\lambda_{lab}$  (rest wavelength)

$\lambda_{ob}$  (observed wavelength)

Diese Verschiebung kann man durch eine Zahl  $z$  angeben, die die relative Verschiebung einer Spektrallinie zu ihrer Ruhelage angibt. Da die Angabe relativ ist, gilt sie für das gesamte Spektrum.

$$z = \frac{\lambda_{ob} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}}$$

©Phil.Burghart  
M.Falk/AEG-Astronomie

Unsere endgültige Formel erhält man, wenn man die Entweichgeschwindigkeit durch die Rotverschiebung  $z$  ausdrückt. Ihr Graph ist links zu sehen.

$$v = c \cdot \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

**Kosmologische Rotverschiebung**

Mit Hilfe des Hubble-Gesetzes kann man aus der Geschwindigkeit die Entfernung des Objektes bestimmen. Die zugrundeliegende Proportionalität ist links zu erkennen. (1 Mpc = 3,26 Mio. Lichtjahre)

**"Hubble-Konstante":**

$H = \sim 70 \text{ km/sek pro Mpc}^*$

**Entfernung:**

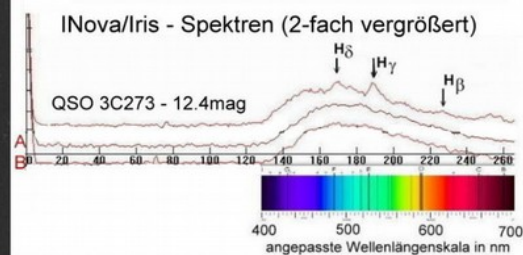
$D = v/H$

\* Parallaxensekunde ist die Entfernungseinheit der Astronomen: 3,26 Lj

©Phil.Burghart  
M.Falk/AEG-Astronomie

In unseren Spektren wäre die Lyman-alpha-Linie, ebenso wie die verschobenen Linien der Balmer-Serie, als „Hubbel“ zu sehen, nicht jedoch der o.a. „Wald“. Dafür ist ein 3-5m Teleskop und ein Spektrometer mit  $10^3 - 10^4$ -facher Auflösung notwendig.

## Die Bestimmung der "Redshift" des Quasars 3 C273



Die Empfindlichkeit des Sensors der Kamera liegt im Spektralbereich von 400nm (~30%) über 500nm (~55%) bis 700nm(~30%). Der Abstand des Transmissionsgitters von 12mm vor dem Sensor erzeugt ein Spektrum der 1. Ordnung von ~130 Pixel Länge (hier als Kurve des IRIS-Plots dargestellt) in der Distanz von ~130 pix von der 0. Ordnung (dem Stern, bzw. Quasar).

Das 300nm lange Spektrum verteilt über ~130 pix bedeutet 2,3nm/pix. Die Beschaffenheit der Quasar-Strahlung zeigt eine verstärkte Emission der Wasserstofflinien H-alpha, -beta, und -gamma, die sich im Spektrum als "peaks" zeigen. Diese sind jedoch -wie erwartet- rotverschoben. Die Wasserstoff-Linie H(gamma) messen wir bei ~524nm. Sie ist somit um ~90nm rotverschoben (Laborw: 434,04nm)

Die Rotverschiebung  $z = \delta\lambda/\lambda = 0,2$  (Lit.Wert 0,19) bedeutet eine "Geschwindigkeit" der Lichtquelle  $V = cz = 60\,000 \text{ Km/s!!}$

Die "Geschwindigkeit" ist die Ausdehnungsrate des Raumes! zwischen Beobachter und Objekt.

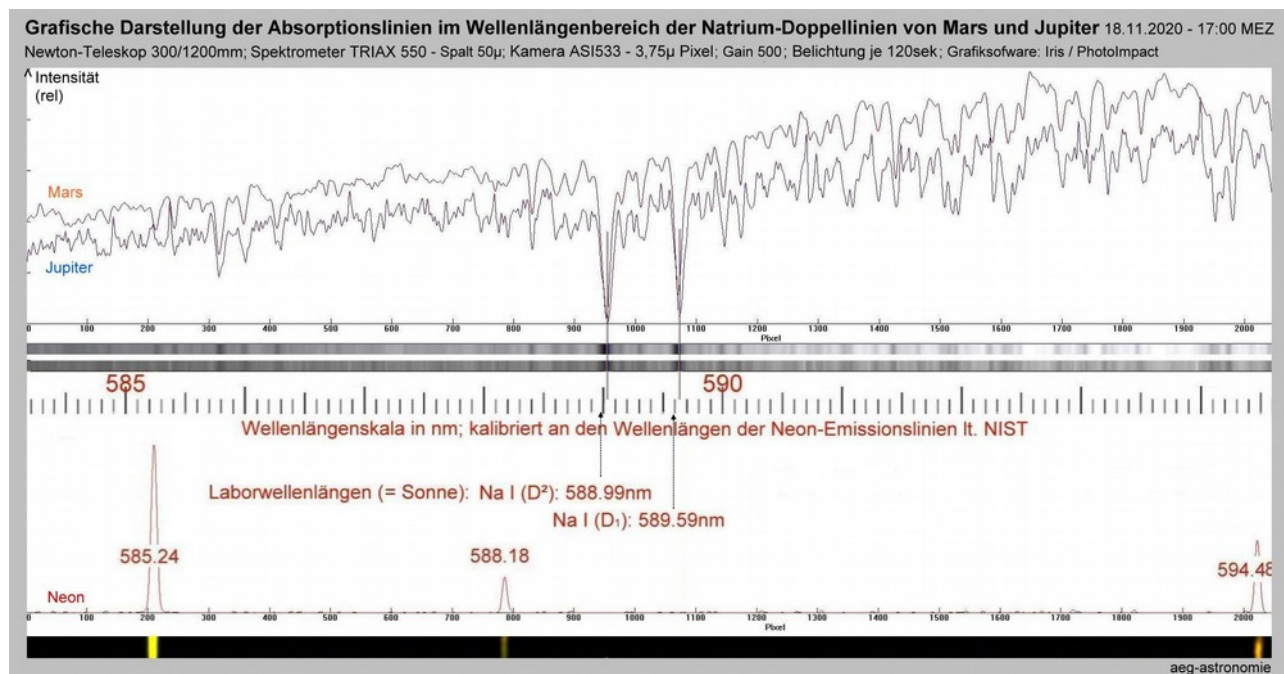
Wenn die "Geschwindigkeit" ~ 10% der Lichtgeschwindigkeit ( $z < 0,1$ ) überschreitet, muss ein "relativistischer Korrekturfaktor" berücksichtigt werden, so dass  $V$  erst bei  $z \sim 1000! = c$  ist.

Die genaue Rechnung ergibt für QSO 3C273 eine Distanz von 2,3 Mrd Lj!

Bei **unseren Kameras** ist jedes Spektrum (nach o.a. Analyse mit „Iris“) eine „Kurve“ mit „Hubbeln“ oder „Dellen“. Der Sensor hat seine max. Empfindlichkeit bei ~500nm (400 und 700nm sind deutlich schwächer). In hoher Auflösung zeigen sich dann die entsprechenden Emissions- oder Absorptionslinien, bzw. deren Halbwertsbreiten.

Die grafische Aufbereitung von Messergebnissen erfordert Arbeitsschritte wie Kalibrierung mittels Referenzlinien (meist von Neon-Glimmlampe oder Sonnenlicht) bei der selben Wellenlängen-Einstellung des Spektrometers und einer Skalierung der x-Achse, die sich aus Pixelabstand und Referenzlinien ergibt.

Hier ein Beispiel aus der Spektralanalyse des Sonnenlichts, reflektiert an Jupiter und Mars – zur Ermittlung der Doppler/Relativgeschwindigkeit zwischen Erde und Planeten:



Die AG-Arbeiten zur Astro-Spektroskopie der letzten 10 Jahre sind jeweils Themen gewidmet, die eine spezielle theoretische Vorbereitung erforderlich machen: z.B. Radial-Verschiebungen in Doppelsternen und Rotationsverbreiterungen der Linien bei Schnell-Rotierern. Den Theorieteil der entsprechenden Arbeit kann man bei mir einsehen/anfordern.

Weitere Informationen im PDF Teil I zur Astro-Spektroskopie.

Verbleibende Fragen und Antworten via Email:

[martin.falk@aeg-buchholz.com](mailto:martin.falk@aeg-buchholz.com) oder [martin.falk2@ewe.net](mailto:martin.falk2@ewe.net); oder über die Astrobox der ZuWe.