

Was uns ein Stern über unsere Erde und die Sonne verrät

Bestimmung der Erdbahnparameter und der Sonnenmasse aus spektroskopischen Beobachtungen des Sterns Wega, durchgeführt an der Sternwarte der Friedrich-Schiller-Universität (FSU) in Großschwabhausen.

Der Blick in den weiten Nachthimmel beeindruckt die Menschen seit jeher. Umso faszinierender ist es, aus der Beobachtung ferner Sterne etwas über unseren eigenen Planeten und sein Zentralgestirn, die Sonne, herauszufinden. Dies gelang in einer Forschungsarbeit, die an der Universitäts-Sternwarte in Großschwabhausen von Hannes Keppler von der Landesschule Pforta durchgeführt wurde.

Das in diesem Forschungsprojekt genutzte Beobachtungsverfahren ist ein Allrounder der Astronomie, es ermöglicht die räumliche Bewegung, chemische Zusammensetzung, Temperatur und viele weitere wichtige Eigenschaften ferner Himmelskörper zu bestimmen, ohne dass man je diese fernen Welten besuchen müsste. Gemeint ist natürlich die Spektroskopie, also die Messung der spektralen Flussdichte F_λ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ .

Bei der durchgeführten Forschungsarbeit kam der fasergekoppelte *Échelle*-Spektrograph FLECHAS (Fiber Linked ECHelle Astronomical Spectrograph) zum Einsatz, der am 90cm Spiegelteleskop der Universitäts-Sternwarte der FSU in Großschwabhausen seit 2013 im Betrieb ist (siehe Mugrauer et al. 2014). FLECHAS weist eine spektrale Auflösungsstärke von $R \sim 9300$ im Wellenlängenbereich zwischen 4000 und 8000Å auf. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Spektren des Sterns Wega ausgewertet und analysiert, die zur Untersuchung der Langzeitstabilität des Spektrographen in 47 Nächten an der Universitäts-Sternwarte Jena in einem Zeitraum von knapp 2 Jahren belichtet wurden. Die dabei aufgenommenen Spektren der Wega weisen eine Belichtungszeit von nur wenigen Sekunden auf. Dazu wurden in jeder Nacht auch noch Kalibrationsaufnahmen zur *Flatfield*-, Dunkelstrom- wie auch zur Wellenlängenkalibration belichtet. Die FLECHAS Spektren wurden dann mit einer speziell für den Spektrographen geschriebenen Software reduziert und anschließend analysiert.

Die Wega (α Lyrae) ist der zweithellste Stern am nördlichen Firmament und bildet zusammen mit Deneb (α Cygni) und Altair (α Aquilae) das bekannte Sommerdreieck (siehe Abbildung 1). Wega ist klassifiziert als ein Stern vom Spektraltyp A0V, also ein weißlich leuchtender Zwergstern mit einer Effektivtemperatur ca. 4000 K heißer als die Sonne. Wega ist ein Einzelstern, der etwa doppelt so massereich und dreimal so groß ist wie unsere Sonne. Betrachtet man das Spektrum der Wega, so fallen darin sofort die dunklen besonders breiten Linien der Balmer Serie des Wasserstoffs auf (siehe Abbildung 2 und 3). Diese Spektrallinien entstehen durch die Absorption des Lichts in der Photosphäre des Sterns durch Wasserstoffatome, wobei darin Elektronen von der zweiten Schale zu höheren Energieniveaus angeregt werden. Da die einzelnen Energieniveaus im Wasserstoffatom genau bekannt sind, können auch die Wellenlängen der einzelnen Absorptionslinien des Wasserstoffs genau berechnet werden und sind auch aus Labormessungen sehr genau bekannt.

Im Spektrum der Wega erscheinen die Linien aber etwas zur Laborwellenlänge verschoben und ändern zudem ihre Position mit der Zeit, bedingt durch die Relativbewegung des Sterns zur Sonne und der Bewegung der Erde um unser Zentralgestirn herum. Dieser Effekt ist aus der Akustik wohl bekannt. Genauso wie der Ton eines herannahenden Autos höher klingt, als der eines wegfahrenden, bewirkt der so genannte Dopplereffekt, dass auch das Licht einer Lichtquelle blauverschoben ist, wenn sich diese dem Beobachter nähert und rotverschoben, wenn sie sich von ihm wegbewegt. Diese Verschiebung erlaubt es nun die Radialgeschwindigkeit der Wega - also ihre Geschwindigkeit senkrecht zur Himmelsebene - zu bestimmen. In der durchgeführten Forschungsarbeit wurden dazu die Wellenlängen der detektierten Balmerlinien des Wasserstoffs ($H\alpha$ - δ) in den aufgenommenen Spektren der Wega vermessen. Mit dem Dopplereffekt folgt daraus dann die Radialgeschwindigkeit v_{rad} des Sterns zu den einzelnen Beobachtungszeitpunkten. Trägt man nun die ermittelten Radialgeschwindigkeiten der Wega über die Zeit auf, so erhält man eine interessante Kurve, die in Abbildung 4

dargestellt ist. Die Radialgeschwindigkeit des Sterns schwankt dabei periodisch um einen Mittelwert. Diese Variation kommt durch die Bewegung der Erde um die Sonne zustande, bei der sich unser Planet einmal auf den Stern zu bewegt und sich dann wieder von ihm entfernt. Gleicht man eine theoretische Radialgeschwindigkeitskurve an die Messpunkte durch Minimierung der quadratischen Abweichungen (rote Kurve in Abbildung 3) an, so erhält man die stellare Radialgeschwindigkeit der Wega sowie die einzelnen Parameter der Umlaufbahn der Erde um die Sonne. Aus der Modellierung der Messdaten folgt:

$$\gamma = -14.4 \pm 0.3 \text{ km/s} \text{ sowie } P = 365.7 \pm 1.0 \text{ Tage, } K = 14.2 \pm 0.5 \text{ km/s} \text{ und } e = 0.014 \text{ } (-0.014/+0.030)$$

Die ermittelte stellare Radialgeschwindigkeit der Wega γ stimmt dabei innerhalb der Messgenauigkeit gut mit Literaturwerten, z.B. $\gamma = -13.8 \pm 0.8 \text{ km/s}$ (Barbier-Brossat & Figon 2000), überein. Auch die spektroskopisch bestimmte Umlaufperiode unseres Planeten um die Sonne herum entspricht innerhalb des Messfehlers dem bekannten Wert für das sidirische Jahr von 365.256 Tagen. Die prozentuale Abweichung beträgt hier nur 0.1 %!

Aus der spektroskopisch gemessenen mittleren projizierten Bahngeschwindigkeit der Erde in Richtung Wega K kann nun die mittlere Bahngeschwindigkeit v_{Erde} unseres Planeten um die Sonne herum berechnet werden und man erhält: $v_{\text{Erde}} = 30 \pm 1 \text{ km/s}$. Die spektroskopisch bestimmte mittlere Bahngeschwindigkeit der Erde stimmt dabei innerhalb der erreichten Messgenauigkeit sehr gut mit dem bekannten Literaturwert von 29.8 km/s überein. Die prozentuale Abweichung beträgt nur 0.7 %!

Für die Bahnexzentrizität der Erde liefert die spektroskopische Analyse eine Exzentrizität von $e = 0.014$, also einen im Rahmen der Messgenauigkeit ($e < 0.044$) kreisförmigen Orbit. Dabei liegt die spektroskopisch bestimmte Bahnexzentrizität wieder sehr nahe an dem bekannten Literaturwert für die Exzentrizität der Erdbahn von $e = 0.017$.

Aus der bestimmten Umlaufperiode und der mittleren Bahngeschwindigkeit der Erde kann nun auch noch die große Halbachse a der Erdumlaufbahn um die Sonne herum ermittelt werden und man erhält $a = 150.9 \pm 5.1 \text{ Mio. km}$. Auch dieses Ergebnis stimmt innerhalb des Messfehlers wieder sehr gut mit dem bekannten Literaturwert der Astronomischen Einheit von 149.6 Mio. km überein. Die prozentuale Abweichung liegt hier nur bei 0.9 %!

Unter Anwendung des 3. Kepler'schen Gesetzes der Planetenbewegung kann aus den spektroskopischen Messdaten sogar noch die Masse unseres Zentralgestirns berechnet werden. Wie Johannes Kepler bereits 1619 in seinem Werk *Harmonices Mundi* beschrieb, sind die Umlaufzeiten der Planeten im Sonnensystem proportional zu den Kuben der großen Halbachsen ihrer Umlaufbahnen. Mit der spektroskopisch gemessenen Umlaufzeit der Erde um die Sonne P und der bestimmten mittleren Bahngeschwindigkeit unseres Planeten v_{Erde} erhält man schließlich für die Sonnenmasse einen Wert von $(2.04 \pm 0.15) \cdot 10^{30} \text{ kg}$, was innerhalb der Messgenauigkeit wieder gut mit dem bekannten Literaturwert für die Sonnenmasse von $1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ übereinstimmt (prozentuale Abweichung von 2.6%).

Mit dem durchgeführten Experiment konnte eindrucksvoll demonstriert werden, mit welcher Genauigkeit aus spektroskopischen Messungen neben der stellaren Radialgeschwindigkeit von Sternen insbesondere auch die Bahnparameter unserer Erde sowie die Masse unseres Zentralgestirns indirekt ermittelt werden können. Dabei ermöglicht die Spektroskopie die Bestimmung der astronomischen Einheit (anders als die Analyse von Venustransiten) zu jedem beliebigen Zeitpunkt, da ja Sterne in jeder klaren Nacht spektroskopiert werden können. Zudem kann sich so jeder Himmelsbeobachter selbst von der Gültigkeit des heliozentrischen Weltbildes mittels eigener spektroskopischer Messungen überzeugen.

Die hier beschriebene Forschungsarbeit wurde von Dr. Markus Mugrauer vom Astrophysikalischen Institut der Friedrich-Schiller-Universität Jena betreut. Die Arbeit wurde 2016 auch im Landeswettbewerb von Jugend Forscht in Sachsen-Anhalt vorgestellt und Hannes Kepler belegte damit den 1. Platz im Fachgebiet Physik.

Literatur:

Barbier-Brossat M. & Figon P.

Catalogue général de vitesses radiales moyennes pour les étoiles galactiques
2000, A&AS 142, 217

Lang K. R.

Astrophysical Formulae. A Compendium for the Physicist and Astrophysicist.
1980, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 3-540-09933-6; ISBN 0-387-09933-6

Mugrauer M., Avila G., Guirao C.

FLECHAS - A new échelle spectrograph at the University Observatory Jena
2014, AN 335, 417

Referenz für die verwendeten bekannten Werte der Erdumlaufbahn P , e , a , sowie der Sonnenmasse:

Unsöld A., Baschek B.

Der neue Kosmos
1999, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 3-540-64165-3



Abbildung 1: Das Sommerdreieck mit den hellen Sternen Deneb (oben), Altair (unten) und Vega (rechts) entlang des Milchstraßenbandes, aufgenommen an der Universitäts-Sternwarte in Großschwabhausen.
Foto: M. Mugrauer

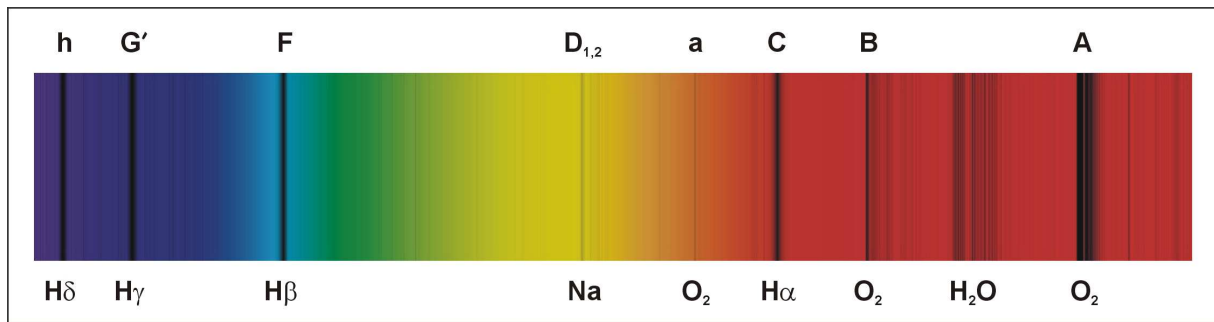


Abbildung 2: Spektrum der Wega mit hinterlegtem Farbverlauf, aufgenommen mit dem Spektrographen FLECHAS am 16.06.2015 am 90cm Spiegelteleskop der Universitäts-Sternwarte Jena. Die Belichtungszeit des Spektrums beträgt nur 5s und deckt den Wellenlängenbereich zwischen 4000 (blaues Ende) und 8000Å (rotes Ende) ab. Deutlich sind im Spektrum die starken Linien der Balmer Serie des Wasserstoffs ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ und $H\delta$) zu erkennen, die neben den tellurischen Banden des Sauerstoffs (A, B, a) und von Wasser (H_2O) das Spektrum dominieren. Im Vergleich dazu ist im Spektrum der Wega die Doppellinie des Natriums ($D_{1,2}$) deutlich schwächer ausgeprägt.

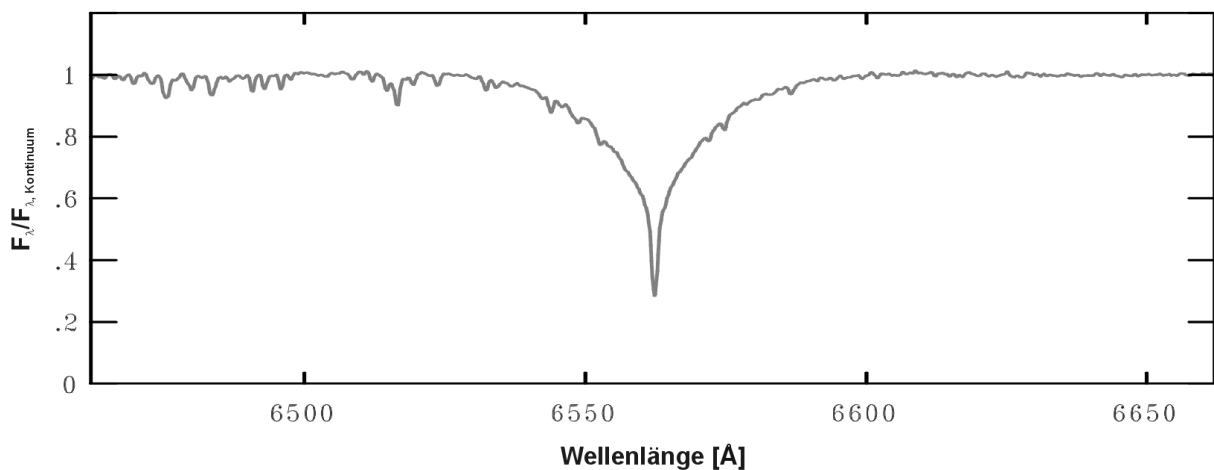


Abbildung 3: Auszug aus dem in Abbildung 2 gezeigten FLECHAS Spektrum der Wega im Wellenlängenbereich um die $H\alpha$ -Linie des Wasserstoffs. Deutlich sind die druckverbreiterten Flügel der Wasserstofflinie sowie ihr schmaler Dopplerkern zu erkennen.

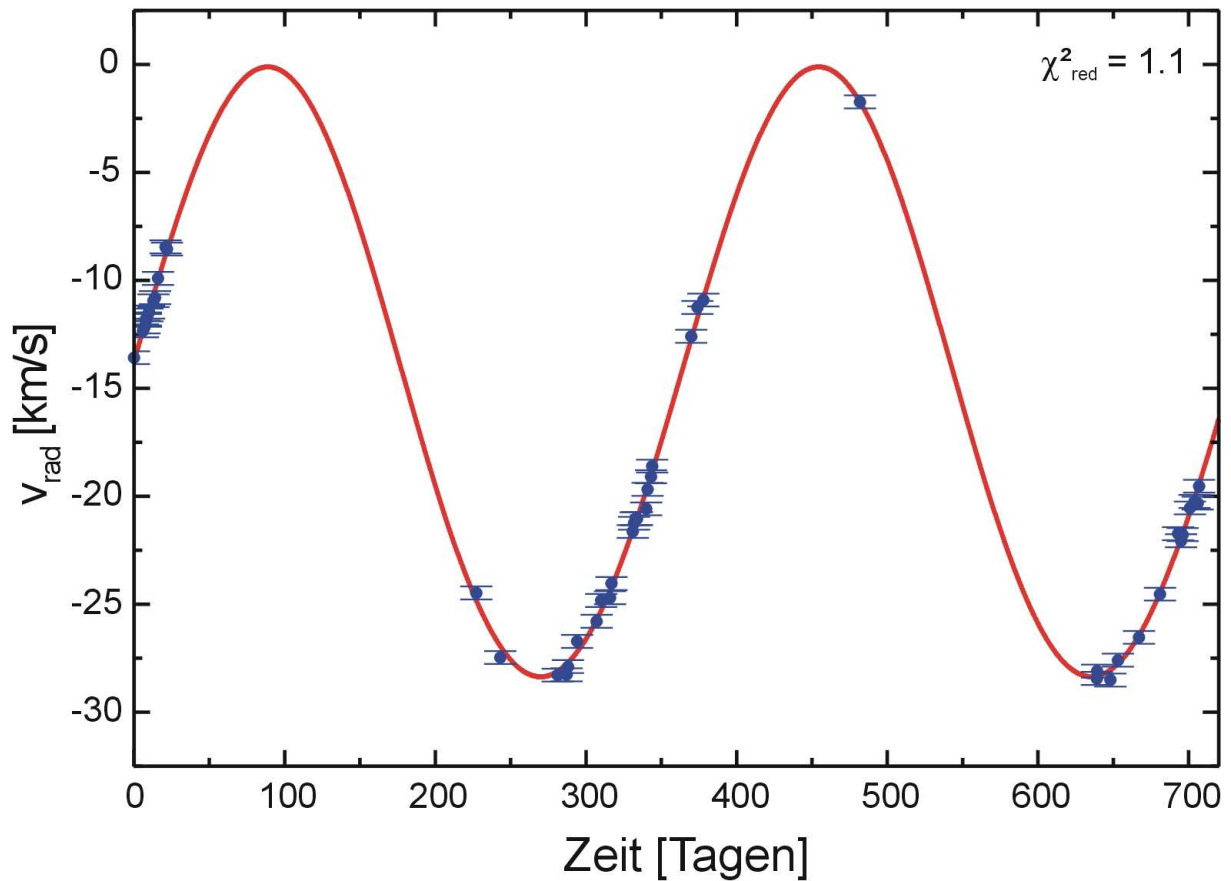


Abbildung 4: Messungen der Radialgeschwindigkeit des Sterns Wega mit dem Spektrographen FLECHAS an der Universitäts-Sternwarte Jena. Über einen Zeitraum von knapp 2 Jahren konnten insgesamt 47 Messungen durchgeführt werden, die im Diagramm als blaue Punkte dargestellt sind. Die erzielte Messgenauigkeit beträgt dabei 0.3 km/s. Die rote Linie zeigt die Radialgeschwindigkeitskurve, die an die einzelnen Messdaten durch Minimierung der quadratischen Abweichungen angepasst wurde.

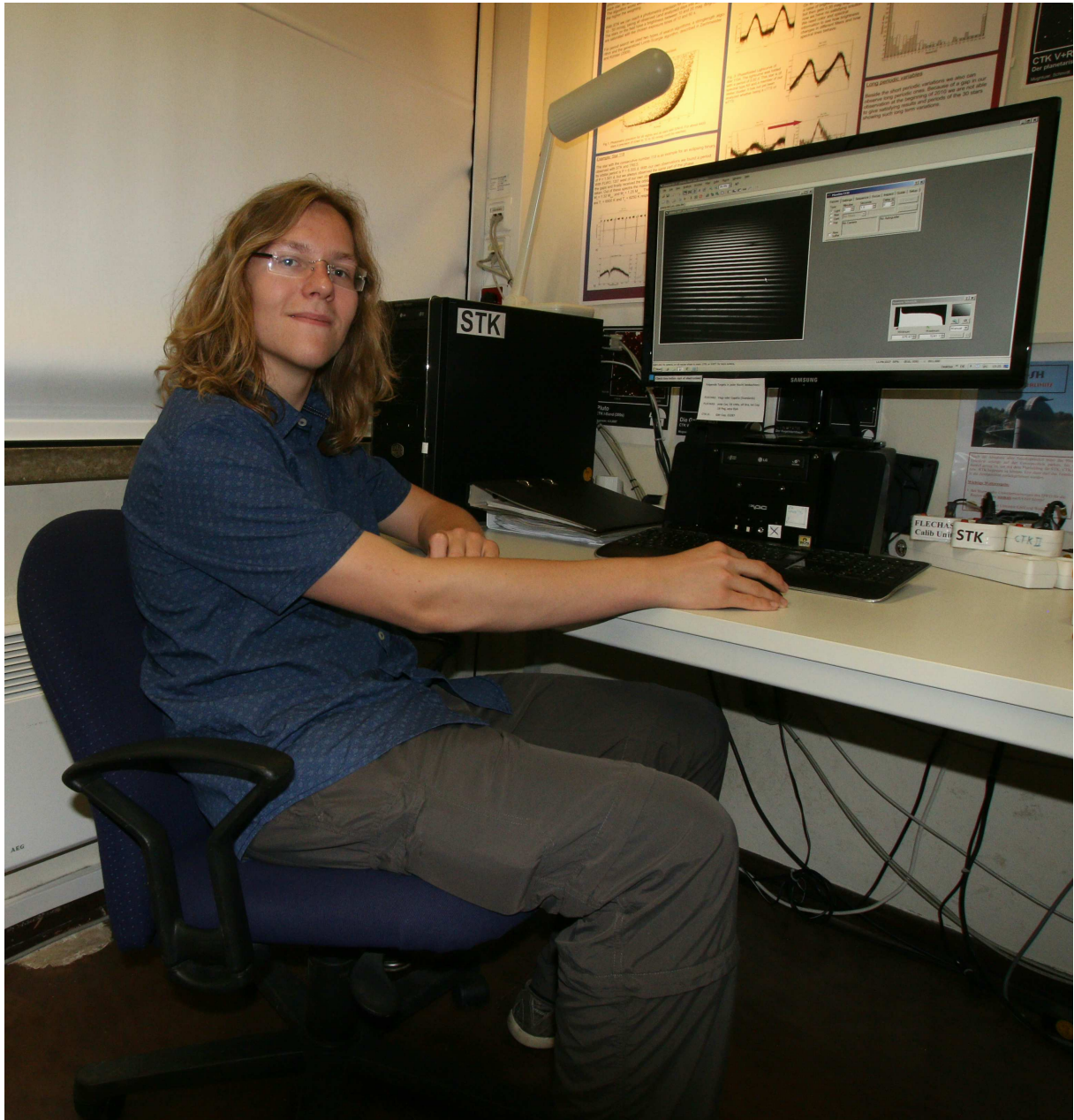


Abbildung 5: Hannes Keppler im Kontrollraum der Universitäts-Sternwarte in Großschwabhausen bei der nächtlichen Beobachtung mit dem Échelle-Spektrografen FLECHAS.