

Schülerforschungszentrum Wuppertal am Carl-Fuhlrott-Gymnasium
Projektbetreuer: Herr Bernd Koch

Arbeit im Rahmen des
Wettbewerbs Jugend forscht 2024
Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

3D-Kartographie und Rotationsbestimmung des Planeten Jupiter

Projekt-ID #106749

Vorgelegt von:

Lukas Spieß (17 Jahre)
Unterkohlfurth 47
42349 Wuppertal
Nordrhein-Westfalen

lukas.spiess007@gmail.com
bernd.koch@astrofoto.de

Abgabedatum:

14.01.2024

Kurzfassung

Dieses Projekt befasst sich mit der 3D-Kartographie und der Rotationsbestimmung des Planeten Jupiter. Hierbei wurden zwei Methoden zur Bestimmung der Rotationsdauer durchgeführt. Für die erste Methode wurde mithilfe eines Spaltspektrographen die Doppler-bedingte Radialgeschwindigkeitsdifferenz bestimmt und anhand dieser die Rotationsdauer berechnet. Für die zweite Methode wurden aufgenommene Jupitervideos anhand eines Merkmals verglichen, dabei wurde durch die Ausmessung und Bestimmung der Merkmalsverschiebung auf die Rotationsdauer geschlossen. Für die 3D-Kartographie wurden mehrere Jupitervideos zu einer quadratischen Plattkarte zusammengefügt, wobei diese daraufhin in einer 3D-Software als Textur für ein sphärisches Mesh genutzt wurde. Hierbei wurde ein 3D-Modell des Planeten Jupiter angefertigt, welches sich von allen Seiten betrachten lässt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Spektroskopische Bestimmung der Rotationsdauer anhand des Dopplereffekts . . .	2
2.1.1 Messung der äquatorialen Rotationsgeschwindigkeit	2
2.1.2 Bestimmung der Rotationsdauer	2
2.2 Bestimmung der Rotationsdauer anhand von Videoaufnahmen	3
2.2.1 Videoaufnahme und Bearbeitung	3
2.2.2 Bildausmessung	3
2.2.3 Bestimmung der Rotationsdauer	3
2.3 3D-Kartographie	3
2.3.1 Erstellung einer quadratischen Plattkarte	3
2.3.2 3D-Modellierung	3
3 Forschungsergebnisse	4
3.1 Forschungsziel	4
3.2 Rotationsbestimmung anhand des Jupiterspektrums	4
3.2.1 Verwendete Geräte und experimenteller Aufbau	4
3.2.2 Durchführung der Beobachtung	5
3.2.3 Auswertungsprozess	6
3.2.4 Berechnung der Rotationsdauer	8
3.2.5 Ergebnis	8
3.3 Rotationsbestimmung anhand von Videoaufnahmen	9
3.3.1 Verwendete Geräte und experimenteller Aufbau	9
3.3.2 Teleskop	9
3.3.3 Videokamera	9
3.3.4 Durchführung der Beobachtung	9
3.4 Auswertungsprozess	10
3.4.1 Berechnung der Rotationsdauer	12
3.4.2 Ergebnis	12
3.5 Vergleich der Methoden	12
3.6 3D-Kartographie	13
3.6.1 Erstellung einer quadratischen Plattkarte	13
3.6.2 Erstellung eines 3D-Modells	14
4 Fazit	15
Abkürzungsverzeichnis	16
Quellenverzeichnis	17
Danksagung für die Unterstützungsleistungen	19

Selbstständigkeitserklärung

19

1 Einleitung

Die Rotationsdauer und die darauf bezogene Rotationsgeschwindigkeit sind ein zentraler Parameter für astronomische Forschungen. Zum einen geben diese Informationen über die Entstehungsgeschichte, als auch die Entwicklung eines Planeten, wie z.B. über frühere Kollisionen mit anderen Himmelskörpern, welche die Rotationsrichtung und Geschwindigkeit des Planeten veränderten. Auch die Oberflächenbeschaffenheit eines Planeten kann aufgrund dieser Information nachvollzogen werden, da diese die Tageslänge und das Klima auf einem Planeten beeinflusst. Beispielsweise hat diese Einflüsse auf die Verteilung von Sonnenenergie auf der Oberfläche des Planeten, hierbei kann die Rotationsgeschwindigkeit ein großer Faktor für geologische Prozesse sein wie z.B. die Wärmeverteilung, welche Auswirkung auf geologische Phänomene wie das Windmuster der Atmosphäre hat. Zudem lassen sich auch weiterreichende Schlüsse auf die Beschaffenheit des Magnetfeldes eines Planeten herleiten, da dieses bei vielen Planeten wie z.B. bei unserem Planeten Erde durch den Dynamo-Effekt im flüssigen äußeren Kern erzeugt wird. Die Rotationsdauer ist auch ein zentraler Faktor für die Kartographie eines Planeten, denn ohne die genaue Kenntnis über die Rotationsgeschwindigkeit können, keine genauen Karten angefertigt werden, da diese unabdingbar ist, um genaue Längen- und Breitengrade zu bestimmen. [1–3]

Aufgrund des wichtigen Aspektes der astronomischen Forschung, welcher der Rotationsbestimmung eines Planeten zuteil wird, möchte ich mich im Rahmen dieser Arbeit mit zwei Methoden der Bestimmung der Rotationsdauer anhand des Planeten Jupiter beschäftigen. Hierbei wird die erste Methode, die der Bestimmung der Radialgeschwindigkeitsdifferenz mit Hilfe des Dopplereffektes sein, welche anhand eines eigen aufgenommenen Jupiterspektrums bestimmt und berechnet wird. Die zweite Methode wird die Bestimmung der Rotationsdauer anhand der Datenauswertung von Videoaufnahmen sein, welche mithilfe eigener Jupiteraufnahmen durchgeführt wird. Beide Methoden werden in ihren theoretischen Grundlagen dargestellt und in ihrer praktischen Durchführung anhand eigener Forschung erklärt. Zudem werden die Ergebnisse beider Methoden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Durchführung diskutiert.

Angesicht der zentralen Bedeutung der Rotationsbestimmung für die Kartographie eines Planeten, wird auch eine quadratische Plattkarte des Planeten Jupiter angefertigt, welche daraufhin als Textur für eine 3D-modellierte Planetenkugel des Jupiter genutzt wird. Auch dieser Prozess der Auswertung bis hin zur Erstellung eines 3D-Modells der eigenen Jupiteraufnahmen wird umfangreich beschrieben und erklärt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Spektroskopische Bestimmung der Rotationsdauer anhand des Dopplereffekts

2.1.1 Messung der äquatorialen Rotationsgeschwindigkeit

Die äquatoriale Rotationsgeschwindigkeit eines kugelförmigen Himmelskörpers, wird mithilfe der aufgrund des Dopplereffekts vorhandenen Radialgeschwindigkeitsdifferenz Δv zwischen östlichem und westlichem Planetenrand gemessen. Hierfür wird der optische Spalt des Spektrographen entlang des scheinbaren Äquators des Himmelskörpers gelegt. Das daraus resultierende Spektrum weist eine Schiefstellung von Spektrallinien auf. Anhand z.B. der $H\alpha$ Absorptionslinie im Spektralstreifen wird die Radialgeschwindigkeitsdifferenz bestimmt, hierbei wird die Differenz der Wellenlänge in Ångström (Å) eines jeweils kleinen Randspektrums am obersten und untersten Ende des Spektralstreifens berechnet. Die daraus folgende Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$ wird mithilfe der Formel $V_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$ in die Geschwindigkeitsdifferenz Δv_r zwischen Ost- und Westrand umgerechnet. Hierbei gibt $\Delta\lambda$ die Differenz der gemessenen Wellenlängen der bestimmten Spektrallinie an, welche durch die Laborwellenlänge, also den Katalogwert der betrachteten Absorptionslinie, dividiert wird. Der Quotient wird daraufhin mit dem Wert der Vakuumlichtgeschwindigkeit c in km/s multipliziert. Die errechnete Geschwindigkeitdifferenz V_r aus dem Verschiebungsbetrag Δ wird zur Bestimmung der Äquatorgeschwindigkeit V in die Formel $v \sin i = \left| \frac{v_r}{4} \right|$ eingesetzt. Da der scheinbare Äquator aufgrund der Sichtlinie von Erde zu Himmelskörper nicht immer dem realen Äquator des Planeten entspricht, wird hierbei von dem direkt messbaren Anteil der Rotationsgeschwindigkeit ausgegangen, dem sogenannten $v \sin i$ Wert, welcher in Sichtlinie zur Erde gemessen wird. Dieser Wert ergibt sich zum einen aus der effektiven Äquatorgeschwindigkeit und dem Inklinationwinkel i zwischen der Rotationsachse des Planeten und der Sichtlinie zur Erde. Der Betrag von V_r dividiert durch 4 ergibt sich durch den Dopplereffekt, da dieser bei lichtreflektierenden Himmelskörpern doppelt wirkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Licht, welches von der Sonne ausgestrahlt auf das Objekt fällt, um einen Betrag rot- und blauverschoben ist. Wird dieses Licht nun in Richtung Erde reflektiert, so bleibt die spektrale Verschiebung bestehen. Demzufolge wird das reflektierte Licht um noch einen zusätzlichen Betrag verschoben, weshalb die Geschwindigkeitsdifferenz Δv_r deshalb nochmals halbiert werden muss. [4]

2.1.2 Bestimmung der Rotationsdauer

Die Rotationsdauer wird mithilfe der zuvor berechneten Äquatorgeschwindigkeit v bestimmt. Hierfür wird die Formel $v = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot r$ der Kreisbewegung genutzt. Da v schon bekannt ist, wird die Gleichung nach T , der Rotationsdauer in Sekunden, umgestellt. Resultierend daraus ergibt sich die Gleichung $T = 2\pi \cdot \frac{r}{v}$. Indem der Radius r des Objektes durch v geteilt und anschließend mit 2π multipliziert wird, lässt sich die Rotationsdauer bestimmen. [4]

2.2 Bestimmung der Rotationsdauer anhand von Videoaufnahmen

2.2.1 Videoaufnahme und Bearbeitung

Hierbei werden Videoaufnahmen mithilfe der Software *FireCapture* am Teleskop mit einer Farbkamera aufgenommen. [5] Die Aufnahmen werden dafür in einem kurzen Abstand hintereinander getätigt, sodass eine klar erkennbare Bewegung eines Merkmals des Himmelskörpers erkennbar wird. Diese Aufnahmen werden daraufhin in der Software *Autostakkert* zu ihren einzelnen Frames aufgebrochen und summiert, wodurch ein Bild entsteht. [6] Die daraus resultierenden Bilder werden dann mit der Software *Giotto* geschärft. [7]

2.2.2 Bildausmessung

Die Bildausmessung der Bilder erfolgt hierbei anhand der Software *WinJupos*. [8] Dafür werden diese mit dem Datenerfassungsmodul „Bildausmessung“ in *WinJupos* anhand des Aufnahmeformats und der Aufnahmezeit *UT* kalibriert. Aus diesen Parametern ergibt sich eine sogenannte „Umrandung“. Diese Umrandung muss so in der Aufnahme positioniert werden, dass die Merkmale des Himmelskörpers wie z.B. die Größe, Position der Monde oder der Äquator des Körpers komplementär zur Umrandung sind. Nach der Kalibrierung folgt dann die Zentrierung des Bildes, wobei der Körper in die Mitte der Ausmessung gestellt wird.

2.2.3 Bestimmung der Rotationsdauer

Um nun die Rotationsdauer des Körpers zu bestimmen, wird in *WinJupos* ein Merkmal des Objektes in Längengrad $L1$ und Breitengrad B'' ausgemessen. In einer der beiden Ausmessungen wird dann die X und Y Koordinate dieses Merkmals anhand des zuvor bestimmten Längen- und Breitengrades bestimmt. Diese Koordinaten werden dann auf die andere Ausmessung übertragen, wodurch ein neuer $L1$ und B'' Wert bestimmt werden kann. Darauf folgend wird die Differenz der beiden $L1$ Werte berechnet, welche die zurückgelegte Strecke des Merkmals in der Zeitdifferenz der Aufnahmen widerspiegelt. Wird die Längengraddifferenz auf 360° hochgerechnet, so lässt sich der Faktor berechnen, mit welchem die Zeitdifferenz multipliziert werden muss. Das daraus resultierende Ergebnis gibt dann die Rotationsdauer des Körpers an.

2.3 3D-Kartographie

2.3.1 Erstellung einer quadratischen Plattkarte

Mithilfe der zuvor ausgemessenen Bilder und weiteren Aufnahmen lässt sich eine quadratische Plattkarte generieren. Hierfür werden die einzelnen Ausmessungen in *WinJupos* in das Auswertungsmodul „Kartenberechnung“ importiert. Die einzelnen Ausmessungen müssen dabei anhand ihrer Längengrade $L1$ so begrenzt werden, dass sie sich nicht überschneiden. Das Resultat ist eine quadratische-Plattkarte von den $L1$ Werten 0° bis 360° und den B'' Werten -90° bis 90° .

2.3.2 3D-Modellierung

Die Karte wird daraufhin als Textur in die 3D-Modellierungssoftware *Blender* importiert. Hierbei wird in *Blender* ein sphärisches Mesh erstellt, wobei ein neues sogenanntes „Material“ genutzt wird, um die Kartenoberfläche auf das Mesh zu projizieren. [9] Hierbei dient das Material als

Bindeglied für die Erschaffung einer Oberfläche auf dem Mesh. Dieses wird daraufhin hinsichtlich seiner sogenannten „Base Color“ bearbeitet, da hierfür die Bildtextur, welche der Karte entspricht, eingefügt werden muss. Daraus ergibt sich dann eine 3D-modellierte Planetenkugel, welche sich von allen Seiten betrachten lässt.

3 Forschungsergebnisse

3.1 Forschungsziel

Im Rahmen der eigenen Bestimmung der Rotationsdauer werden die zuvor genannten zwei Methoden durchgeführt. Hierbei soll zum einen die Rotationsdauer anhand der $H\alpha$ Absorptionslinie des eigen aufgenommenen Jupiterspektrums vom 27.12.2023 um 20:57 Uhr MEZ bestimmt werden, als auch anhand der Videoaufnahmen vom 02.11.2022 um 19:30 Uhr UT und 19:43 Uhr UT.

3.2 Rotationsbestimmung anhand des Jupiterspektrums

3.2.1 Verwendete Geräte und experimenteller Aufbau

Zur Aufnahme des Jupiterspektrums wurde das Schmidt-Cassegrain-Teleskop C14 EdgeHD von Celestron auf einer 10Micron GM2000HPS Montierung verwendet. An den Strahlengang des Teleskops wurden ein Shelyak Lhires III Spaltspektrograph sowie die CCD-Kamera STF-8300M von SBIG angeschossen. Diese Ausstattung gehört zur Privatsternwarte von Herrn Bernd Koch, auf die ich via Microsoft Teams per remote control für die Aufnahme des Spektrums zugreifen konnte. (siehe Abbildung 1).

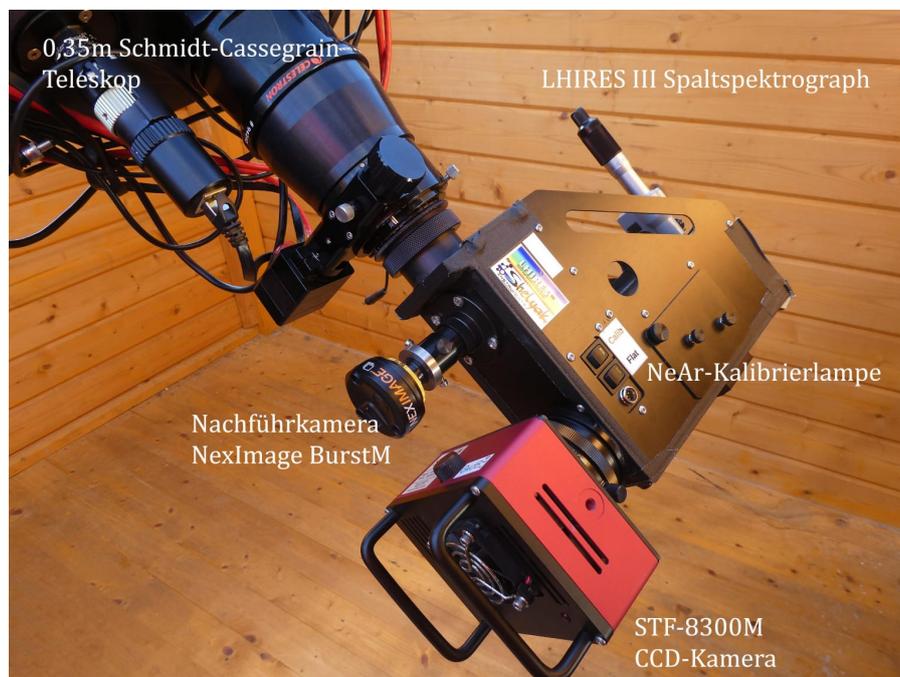


Abbildung 1: Foto des Beobachtungsaufbaus: C14, Lhires III, NeAr-Kalibrierungslampe, STF-8300M, NexImage BurstM

Teleskop

Das Schmidt-Cassegrain-Teleskop C14 EdgeHD von Celestron ist ein Teleskop mit einer Brennweite von 3910 mm und einer Öffnung von 14" (356 mm), somit eignet sich dieses perfekt für die Aufnahme eines Jupiterspektrums. Zudem lässt sich das Teleskop sehr leicht anhand der Hauptspiegelfokussierung scharf stellen. [10] [11]

Kamera

Die STF-8300M ist eine CCD-Kamera der Firma SBIG, welche eine Auflösung von über 3326×2504 Pixel bietet. Dabei weist diese eine Bit-Tiefe von 16 Bit auf und verfügt somit über 65536 Graustufen. Die Kamera wird mithilfe eines integrierten Kühlers auf bis zu -20°C gekühlt, wodurch eine erhebliche Rauschunterdrückung bewirkt wird. Durch ihren eingebauten mechanischen Verschluss (Dunkelbildaufnahme) ist diese auch für den Remote-Betrieb geeignet. [12]

Nachführkamera

Die NexImage Burst Monochrom ist eine monochrome Nachführkamera für das C14 Teleskop, welche zur Ausrichtung des optischen Spalts des Lhires III Spaltspektrographen genutzt wird. Sie hat eine Bit-Tiefe von 12 Bit und eine Auflösung von 1280×960 Pixeln. [13]

Spektrograph

Für die Beobachtung des Jupiter wurde der LHIREN III Spaltspektrograph der Firma Shelyak verwendet. Dieser erzeugt ein hochauflösendes Absorptionsspektrum des reflektierten Sonnenlichts des Planeten Jupiter. Das spektrale Auflösungsvermögen R beträgt ca. 18000 [14]

Referenzlampe

Der LHIREN III besitzt eine integrierte Neon-Argon-Referenzlampe, diese dient vor allem zur Kalibrierung der Wellenlänge aufgenommener Spektren im Bereich der $\text{H}\alpha$ Absorptionslinie. Zudem ermöglicht sie es, die leichte Krümmung der Spektrallinien in *BassProject* zu korrigieren. [14]

3.2.2 Durchführung der Beobachtung

Das Jupiterspektrum wurde am 27.12.2023 um 20:57 Uhr an der Privatsternwarte von Herrn Bernd Koch in Sörth im Westerwald mithilfe von Microsoft Teams ferngesteuert aufgenommen. Aufgrund von schlechten Wetterverhältnissen musste eine Lücke in der Wolkendecke abgepasst werden, welche mithilfe der Website „Wetteronline“ herausgefunden wurde. [15] Für die Aufnahme des Spektrums wurde hierfür die verknüpfte 10Micron-Montierung auf den Planeten Jupiter ausgerichtet. Folgend darauf wurde das Teleskop anhand der Hauptspiegelfokussierung scharf gestellt. Die Software *SpecTrack* ermöglichte es, mit der Nachführkamera den optischen Spalt visuell auszurichten, hierbei wurde dieser mithilfe einer roten Markierung im Guiding-Interface sichtbar gemacht. Mit der Software *Maxim DL Pro 6* wurden daraufhin die Aufnahmen getätigt, hierbei wurde das Modul „Camera Control“ genutzt. Zunächst wurde ein Jupiterspektrum mit 300 Sekunden Belichtungszeit aufgenommen, hierbei musste während dieser Zeit der Spalt

des Spektrographen anhand der Micronsteuerung immer auf dem Äquator des Jupiter gehalten werden. Zusätzlich der Aufnahme des Spektrums wurde auch ein sogenanntes „Darkframe“ mit einer Belichtungszeit von 300 Sekunden aufgenommen. Zuletzt wurde auch noch ein Neon-Argon-Referenzspektrum mit 120 Sekunden Belichtungszeit aufgenommen, hierfür wurde die integrierte NeAr-Kalibrierlampe des LHIRES III aktiviert (siehe Abbildung 2).

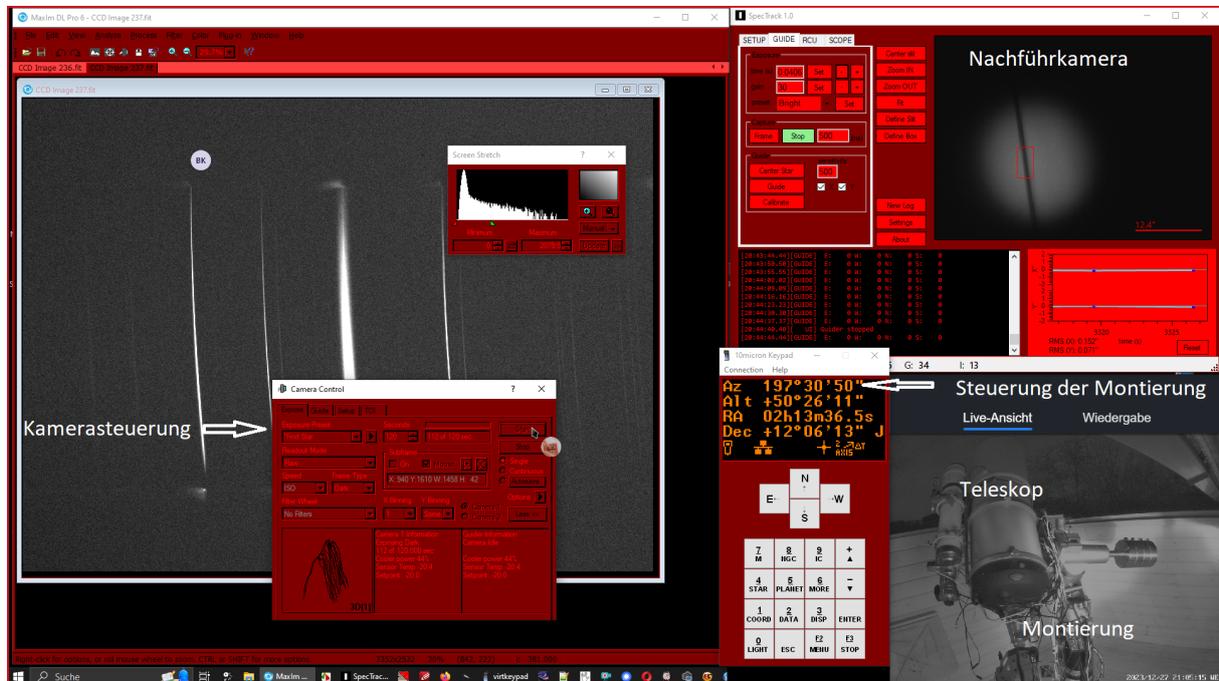


Abbildung 2: Bildschirmaufnahme des digitalen Beobachtungsaufbaus: Fernsteuerung der Montierung, Interface der Nachführkamera, Kamerasteuerung, Live-Ansicht

3.2.3 Auswertungsprozess

In der Software *Maxim DL Pro 6* wird nun das Darkframe als sogenanntes „MasterDark“ von der eigentlichen Aufnahme subtrahiert, somit können kamerabedingte Bildfehler wie z.B. fehlerhafte Pixel aus der Aufnahme entfernt werden. [16] Darauf folgend werden das Neon-Argon-Referenzspektrum und das Jupiterspektrum beide in die Software *BassProject* importiert, hierfür werden beide Fit-Dateien ausgewählt und als neues Projekt in der Software geöffnet. [17] Für die Auswertung müssen nun zunächst die Spektren anhand ihrer Schiefstellung richtig aufgerichtet werden, dies funktioniert mithilfe der Funktion „Tilt-Correction“. Nach der Korrektur der Schiefstellung, wurden beide Spektren mithilfe der Funktion „Smile Smile/Slant Correction“ in ihrer Schiefstellung der Spektrallinien korrigiert (siehe Abbildung 3). Dies dient zum einen für die Korrektur der Krümmung der Spektrallinien, zum anderen für die vertikale Korrektur der Absorptionslinien im Jupiterspektrum. Die Korrektur der Absorptionslinien ist hierbei wichtig, da die Rotation anhand der Differenz der Wellenlänge am Ost- und Westrand des Planeten bestimmt wer-

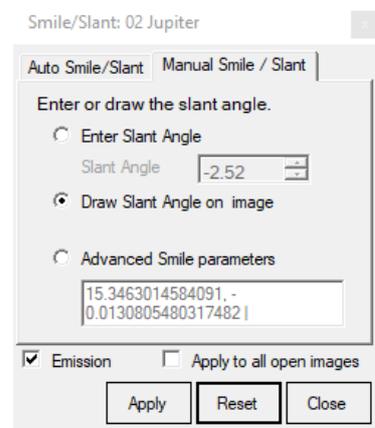


Abbildung 3: Korrektur der Schiefstellung der Spektrallinien

den muss. Bei einer verfälschten Krümmung der $H\alpha$ Linie würden daher falsche Ergebnisse ausgemessen werden. Damit dies nicht passiert, wird das Spektrum anhand der Absorptionslinien der Erdatmosphäre korrigiert. Hierfür wird an einer der atmosphärisch bedingten Wasserdampflinien eine Linie entlang gezogen, welche bewirkt, dass die Absorptionslinie automatisch entkrümmt und senkrecht ausgerichtet wird. Das Jupiterspektrum hat nach dieser Korrektur klar erkennbare senkrechte atmosphärische Absorptionslinien und geneigte Jupiter-Absorptionslinien. Darauf folgend wird das Jupiterspektrum anhand der Emissionslinien des Neon-Argon-Referenzspektrums kalibriert. Dabei werden die spezifischen Wellenlängen den Emissionslinien des Spektrums zugeordnet. Dies wird mithilfe des „Calibration Tool“ erreicht, in welchem die markierten Emissionslinien mit einer Wellenlängendatenbank (RELCO) den bestimmten Wellenlängen in Ångström zugeordnet werden (siehe Abbildung 4). Nach der Wellenlängenkalisierung werden die Wellenlängen von $H\alpha$ am oberen und unteren Ende des Spektralstreifen des Jupiterspektrums vermessen, dies wird anhand des „Region Selection Tool“ durchgeführt. Hierbei wird ein Spektrum von einer Breite eines Pixels bei dem Y-Wert 51 ausgewählt, welches den oberen Rand des Spektralstreifen markiert. Wird nun die Wellenlänge von $H\alpha$ anhand dieses Randspektrums gemessen, lässt sich eine Wellenlänge von $6562,54\text{Å}$ bestimmen. Diese Wellenlänge ist aufgrund der leichten Ungenauigkeit des Spektrographen der Mittelwert des linken und rechten Endes der Absorptionslinie von $H\alpha$, hierbei hat die Ausmessung also eine ungefähre Fehlertoleranz von $\pm 0,1\text{Å}$ (siehe Abbildung 5). Bei der Messung des unteren Endes des Spektralstreifens ergibt sich bei dem Y-Wert 161 eine Wellenlänge von $6563,77\text{Å}$. Hierbei fällt die Fehlertoleranz mit $0,01\text{Å}$ sehr viel geringer aus, da sich die Absorption von $H\alpha$ hierbei sehr viel besser auswerten ließ (siehe Abbildung 6).

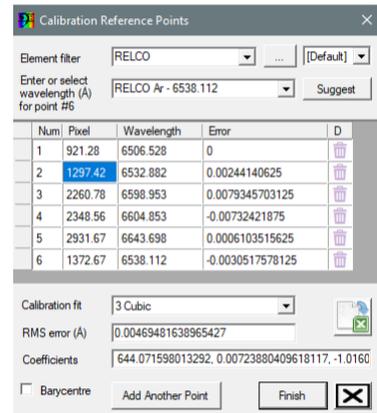


Abbildung 4: Wellenlängenkalisierung

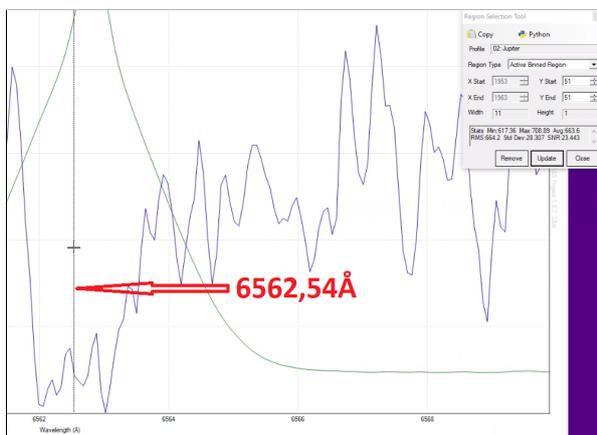


Abbildung 5: $H\alpha$ Wellenlänge des oberen Randspektrums



Abbildung 6: $H\alpha$ Wellenlänge des unteren Randspektrums

3.2.4 Berechnung der Rotationsdauer

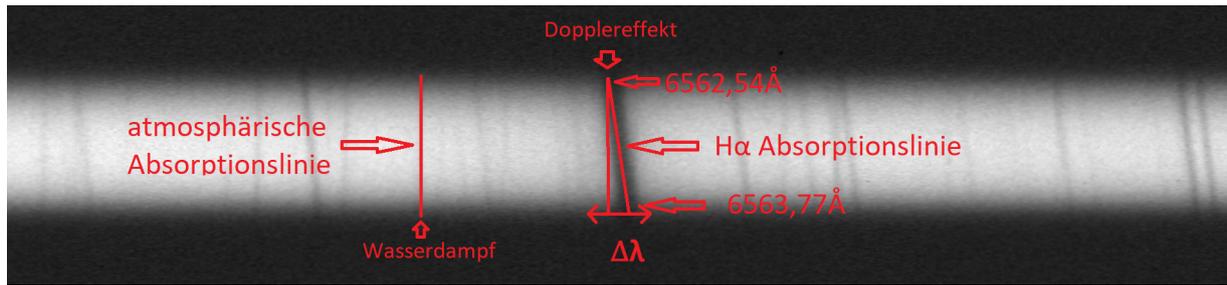


Abbildung 7: Jupiterspektrum

Anhand der zuvor bestimmten Wellenlängen wird nun die Dopplerverschiebung $\Delta\lambda$ bestimmt, hierfür wird der Wellenlängenwert 6562.54\AA des oberen Randspektrums von dem Wellenlängenwert 6563.77\AA des unteren Randspektrums subtrahiert. Resultierend daraus ergibt sich eine Dopplerverschiebung von $1,23\text{\AA}$, welche mithilfe der Formel $V_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$ in die Geschwindigkeitsdifferenz Δv_r umgerechnet wird. Hierfür wird $\Delta\lambda = 1,23\text{\AA}$ durch den Katalogwert der Wellenlänge λ_0 von $H\alpha = 6562,852\text{\AA}$ dividiert und mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 299,792\text{ km/s}$ multipliziert. Daraus ergibt sich $V_r \approx 56,191\text{ km/s}$. Anhand von Δv_r kann nun die Äquatorgeschwindigkeit mit der Formel $V \cdot \sin i = \left| \frac{v_r}{4} \right|$ berechnet werden. Hierfür wird zunächst der $\sin i$ Wert berechnet. Der Inklinationwinkel i ergibt sich, indem die Neigung der Bahnebene $= 1,304^\circ$ des Planeten Jupiter von 90° , also dem Winkel zwischen Rotationsachse und Äquatorebene, subtrahiert wird. Da der \sin des Ergebnisses $88,696^\circ$ ungefähr 1 entspricht, wird V mit 1 multipliziert. Dies liegt vor allem daran, dass die Sichtlinie von der Erde aus nahezu genau auf den Äquator des Planeten sieht. Wird der Betrag von $V_r = 56,191\text{ km/s}$ geteilt durch 4 berechnet, ergibt sich das Ergebnis $\approx 14,06\text{ km/s}$. Damit die Äquatorgeschwindigkeit in die Rotationsdauer umgerechnet werden kann, wird die Formel der Kreisbewegung $T = 2\pi \cdot \frac{r}{v}$ benötigt. Hierbei wird der Radius des Planeten Jupiter $r = 71500\text{ km}$ und die Äquatorgeschwindigkeit $v = 14,06\text{ km/s}$ eingesetzt. Somit ergibt sich eine Zeit T von $3198,7$ Sekunden, was umgerechnet eine Rotationsdauer von 8 Stunden und 53 Minuten entspricht.

3.2.5 Ergebnis

Das Ergebnis von 8 Stunden und 53 Minuten hat eine Abweichung von 11% zum Katalogwert 9 Stunden und 55 Minuten. Dies könnte zum einen an den starken Seeing-Schwankungen bei der Aufnahme des Spektrums liegen, da es dadurch nicht möglich war, den optischen Spalt nahezu statisch auf dem Äquator des Planeten zu halten. Zudem gab es Ungenauigkeit in der Auswertung in *BassProject*, da zumindest bei einem der zwei Randspektren der Mittelwert genutzt wurde. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass diese zwei Fehlerquellen das Ergebnis hinsichtlich seiner Genauigkeit stark beeinflusst haben.

3.3 Rotationsbestimmung anhand von Videoaufnahmen

3.3.1 Verwendete Geräte und experimenteller Aufbau

Zur Aufnahme der Jupitervideos wurde das Corrected Dall-Kirkham (CDK) 20 von PlaneWave Instruments genutzt. An den Strahlengang des Teleskops wurde eine ASI183 Pro color Videokamera von der Marke ZWO ASI angeschlossen. Diese Ausstattung gehört zur Schulsternwarte des Schülerlabors Astronomie am Carl-Fuhlrott-Gymnasium Wuppertal (siehe Abbildung 8).

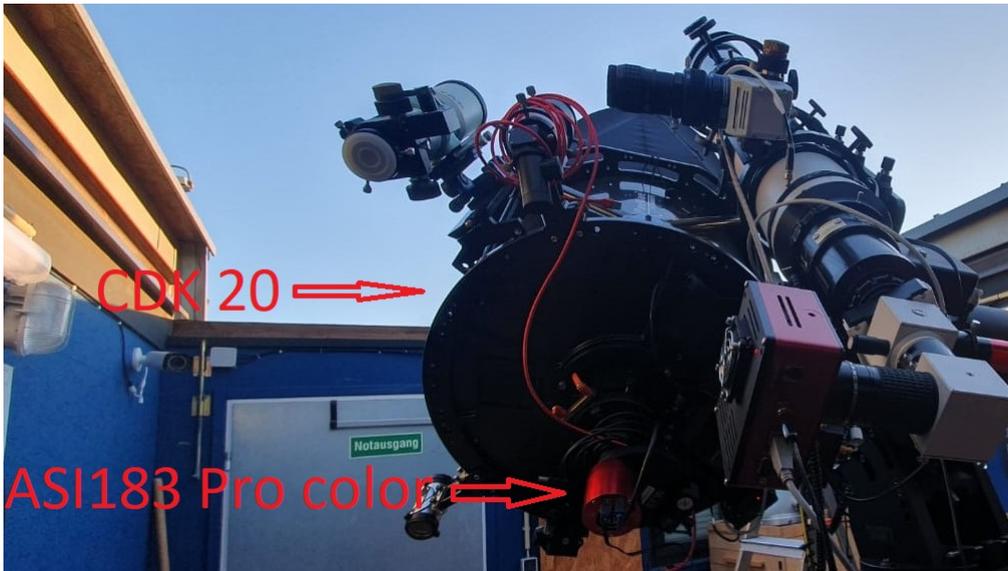


Abbildung 8: Foto des Beobachtungsaufbaus: CDK 20, ASI183 Pro color

3.3.2 Teleskop

Das Corrected Dall-Kirkham (CDK) 20 von PlaneWave Instruments ist ein Teleskop mit einer Brennweite 3454 mm und Öffnung von 508 mm, somit eignet sich dieses perfekt zur Aufnahme von DeepSky Objekten wie dem Planeten Jupiter. [18]

3.3.3 Videokamera

Die ASI183 Pro color ist eine Videokamera der Marke ZWO ASI, welche eine Auflösung von 5496×3672 Pixeln besitzt. Hierbei weist diese eine Bit-Tiefe von 12 Bit auf. Dank der integrierten zweistufigen Tec-Kühlung kann die Sensortemperatur der Videokamera auf 40-45 Grad Celsius unter die der Umgebungstemperatur gesenkt werden, wodurch die Dunkelstromerzeugung und das Sensorrauschen selbst bei längeren Belichtungszeiten erheblich reduziert werden können. [19]

3.3.4 Durchführung der Beobachtung

Beide Videoaufnahmen wurden am 02.11.2022 um 19:30 Uhr UT und 19:43 Uhr UT an der Schulsternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums aufgenommen. Für die Aufnahme wurde die Software FireCapture zur Steuerung der Videokamera genutzt. Zudem wurde die Montierung mithilfe der Micron-Fernsteuerung verbunden. Mit der Software Stellarium konnte dann die verbundene Montierung auf den Planeten Jupiter umgeschwenkt werden. [20] Nach Synchronisierung der Zeit der Montierung mit der des Computers wurde die Videokamera anhand der automatischen

Fokussierung manuell am Computer scharf gestellt. Die Aufnahmen wurden in einem Intervall von 90 Sekunden aufgenommen und hatten dabei eine Belichtungszeit von 7,828 ms pro Frame (siehe Abbildung 9). [21]

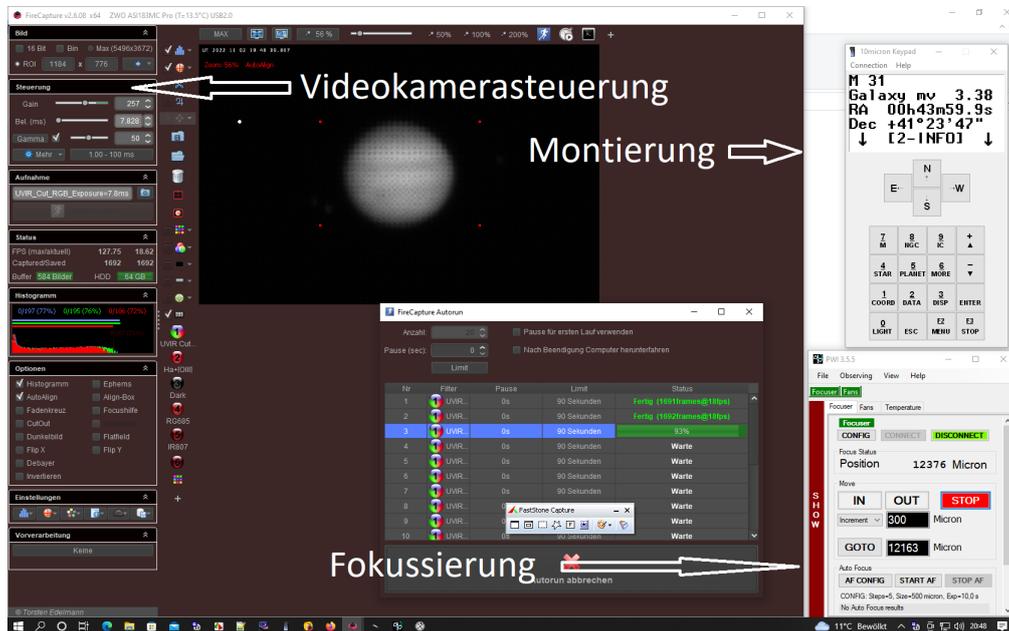


Abbildung 9: Bildschirmaufnahme des digitalen Beobachtungsaufbaus: Fernsteuerung der Montierung, Videokamerasteuerung

3.4 Auswertungsprozess

Zunächst werden die Jupitervideos mithilfe der Software *AutoStakkert* „gestackt“, hierbei wird das Video in seine einzelnen Bilder zerlegt, welche daraufhin von der Software summiert werden (siehe Abbildung 10). Das Resultat ist ein Summenbild aus den einzelnen Frames des Videos. Die zwei Bilder, welche aus den zwei Videoaufnahmen hervorgehen, werden daraufhin in der Software *Giotto* geschärft. Daraufhin werden die geschärften Bilder in der Software *WinJupos* ausgemessen und kalibriert, hierbei werden diese in das Modul „Datenerfassung“/„Bildausmessung“ importiert. Damit die Bilder ausgemessen werden können, müssen diese zunächst anhand ihrer Aufnahmezeit und ihres Aufnahmedatums kalibriert werden. Hierfür müssen diese in dem Ausmessungsfenster angegeben werden. Resultierend daraus ergibt sich eine sogenannte „Umrandung“, welche nun so auf dem Jupiter platziert werden muss, dass diese mit der Größe, der Position der Monde und des Äquators komplementär ist (siehe Abbildung 11). Zuletzt werden beide Bilder mithilfe der Funktion „Umrandung mit Bild zentrieren“ zentriert, wodurch der Jupiter in die Mitte der

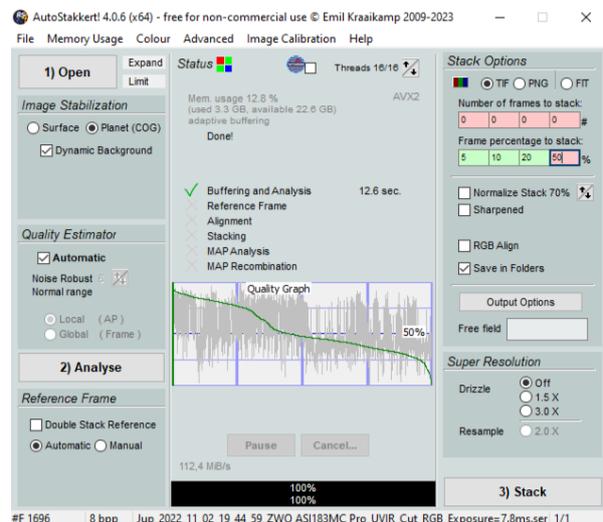


Abbildung 10: Autostakkert

Ausmessung befördert wird. [21] Nachdem die Jupiterbilder kalibriert wurden, müssen diese nun

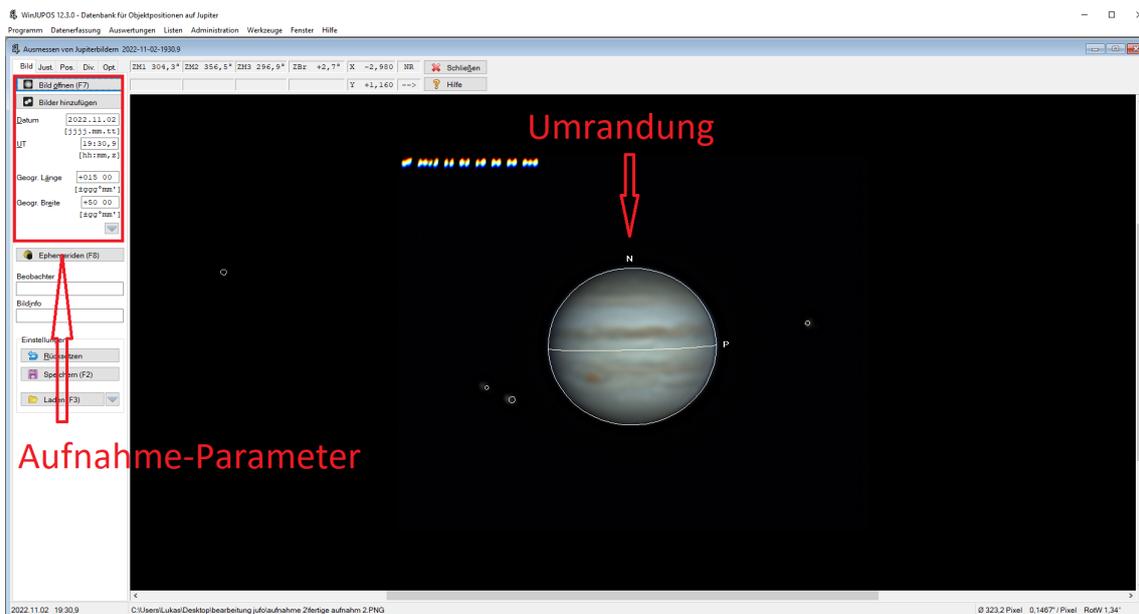


Abbildung 11: Bildschirmaufnahme der Datenauswertung in WinJupos: Aufnahme-Parameter, Umrandung

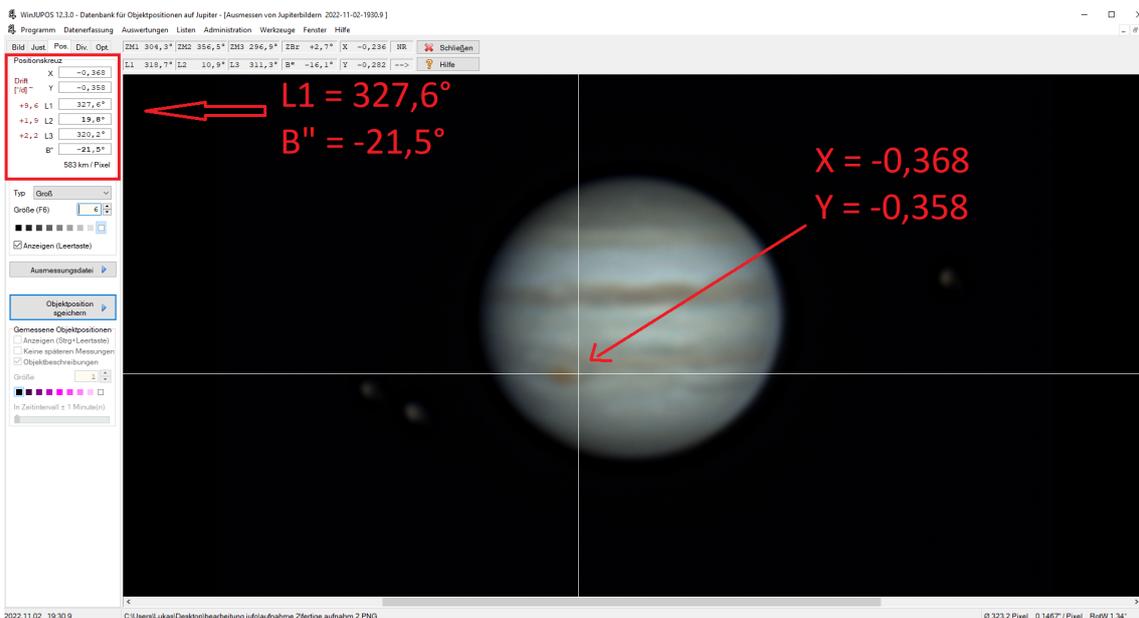


Abbildung 12: Bildausmessung in WinJupos

anhand eines Merkmals ausgemessen werden. Hierfür wurde bei diesen Jupiterbildern der „Große Rote Fleck“ gewählt. Dieser ist ein auffälliger und sehr langlebiger Sturm in der Jupiteratmosphäre, welcher durch seine markante rote Farbe auffällt. Hierbei wurde bei der ersten Aufnahme ein Längengrad $L1$ von $335,2^\circ$ und ein Breitengrad B'' von $-21,5^\circ$ bestimmt. Darauf folgend wird bei der zweiten Aufnahme die X und Y Koordinate dieses Längen- und Breitengrades bestimmt. Somit ergibt sich ein X Koordinatenwert von $0,368$ und ein Y Koordinatenwert von $0,358$. Werden diese beiden Koordinaten nun wieder in das erste Bild eingesetzt, lässt sich ein $L1$ -Wert von $327,6^\circ$ und ein B'' -Wert von $-21,5^\circ$ bestimmen (siehe Abbildung 12).

3.4.1 Berechnung der Rotationsdauer

Damit nun die Rotationsdauer bestimmt werden kann, muss die Längengraddifferenz bestimmt werden. Diese ergibt sich aus der Subtraktion der beiden gemessenen $L1$ -Werte, wobei die Differenz bei $7,6^\circ$ liegt. Durch die Informationen der Aufnahmezeit lässt sich bestimmen, wie lange der Jupiter für die Rotation von $7,6^\circ$ gebraucht hat. Hierbei liegt die Zeitdifferenz bei 12,68 Minuten. Werden jetzt die 360° der gesamten Rotation durch die $7,6^\circ$ geteilt, so lässt sich der Faktor bestimmen mit dem die Zeitdifferenz multipliziert werden muss. Somit ergibt sich: $\frac{360}{7,6} = 47,3684210$. Somit lässt sich eine Rotationsdauer von $47,368422105 \cdot 12,63 = 558,2631578943$ [Minuten] berechnen. Umgerechnet ergibt dies eine Rotationsdauer von 9 Stunden und 58,26 Minuten.

3.4.2 Ergebnis

Das Ergebnis von 9 Stunden und 58,26 Minuten hat eine Differenz von etwa 3 Minuten, also 0,7% zum Katalogwert von 9 Stunden und 55,5 Minuten. Somit ließ sich die Rotationsdauer des Planeten Jupiter nahezu genau bestimmen. Hierbei muss erwähnt werden, dass die Messung der Rotationsdauer anhand des Großen Roten Flecks durchgeführt worden ist. Da dieser aber nicht genau auf dem Äquator des Planeten liegt, sondern unterhalb im $L2$ -System, hat dies eine etwas längere Rotationsdauer zufolge. Somit hat das Ergebnis auch eine geringe Fehlertoleranz aufzuweisen, welche aber keine signifikante Auswirkung auf das Ergebnis hat.

3.5 Vergleich der Methoden

Werden die beiden Methoden in einem Vergleich betrachtet, so lässt sich sagen, dass die Rotationsbestimmung anhand eines Spektrums sehr viel schneller durchgeführt werden kann. Anders als bei der Videographie fällt die Aufnahmedauer und die Auswertungszeit sehr viel geringer aus, dies liegt zum einen daran, dass nur ein Spektrum mit 300 Sekunden Belichtungszeit benötigt wird, als auch an der erleichterten Auswertung des Spektrums in BassProject. Die Bestimmung der Rotationsdauer anhand der Videographie lässt sich dabei, vor allem aufgrund der langen Aufnahmezeit, als sehr viel aufwendiger betiteln. Dies liegt zum einen an der Intervalllänge der Videoaufnahmen, als auch den Zeitunterschieden zwischen den Videos. Da Zeitunterschiede aufgrund der Rotationsbestimmung zwingend benötigt werden, um die Verschiebung eines Merkmals zu bestimmen. Auch die Auswertung der Bilder in WinJupos war aufwendiger, da der Kalibrierungsprozess als auch die Bildausmessung viele händische Durchführungen benötigte. Werden nun die Ergebnisse der beiden Methoden betrachtet, lässt sich anhand meiner Forschungsergebnisse sagen, dass die Methodik der Videographie sehr viel genauere Berechnungen hervorgebracht hat. Hingegen hat die Rotationsbestimmung anhand des Spektrums Fehlerquellen gehabt, welche das Ergebnis stark beeinflusst haben.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Methode der Videographie bessere Ergebnisse hervorbringt. Trotzdem muss erwähnt werden, dass die zuvor genannten Fehlerquellen der Grund für die Abweichung der Rotationsdauer waren und somit keinesfalls die Methode ausschließen, da diese bei guten Seeingverhältnissen und Genauigkeit des Spektrums ein ähnliches Ergebnis hätte hervorbringen können.

3.6 3D-Kartographie

3.6.1 Erstellung einer quadratischen Plattkarte

Für die Erstellung einer quadratischen Plattkarte muss das Modul „Auswertung“ „Kartenberechnung“ genutzt werden. Hierfür werden die zuvor kalibrierten Jupiterbilder mit weiteren Aufnahmen in das Modul importiert, wodurch sich eine Anzahl von vier Bildausmessungen ergibt. Die zwei zusätzlichen Aufnahmen waren dabei vom 15.11.2023 und dem 14.12.2022. Darauf folgend werden die Jupiterbilder anhand ihrer Längengradbereiche, welche diese abdecken, eingetragen. Dabei wird bei jedem Bild der Längengrad des östlichen und westlichen Planetenrandes auf Höhe des Äquators gemessen. Zudem muss darauf geachtet werden, dass sich die Jupiterbilder nicht überlagern. Hierbei muss sichergestellt werden, dass die angegebenen $L1$ -Bereiche sich nicht mit den Bereichen der anderen Bilder überschneiden. Daher werden manche Jupiterbilder auf der Karte mehr zugeschnitten als andere (siehe Abbildung 13). Zudem muss darauf geachtet werden, dass die Einstellung „Länge des linken Kartenrandes“ bei 0° im System 1 liegt. Dies wird aufgrund der Ausmessungen der Längengrade ausgewählt, da diese im Längengradssystem 1 ($L1$) vermessen wurden.

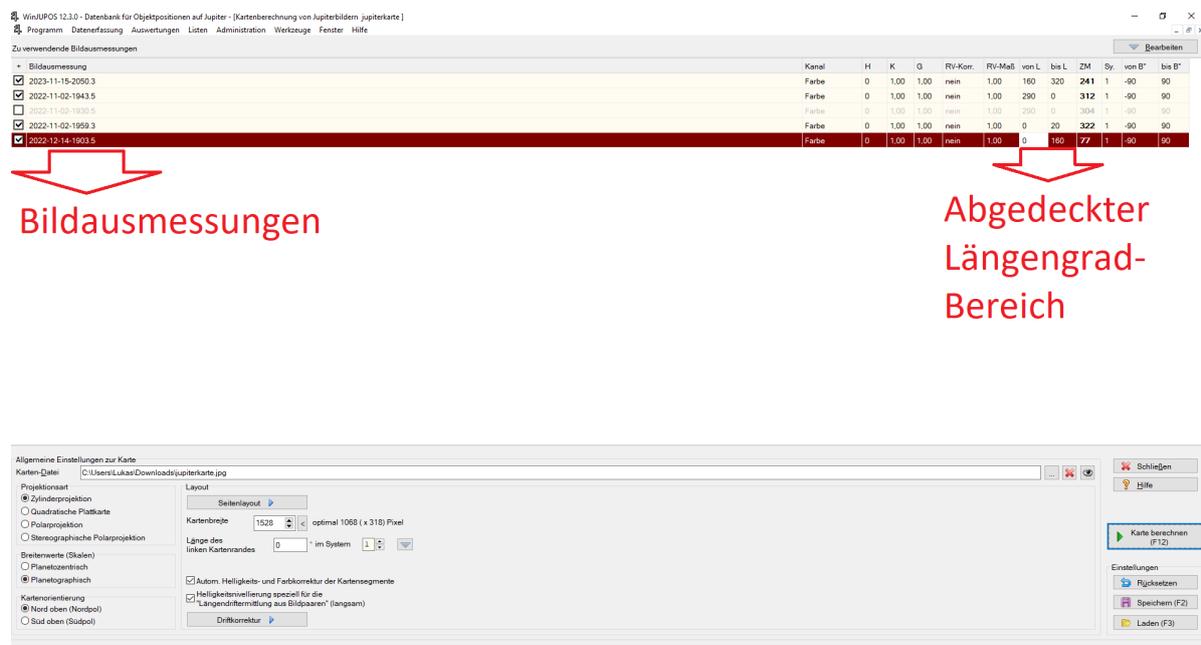


Abbildung 13: Bildschirmfoto aus WinJupos: Kartenberechnung

Darauf folgend wird die Karte mithilfe der Funktion „Karte berechnen“ generiert. Das Resultat ist eine vollständige Jupiterkarte, welche anhand ihrer Breitengrade von -90° bis 90° und ihrer Längengrade im $L1$ -System 0° bis 360° gekennzeichnet ist (siehe Abbildung 14).

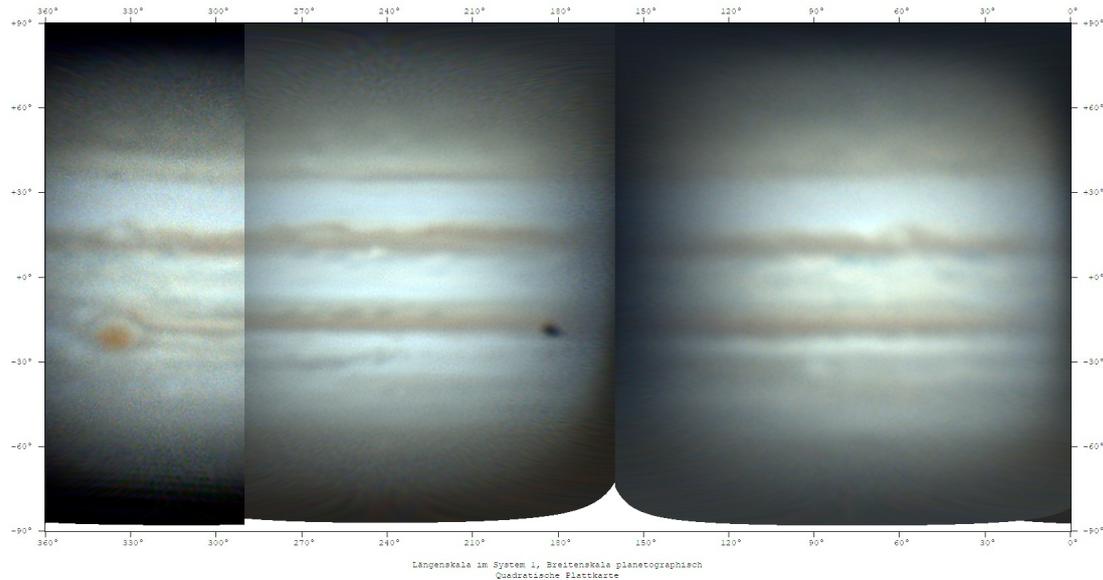


Abbildung 14: WinJupos: Fertige Jupiterkarte

3.6.2 Erstellung eines 3D-Modells

Damit ein 3D-Modell des Jupiters erstellt werden kann, wird die Jupiterkarte zunächst zugeschnitten. In diesem Fall muss sichergestellt werden, dass nur die Angaben der Längen- und Breitengrade herausgeschnitten werden, da ein fehlender Teil der Karte das 3D-Modell verfälschen würde.

Im nächsten Schritt wird in der Software Blender ein sphärisches Mesh erstellt. Die Jupiterkarte wird darauf folgend als „Image Texture“ mithilfe eines erstellten „Materials“ auf dieses Mesh projiziert. Hierfür wird im Materialmodul der Software ein Material erstellt, bei welchem die Base Color die Jupiterkarte entsprechen muss. Hierbei wird bei der Base Color als Textur „Image Texture“ ausgewählt. Darauf folgend wird die Jupiterkarte anhand dieser Funktion eingefügt (siehe Abbildung 15).

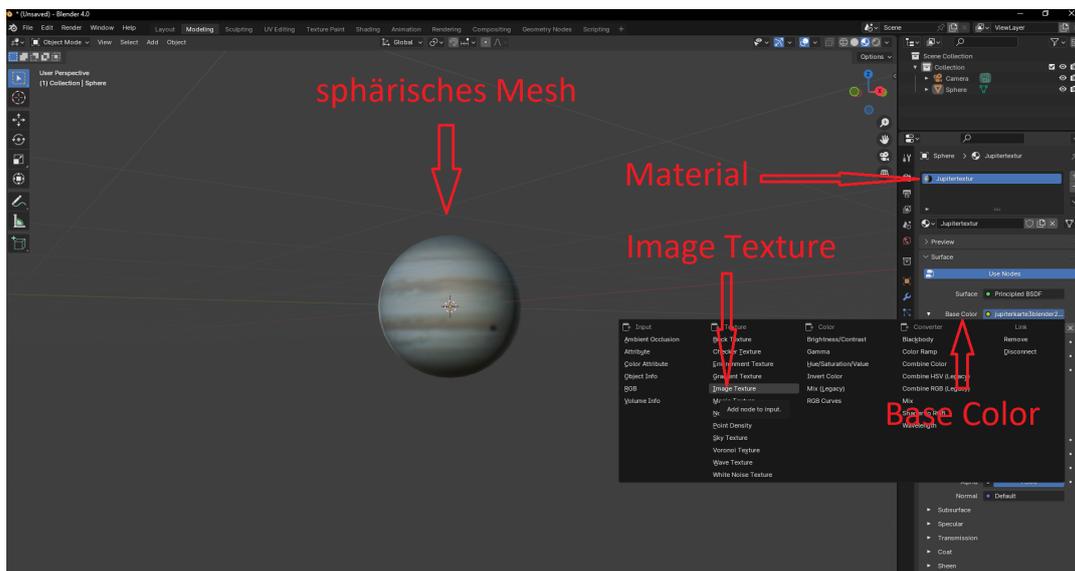


Abbildung 15: Bildschirmfoto: Blender 3D-Modellierung

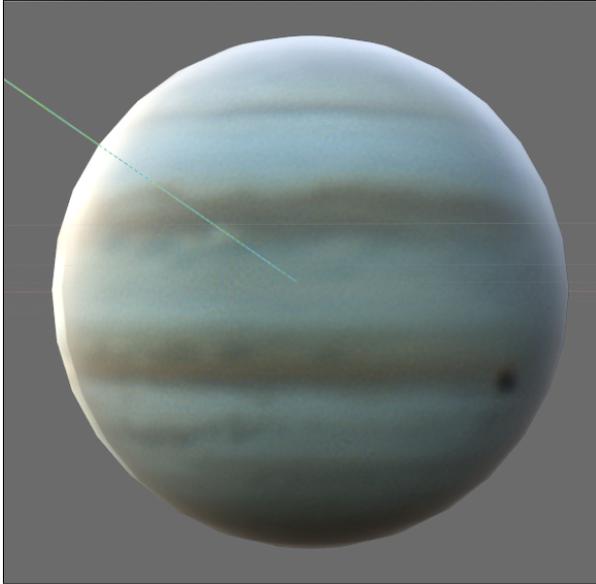


Abbildung 16: Ansicht des Jupitermodells
(1)

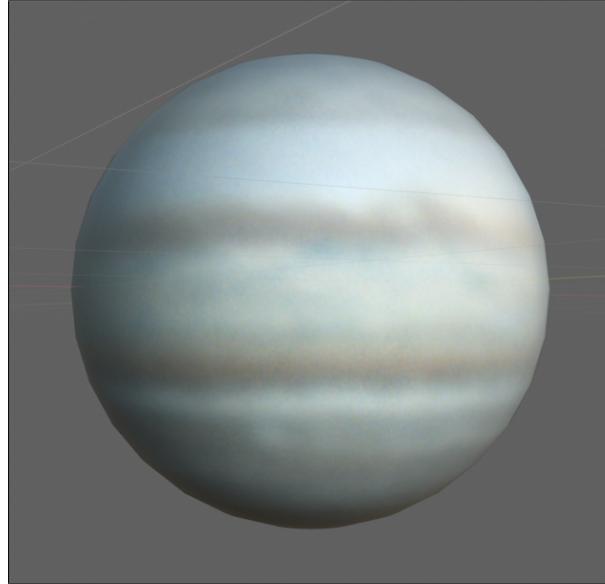


Abbildung 17: Ansicht des Jupitermodells
(2)

Das Resultat ist eine Planetenkugel des Planeten Jupiter, welche von allen Seiten betrachtet werden kann (siehe Abbildung 16 und 17).

4 Fazit

Die von mir genutzten Methoden zur Bestimmung der Rotationsdauer des Planeten Jupiter ließen sich hinsichtlich ihrer Durchführung und theoretischen Grundlagen darstellen und erklären. Zudem wurden die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeit verglichen und die Methoden anhand ihrer Vor- und Nachteile umfangreich diskutiert. Hierbei zeigte die Methode der Videographie ein deutlich zufriedenstellendes Ergebnis, als die Methode der Rotationsbestimmung anhand der an der $H\alpha$ bestimmten Radialgeschwindigkeitsdifferenz. Dabei ergab die Methode der Videographie eine Rotationsdauer von 9 Stunden und 58,26 Minuten, welche eine Abweichung von 3 Minuten, also 0,7% zum Katalogwert aufwies. Mithilfe der Jupitervideos konnte auch eine präzise Karte der Jupiteroberfläche angefertigt werden, welche anschließend als bildliche Grundlage für ein 3D-Modell des Jupiter genutzt werden konnte.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Foto des Beobachtungsaufbaus: C14, Lhires III, NeAr-Kalibrierungslampe, STF-8300M, NexImage BurstM	4
Abbildung 2:	Bildschirmaufnahme des digitalen Beobachtungsaufbaus: Fernsteuerung der Montierung, Interface der Nachführkamera, Kamerasteuerung, Live-Ansicht	6
Abbildung 3:	Korrektur der Schiefstellung der Spektrallinien	6
Abbildung 4:	Wellenlängenkalibrierung	7
Abbildung 5:	H α Wellenlänge des oberen Randspektrums	7
Abbildung 6:	H α Wellenlänge des unteren Randspektrums	7
Abbildung 7:	Jupiterspektrum	8
Abbildung 8:	Foto des Beobachtungsaufbaus: CDK 20, ASI183 Pro color	9
Abbildung 9:	Bildschirmaufnahme des digitalen Beobachtungsaufbaus: Fernsteuerung der Montierung, Videokamerasteuerung	10
Abbildung 10:	Autostakkert	10
Abbildung 11:	Bildschirmaufnahme der Datenauswertung in WinJupos: Aufnahme-Parameter, Umrandung	11
Abbildung 12:	Bildausmessung in WinJupos	11
Abbildung 13:	Bildschirmfoto aus WinJupos: Kartenberechnung	13
Abbildung 14:	WinJupos: Fertige Jupiterkarte	14
Abbildung 15:	Bildschirmfoto: Blender 3D-Modellierung	14
Abbildung 16:	Ansicht des Jupitermodells (1)	15
Abbildung 17:	Ansicht des Jupitermodells (2)	15

Vermerk: Alle verwendeten Bilder sind Eigenaufnahmen.

Abkürzungsverzeichnis

MEZ	Mitteleuropäische Zeit
UT	Universal Time

Quellenverzeichnis

Internetquellen

- ¹*Globale atmosphärische Zirkulation*, <http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/1pd.html>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ²*How much does the rotation of our planet affect weather patterns and ocean currents?*, <https://www.astronomy.com/science/how-much-does-the-rotation-of-our-planet-affect-weather-patterns-and-ocean-currents/>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ³*Das Erdmagnetfeld: Ein riesiger Dynamo*, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Das_Erdmagnetfeld_Ein_riesiger_Dynamo, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ⁴R. Walker, *Analyse und Interpretation astronomischer Spektren*, <https://silو.tips/download/analyse-und-interpretation-astronomischer-spektren#>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹⁰*Celestron C14 SC XLT - 356/3910 mm Schmidt Cassegrain Tubus*, https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p1009_Celestron-C14-SC-XLT---356-3910mm-Schmidt-Cassegrain-Tubus.html, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹¹*14 EdgeHD Tubus (OTA) mit 3 Schiene (76mm)*, [https://www.celestron.de/ce_de/astronomie/teleskope-\(otas\)/edgehd-14-ota.html](https://www.celestron.de/ce_de/astronomie/teleskope-(otas)/edgehd-14-ota.html), (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹²..., *SBIG STF - 8300 M*, <https://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹³*Kamera NexImage Burst Monochrom*, https://www.astroshop.de/astro-kameras/celestron-kamera-neximage-burst-monochrom/p,45277?utm_medium=cpc&utm_term=45277&utm_campaign=2401&utm_source=bing-mc&utm_content=, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹⁴*Shelyak Spektrograph Lhires III*, <https://www.apm-telescopes.net/de/shelyak-spektrograph-lhires-iii>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹⁵*Wetteronline*, <https://www.wetteronline.de/wetterradar/soerth?wrm=9&wry=50.7,7.69&wrn=U802cnRo&wrg=a5761>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹⁸*CDK20 Optical Tube Assembly (F/6.8)*, <https://planewave.com/product/cdk20-ota/>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ¹⁹*ASI183 Pro*, <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi183mc-pro-color/>, (aufgerufen: 06.01.2024).
- ²¹L. Spieß, *Meine Projektarbeit: Aufnahme und Spektroskopie von Monden und ihren Planeten*, https://www.schuelerlabor-astronomie.de/wp-content/uploads/2023/06/Spiess_Monde-_und_Planeten.pdf, (aufgerufen: 06.01.2024).

Softwareverzeichnis

- ⁵*FireCapture* (<https://firecapture.de/>), (aufgerufen: 06.01.2024).
- ⁶*Autostakkert* (<https://www.autostakkert.com/>), (aufgerufen: 06.01.2024).
- ⁷*Giotto* (<http://www.giotto-software.de/>), (aufgerufen: 06.01.2024).

⁸ *WinJupos* (<http://jupos.org/gh/download.htm>), (aufgerufen: 06.01.2024).

⁹ *Blender* (<https://www.blender.org/>), (aufgerufen: 06.01.2024).

¹⁶ *MaxIM DL Pro6* (<https://diffractionlimited.com/maxim-dl/>), (aufgerufen: 06.01.2024).

¹⁷ *BassProject* (<https://groups.io/g/BassSpectro>), (aufgerufen: 06.01.2024).

²⁰ *Stellarium* (<http://stellarium.org>), (aufgerufen: 06.01.2024).

Danksagung für die Unterstützungsleistungen

Hiermit möchte ich mich herzlich bei meinem Projektbetreuer Herrn Bernd Koch bedanken, der mich im ganzen Umfang dieser Arbeit unterstützt und beraten hat. Auch bedanke ich mich dafür, dass dieser seine Privatsternwarte für Beobachtungszwecke zur Verfügung gestellt hat, wodurch der ganze Umfang dieses Projektes erst möglich geworden ist.

Zudem danke ich meiner Familie, welche es mir ermöglichte, an Jugend forscht teilzunehmen und mich in der Erarbeitung dieses Projekts besonders unterstützte.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Arbeit

„3D-Kartographie und Rotationsbestimmung des Planeten Jupiter“

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die in der Arbeit angegebenen Links wurden zum Zeitpunkt des Aufrufs überprüft und enthielten keine illegalen Inhalte. Für jegliche Änderungen der Inhalte übernehme ich keine Verantwortung.

Wuppertal, 14. Januar 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Lukas Spieß', with a stylized flourish extending from the end.

Lukas Spieß