



Aus der Reihe

Astronomie

Astronomical Bulletin Wischnewski

No. 23: Bestimmung der Radialgeschwindigkeit

Bestimmung der Radialgeschwindigkeit ohne Kalibrierung

Abstract Amateurastronomen können mit Hilfe einfacher Spektroskopie die Radialgeschwindigkeit von bewegten Objekten, vornehmlich entfernten Galaxien und Quasare, mit Geschwindigkeiten über 1000 km/s (in günstigen Fällen über 300 km/s) auch ohne eine Kalibrierung des Spektrums bestimmen. Eine Kalibrierlampe ist nicht erforderlich, die Spektrallinien müssen nicht identifiziert werden. Die Methode verwendet stattdessen einen (fast) ruhenden Referenzstern, dessen Spektrallinien lediglich denen des Messobjektes zugeordnet werden müssen. Die Methode ist ausreichend für eine erste Abschätzung, obgleich Fehler von weit über 20% zu erwarten sind.

Eine ausführliche Behandlung des Themas Spektroskopie finden Sie im dreibändigen Werk *>Astronomie in Theorie und Praxis<*, 9. Auflage (ISBN 978-3-948774-00-4).

Dr. Erik Wischnewski

Heinrich-Heine-Weg 13 • D-24568 Kaltenkirchen

E-Mail: proab@t-online.de • Internet: <http://www.astronomie-buch.de>

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Rechte vorbehalten.

© Dr. Erik Wischnewski, Kaltenkirchen 2021

Version: 14.05.2021 08:08:09

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	3
2	Methode	3
	2.1 Fehlerbetrachtung	4
3	Anwendung	5
	3.1 Spektren	5
	3.2 Auswertung	6
	3.3 Korrekturen	8
4	Schlussfolgerung	9
	Danksagung, Literatur und Software.....	9

1 Einführung

Amateurastronomen, die die Spektroskopie ambitioniert betreiben, besitzen neben einem Spaltspektrographen oft auch eine Kalibrierlampe (häufig fälschlich als Eichlampe bezeichnet). Wird ein Spektrum damit absolut wellenlängenkalibriert, kann die gemessene Wellenlänge einer Linie mit der zugehörigen Laborwellenlänge (Ruhewellenlänge) verglichen werden. Die Differenz ergibt direkt die Radialgeschwindigkeit. Hierbei handelt es sich um den Anteil des Geschwindigkeitsvektors, der auf die Erde zu gerichtet ist (oder von uns weg).

Eine weitaus größere Zahl von Sternfreunden besitzt ein einfaches geblatztes Beugungsgitter, das wie ein Filter prefokal in den konvergenten Strahlengang eingefügt wird. Weit verbreitet ist der Star Analyser, den es mit 100 und mit 200 Linien/mm gibt. Mit dem entsprechenden Versuchsaufbau (Setup) und einer DSLR-Kamera können Dispersionen bis zu einem Ångström/Pixel erreicht werden.

Mit genügend großer Optik und guter Nachführung können durchaus Spektren bis über die zehnte Größenklasse hinaus aufgenommen werden, gegebenenfalls muss die Dispersion reduziert oder die Aufnahme einem Binning unterzogen werden. Punktförmige Objekte lassen sich damit leicht spektroskopieren. Kleine Flächenobjekte wie Quasare oder die Zentren von elliptischen Galaxien können unter Umständen noch möglich sein.

Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, wie auch ohne absolute Wellenlängenkalibrierung die Radialgeschwindigkeit bestimmt werden kann.

2 Methode

Statt einer Kalibrierlampe wird als Referenz für die Wellenlänge ein ruhender Stern ohne Radialbewegung verwendet. Zur Korrektur bei geringer Radialgeschwindigkeit wird an späterer Stelle noch eingegangen. Anhand der Spektren der bewegten Quelle (hier mit ›Qu‹ abgekürzt, was auch für Quasar stehen kann) und des Referenzsterns (Ref) wird die Verschiebung aufgrund des Doppler-Effektes bestimmt, ohne dass hierfür irgendeine Kalibrierung notwendig ist. Es genügt, die Pixel zu zählen.

Die beiden Spektralbilder (Referenzstern und bewegte Quelle) werden so gedreht, dass die Spektren waagrecht liegen. Nun werden die Zentralwellenlängen der Spektrallinien (λ_1 und λ_2) gemessen, ohne vorher zu kalibrieren.

Zwei Spektrallinien der Ruhewellenlängen λ_1 und λ_2 werden bei gegebener Radialgeschwindigkeit v einer bewegten Quelle durch den Doppler-Effekt nach

$$\lambda_{\text{Qu},1} = \lambda_1 \cdot (1 + v/c)$$

und

$$\lambda_{\text{Qu},2} = \lambda_2 \cdot (1 + v/c)$$

verschoben.

Die Differenz ($\lambda_2 - \lambda_1$) vergrößert sich ebenfalls um den Faktor $(1 + v/c)$.

Dasselbe gilt bei linearer Dispersion auch für die Pixelwerte x :
 Aus $(x_2 - x_1)$ für $v = 0$ wird

$$(x_2 - x_1) \cdot (1 + v/c)$$

für eine beliebige Radialgeschwindigkeit v .

Bei gleichem Versuchsaufbau (Setup) ist die Dispersion

$$d = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{x_2 - x_1}$$

für alle Geschwindigkeit gleich groß, also sowohl für einen ruhenden Referenzstern als auch für eine bewegte Quelle. Der Zähler lässt sich auch wie folgt ausdrücken:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{Qu}} &= \lambda_{\text{Qu},2} - \lambda_{\text{Qu},1} \\ &= \lambda_{\text{Ref},2} \cdot (1 + v/c) - \lambda_{\text{Ref},1} \cdot (1 + v/c) \\ &= (\lambda_{\text{Ref},2} - \lambda_{\text{Ref},1}) \cdot (1 + v/c) \\ &= \Delta\lambda_{\text{Ref}} \cdot (1 + v/c) \end{aligned}$$

Analoges gilt bei linearer Dispersion auch für die Pixelwerte x :

$$\Delta x_{\text{Qu}} = \Delta x_{\text{Ref}} \cdot (1 + v/c)$$

bzw.

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta x_{\text{Qu}}}{\Delta x_{\text{Ref}}} - 1$$

2.1 Fehlerbetrachtung

Bei dieser Methode kommen mehrere Fehlerquellen zum Tragen:

- Referenzstern besitzt Radialgeschwindigkeit
- Dispersion ist nicht linear
- Spektrale Auflösung ist relativ niedrig
- Spektrallinien sind ›blend‹ oder schmale Banden
- Rauschen und niedriges S/N

Referenzstern | Eine geringe Radialgeschwindigkeit des Referenzsterns kann hinreichend korrigiert werden, sofern diese bekannt ist. Die beschriebene Methode bestimmt die Differenz der Radialgeschwindigkeiten $\Delta v = v_{\text{Qu}} - v_{\text{Ref}}$. Es genügt, die Radialgeschwindigkeit des Referenzsterns zu addieren. Der verbleibende Restfehler liegt weit unterhalb der anderen Fehler.

Dispersion | Die meisten Spektren erreichen mit einer lineare Regression noch keine besonders gute Beziehung zwischen Wellenlänge und Pixelwert. Vielfach ist eine Parabel oder sogar ein Polynom 3. Grades notwendig. Für eine erste Abschätzung – und mehr ist diese Methode nicht – darf von einer linearen Dispersion ausgegangen werden.

Auflösung | Die spektrale Auflösung R des Spektrographen bedingt, dass eine genaue Bestimmung nur für Radialgeschwindigkeiten $v \gg c/R$ möglich ist. Mit dem Spaltspektrographen kann mit einem 900-Linien-Gitter eine spektrale Auflösung von $R=3000$ erreicht werden. Damit sind Radialgeschwindigkeiten $v \gg 100$ km/s messbar. Mit dem Star Analyser 200 konnte der Verfasser bis $R=900$ erreichen, typischerweise aber liegen die Werte eher bei $R=300$, was einer Radialgeschwindigkeit von 1000 km/s entspricht.

Linienprofil | Sofern die Spektrallinien nicht reinrassig sind, ergeben sich oft deutliche Unterschiede zwischen der Peakwellenlänge und der baryzentrischen Wellenlänge. Erfahrungen zeigen, dass die baryzentrischen Wellenlängen (Schwerpunkt der Linie) für diese Aufgabe geeigneter zu sein scheint. Die Software RSpec ermittelt diesen Schwerpunkt.

Rauschen | Gegen das allgemeine Rauschen bzw. ein schlechtes S/N hilft, mehrere Linien zu vermessen und eine lineare Ausgleichsrechnung vorzunehmen (→ Anwendung).

Ausgleichsrechnung | In der Summe ist der Fehler einer solchen Messung recht hoch. Deshalb ist das Vermessen von so viel Linien wie möglich die einzige Möglichkeit, den Gesamtfehler zu reduzieren. Statt die Differenz zwischen zwei konkreten Linien zu bilden, werden die gemessenen Pixelwerte direkt in ein Diagramm eingetragen: die Pixelwerte des Referenzsterns an der x-Achse, die der bewegten Quelle an der y-Achse (→ Abbildung 3). Eine lineare Regression ergibt die Steigung und ihren mittleren Fehler. Die Steigung entspricht $(1 + v/c)$.

3 Anwendung

Die beschriebene Methode zur Bestimmung der Radialgeschwindigkeit ohne Verwendung einer Kalibrierlampe wird am Beispiel der Galaxie Messier 49 und dem Vergleichssterne HD 106888 überprüft.

3.1 Spektren

M49 ist eine elliptische Galaxie vom Typ E2, die auch als Seyfert-Galaxie vom Typ 2 eingestuft wird. Die Gesamthelligkeit liegt bei $V = 8.3$ mag, die Helligkeit der zentralen Aufhellung bei $V = 12.2$ mag. Der scheinbare Durchmesser liegt bei 10.2×8.3 Bogenminuten.

HD 106888 ist ein Stern vom Spektraltyp F8 und einer Helligkeit von $V = 8.2$ mag. Die Radialgeschwindigkeit des Sterns beträgt -3.4 km/s. Er bewegt sich also auf uns zu.

Da der Verfasser die Galaxie M49 durch ungünstige Standortbedingungen nicht mit hinreichender Genauigkeit spektroskopieren kann, hat freundlicherweise Richard Walker an seinem Wohnort in der Schweiz die Spektren unter Verwendung eines 20 cm Schmidt-Cassegrain-Teleskops (f/10), eines DADOS-Spaltspektrographen mit 200-Linien-Gitter und einer gekühlten ATIK-314L-Kamera aufgenommen.

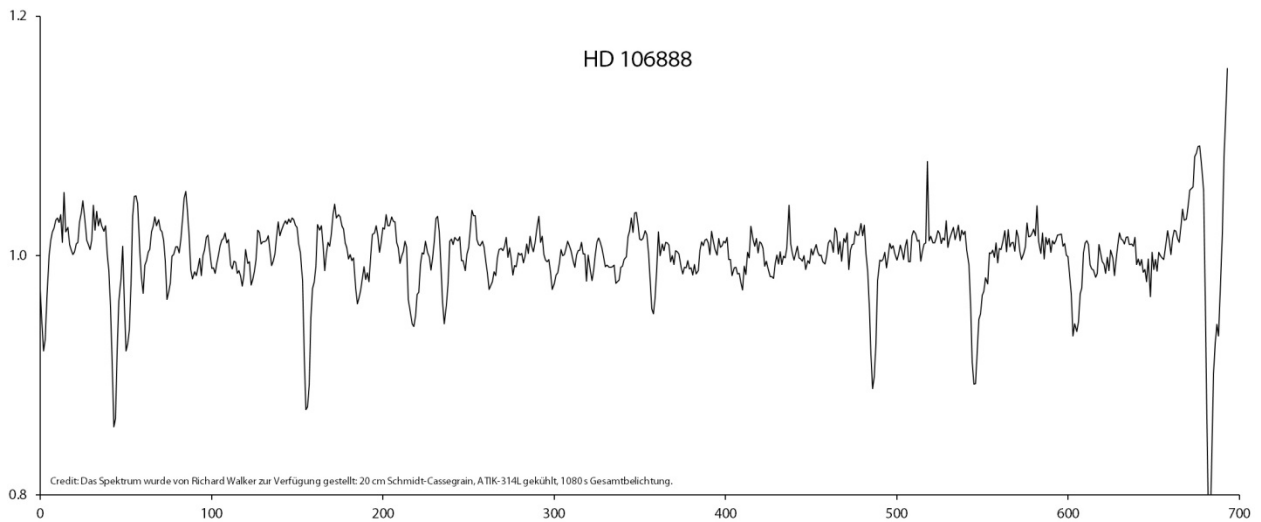


Abbildung 1: Spektrum von HD 106888, 18 Minuten Gesamtelichtungszeit, nicht wellenlängenkalibriert. Die Balmerlinie $H\beta$ liegt bei 150, die Balmerlinie $H\alpha$ liegt nahe 500. Bei 550 und 600 liegen die tellurischen Absorptionsbanden des Sauerstoffs (A-Band) und des Wasserdampfes. *Credit: Richard Walker, Schweiz.*

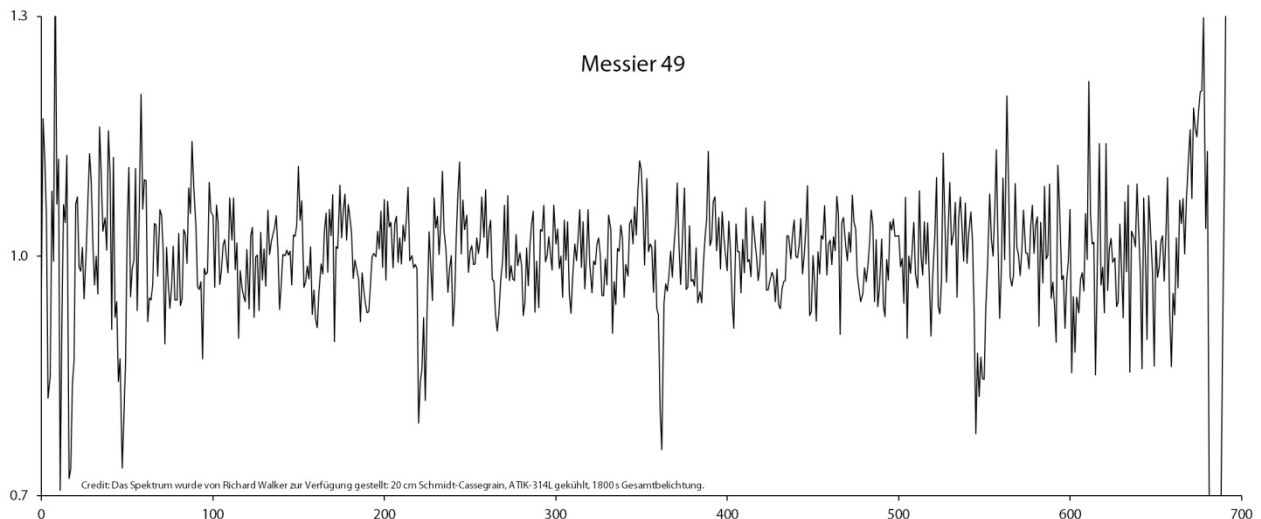


Abbildung 2: Spektrum von Messier 49, 30 Minuten Gesamtelichtungszeit, nicht wellenlängenkalibriert. Die Balmerlinien sind deutlich weniger ausgeprägt als beim Referenzstern, aber noch identifizierbar. Das A-Band bei 550 ist gut und die Wasserdampfabsorption bei 600 schwach zu erkennen. Insgesamt lassen sich zehn Linien mit hinreichender Sicherheit identifizieren, die auch beim Vergleichsstern vorhanden sind. *Credit: Richard Walker, Schweiz.*

3.2 Auswertung

Es werden die x-Pixelwerte von allen Spektrallinien bestimmt, die in beiden horizontal ausgerichteten Spektren eindeutig einander zugeordnet werden können. In diesem Beispiel gelang das bei zehn Linien. Deren Pixelwerte sind im Diagramm (→ Abbildung 3) eingetragen.

Nebenbei | Der Abstand der tellurischen Linien/Banden untereinander sind bei beiden Spektren gleich – wie zu erwarten. Sie unterliegen ja nicht dem Doppler-Effekt der Sterne und Galaxien.

Wichtig | Es ist keine Kalibrierung erforderlich. Die Wellenlängen interessieren bei dieser Methode nicht, lediglich muss es sich um dieselbe Spektrallinien handeln, die paarweise in das

Diagramm eingetragen werden. Es ist auch nicht wichtig, die Linien zu kennen. Die Bezeichnungen im Diagramm sind also optional.

Ausreißer | Sobald man 3–4 deutliche Linien vermessen und eingetragen hat, ergibt sich bereits die lineare Beziehung. Weitere Messungen erhöhen die Genauigkeit. Im Falle falscher Zuordnung von Linien in den beiden Spektren würde der Messpunkt deutlich von der Geraden abweichen. Die Linienzuordnung muss überprüft und korrigiert werden, gegebenenfalls darf der Punkt nicht verwendet werden.

Ergebnis | Für Messier 49 und HD 106888 ergibt sich aus der Steigung eine Radialgeschwindigkeiten von

$$v = 0.003463 \cdot c = 1038 \pm 613 \text{ km/s.}$$

Hierbei wird angenommen, dass der Referenzstern ruht.

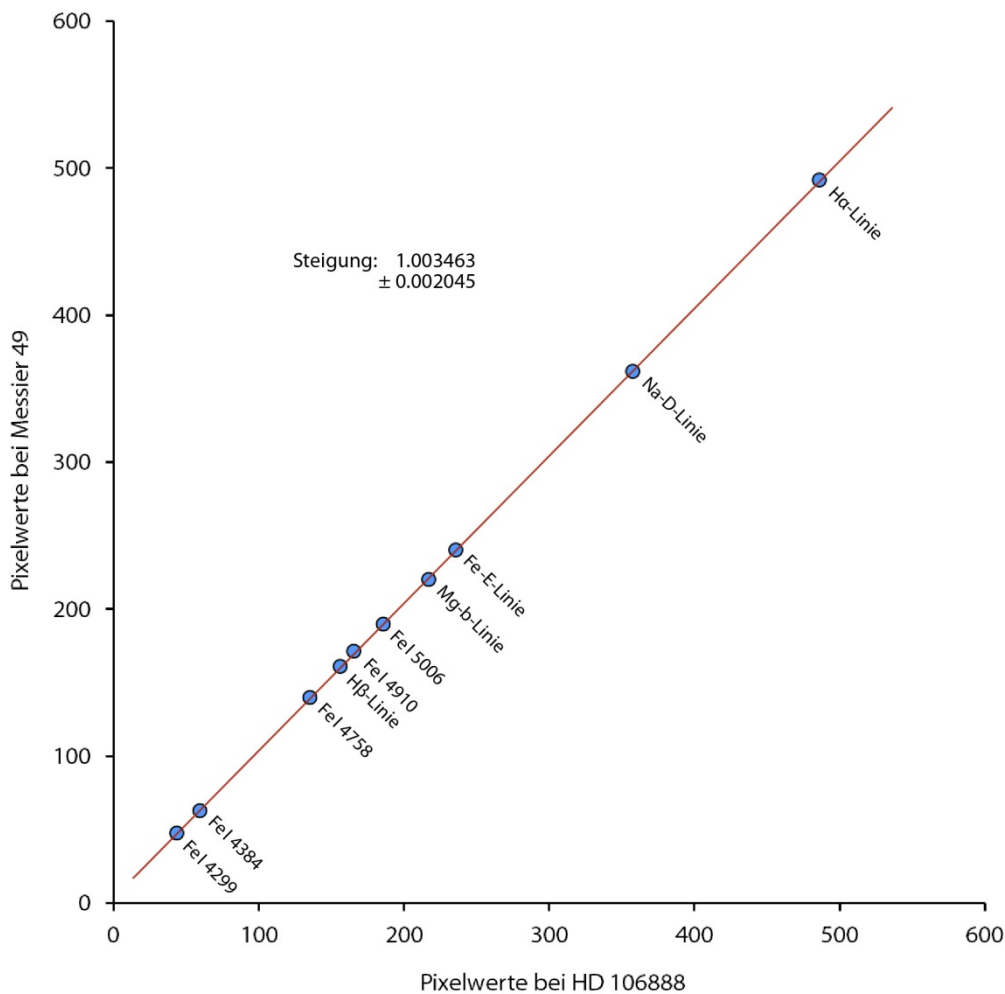


Abbildung 3: Messungen der Pixelwerte in den Spektren von Messier 49 und HD 106888 bei unverändertem Setup des Spektrographen, das heißt, vom Versuchsaufbau her identischer Dispersion (Ångström/Pixel). Die Abweichung der Steigung von 1 bedeutet, von zufälligen und systematischen Messfehlern abgesehen, unterschiedliche Dopplerverschiebungen der Linien.

3.3 Korrekturen

3.3.1 Referenzsternkorrektur

Der verwendete Referenzstern besitzt eine Radialgeschwindigkeit von -3.4 km/s. Diese muss zum Messergebnis addiert werden, so dass die topozentrische Radialgeschwindigkeit $v = 1035 \pm 613$ km/s beträgt.

3.3.2 Topozentrische Korrektur

Die Radialgeschwindigkeiten werden grundsätzlich auf die Sonne bezogen (heliozentrisch) angegeben. Da die Beobachtungen von der Erde aus erfolgen und diese sich um die Sonne bewegt, muss die Geschwindigkeitskomponente der Erde in Richtung des Objektes berücksichtigt werden. Analoges gilt für die Rotationsgeschwindigkeit der Erde, wofür der Standort des Beobachters relevant ist. Mit Hilfe des zum Programmpaket SpecRaVE von Helmut Jahns gehörende Programms ›TopocentricCorrection‹ können beide Effekte korrigiert werden.

Da bei der hier vorgestellten Methode ein Vergleichsstern herangezogen wird, welcher ebenfalls diesen Effekten unterliegt, ist nur die Differenz relevant. Sofern Objekt und Vergleichsstern dicht beieinander liegen, ist die Korrektur für beide nahezu gleich groß und die Differenz kann im Rahmen des viel größeren Messfehlers vernachlässigt werden. Für diese Anwendung betragen die topo- zu heliozentrischen Korrekturen:

Messier 49: -18.3 km/s

HD 106888: -20.0 km/s

Daraus ergibt sich eine effektive Korrektur von $+1.7$ km/s.

Die heliozentrische Radialgeschwindigkeit von Messier 49 beträgt unter Berücksichtigung beider Korrekturen

$$v = 1036 \pm 613 \text{ km/s.}$$

Die Werte professioneller Messungen schwanken zwischen 857 km/s und 1319 km/s (Mittelwert = 1002 ± 45 km/s) mit Häufung im Bereich zwischen 957 km/s und 1004 km/s (Mittelwert = 974 ± 13 km/s). Der neueste und häufig zitierte Wert lautet 981 km/s.

Vorsicht: Die gute Übereinstimmung der gemessenen Radialgeschwindigkeit mit den Literaturwerten ist in Hinsicht auf den großen Fehler von ca. 60 % trügerisch und muss eher als ein glücklicher Zufall verstanden werden.

4 Schlussfolgerung

Die vorgestellte Methode ermöglicht eine einfache Bestimmung der Radialgeschwindigkeit ohne Verwendung einer Kalibrierlampe. Die beiden einzigen Randbedingungen sind eine hinreichend lineare Dispersion und ein hinreichend ruhender Referenzstern, der mit gleichem Setup aufgenommen wird. Eine Bestimmung der Spektrallinien ist nicht erforderlich, lediglich müssen die zu vermessenen Linien in beiden Spektren gefunden und zugeordnet werden können.

Damit hat der Sternfreund mit einfacher Ausrüstung, im einfachsten Fall einem Star Analyser 100 oder 200, die Möglichkeit, Radialgeschwindigkeiten über 1000 km/s zu bestimmen. In günstigen Fällen liegt die Nachweisgrenze bei 300 km/s. Der Messfehler ist sehr groß – im Beispiel sind es $\pm 60\%$. Der Verfasser schätzt, dass in günstigen Fällen auch noch $\pm 20\%$ möglich sind.

Ein wissenschaftlicher Beitrag ist mit dieser Methode nicht möglich. Amateurastronomen können aber ohne große Ausrüstung und ohne Kalibrierung dennoch ein Ergebnis erhalten, das der Freude an den Sternen dienen mag.

Danksagung, Literatur und Software

Mein Dank gilt Richard Walker für die Erstellung der Spektralaufnahmen von Messier 49 und HD 106888, wodurch die theoretisch abgeleitete Formel verifiziert werden konnte.

Walker, Richard: Spectral Atlas, Cambridge University Press, 2017

Walker, Richard: privater Schriftverkehr, Mai 2021

The SIMBAD astronomical database, simbad.u-strasbg.fr/simbad

NIST Atomic Spectra Database, physics.nist.gov/PhysRefData/ASD

Fields, Tom: RSpec, www.rspec-astro.com

Jahns, Helmut und Roland Bücke: TopocentricCorrection (Komponente von SpecRaVE), astro.buecke.de/software