

# Farbkalibrierung einer CCD-Aufnahme anhand bekannter Helligkeiten von Feldsternen

Harald Tomsik und Peter Riepe

*Akzeptiertes Ziel der Farbkalibrierung einer CCD-Aufnahme ist, dass ein unserer Sonne ähnlicher G2-Stern im Blickfeld der Kamera weiß erscheint. Je kleiner jedoch das Blickfeld einer Teleskop-Kamera-Kombination ist, desto unwahrscheinlicher wird sich ein bekannter G2-Stern im aufgezeichneten Bild befinden. Wie dennoch eine Farbkalibrierung vorgenommen werden kann, bei der ein hypothetischer, also real nicht vorhandener G2-Stern weiß erscheinen würde, beschreibt der vorliegende Aufsatz.*

In den Artikeln über die Kalibrierung der Farben eines mittels CCD-Kamera aufgenommen Satzes von Rot-, Grün- und Blauaufnahmen [1, 2] erläuterten wir, dass eine Farbkalibrierung mit Hilfe von G-Sternen im Gesichtsfeld automatisch folgende Effekte berücksichtigt und korrigiert, ohne sie im Einzelnen quantifizieren zu müssen: wellenlängenabhängige Transmissionswerte von Teleskop, Filtern und CCD-Chip, Änderungen der durchstrahlten Luftmasse und damit erneut der Transmissionswerte in Abhängigkeit von der Horizonthöhe sowie Staub- und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Die einzelnen Farbauszüge werden dabei so mittels Multiplikation angepasst, dass die instrumentellen Magnituden des G-Sterns in den 3 Farbbildern identisch sind und seine Farbe damit im farblichen Kompositbild weiß wird. Voraussetzung für dieses Verfahren ist jedoch, dass sich ein aus der Literatur bekannter G-Stern, idealerweise ein G2-Stern, im Bildfeld befindet. Insbesondere bei den kleinen Gesichtsfeldern langbrennweitiger Teleskope sind passende G-Sterne zur Farbkalibrierung nur selten zu finden. Im Folgenden stellen wir eine von diesen Überlegungen ausgehende Erweiterung des Verfahrens vor, bei der als Mindestvoraussetzung im Gesichtsfeld nur je eine Rot-, Grün- und Blauhelligkeit aus der Literatur bekannt sein muss.

## Die Grundidee

### Schritt 1: Anpassung an Literaturwerte mittels Kalibrierungsfaktoren

In der Literatur sind auch für kleine Gesichtsfelder Sternhelligkeiten insbesondere im UBVRI-System nach Johnson leicht erhältlich. Beispielhaft sei dazu sei auf die Beschreibung der Datenextraktion mittels Aladin (<http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>) verwiesen [2]. Um an diese Literaturwerte anschließen zu können, verwenden wir bei unseren Aufnahmen ebenfalls B-, V- und R-Filter eines Filtersatzes nach Johnson. Zuerst wird je eine bereits bekannte B-, V- und R-Helligkeit von Feldsternen herausgesucht, nennen wir sie  $M_{B-Lit}$ ,  $M_{V-Lit}$  und  $M_{R-Lit}$ . Dabei ist es unerheblich, ob diese drei Helligkeiten von einem einzigen, zwei oder drei verschiedenen Sternen im Gesichtsfeld stammen. Anschließend werden in den einzelnen CCD-Farbkanälen mittels Aperturfotometrie die korrespondierenden instrumentellen Magnituden gemessen ( $M_{B-inst}$ ,  $M_{V-inst}$  und  $M_{R-inst}$ ), wobei es sinnvoll ist, dies im 16-bit-Fits-Format durchzuführen.

Ziel dieses ersten Schrittes ist, dass nach Multiplikation des B- und des V-Kanals (Bezug also auf R) mit einem Kalibrierungsfaktor  $KF_B$  bzw.  $KF_V$  die Helligkeitsabstände (genauer die Quotienten) zwischen den Farbkanälen den Helligkeitsabständen der Literaturwerte (genauer deren Quotienten) entsprechen und somit für deren Lichtintensität  $I$  gilt:

$$\frac{I_{B-Lit}}{I_{R-Lit}} = \frac{I_{B-inst} \cdot B\text{-Belichtungszeit} \cdot KF_B}{I_{R-inst} \cdot R\text{-Belichtungszeit}} \quad (\text{Gl. 1})$$

sowie

$$\frac{I_{V-Lit}}{I_{R-Lit}} = \frac{I_{V-inst} \cdot V\text{-Belichtungszeit} \cdot KF_V}{I_{R-inst} \cdot R\text{-Belichtungszeit}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Aus Gl. 1 (Kürzel für „Belichtungszeit“ ab jetzt „BZ“) folgt der gesuchte Kalibrierungsfaktor  $KF_B$ :

$$\begin{aligned} KF_B &= \frac{I_{B-Lit}}{I_{R-Lit}} \cdot \frac{I_{R-inst}}{I_{B-inst}} \cdot \frac{BZ_R}{BZ_B} \\ &= 2,512^{M_{R-Lit} - M_{B-Lit}} \cdot 2,512^{M_{B-inst} - M_{R-inst}} \cdot \frac{BZ_R}{BZ_B} \quad (\text{Gl. 3}) \end{aligned}$$

Entsprechend folgt für den Kalibrierungsfaktor  $KF_V$  aus Gl. 2:

$$\begin{aligned} KF_V &= \frac{I_{V-Lit}}{I_{R-Lit}} \cdot \frac{I_{R-inst}}{I_{V-inst}} \cdot \frac{BZ_R}{BZ_V} \\ &= 2,512^{M_{R-Lit} - M_{V-Lit}} \cdot 2,512^{M_{V-inst} - M_{R-inst}} \cdot \frac{BZ_R}{BZ_V} \quad (\text{Gl. 4}) \end{aligned}$$

Anschließend werden die Farbkanäle  $K_B$  und  $K_V$  mit diesen Kalibrierungsfaktoren multipliziert und man erhält in Anlehnung an die Literaturwerte die kalibrierten Farbkanäle  $K_{B-cal}$  und  $K_{V-cal}$ , die dann zu  $K_R$  ( $= K_{R-cal}$ ) den gemäß Literaturwerten richtigen „Abstand“ aufweisen:

$$K_{B-cal} = K_B \cdot KF_B \quad (\text{Gl. 5})$$

$$K_{V-cal} = K_V \cdot KF_V$$

und unverändert ist:

$$K_{R-cal} = K_R$$

### Schritt 2: Anpassung an einen hypothetischen G2-Stern mittels Farbindices

Nachdem die kalibrierten Farbkanäle den richtigen Helligkeitsabstand zueinander haben, hilft folgende Überlegung weiter: „Pflanzen“ wir uns in unser Bildfeld einen hypothetischen (also tatsächlich nicht vorhandenen) G2-Stern, so wäre er gemäß veröffentlichten B-, V- und R-Helligkeiten [3] im kalibrierten B-Kanal 1,16 mag schwächer als im kalibrierten R-Kanal (Farbindex B-R = 1,16 mag) und er wäre im kalibrierten V-Kanal um 0,53 mag schwächer als im kalibrierten R-Kanal (Farbindex V-R = 0,53 mag).

Damit dieser hypothetische G2-Stern im Farbkomposit des RGB-Farbraums (Beispiel TIFF-Datei) weiß erscheint, muss man ihn in allen Farbausügen erneut mittels Multiplikation gleich hell werden lassen:

$$K_{B-Gcal} = K_{B-cal} \cdot 2,512^{1,16} \quad (\text{Gl. 6})$$

$$K_{V-Gcal} = K_{V-cal} \cdot 2,512^{0,53}$$

$$K_{R-Gcal} = K_{R-cal}$$

### Schritt 3: Anpassung der Hintergrundhelligkeit

Wie ausführlicher in [2] beschrieben, wird im letzten Schritt an einer Stelle ohne Himmelsobjekt die Intensität in den drei Kanälen angeglichen, damit der Himmelshintergrund im Farbkomposit neutral

grau erscheint. Dazu werden die Hintergrundhelligkeiten  $H_{B-Gcal}$ ,  $H_{V-Gcal}$  und  $H_{R-Gcal}$  gemessen und mittels Addition auf den angestrebten Sollwert  $H_{Soll}$  (von z.B. 15 ADU) gebracht, ohne dass sich durch diese Addition die bereits kalibrierten Sternhelligkeiten ändern:

$$K_{B-Gcal-H} = K_{B-Gcal} - H_{B-Gcal} + H_{Soll} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$K_{V-Gcal-H} = K_{V-Gcal} - H_{V-Gcal} + H_{Soll}$$

$$K_{R-Gcal-H} = K_{R-Gcal} - H_{R-Gcal} + H_{Soll}$$

#### Schritt 4: Zusammensetzen zum RGB-Bild

Die bezüglich Stern- und Hintergrundhelligkeiten fertig kalibrierten drei Farbkanäle  $K_{B-Gcal-H}$ ,  $K_{V-Gcal-H}$  und  $K_{R-Gcal-H}$  werden aus dem 16-bit-Fits-Format in ein allgemein bekanntes Grafikformat wie z.B. Tiff konvertiert, wobei auf die Auswahl eines identischen Dynamikbereiches Wert gelegt werden muss. Abschließend kann mit einem der gängigen Grafikprogramme das RGB-Bild aus den drei monochromen Tiff-Bildern zusammengesetzt werden.

### **Mögliche Erweiterungen**

#### Mittelwertbildung

Um vor Ausreißern der Helligkeiten (z.B. Messfehlern) sowohl aus der Literatur als auch bei der Aperturfotometrie besser gewappnet zu sein, empfiehlt es sich, in jedem Farbkanal statt nur einen Stern mehrere heranzuziehen und statt eines Einzelwertes das arithmetische Mittel mehrerer Sternhelligkeiten in den oben aufgeführten Rechnungen zu verwenden. Um bei der Fotometrie ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen, sollten hellere Sterne im Bildfeld vermessen werden. Beachtet werden muss aber, dass keine gesättigten Pixel in die Photometrie eingehen. Als Maß für die Abweichung unserer Messwerte von den NOMAD1-Katalogwerten (die wir zumeist via Aladin verwenden) ergaben sich bei Verwendung von etwa 12 Sternen pro Farbkanal mit Helligkeiten zwischen 16 und 18 mag Standardabweichungen um 0,09 mag im R-Kanal, 0,19 mag im V-Kanal und 0,28 mag im B-Kanal. Bei diesem konkreten Beispiel mag Mitursache für die Streuung der Messwerte sein, dass hierbei nicht der bevorzugte BVR-Filtersatz verwendet wurde, sondern ein RGB-Filtersatz.

#### Andere Filter

Werden andere Spektralbereiche als der sichtbare verwendet, erscheint zur Ausnutzung des darstellbaren Farbraums eine Farbkalibrierung sinnvoll, bei der ein hypothetischer G-Stern auch weiterhin weiß dargestellt wird. Es muss aber klar sein, dass es sich im Gegensatz zu der oben beschriebenen Kalibrierung mit BVR-Filtern dann um eine gewollte Falschfarbendarstellung handelt. Neben den oben bereits verwendeten Farbindizes geben wir nun für die Anwendung eines Johnson I-Filters weitere Farbindizes für einen typischen G2-Hauptreihenstern an (nach [3]):

$$\begin{array}{ll} B-V = 0,63 \text{ mag} & V-R = 0,53 \text{ mag} \\ B-R = 1,16 \text{ mag} & V-I = 0,86 \text{ mag} \\ B-I = 1,49 \text{ mag} & R-I = 0,33 \text{ mag} \end{array}$$

#### Rötung durch Staub in der Blickrichtung

Befindet sich in der Blickrichtung zum beobachteten Objekt interstellarer Staub, kommt es in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Sternlichtes zu Streuung und Absorption. Diese Prozesse führen insgesamt zu einer „Rötung“, d.h. zu einer vermehrten Abschwächung des kurzwelligen Lichtes im Vergleich zum langwelligen Licht. Die bisher beschriebene Farbkalibrierung führt auch in diesem Fall zu einer Darstellung, wie ein „überempfindlich“ aber mit unveränderter Farbcharakteristik reagierendes Auge die durch diesen Staub veränderten Sternfarben sehen würde.

Dieses Verfahren kann aber auch erweitert werden, indem eine Farbdarstellung errechnet wird, die einem Objekt entspräche, wenn zwischen ihm und uns kein Staub läge. Dann entnimmt man aus einem Katalog den „Rötungsindex“, der für den Blick in eine bestimmte Himmelsrichtung gilt [4]. Bei einem hinreichend kleinen Gesichtsfeld (resultierend aus langer Brennweite und nicht zu großer Chipfläche) kann der staubfilterabhängige Rötungsindex in erster Näherung als konstant für das gesamte Bild angenommen werden, z.B.  $x$  mag Schwächung im B-Filter und  $y$  mag im V-Filter, beides gegenüber dem R-Filter. Um jetzt die geröteten G-Sterne wieder weiß aussehen zu lassen, kann man direkt nach Schritt 2 (und somit vor Schritt 3)  $K_{B-Gcal}$  mit  $2,512^x$  multiplizieren und den  $K_{V-Gcal}$  mit  $2,512^y$ .

### **Vergleich zur Farbkalibrierung mit Hilfe von G2-Sternen**

Mit der Farbkalibrierung einer CCD-Aufnahme anhand bekannter Helligkeiten von Feldsternen haben wir jetzt eine zweite Methode neben der Farbkalibrierung mit Hilfe von G2-Sternen direkt im Bildfeld [1, 2] vorgestellt, die ebenfalls auf der Grundannahme basiert, dass für uns ein G2-Stern eine weiße Farbe hat. Werden beide Verfahren auch zuverlässig identische Resultate liefern? Wegen der oben beschriebenen Rötung durch Staub in der Sichtlinie nicht!

Der typische „Fingerabdruck“ eines G2-Sterns in seinem Linienspektrum wird durch Staub in der Sichtlinie nicht verwischt. Daher wird ein G2-Stern unabhängig von der dazwischen liegenden Staubmenge immer als solcher erkannt und bei der Farbkalibrierung mit Hilfe von G2-Sternen deshalb auch immer weiß kalibriert. Der Einfluss des zwischen Erde und G2-Stern liegenden Staubes auf das gesamte Bild wird somit durch diese Art der Kalibrierung eliminiert, die im Feld liegenden nicht geröteten Sterne werden in ihrer Farbe allerdings blauer.

Das Wegrechnen der staubbedingten Rötung erfolgt nicht bei der jetzt vorgestellten Farbkalibrierung einer CCD-Aufnahme anhand bekannter Helligkeiten von Feldsternen. Durch Staub in der Sichtlinie wären die Farbindices auch eines im Bild befindlichen G2-Sterns gegenüber den oben aufgeführten Standardwerten [3] verschoben und die Farbkalibrierung unter Verwendung von Feldsternen mit diesen Standard-Farbindices würde diesem G2-Stern eine rötliche Farbe zuordnen – genau wie ein „überempfindlich“ reagierendes Auge, das mit unveränderter Farbcharakteristik ebenfalls die staubveränderte Farbe des G2-Sterns sehen würde. Wollte man mit diesen beiden Verfahren zu identischen Farbdarstellungen kommen, müsste entweder bei der Farbkalibrierung mit Hilfe eines G2-Sterns gemäß [3] die staubbedingte Rötung in das Bild „hineingerechnet“ oder bei der Farbkalibrierung mit Hilfe von Feldsternen die staubbedingte Rötung rechnerisch eliminiert werden. Wir können je nach Fragestellung beiden Farbgebungen einen physikalischen Sinn abgewinnen, sie sollten nur auch jeweils eindeutig in der Bildlegende benannt sein. Ist nämlich der zur Kalibrierung verwendete G2-Stern selbst Teil des eigentlich interessierenden Objektes, und unterliegt er bei einem winkelmäßig hinreichend kleinen Objekt somit in erster Näherung denselben staubbedingten Einflüssen wie das Objekt selbst, so stellt die G2-Stern-basierte Farbkalibrierung die Objektsterne durch die Elimination der staubbedingten Rötung auch in ihren Spektraltyp-typischen Farben dar. Wird hingegen ohne weitere Anpassungen die Farbkalibrierung mit Hilfe von bekannten Helligkeiten von Feldsternen durchgeführt, so sind die Farben im Bild Ausdruck sowohl der Physik des beobachteten Objektes wie auch der Einflüsse, die das Licht auf seinem Weg zur Erde modifizieren.

### **Vergleich mit ähnlichen Verfahren**

Seit dem Abfassen unseres Artikels über die Farbkalibrierung mit Hilfe von G-Sternen sind inzwischen fast 6 Jahre vergangen [1, 2]. Die jetzt beschriebene Methode entstand als uns logisch erscheinende Erweiterung bereits 2007, quasi in „einem Rutsch“ mit der ursprünglichen G-Stern-Methode und wird seitdem auch von uns angewendet. In der Zwischenzeit wurden ähnliche

Erweiterungen der G-Stern-Methode von Andreas Rörig [5] und Bernhard Hubl [6] vorgeschlagen, die ebenfalls von der Grundannahme ausgehen, dass ein nicht durch interstellaren Staub beeinflusster G2-Stern auf einer Farbaufnahme weiß erscheinen soll.

Im Vergleich zu den Verfahren dieser beiden Autoren, die unzweifelhaft ebenfalls einen großen Schritt in Richtung auf ein „farbrichtiges“ Bild genommen haben, und deren exzellente Bildresultate unter anderem auch in der Mailingliste der Fachgruppe Astrofotografie große Beachtung finden, sehen wir folgende Vorteile für das hier vorgestellte Verfahren:

Andreas Rörig [5] geht davon aus, dass von einem zur Kalibrierung benutzten Stern nur der B-V-Index bekannt sein muss, der dann bereits die R-Intensität eindeutig festlegt. Daher misst er in seinem Programm Regim den B- und den V-Kanal ein, verzichtet aber auf ein Einmessen des R-Kanals. Diese Annahme ist aber nur annäherungsweise korrekt. So haben ein K2-Hauptreihenstern und ein G5-Riesenstern der Helligkeitsklasse III beide ein B-V von 0,92 mag, jedoch ein unterschiedliches V-R von 0,74 bzw. 0,69 mag. Größer noch ist die Abweichung im R-Kanal zwischen einem M3-Hauptreihenstern und einem M5-Riesenstern: Ihr B-V ist mit 1,55 mag zwar identisch, ihre V-R-Indizes betragen jedoch 1,60 bzw. 2,18 mag. Da aber beim Einmessen der B- und V-Helligkeiten die Luminanzklassen der jeweiligen Sterne nicht bekannt sind, gehen diese Differenzen im Rotkanal unweigerlich in die Farbgebung als Ungenauigkeiten mit ein.

Bernhard Hubl [6] benutzt ebenfalls zumeist den NOMAD1-Katalog. Zur Kalibrierung sind in seiner Variante aber nicht alle Sterne im Bildfeld geeignet, sondern nur diejenigen, deren B-V-Index zwischen 0,6 mag und 0,7 mag liegen sowie gleichzeitig deren V-R-Index zwischen 0,2 mag und 0,6 mag. Die Farben dieser Sterne werden dann weiß dargestellt. Durch dieses Auswahlkriterium wird die Anzahl der zur Kalibrierung verfügbaren Sterne im Sichtfeld deutlich gemindert. Vor allem aber erscheinen uns die resultierenden Ungenauigkeiten unnötig hoch im Farbverhältnis zwischen B und V mit 0,1 mag, entsprechend einer in der resultierenden Farbdarstellung vernachlässigten Intensitätsabweichung von 10%, und insbesondere zwischen V und R mit 0,4 mag, entsprechend einem derselben Farbe zugeordneten „Intensitätskorridor“ von 45%.

### **Ausklang**

Natürlich kann man auch durch Drehen an Farbgablern in einem bekannten Grafikprogramm ästhetisch schöne Bilder erzielen, und das sicherlich schneller als mit der vorgestellten Methode. Wenn man aber in einer CCD-Aufnahme Farben sehen will, die eine sinnvolle und für uns auch spannende Geschichte zur Physik der beobachteten Objekte erzählen können, zeigt die hier vorgestellte Methode einen Weg auf, der hierfür geeignete und reproduzierbare Ergebnisse liefert und gleichzeitig auch Rücksicht nimmt auf die Farbwahrnehmung des unter dem G2-Stern Sonne geborenen Lebewesens Homo sapiens, für den G2-Sterne im Zenit weiß erscheinen.

### **Quellen**

- [1] Harald Tomsik und Peter Riepe: Farbkalibration einer CCD-Aufnahme mit Hilfe von G-Sternen, Teil 1. VdS-Journal Nr. 25, Seite 57-60.
- [2] Harald Tomsik und Peter Riepe: Farbkalibration einer CCD-Aufnahme mit Hilfe von G-Sternen, Teil 2. VdS-Journal Nr. 26, Seite 50-53.
- [3] Handbook of Space Astronomy & Astrophysics, Martin V. Zombeck, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1990, S 68-70.
- [4] David J. Schlegel et al. (1998). Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds, *Astrophys. J.* 500, 525
- [5] Andreas Rörig: Regim Benutzerhandbuch Stand 17.12.2011, <http://www.andreasroerig.de>
- [6] Bernhard Hubl: B-V Farbkalibrierung von RGB-Aufnahmen mittels Aladin Filter. Eine Anleitung von Bernhard Hubl, 30.01.2009. [http://astrofotografie.fg-vds.de/artikel/pdf/b\\_v\\_hubl.pdf](http://astrofotografie.fg-vds.de/artikel/pdf/b_v_hubl.pdf)