

Über die Abhängigkeit des photometrischen Fehlers und die Notwendigkeit der Farb-Kalibration in der Integralphotometrie

Thilo Bauer

Abstract: *Light curves of variable stars are often composed of observations from different observers and taken within one single spectral range, like a monochrome bandpass filter. It is outlined, that misfit of the several data will arise, because color calibration is not applied to photometric devices. Stellar photometry in one single color band will mean large uncertainty about errors. This is even true, if magnitudes appear to have found a small error from the scatter of the light curve. The work presents RGB color observations of the open stellar clusters NGC 1907 and NGC 7235 taken with a Canon digital single lens reflex camera (DSLR) and a 20 cm Cassegrain telescope. Stellar fields are a good test case to demonstrate dependencies between color calibration and the photometric error. Without color calibration of the photometric device, instrumental errors may reach 0.1 mag for v and 0.8 mag for the b-v color index. The scale of these errors clearly indicates the importance and need for color calibration with serious stellar photometry. DSLR cameras are sound photometric devices for precise stellar photometry. For the first time, it is shown, that DSLRs can be calibrated well to the Johnson-Cousins BVRc photometric standard system.*

Einleitung

Lange bevor die Integralphotometrie standardisiert wurde, war sie unter anderem in der deutschsprachigen Literatur recht umstritten (*Brill, 1942; Becker, 1946*). Diskussionspunkte waren vor allem inhaltlicher Art, etwa welche Probleme sich in den Messungen und aus dem Vergleich der Farbsysteme ergeben oder welche Merkmale ein geeignetes photometrisches System für die Integralphotometrie überhaupt aufweisen sollte. Einen Überblick über die Anwendungen der Integralphotometrie gibt *Struve (1963)*. Die heute genutzten, photoelektrischen Standards konnten sich mit den technischen Möglichkeiten rasch weiter entwickeln. Aktuelle Farbsysteme sind jedoch eher historisch begründet, als von der Debatte um ideale Anforderungen bestimmt. Anwendungen sind vor allem die Stellarstatistik von Offenen und Kugelhaufen sowie der in Einzelsterne aufgelösten, nahen Galaxien.

Obwohl die photoelektrischen Systeme heute standardisiert erscheinen, bringt jeder Detektor und jedes Observatorium ein eigenes instrumentelles, photometrisches Farb-System mit sich, für das gewisse Anstrengungen unternommen werden müssen, dieses auf eine gemeinsame Basis zu beziehen. Die Angleichung der verwendeten photoelektrischen Detektoren erfolgt mittels Farbkalibration auf ein gewähltes Bezugssystem, z. B. bezogen auf Johnson-Morgan (*Johnson & Morgan, 1953*) oder Johnson-Cousins (*Bessell, 1979; Cousins, 1981*), welche mittels bodengebundenen Beobachtungen erarbeitet wurden. Mit Satellitenbeobachtungen kamen neue photometrische Systeme hinzu. Für die Satellitenbeobachtung entworfene Farbsysteme können aus diversen Gründen hinsichtlich der astronomischen Interpretation der Ergebnisse mit den Farbsystemen für boden-gebundene Beobachtungen naturgemäß nicht ohne weiteres verglichen werden – und dürfen vor allem auch nicht auf naive Weise miteinander vermischt werden.

Bei der Beobachtung veränderlicher Sterne in Kugelhaufen mittels Super-Resolution erlangte die Frage nach der Farbkalibration des verwendeten Detektorsystems eine gewisse Bedeutung im BAV Rundbrief (*Bauer, 2012*). Am Farben-Helligkeits-Diagramm des Kugelhaufens M13 wurde gezeigt, dass die mittels Super-Resolution im Sub-Pixel Bereich gefundenen Sterne realistische Magnituden der Sternhelligkeiten ergeben. Die Farbkalibration wurde anhand zweier Einzelsterne des Kugelhaufens durchgeführt, die vom Farbindex sehr unterschiedlich gewählt waren. Während eine solche Transformation von Farbindizes und Magnituden anhand zweier Einzelsterne recht trivial erscheint, blieb offen, inwieweit die erhaltene Farbkalibration mit lediglich zwei Sternen genau genug sein würde. Effekte wie Linearität der verwendeten DSLR und der Spektralbereiche blieben ungeklärt.

Geeignete Referenzsysteme

Zur Bewertung des Erfolgs einer Farbkalibration sind systematische Auswertungen von geeigneten Sternfeldern erforderlich. Es sollen hier die folgenden Referenz-Standards betrachtet werden: Die Landolt-Sequenz (*Landolt, 1973*), die internationale Polsequenz (*Hnatek, 1917*), die Auswahl weißer Zwerge als Vergleichslichtquelle (*ESO, 2010*), sowie die Methode der Verwendung Offener Sternhaufen zur Kalibration der Kamera. Eine Orientierungshilfe vermittelt die Tabelle 1.

Betrachtet man die verschiedenen Referenzsysteme, so ergeben sich einige Probleme aus deren Verwendung. Weiße Zwerge bieten zwar eine präzise Kalibration des Lichtflusses, scheiden jedoch für die Farbkalibration aus, da sie nur einen schmalen Bereich von Sternfarben abdecken. Neben der atmosphärischen Extinktion ist an suburbanen Standorten auch eine variable Aufhellung des Himmelsuntergrundes festzustellen. Der Himmel erscheint einer Farbkamera nicht grau, sondern durch künstliche Beleuchtung orange getönt in einer Astrofotografie. So kann bei der Durchmusterung großer Felder, die mehrere Aufnahmen in unterschiedlichen Regionen des Himmels erfordern, wie etwa nach Landolt, ein Farbgradient des Himmels die Farbphotometrie weit auseinander liegender Regionen beeinflussen. Ferner haben die Landoltfelder für die Beobachtung in unseren Breiten generell den Nachteil, dass es sich größtenteils um Sternfelder handelt, die nahe dem Himmelsäquator stehen. So wird die Messung des Verlaufs der atmosphärischen Extinktion auf Basis der Landoltfelder für einen Beobachtungsstandort in Mitteleuropa nicht für jede Höhe über dem Horizont möglich sein. Ähnliche Probleme ergeben sich bei der internationalen Polsequenz, die auf einem inzwischen als veraltet geltenden System basiert, das vom *UBVRI*-System abgelöst wurde.

Der Vorschlag, Offene Sternhaufen für die Farbkalibration eines Detektors zu nutzen, wird bereits in der BAV Einführung beschrieben (*Geyer et. al., 2009*). Die in der BAV Einführung dargestellten Beispiele und Transformationen der Farbenhelligkeiten in *B*, *V* und *I* sind für diesen Zweck jedoch wenig praxistauglich. Moderne DSLRs, digitale Kompaktkameras oder gekühlte RGB-CCD-Kameras sind in den Farbbereichen Blau, Grün und Rot empfindlich. Instrumentelle Helligkeiten in *b*, *v* ($=g$) und *r* entsprechen daher am ehesten den Farbindizes *B*, *V* und *R*. Die Beobachtung Offener Sternhaufen erscheint einfacher, als die Durchmusterung der Landolt-Sequenz, da der Beobachtungsaufwand geringer ist. Mit Offenen Haufen, die für den Beobachtungsstandort nahe dem Zenit kulminieren, ließe sich die atmosphärische

Extinktion für alle Höhen messtechnisch erfassen. Nachteilig bei den Offenen Haufen ist, dass sie selbst stets nur eine sekundäre Referenzquelle darstellen, welche in der Regel über einen anderen, primären Standard (meist Landolt) kalibriert wurden. Hier schließt sich die Frage an, inwieweit man bewerten kann, ob die Katalogangaben eines Sternhaufens von guter oder schlechter Qualität sind. Der Vergleich der Daten verschiedener Haufen untereinander könnte hierbei helfen Fehler und Systematiken in den Referenzen aufzudecken und zu bewerten.

Referenzsystem	Plus	Minus
Landolt Felder	anerkanntes Referenzsystem	erfordert Korrektur der Luftmassen; geringe Zahl von Sternen pro Feld; aufwändig
Int. Posequenz	Großer Helligkeitsbereich	Großes Feld; Korrektur der Luftmassen erforderlich; aufwändig; veraltetes System
Weißer Zwerge (Quelle z.B. ESO)	Stabile Lichtquelle, (es sind auch variable weiße Zwerge bekannt)	Nur zwei Sterne in nördl. Breiten; nur ein Spektraltyp verfügbar; ungeeignet für Farbkalibration
Offene Haufen	Viele Sterne mit weitem Bereich des Farbindex (~2 mag); Haufen passt meist auch bei längeren Teleskop-Brennweiten auf eine einzelne Aufnahme	Qualität der Katalogangaben variiert u.U. (siehe Text); es handelt sich um sekundäre Referenzen; Bestimmung der atmosphär. Extinktion möglich (Luftmassenkorrektur)

Tabelle 1: Bewertung ausgewählter photometrischer Standards

Auswahl und Umrechnung der Referenzsysteme

Eine Möglichkeit, photometrische Referenzdaten zu recherchieren, bietet der Internet Dienst WEBDA (Pauzen, 2008). WEBDA ist eine Datenbank, in der für Offene Sternhaufen der Milchstraße bzw. der Magellanschen Wolken photometrische Helligkeiten, Finding Charts und andere Daten zusammen getragen sind. WEBDA bietet verschiedene Abfragemöglichkeiten, um Helligkeiten der Sterne zu extrahieren. Unter anderem ist auch die Möglichkeit gegeben, gezielt nach Sternhaufen zu suchen, für welche Daten eines bestimmten, photometrischen Standards existieren. Grundlage bilden fotografische, photoelektrische und CCD-Beobachtungen in verschiedenen Farbsystemen. Die Datenbasis ist naturgemäß nicht homogen. Bei der Auswahl geeigneter Kalibrationssterne gilt zu beachten, dass *R* und *I* Magnituden kritisch sind, da sie ohne besondere Benennung verschiedene Farbsysteme bedeuten. Die beiden *R*-Filter des Johnson bzw. Cousins Systems liegen so versetzt, dass das Johnson *R*

Band zwischen den R_c und I_c Filtern des Cousins Systems liegt. *Cousins (1981)* berichtet, dass der Johnson Nullpunkt mit der Rektaszension variiert. Dies könnte Indiz für jahreszeitliche Probleme, interstellare Extinktion oder schlichtweg Anschlussprobleme bei der Kalibration sein.

Hin- und Rücktransformation zwischen Cousins $V-R_c$ und Johnson $V-R$ beschreibt *Cousins (1981)* in gewisser Weise als problematisch. Umrechnungsformeln zwischen Johnson und Cousins sind empirisch ermittelt. Dabei sind die Messdaten entweder abschnittsweise linear oder durch einen nicht-linearen Term approximiert, wobei der Restfehler der Umrechnung mit 0.005 mag vergleichsweise gering ist. Gründe der nicht-linearen Korrekturen sind sowohl in den unterschiedlichen Filtern, als auch in den Feinheiten der Spektren der Sterne zu suchen (Riesen vs. Zwerge). Zwar ist die Umrechnung der beiden Systeme mit guter Genauigkeit möglich, doch muss man sich für eines der beiden Systeme entscheiden, um eine Kamera zu kalibrieren. Prinzipiell wäre die Auswahl des Farbsystems frei wählbar. Hierbei sollte man jedoch annehmen, dass CCD-Beobachtungen am ehesten den Magnituden der DSLRs entsprechen.

Für Deklinationen zwischen -30° und $+90^\circ$ weist WEBDA mehr als 100 Offene Haufen aus, für welche Cousins R_c Magnituden aus CCD Beobachtungen vorliegen, während lediglich zwei(!) Haufen mit Johnson R CCD Helligkeiten gelistet sind. Die Recherche spiegelt die allgemeine Bevorzugung des Johnson-Cousins Systems wieder, während das Johnson VRI System keine große Bedeutung mehr hat. Ein aktueller Überblick über die heute üblichen Farbsysteme ist bei *Bessell (2005)* zu finden. Der Beobachter darf sich also nicht vorbehaltlos auf BVR berufen, ohne das verwendete Farbsystem näher zu spezifizieren.

Es ist anzunehmen, dass sich mit der fortschreitenden Evolution der Photodetektoren die Ergebnisse der Stellarphotometrie im Laufe der Zeit systematisch verändern, da man sich quasi von einem Ergebnis zum nächsten mit einem jeweils neuen Detektor und Filtersystem hangelt. Zu solchen Effekten historisch begründeter Variabilität photometrischer Bezugssysteme liegen meines Wissens bislang kaum systematische Untersuchungen vor. Selektionseffekte, wie die oben gefundene Bevorzugung des Cousins Systems bei CCD-Beobachtungen, sind ebenfalls in diesen Kontext einzuordnen. Ferner sollte man nicht davon ausgehen, dass man mit einer modernen Kamera heute noch in der Lage wäre, die licht-elektrischen Messungen von Landolt, Johnson oder Cousins tatsächlich zu reproduzieren. Farbkalibration bedeutet also die Anlehnung an ein älteres System, welches notwendigerweise mit einem anderen Detektor gewonnen wurde. Daher ist das Gesetz der Fehlerfortpflanzung im historischen Kontext zu beachten. Der sorgfältig arbeitende Beobachter wird Messungen, welche ihm genauer erscheinen, als die veröffentlichten Fehler des Bezugssystems, das er verwendet, im eigenen Interesse stets anzweifeln müssen. Geringe, behauptete Fehler unkalibrierter Messungen sind grundsätzlich fragwürdig und wohl zu verwerfen. Dies ergibt die folgende Analyse von Beobachtungen.

Beobachtungen

Verschiedene Offene Sternhaufen wurden vom Autor in den Jahren 2008 bis 2012 mit einem 20 cm - Cassegrain mit verschiedenen DSLRs untersucht. Für die hier präsentierte, photometrische Auswertung wurden Komposita aus 32 Aufnahmen mit

30s für NGC 1907 (3. Juni 2011) bzw. 39 Aufnahmen mit 30s für NGC 7235 (7. Sept. 2012) ausgewertet, welche mit einer Canon EOS 60D gewonnen wurden. Diese DSLR ist mit Klarglas modifiziert und bietet eine erweiterte Empfindlichkeit im UV und IR. Zur Beobachtung der Sternhaufen wurde ein Astronomik UV/IR Blockfilter eingesetzt, welches an beiden Enden des sichtbaren Spektrums eine steile Flanke besitzt und verbesserte Rotempfindlichkeit bietet.

Die Sternfeldaufnahmen wurden mit gemittelten Dark, Bias und Sky-Flatfield aus jeweils 100 Einzelaufnahmen vorverarbeitet. Die Sterne wurden automatisch identifiziert und so eingegrenzt, dass nur Sterne mit einem Mindestabstand von 5" ausgewertet wurden. Damit werden Blendeffekte nahe benachbarter Sterne durch Überlappung weitgehend ausgeschlossen. Die so identifizierten Einzelsterne wurden mittels Aperturphotometrie und einem Blendendurchmesser von 4" vermessen. Der Himmelsuntergrund wurde als konstant angenommen und mittels Sigma Clipping automatisch bestimmt. In den Kompositen war visuell kein Gradient im Untergrund feststellbar.

Ausgleichsrechnung zur photometrischen Kalibration

Aus der Photometrie ergibt sich für jeden Stern ein Satz von Vektoren aus je drei Koordinaten Tripeln der instrumentellen Werte r , v , b , den Katalogwerten der Johnson-Cousins Photometrie R_c , V , B sowie den kalibrierten Werten $R_{c,c}$, V_c , B_c . Die kalibrierten Werte sind zunächst unbekannt und daher zu bestimmen. Üblicherweise wird zur Transformation zweier Farbmagnituden je ein lineares System aus zwei Gleichungen angesetzt, welches es zu lösen gilt (*Rey et al. 2001*):

$$B-V = p_1 (b-g) + p_2$$

$$V-v_0 = p_3 (B-V) + p_4$$

$$V-R_c = p_5 (g-r) + p_6$$

$$R_c-r_0 = p_7 (V-R_c) + p_8$$

v_0 und r_0 bezeichnen hier die Magnituden des (willkürlich) gewählten Referenzsterns im beobachteten Feld. Gelegentlich sind in der Literatur auch Abwandlungen der Gleichungen (*Corwin & Carney, 2001*) oder auch Taylorreihen Näherungen (*Piotto et al., 2002*) beschrieben, welche hier nicht weiter diskutiert werden sollen. Im Folgenden ergibt sich ein Satz von vier linearen Gleichungen für jeden einzelnen Stern mit den 8 Unbekannten p_1, \dots, p_8 . Da die instrumentellen Werte und die Katalogwerte der Magnituden statistisch verteilt sind, entsteht ein Gleichungssystem, für welches eine Näherungslösung für die Parameter p_i zu ermitteln ist. Die Approximation der gesuchten Parameter p_i kann nun beispielsweise über Ausgleichsrechnung mit dem Gauß-Verfahren bestimmt werden. Das Verfahren ist etwa auch bei *Bronstein & Semendjajew (1991)* beschrieben. Sind die Konstantensätze p_1, \dots, p_8 aus der Ausgleichsrechnung bestimmt, liefern die obigen Formeln aus den instrumentellen Werten b , $v(g)$, r die kalibrierten Magnituden B_c , V_c , $R_{c,c}$ für jeden Stern.

Ergebnisse

Die instrumentellen, referenzierten und kalibrierten Magnituden können auf vielfache Weise gegenüber gestellt werden, um die Farbabhängigkeit der Messungen zu studieren. Der Vergleich instrumenteller Helligkeiten mit Referenz-Magnituden von

NGC 1907 ergibt eine gute lineare Beziehung der Werte für die verwendete DSLR (Abb. 1). Auffällig ist zunächst die Doppelung der Messpunkte für die blauen Helligkeiten und eine damit verbundene Zunahme der Streuung der Werte. Ein Ausreißer der Messreihe (NGC 1907 147) zeigt mehrere enge Begleitsterne, die von der Sternidentifikation nicht als Mehrfachsystem identifiziert wurden. Mindestens ein Stern (NGC 1907 72) ist wahrscheinlicher Kandidat für Variabilität mit größerer Amplitude.

Trägt man die Differenzen instrumenteller und Referenz-Helligkeit in V gegen den Farbindex $B-V$ auf (Abb. 2, links), so deutet die Ausgleichsgerade eine Drift der V Magnituden in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des Sterns bzw. dem gemessenen Farbindex an. Dies entspricht einem Messfehler von 0.2 mag über den gesamten Farbbereich. Es ist also anzunehmen, dass die Messung von Veränderlichen ebenfalls systematisch verschobene Magnituden ergibt, falls der Spektraltyp des Veränderlichen vom Vergleichssterne abweicht. Ein Unterschied der Farbindices ist jedoch bei der Beobachtung von Veränderlichen und verwendeten Vergleichssterne eine astronomische Normalität! Die Standardabweichung besitzt hierbei eine ähnliche Größenordnung, wie der Trend mit 0.16 mag. An dieser Stelle mag man den Trend einer farbabhängigen Abweichung zunächst noch bezweifeln. Deutlicher fällt der Trend jedoch auf, den man für die kalibrierten Magnituden erhält. Gleichzeitig ist die mittlere Abweichung der kalibrierten Werte auf 1/10 der Abweichungen der instrumentellen Magnituden reduziert (Abb. 2, rechts). Betrachtet man die Abweichungen in Abhängigkeit von der Sternhelligkeit, so ergibt sich ein systematischer Versatz von 0.06 mag der instrumentellen v Magnituden.

Systematischer Versatz der Magnituden hat seine Ursache also im Unterschied der Spektraltypen der verglichenen Sterne (Abb. 3). Am deutlichsten wird der Farbfehler, wenn man die instrumentellen Farbindices mit den Referenzangaben vergleicht. Der instrumentelle Fehler für den Farbindex in $B-V$ ergibt für die Kombination aus Filter und Kamera +0.2 bis -0.8 mag. Gegenüber den Referenzhelligkeiten $V-R_c$ weichen die instrumentellen $v-r$ im Maximum ± 0.1 mag ab (Abb. 4). Das sorgfältig kalibrierte Farben-Helligkeits-Diagramm für den Haufen NGC 1907 bietet schließlich einen astronomischen Befund: Auch außerhalb der sichtbaren Konzentration liegende „Feldsterne“ scheinen noch zum Haufen zu gehören (Abb. 5, links). Die Messungen von NGC 1907 stimmen gut mit früher im BAV Rundbrief veröffentlichten Kalibrationsgleichungen für Messier 13 überein. Ein Beispiel schlechter Qualität publizierter Farbhelligkeiten ist für den Sternhaufen NGC 7235 dargestellt (Abb. 5, rechts). In diesem Falle weichen publizierte $V-R_c$ Helligkeiten von *Pigulski et al. (1997)* mehrere Magnituden von erwarteten Messungen gegenüber NGC 1907 ab. Vorsicht ist demnach bei der Auswahl der Referenzfelder selbst angebracht. Veröffentlichten Helligkeiten sollte man also nicht bedenkenlos Vertrauen schenken.

Schlussbemerkungen

Der wahre photometrische Fehler instrumenteller Magnituden ist offenbar schwer einzuschätzen und ergibt systematische Abweichungen, die für eine DSLR durchaus in der Größenordnung von 1.0 mag liegen können. Auch die Streubreite wird ohne Farbkalibration deutlich größer erscheinen. Auch für die Veränderlichen bedeutet dies, dass der wahre Fehler unkalibrierter Messungen um ein Vielfaches größer sein wird,

als eine aus dem Verlauf der Lichtkurve abgeschätzte Streubreite der Messwerte. Übertriebener Optimismus bei Fehlerangaben unkalibrierter Messungen ist also nicht angezeigt. Der Fehler resultiert aus den unterschiedlichen Spektralfarben der verglichenen Sterne. Dies erklärt, wie zwischen einzelnen Lichtkurven verschiedener Beobachter erhebliche Diskrepanzen auftreten können. Messungen in einem einzigen Farbband (Farbfilter) und ohne Korrektur der Farbfehler der Kamera sind grundsätzlich nicht zu empfehlen. Dies gilt auch für CCD-Beobachtungen oder Beobachtungen mit anderen Farbkameras, für welche der Farbfehler nicht korrigiert ist.

Eine Empfehlung muss daher lauten, unkalibrierte Messungen von Veränderlichen mit einem geringeren Gewicht zu versehen, als solche Messungen, für die eine sorgfältige Farbkalibration durchgeführt wurde. Die Farbkalibration kann man als Sortieren der Sterne nach deren Farbtemperatur auffassen. Farbkalibration bewirkt eine Reduktion der Fehlergrößen. Mit dieser Arbeit konnte erstmals auch gezeigt werden, dass DSLR-Kameras mit Hilfe geeigneter Sternhaufen gut für den Johnson-Cousins BVR_c Standard kalibriert werden können. Die verbleibenden Messfehler liegen in der Größenordnung der inneren Fehler der Referenzwerte selbst. Dennoch ergibt sich aus der Recherche auch, dass nicht jede Quelle veröffentlichter Helligkeiten von Sternen in offenen Haufen zur Kalibration geeignet ist. Bei der Beobachtung offener Haufen ist ferner davon auszugehen, dass man Veränderliche im Feld vor sich hat, welche von der Kalibration auszuschließen sind. Gelegentlich ist die Beschäftigung mit WEBDA auch lohnenswert. So ergab diese Arbeit eine Korrektur für die Finding Chart von NGC 1907. Ich möchte an dieser Stelle Ernst Paunzen für sein emsiges Bemühen um WEBDA herzlich danken.

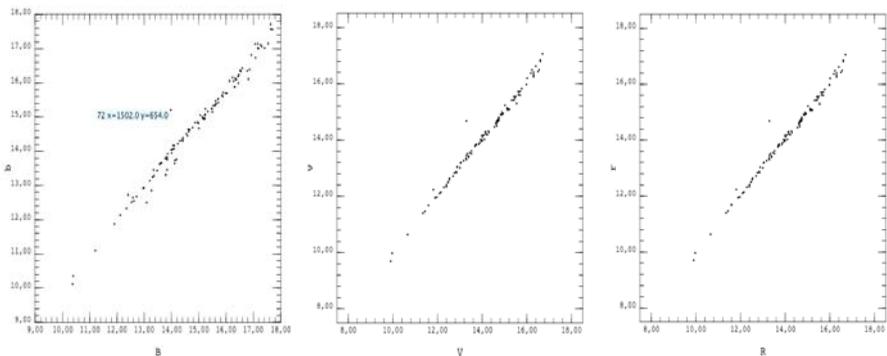


Abb. 1: Die Beziehung zwischen instrumentellen b , v , r und den Referenzmagnituden im Johnson-Cousins BVR_c System legt gutes, lineares Verhalten der Canon EOS 60D über einen Messbereich von 10 mag bis zur Grenzgröße nahe. In dieser Darstellung scheinen die instrumentellen Helligkeiten zunächst keine weitere Korrektur zu benötigen. Auffallend ist jedoch eine Verdopplung der instrumentellen b Helligkeiten und eine größere Streuung.

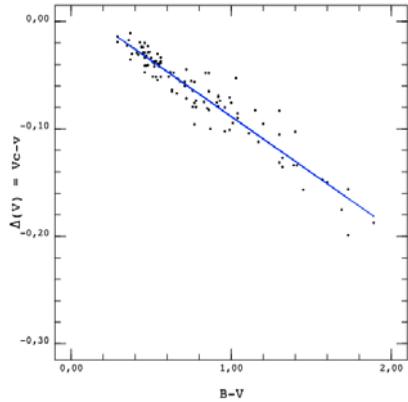
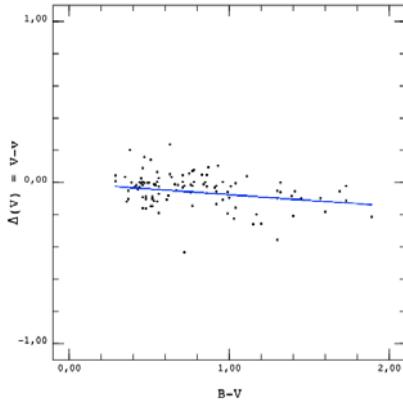


Abb. 2: *Links:* Die Ausgleichsgerade der Differenz $V-v$ zwischen Katalogwert und instrumenteller Helligkeit aufgetragen gegen den Farbindex $B-V$ deutet einen systematischen Fehler von bis zu 0.2 mag in Abhängigkeit vom Spektraltyp der Sterne an. Die Standardabweichung beträgt 0.16 mag. *Rechts:* Die Differenz zwischen kalibriertem und instrumentellem Wert zeigt den Trend des Farbfehlers deutlicher. Der Fehler beträgt 0.12 mag je Magnitude Abweichung des Farbindex $B-V$. Auffallend ist die deutlich reduzierte Streuung der kalibrierten Werte, welche mit 0.017 mag nur 1/10 der instrumentellen Streuung vom Referenzwert entspricht.

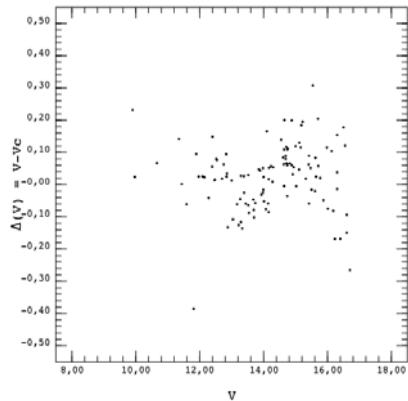
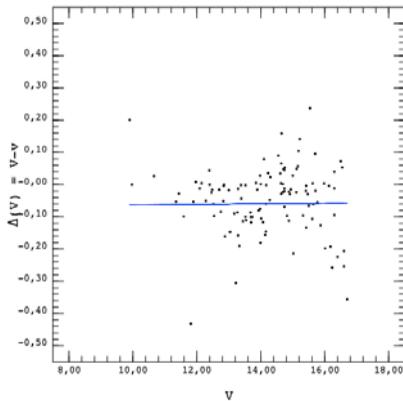


Abb. 3: *Links:* Der Vergleichsstern HD 281143 ($V=9.97$, $B-V=0.36$) ist recht hell. Der Farbfehler bewirkt jedoch einen Versatz um -0.06 mag für alle v Magnituden. Der Grund ist in der Abweichung zwischen Johnson V und grünen Spektralbereich der DSLR zu finden und hängt vom Spektraltyp des Vergleichssterne ab. *Rechts:* Mittels Farbkalibration bestimmte Helligkeiten sind symmetrisch um Null verteilt. Die Fehler

nehmen erwartungsgemäß mit abnehmender Helligkeit zu, bleiben jedoch selbst für Sterne unterhalb der 16. Magnitude vergleichsweise gering.

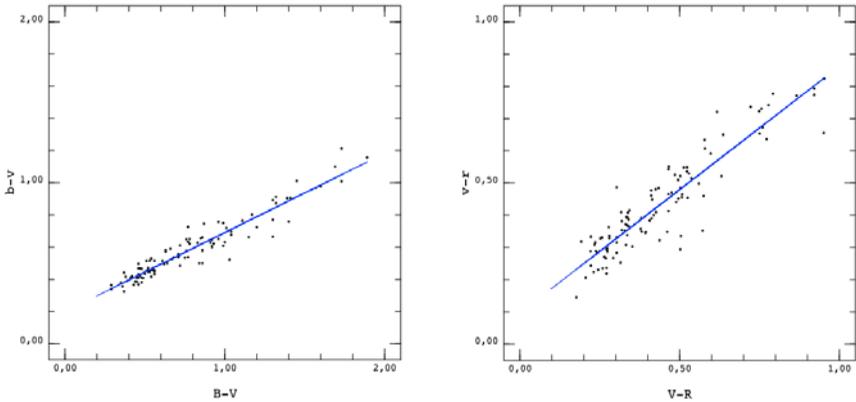


Abb. 4: Der Vergleich der instrumentellen und Referenz-Farbindizes verdeutlicht die Ursache für den Farbfehler. Die abgeflachte Beziehung des Farbindex $b-v$ entspricht einem Fehler von +0.2 bis -0.8 mag über den Messbereich! Die instrumentellen $v-r$ Farbindizes ergeben einen Farbfehler von knapp ± 0.1 mag an den Rändern des Farbbereich in $V-R_c$.

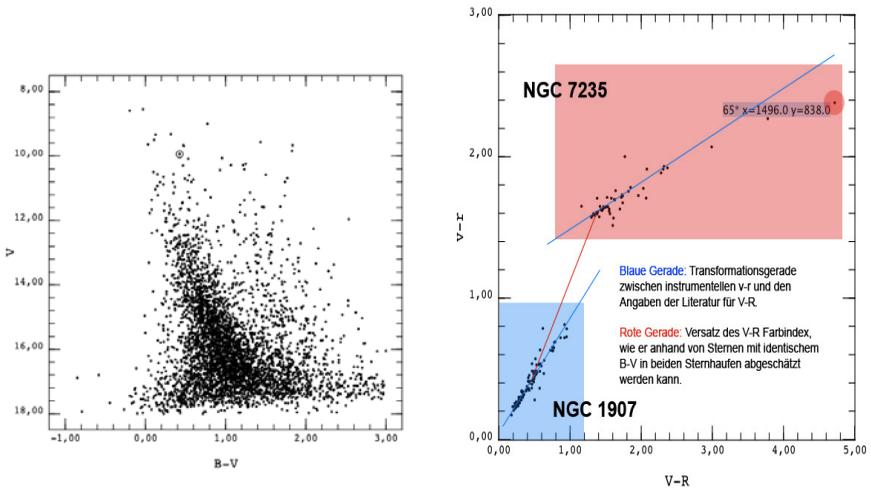


Abb. 5: Links: Das kalibrierte FHD von NGC 1907 zeigt, dass der Haufen offenbar ausgedehnter ist, als der optische Eindruck. Rechts: Cousins R_c Helligkeiten für NGC 7235 ergeben schlechte Qualität der Referenzwerte, welche auf erhebliche Kalibrationsfehler der Publikation zurückzuführen ist (Pigulski et al., 1997).

Literatur

- Becker, W., 1946. Veroeff. d. Universitaets-Sternwarte zu Goettingen, Vol. 5, 159-172.
- Bessell, M. S., 1979. PASP, 91, 589-607.
- Bessell, M. S., 2005. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 43, 1, 293-336
- Brill, A., 1942. Astronomische Nachrichten, Vol. 272, 166.
- Bronstein, I. N., Semendjajew A., 1991. Taschenbuch der Mathematik.
- Cousins, A. W. J., 1981. MNRAS. Southern Africa, Vol. 40, 37.
- Corwin & Carney, 2001. AJ, 122, 3183.
- ESO, 2010. <http://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra.html>
- Geyer, E. H.; et al.; 2009. BAV Einführung, ISBN 978-3-00-028465-6.
- Hnatek, A., 1917. Astronomische Nachrichten, Vol. 204, 5.
- Johnson, H. L.; Morgan, W. W., 1953. AJ, 117, 313.
- Landolt, A. U., 1973. AJ, 78, 959.
- Paunzen, E.; 2008. WEBDA - a tool for CP star research in open clusters. Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, vol. 38, no. 2, 435-436.
- Pigulski A., Jerzykiewicz M., Kopacki G, 1997. Acta Astron.. 47, 365.
- Piotto et al., 2002. A&A 391, 945-965.
- Rey et al., 2001 AJ, 122, 3219.
- Struve O.; 1963. Astronomie – Einführung in ihre Grundlagen. de Gruyter, Berlin.
- URL des Internet-Dienstes WEBDA: <http://www.univie.ac.at/webda/>