



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Chemische Anomalien am Blauen Horizontalast von Kugelsternhaufen

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Verfasser:	Hubert Baum
Matrikel-Nummer:	9804620
Studienrichtung (lt. Studienblatt):	A413 Astronomie
Betreuer:	Ao. Univ.-Prof. i.R. tit. Univ.-Prof. Dr. Hans Michael Maitzen

Wien, am 11. Oktober 2008



M13 aufgenommen von Noel Carboni

Danksagung

Der Dank für die Unterstützung während des ganzen Studiums und insbesondere beim Schreiben der Diplomarbeit gebührt meiner Familie und meinen Freunden. Für die wissenschaftliche Unterstützung und Hilfe beim Erstellen der Diplomarbeit möchte ich meinen Kollegen danken. Insbesondere gilt mein Dank Ernst Paunzen und Hans Michael Maitzen für die Zeit, die Sie sich genommen haben, und deren Betreuung. Klaus-Dieter Herbst für die Zeit und Mühe mir die Ephemeriden von Gottfried Kirch zugänglich zu machen, Frank Grundahl für die Übermittlung seiner Messdaten, um die Korrelation vom Δa -System in das Strömgrensystem zu ermöglichen, und Noel Carboni für die Erlaubnis, sein Bild von M13 als Deckblatt zu verwenden, möchte ich hiermit ebenfalls meinen Dank aussprechen. Zum Schluß seien allen Personen gedankt, welche ich in meiner Auflistung vergessen habe, welche aber auf die eine oder andere Weise zum Gelingen meines Studiums und meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Historisches zur Erforschung von Kugelsternhaufen	1
1.1	Anfänge der Erforschung von Variablen Sternen in Kugelsternhaufen . . .	2
1.2	Shapleys Arbeit mit Kugelsternhaufen	6
1.3	Die Erforschung von Messier 13	8
2	Historisches zur Erforschung von chemisch peculiaren Sternen	10
2.1	Anfänge der Erforschung von Spektren	10
2.2	Anfänge der Spektralklassifikation	14
2.3	Entdeckung und Erforschung von chemisch peculiaren Sternen	15
3	Kugelsternhaufen	17
3.1	Bedeutung von Kugelsternhaufen für die Wissenschaft	17
3.2	Das galaktische Kugelsternhaufensystem	17
3.2.1	Farb-Helligkeits-Diagramm	18
3.2.2	Entfernungsbestimmung	22
3.2.3	Altersbestimmung	24
3.2.4	Das Problem des zweiten Parameters	28
3.2.5	Metallizitätsverteilung von galaktischen Kugelsternhaufen	30
4	Chemisch peculiare Sterne am blauen Horizontalast	33
4.1	Spektroskopische Untersuchungen an blauen Horizontalaststernen	33
4.2	Diffusionsmechanismus	36
4.3	Photometrische Besonderheiten von blauen Horizontalaststernen	37

4.4	Das Δa System	38
5	Die Messung von M13 im Δa-System	42
5.1	Objektauswahl und Aufnahmegewinnung	42
5.2	Korrektur der Aufnahmen und Photometrie mit IRAF	44
5.3	Mittelung der Daten und Fehlerrechnung	50
5.4	Auswertung der Daten	54
6	Interpretation und Ausblick	64
	Anhang	I
A	Tabelle der Photometrie	I
B	Johnsonkorrelationen	XVII
C	Abkürzungsverzeichnis	XIX
D	Zusammenfassung	XX
	Literaturverzeichnis	XXI

1 Historisches zur Erforschung von Kugelsternhaufen

Im 17. Jahrhundert wurden Kugelsternhaufen noch als nebelartige Gebilde beschrieben, da deren tatsächliche Gestalt mit den damaligen Mitteln noch nicht aufgelöst werden konnte. Die erste Entdeckung eines Kugelsternhaufens ist vermutlich Abraham Ihle 1665 gelungen und erstmals in den Ephemeriden von Gottfried Kirch veröffentlicht worden.¹ Kirch vermerkt in seinem Bericht, dass Johannes Hevelius dieses Objekt, es handelt sich hierbei um das Messier Objekt 22 (M22), schon früher entdeckt habe, aber dies konnte nicht verifiziert werden ².

Die erste bedeutende Sammlung solcher Objekte in Form eines Katalogs erfolgte durch Charles Messier. Veröffentlicht wurde dieser Katalog 1771 in den *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* unter dem Titel: *Catalogue des Nébuleuses & des amas d'Etoiles, que l'on découvre parmi les Étoiles fixes sur l'horizon de Paris; observées à l'Observatoire de la Marine, avec differens instruments* [41]. Dieser erste Katalog enthielt 45 nebulöse Objekte, von denen 14 Kugelsternhaufen sind. Zu diesem Katalog wurden von Messier noch zwei Erweiterungen in den *Connoissance de Temps* für 1783 und für 1784 [42, 43] veröffentlicht. Mit den Erweiterungen wuchs die Zahl der Kugelsternhaufen in Messiers Katalog auf 28. Die Objekte M104 bis M107 sind nicht in dem von Messier veröffentlichten Katalog samt Erweiterungen enthalten, sondern gehen auf einen Brief von Pierre François André Méchain an Bernoulli, veröffentlicht in Johann Elert Bodes

¹„Sed verè nebulosæ tres ab Astrophilis animadversæ sunt : [...] & tertia in Sagittario,qvam Dn. Joh.

Abrah. Ihle Anno 1665. deprehendit;“ [28]

²vgl. H. Schultz 1866 [58]

Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1786, zurück, in welchem Méchain über die Beobachtungen dieser Objekte schreibt.³ Da in diesen zusätzlichen Objekten ein Kugelsternhaufen enthalten ist, steigt die Anzahl der Kugelsternhaufen, welche dem Messierkatalog zugerechnet werden können, auf 29.

In William Herschels⁴ *Catalogue of a second Thousand of new Nebulæ and Clusters of Stars; with a few introductory Remarks on the Construction of the Heavens* [25] wird der Ausdruck kugelförmig (englisch globular) geprägt. In diesem Katalog beschreibt Herschel das optische Erscheinungsbild von Kugelsternhaufen⁵ und erläutert, dass diese Objekte aus kugelförmig angeordneten Sternen bestehen⁶. Zusammen mit dem ersten Teil [24], welcher 1786 erschienen ist, entdeckte Herschel 35 Kugelsternhaufen.

1.1 Anfänge der Erforschung von Variablen Sternen in Kugelsternhaufen⁷

Kugelsternhaufen führten in der damaligen astronomischen Forschung eine Art Schattendasein, da diese Objekte nur in ihrer Anzahl gezählt wurden und als optisch schöne

³vgl. O. Gingerich 1953 [15]

⁴Die meisten Kugelsternhaufen konnten erst mittels der Teleskope, die William Herschel entwickelt hatte, in Sterne aufgelöst werden. (vgl. H. Shapley 1917 [64])

⁵„If we have drawn proper conclusions relating to the size of stars, we may with still greater safety speak of their relative situations, and affirm that in the same distances from the center an equal scattering takes place. If this were not the case, the appearance of a cluster could not be uniformly encreasing [sic!] in brightness towards the middle, but would appear nebulous in those parts which were more crowded with stars; but, as far as we can distinguish, in the cluster of which we speak, every concentric circle maintains an equal degree of compression, as long as the stars are visible; and when they become to crowded to be distinguished, an equal brightness takes place, at equal distances from the center, which is the most luminous part.“ [25, Seite 217]

⁶„And thus [...] we come to know that there are globular clusters of stars nearly equal in size, which are scattered evenly at equal distances from the middle, but with an encreasing [sic!] accumulation towards the center.“ [25, Seite 218]

⁷Die folgende Darstellung der Erforschung von Kugelsternhaufen orientiert sich an H. A. Smith 2000 [67].

Objekte galten, aber ihnen keinerlei physikalische Bedeutung beigemessen wurde. Dies änderte sich erst, als Edward C. Pickering 1889 den zweiten variablen Stern⁸ in einem Kugelsternhaufen – später klassifiziert als Cepheide⁹ – nahe dem Zentrum von M3 entdeckte. Diese Entdeckung von Pickering erfolgte mittels Photographie, einer damals noch recht jungen Technik in der Astronomie. Darauf folgten in den nächsten Jahren einige weitere Entdeckungen von Variablen in Kugelsternhaufen. Eine ausführliche Beschäftigung mit und Beschreibung von Variablen erfolgte erst, als mit regelmäßigen photographischen Aufnahmen von Kugelsternhaufen auf der Außenstation des Harvard College Observatoriums in Arequipa (Peru), begonnen wurde. Solon Irving Bailey war im Jahre 1889 von Pickering, dem damaligen Leiter des Harvard College Observatoriums, nach Peru geschickt worden, um bei der instrumentellen Ausstattung vor Ort behilflich zu sein. Nach zweijährigem Aufenthalt kehrte Bailey nach Harvard zurück und ging 1893 als neu eingesetzter Assistenzprofessor wieder nach Peru. Das Photographieren von Kugelsternhaufen (13-inch Boyden Teleskop) war zu dieser Zeit Teil des Beobachtungsprogramms auf Arequipa. Im August 1893 entdeckte Williamina Fleming einen variablen Stern in ω Centauri auf Photoplaten von Arequipa. Wenige Tage später fand Pickering im selben Kugelsternhaufen einen weiteren variablen Stern, in 47 Tucanae entdeckten Bailey und Fleming jeweils drei Variable. Im Februar 1895 wurden von Pickering in ω Centauri noch sechs weitere variable Sterne entdeckt.

Mit steigender Zahl der Entdeckungen wurde Bailey und Pickering klar, dass die Photographie bei der großen Anzahl vorhandener Variabler in Kugelsternhaufen ein geeignetes Mittel zur Identifizierung dieser sei. Daraufhin wurden immer mehr photographische Aufnahmen von Kugelsternhaufen gefertigt. Zwischen 1895 und 1898 stieg die Zahl der

⁸Der erste variable Stern in einem Kugelsternhaufen wurde 1860 in M80 entdeckt und später als Nova klassifiziert.

⁹Bei den Sternen, die als Cepheiden in Kugelsternhaufen klassifiziert worden sind, handelt es sich jedoch um W Virginis Sterne. Diese beiden Sterngruppen weisen ähnliche Eigenschaften auf und liegen im Hertzsprung-Russel-Diagramm nahe beinander. Bei W Virginis Sternen handelt es sich um Population II Sterne, Cepheiden sind Population I Sterne, dieser Sterntyp findet sich jedoch nicht in Kugelsternhaufen. Im folgenden wird die Bezeichnung Cepheide beibehalten.

bekannten Variablen durch die Arbeit von Bailey auf ungefähr 500. Etwa gleich viele variable Sterne waren damals außerhalb von Kugelsternhaufen bekannt. Bis auf diejenigen wenigen Sterne, die bereits als Cepheiden klassifiziert worden waren, wurden die restlichen variablen Sterne zunächst den sogenannten Haufenvariablen (englisch cluster-type variables) zugeordnet, später bezeichnet als RR-Lyrae.

Baileys Methode zur Auffindung variabler Sterne war sehr erfolgreich. Wenn man die gefundenen variablen Sterne in ihrer Anzahl mit dem 1973 von Helen Sawyer Hogg veröffentlichten *Third catalogue of globular cluster variables* [26] vergleicht, so hatte Bailey schon 61% beziehungsweise 72% der variablen Sterne in M3 und ω Centauri gefunden.

1899 veröffentlichte Bailey einen kurzen Bericht über variable Sterne in M5. Dieser ersten Publikation folgten weitere kurze Abhandlungen über andere Kugelsternhaufen. Weiters veröffentlichte Bailey auch vier lange Abhandlungen in den Annalen des Harvard College zwischen 1902 und 1919. Diese Arbeiten gehen im Detail auf die Variablen in den Kugelsternhaufen ω Centauri, M3, M5 und M15 ein, welche eine große Anzahl variabler Sterne enthalten.

In seiner Arbeit über ω Centauri (erschienen 1902) beschreibt Bailey 128 Variable, welche auf 124 Photoplaten vermessen wurden. Für 95 davon konnte er sichere Perioden bestimmen, während für weitere 20 nur eine unsichere Bestimmung möglich war. Die Mehrheit dieser Sterne waren Haufenvariable, fünf Sterne waren langperiodische Cepheiden.

Die aus den Cepheiden abgeleitete Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zur Entfernungsbestimmung wurde erstmals 1908 von Henrietta Leavitt vorgeschlagen und 1912 von ihr in eine endgültige Form gebracht. Bailey wäre in der Lage gewesen, die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung aus den fünf in seiner Arbeit über ω Centauri beschriebenen Cepheiden abzuleiten. Allerdings sind nur drei Cepheiden in dieser Abhandlung mit sicheren Perioden bestimmt. Aufgrund der großen Anzahl von gefundenen Haufenvariablen und der damaligen Vorgehensweise, nur eine Art Datensammlung zu veröffentlichen,

ist es nachvollziehbar, dass Bailey diese Beziehung nicht entdeckte.¹⁰

1913 verwendete Henry Norris Russell die statistische Parallaxe von 13 relativ nahen Cepheiden um deren absolute Helligkeiten zu bestimmen und um zu zeigen, dass Cepheiden Riesensterne sind. Im selben Jahr verwendete Hertzsprung ähnliche Berechnungen, um einen Nullpunkt der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung zu erhalten und weiters die Entfernung der kleinen Magellanschen Wolke zu bestimmen.

Bei der weiteren Erforschung von Variablen in Kugelsternhaufen stieß Bailey auf Sterne, welche Perioden von weniger als sieben Stunden aufwiesen, und auf solche, die ihre gesamte Helligkeit in weniger als einer Stunde änderten, manche sogar um mehr als eine Magnitude. Solche schnellen Helligkeitsschwankungen waren damals bei anderen Sternen nicht bekannt, mit Ausnahme weniger algolartiger Sterne. Um RR-Lyrae Sterne adäquat abbilden zu können, war mit dem 13-inch Boyden Teleskop eine Belichtungszeit von einer Stunde und mehr notwendig. Diese langen Belichtungszeiten verzerrten die Form der Lichtkurve aufgrund der schnellen Helligkeitsänderung. Die Aufstellung des 24-inch Bruce Teleskops 1896 auf Arequipa verbesserte die Situation nicht wesentlich, da die kurze Fokallänge die Auflösung im Zentrum der Kugelsternhaufen limitierte. Daher blieb das Boyden Teleskop das Hauptinstrument für die Gewinnung von photometrischen Daten solcher Objekte. Bailey wies darauf hin, dass sowohl ein großes Teleskop als auch sehr empfindliche Photoplaten nötig seien, um die Lichtkurve von Sternen mit rasch ändernder Helligkeit beschreiben zu können.

Auf Antrag von Pickering, der seine Zustimmung als Harvard Direktor zu Baileys Projekt gab, wurden im Mai 1900 eine Reihe von Aufnahmen von M3 mit dem 36-inch Crossley Reflektor auf dem Lick Observatorium gemacht.¹¹ Im Juni wurden noch einige länger belichtete Aufnahmen angefertigt. Der plötzliche Tod des Direktors des Lick Observatoriums, James Keeler, am 12. August 1900 beendete die Zusammenarbeit zwischen den beiden Institutionen. Damit blieb Baileys Suche nach zusätzlichem Datenmaterial an großen Teleskopen für einige Zeit ohne Erfolg, da auch das 60-inch Teleskop, wel-

¹⁰vgl. H. A. Smith 1997 [66]

¹¹Die Aufnahmen vom Lick Observatorium waren ein wichtiger Bestandteil in Baileys Arbeit von 1913 über variable Sterne in M3.

ches 1904 vom Harvard College Observatorium erworben wurde, nie gute Abbildungen erzeugte, und nach weiteren erfolglosen Tests 1914 außer Dienst gestellt wurde.

Im März 1911 verfasste Pickering einen Brief an den stellvertretenden Direktor des Mount Wilson Observatoriums, Walter Adams, um einige langbelichtete Aufnahmen von M3 und M5 zu erhalten. Das dortige 60-inch Teleskop wurde 1908 errichtet, und zeigte schon bei anderen Projekten, die Pickering leitete, seine Tauglichkeit. Im Juni 1911 erhielt Pickering eine vergrößerte Aufnahme von M3. Im Februar 1912 bat Pickering den Direktor des Mount Wilson Observatoriums, George Hale, um kurzbelichtete Aufnahmen (10 Minuten) von M5 und M15. Im Juni erhielt Pickering die ersten Aufnahmen von M5. Später schickte Hale noch Kopien von existierenden Langzeitbelichtungen von Kugelsternhaufen nach Harvard. Die gewünschten Aufnahmen von M15 konnten nicht gewonnen werden, da eigene Projekte am Mount Wilson Observatorium mehr Zeit in Anspruch nahmen. Erst im April 1917 erhielt Bailey 55 von Shapley am Mount Wilson Observatorium aufgenommene Photoplatten von M15.

1.2 Shapleys Arbeit mit Kugelsternhaufen¹²

1914 nahm Harlow Shapley eine Anstellung am Mount Wilson Observatorium an und erforschte auf den Vorschlag Baileys hin variable Sterne in Kugelsternhaufen. Seine erste Arbeit beschäftigte sich mit Variablen in M3, was eine Erweiterung zur Arbeit von Bailey darstellte.

Innerhalb des ersten Jahres am Mount Wilson Observatorium veröffentlichte Shapley eine weitere Arbeit [63], welche das Wissen über Cepheiden grundlegend veränderte. In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass Pulsationen für die Helligkeitsveränderungen von Cepheiden verantwortlich seien und nicht, wie bisher angenommen, Bedeckungen von Doppelsternen. Es war zwar nicht die erste solche Behauptung, in der Arbeit erfolgte jedoch der Beweis durch eine Bestimmung von Umlaufbahnen. Da Cepheiden Riesenster-

¹²Die folgende Darstellung der Erforschung von Kugelsternhaufen orientiert sich an H. A. Smith 2000 [67].

ne sind, würde der Durchmesser der Umlaufbahnen der Doppelsternpartner kleiner sein als der Radius eines Cepheiden. In dieser Arbeit argumentierte Shapley auch, dass derselbe Mechanismus (Pulsation) in Cepheiden und in kurzperiodischen Haufenvariablen wirken müsse. Einerseits seien die Lichtkurven beider Sterntypen ähnlich, andererseits waren 1914 auch RR-Lyrae außerhalb von Kugelsternhaufen entdeckt worden. Einige dieser RR-Lyrae waren wesentlich heller als jene in Kugelsternhaufen und konnten somit spektroskopisch untersucht werden. Bei diesen Untersuchungen fand C. C. Kiess eine zu den Cepheiden vergleichbare Schwankung der Radialgeschwindigkeit über die Zyklen der Helligkeitsveränderung.

Weitere wichtige Erkenntnisse veröffentlichte Shapley in der Arbeit *„Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters, second paper: Thirteen hundred stars in the Hercules cluster (Messier 13)“* [64]. Darin deutet er einen möglichen Nutzen der RR-Lyrae Sterne bei der Bestimmung der Entfernung von Kugelsternhaufen an, da im Gegensatz zu Cepheiden bei ihnen keine Veränderung der mittleren Helligkeit mit der Periodenlänge vorhanden sei. Somit seien RR-Lyrae Sterne hervorragend als Standardkerzen zu verwenden.

Diese Tatsache verwendete Shapley in weiterer Folge, um über eine Eichung der RR-Lyrae Sterne mittels Cepheiden und deren Perioden-Leuchtkraft-Beziehung die Entfernung von Kugelsternhaufen zu bestimmen, in denen keine Cepheiden bekannt waren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse waren entscheidend bei der Skalierung zweier weiterer Methoden zur Entfernungsbestimmung; einerseits die Verwendung der mittleren Helligkeit der hellsten Haufenmitglieder, andererseits die Verwendung der scheinbaren Durchmesser von Kugelsternhaufen.

Diese Methoden stellten das Werkzeug für Shapleys 1918 erschienene Arbeit dar, in welcher er über die Entfernungsbestimmungen von Kugelsternhaufen referierte. Für diese Arbeit verwendete Shapley Daten aus Baileys Publikationen (sowie bisher unveröffentlichte Auswertungen von M15), Messungen anderer und von ihm selbst angefertigte

Daten. Die Daten, welche Shapley von Bailey verwendete, waren im einzelnen fünf Cepheiden in ω Centauri, zwei Cepheiden in M5, ein Cepheide in M15, zahlreiche RR-Lyrae in diesen und weiteren Kugelsternhaufen.

Die Bestimmung der Entfernungen von Cepheiden in Kugelsternhaufen mittels der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung war allerdings nicht korrekt, da Shapley sich auf die Ergebnisse stützte, die Levy für die Kleine Magellansche Wolke bestimmt hatte. Die Cepheiden in Kugelsternhaufen (eigentlich W Virginis Sterne), welche einer anderen Perioden-Leuchtkraft-Beziehung gehorchen als Population I Sterne, gehören der Population II an. Die Sterne in der Kleinen Magellanschen Wolke sind der Population I zuzuordnen. Die Existenz der zwei unterschiedlichen Populationen wurde allerdings erst von Baade 1944 aufgezeigt.¹³

1.3 Die Erforschung von Messier 13

Die Entdeckung des Kugelsternhaufens im Sternbild des Herkules wurde erstmals von Halley in den Philosophical Transactions im Jahre 1716 beschrieben.¹⁴ Messier beobachtete 1764 M13 mit einem 4 1/2 Fuß messenden Spiegelteleskop. Er beschrieb 1764 das Objekt als runden, glänzenden Nebel, in welchem keine Sterne zu erkennen waren. Zum Zentrum hin war ein Anstieg der Helligkeit erkennbar. Die optische Auflösung der Randsterne erfolgte durch William Herschel mit einem 7 Fuß Teleskop 1783, später gelang ihm eine vollständige Auflösung mit seinem 20 Fuß Teleskop.¹⁵

Die erste photographische Aufnahme von M13 wurde in Paris 1887 angefertigt. Die Aufnahme wurde zwei Stunden belichtet, dabei waren die Sterne am Rand aufgelöst. Der erste Versuch einer Positionsbestimmung der Sterne im Haufen wurde von J. Scheiner

¹³vgl. H. A. Smith 1997 [66]

¹⁴„The Sixth and last was accidentally hit upon by M. Edm. Halley in the Constelation of Hercules, in the Year 1714. It is nearly in a Right Line with ζ and η of *Bayer*, somewhat nearer to ζ than η : and by comparing its Situation among the Stars, its Place is sufficiently near in $\mathcal{M}$, 26° with $57^\circ.00$ North. Lat. This is but a little Patch, but it shews itself to the naked Eye, when the Sky is serene and the Moon absent.“ [21].

¹⁵vgl. J. Scheiner 1892 [56] und H. Shapley 1917 [64]

in Potsdam unternommen. Dazu belichtete er eine Photoplatte zwei Stunden am 9. September 1891 und eine weitere eine Stunde lang in der nächsten Nacht. Der daraus resultierende Katalog enthielt 833 Sterne.¹⁶

¹⁶vgl. J. Scheiner 1892 [56]

2 Historisches zur Erforschung von chemisch pekuliaren Sternen

2.1 Anfänge der Erforschung von Spektren

Die Erforschung von Spektren wurde durch die Grundlagenforschung von Isaac Newton ermöglicht, der 1666 begann, Licht durch Prismen zu lenken und somit das Licht in seine Spektralfarben zu zerlegen. Er interpretierte seine Versuche richtigerweise als das Ergebnis der unterschiedlichen Brechbarkeit des farbigen Lichtes. Seine Erkenntnisse veröffentlichte Newton 1671 in den Philosophical Transactions.¹

Eine weitere wichtige Entdeckung erfolgte durch Joseph Fraunhofer bei seinen Untersuchungen zur Verbesserung achromatischer Fernrohre. Zu diesem Zweck versuchte er Lichtquellen zu finden, welche Licht von nur einer Farbe aussenden (heute würde man dies als monochromatisches Licht bezeichnen)². Um monochromatisches Licht zu erhalten, experimentierte Fraunhofer mit gefärbten Gläsern und farbigen Flüssigkeiten. Seine Erkenntnisse aus diesen Versuchen waren, dass das meiste Licht in der entsprechenden Farbe der Gläser und Flüssigkeiten diese durchdringt, aber trotzdem auch andere Farben des Spektrums durchgelassen werden. Weitere Experimente mit farbigen Flammen enthüllten ein bemerkenswertes Ergebnis:

„Auch die farbigen Flammen, die man durch Verbrennen von Alkohol, Schwe-

¹vgl. W. Seitter 1969 [60]

²„Es würde sehr vorteilhaft seyn [sic!], wenn man in jeder Glasart das Zerstreuungsvermögen für jede Farbe besonders finden könnte; allein da im Spektrum die verschiedenen Farben keine bestimmten Grenzen haben, so ist dieses unmittelbar aus dem Farbenbilde nicht abzuleiten;“ [31, Seite 5]

fel u.s.w. erhält, geben durch das Prisma gesehen kein einfaches Licht, das ihrer Farbe entspricht; jedoch fand ich bey diesen, so wie auch mit Oel und Talglichte und überhaupt mit dem Lichte des Feuers, im Farbenbilde zwischen der rothen und gelben Farbe einen hellen scharf begrenzten Streifen, der bey allen genau an demselben Orte ist, und in der Folge sehr nützlich wurde.“ [31, Seite 6]

Außerdem fand Fraunhofer auch einen weiteren hellen Streifen im Grünen, aber dieser war schwächer als der eben beschriebene zwischen gelb und rot und manchmal für ihn kaum zu erkennen. Nach weiteren Versuchen erkannte Fraunhofer, dass sich der helle Streifen nicht weiter zerlegen ließ und somit der von ihm gesuchten monochromatischen Lichtquelle entsprach.

Sein weiteres Vorgehen beschrieb Fraunhofer so:

„Ich wollte suchen, ob im Farbenbilde von Sonnenlichte ein ähnlicher heller Streif zu sehen sey, wie im Farbenbilde von Lampenlichte, und fand anstatt desselben mit dem Fernrohre fast unzählig viele starke und schwache vertikale Linien, die aber dunkler sind als der übrige Theil des Farbenbildes; einige scheinen fast ganz schwarz zu seyn.“ [31, Seite 10]

Aus der Beschreibung Fraunhofers der nach ihm benannten Linien im Sonnenspektrum geht nicht hervor, ob er Kenntnis hatte von den Forschungen William Wollastons, der im Juni 1802 in den Philosophical Transactions über die Entdeckung von sieben dunklen Linien im Sonnenspektrum berichtete,^{3, 4} hatte. Seine weiteren Versuche überzeugten Fraunhofer, dass die Linien und Streifen in der Natur des Sonnenlichtes liegen und nicht durch einen Fehler im Versuchsaufbau erzeugt werden. Fraunhofer bezeichnete die ausgeprägten Linien mit Großbuchstaben, die etwas schwächeren mit Kleinbuchstaben.

³vgl. R. Rieker 1990 [53, Seite 165]

⁴Für Wollaston waren die Linien, welche er mit A, B, C, D und E bezeichnete, Begrenzungen der Farben Rot, Grün, Blau und Violett. Für die Existenz der Linien f und g fand Wollaston keine Begründung. (vgl. W. Seitter 1969 [60])

In weiteren Experimenten ließ Fraunhofer das Licht einer Lampe durch die gleiche Versuchsanordnung fallen wie vorher das Sonnenlicht und stellte dabei fest, dass der helle Streifen zwischen den Farben Gelb und Rot von der Lampe genau an der selben Stelle im Spektrum ist, wie eine dunkle Linie im Sonnenspektrum, welche er mit dem Buchstaben D gekennzeichnet hatte.

Fraunhofer untersuchte auch die Spektren von anderen Himmelskörpern wie der Venus und Fixsternen erster Größe. Dabei erkannte er, dass die Venus die selben dunklen Linien hatte wie die Sonne, wenngleich auch schwächer. Die Fixsterne hatten andere Linien im Spektrum als die Sonne und waren sich auch untereinander nicht ähnlich.

Die von Fraunhofer durchgeführten Studien veranlassten Kirchhoff und Bunsen zu weiteren Versuchen mit farbigen Flammen. Die Ergebnisse präsentierte Kirchhoff der Akademie der Wissenschaften zu Berlin unter dem Titel „*Über die Fraunhofer'schen Linien*“ [29]. Zu Beginn seiner Abhandlung zeigt Kirchhoff die Bedeutung seiner Entdeckungen auf:

„Bei Gelegenheit einer von Bunsen und mir in Gemeinschaft ausgeführten Untersuchung über die Spectren farbiger Flammen, durch welche es uns möglich geworden ist, die qualitative Zusammensetzung complicirter Gemenge aus dem Anblick des Spectrums ihrer Löthrohrflamme zu erkennen, habe ich einige Beobachtungen gemacht, welche einem unerwarteten Aufschluß über den Ursprung der Fraunhofer'schen Linien geben und zu Schlüssen berechtigen von diesen auf die stoffliche Beschaffenheit der Atmosphäre der Sonne und vielleicht auch der helleren Fixsterne.“ [29, Seite 564]

Bei seinen Experimenten lenkte Kirchhoff Sonnenlicht durch eine kräftige Kochsalzflamme und erkannte bei hinreichend gedämpftem Sonnenlicht anstelle der dunklen D Linien im Sonnenspektrum zwei helle Linien. Überstieg allerdings die Intensität des Sonnenlichtes eine gewisse Grenze, so wurden die dunklen D Linien sichtbar, sogar stärker ausgeprägt, als hätte man im Strahlengang keine Kochsalzflamme positioniert. Weitere Experimente mit starken künstlichen Lichtquellen (z.B. Drummondsches Licht), in

deren Spektrum keine natürlichen Linien (weder helle noch dunkle) vorkommen, zeigten Kirchhoff die Möglichkeit, dunkle Linien in einem Spektrum künstlich erzeugen zu können. Die Versuche mit Chlorlithium und dem Sonnenlicht ergaben eine dunkle oder helle Linie (je nach Intensität des Sonnenlichts) zwischen den Fraunhofer Linien B und C. Aus diesen Ergebnissen zog Kirchhoff richtige Schlüsse:

„Ich schliesse aus diesen Beobachtungen, dass farbige Flammen, in deren Spectrum helle, scharfe Linien vorkommen, Strahlen von der Farbe dieser Linien, wenn dieselben durch sie hindurchgehen, so schwächen, das an der Stelle der hellen Linien, dunkle auftreten, sobald hinter der Flamme eine Lichtquelle von hinreichender Intensität angebracht wird, in deren Spectrum diese Linien sonst fehlen. Ich schliesse weiter, dass die dunklen Linien des Sonnenspectrums, welche nicht durch die Erdatmosphäre hervorgerufen werden, durch die Anwesenheit derjenigen Stoffe in der glühenden Sonnenatmosphäre entstehen, welche in dem Spectrum einer Flamme helle Linien an demselben Ort erzeugen.“ [29, Seite 565]

Kirchhoff nahm an, dass die mit den Fraunhofer'schen D Linien übereinstimmenden hellen Linien in Flammenspektren vom Natriumgehalt derselben herrührten und somit auch Natrium in der Sonnenatmosphäre enthalten sei. Aus den Experimenten Brewsters, welcher in Salpeterflammen die Fraunhofer-Linien A, a und B in ihrer hellen Erscheinungsform entdeckte, schloss Kirchhoff auf Kalium in der Sonnenatmosphäre. Die Abwesenheit der entsprechenden Linien im Sonnenspektrum zu den roten Streifen der Lithium Flamme führten Kirchhoff zu dem Schluss, es gebe kein Lithium in der Sonnenatmosphäre, oder nur in sehr geringer Menge.

2.2 Anfänge der Spektralklassifikation⁵

Nach den Erkenntnissen von Kirchhoff und Bunsen stieg das Interesse der Wissenschaft an den Spektren der Sterne, da nun die Möglichkeit gegeben war, auf die chemische Zusammensetzung der Sterne zu schließen. William Huggins und W. Allen Miller verglichen 1864 die Spektren von 16 irdischen Elementen mit Sternspektren. Bei ihren Untersuchungen gelang es ihnen erstmals Wasserstoff in Sternen festzustellen.

Etwa zur gleichen Zeit wurden erste Versuche unternommen Sterne nach ihren Spektren in Klassen einzuteilen. Um 1860 wurden von verschiedenen Autoren Klassifikationssysteme vorgeschlagen, welche die Sterne zumeist in drei Gruppen einteilten. 1863 entwickelte der Jesuitenpater Angelo Secchi das damals verbreitetste Klassifizierungssystem mit zwei Sterntypen, den farbigen und den weißen Sternen. Bis zum Jahre 1878 erweiterte er sein System auf insgesamt fünf Klassen. Die erste Klasse beinhaltete weiße oder blaue Sterne mit fast kontinuierlichem Spektrum von vier Wasserstofflinien durchzogen (z.B. Sirius), die zweite Gruppe waren gelbe Sterne mit sehr feinen Wasserstofflinien und einem mit der Sonne übereinstimmenden Spektrum (z.B. Arcturus), den dritten Typus bildeten die orangefarbenen und roten Sterne mit dunklen und hellen Linien, die sich zu Banden vereinigten (z.B. α Orionis). Die vierte Klasse bestand aus Sternen, welche der vorherigen ähnlich waren, allerdings waren es nur schwache, oft stark variable Sterne mit weniger Banden (z.B. β Orionis), den fünften Typus bildeten Sterne mit hellen Linien (Emissionslinien) anstelle der dunklen Absorptionslinien (z.B. γ Cassiopeiae⁶).

Secchi teilte die Sterne nur nach unterschiedlichen Farben und Absorptionsmustern ein. Er überlegte, wie sich die Gruppen physikalisch und chemisch unterscheiden. H.C. Vogel versuchte 1874 die Sterne unter einem anderen Gesichtspunkt zu klassifizieren. Er vermutete, dass die Spektren den Entwicklungszustand der Sterne wiedergeben. Er for-

⁵Die folgende Darstellung der Anfänge der Spektralklassifikation orientiert sich an W.Seitter 1969a [60], W.Seitter 1969b [61], W.Seitter 1969c [62] und an A.Secchi 1878 [59].

⁶Secchi betont ausdrücklich, dass dies der einzige Stern sei, der dauerhaft Wasserstoffemissionslinien zeige. Alle anderen Sterne dieses Typus zeigen andere Emissionslinien. (vgl. A. Secchi 1878 [59, Seite 97])

multierte die Möglichkeit, dass Metalldämpfe in zu heißen Atmosphären kaum Absorption zeigen können, während in kühlen Atmosphären sogar Assoziationen von Stoffen, welche die Atmosphäre bilden, eintreten können. Somit beschreibt seine Entwicklungssequenz eine Temperatursequenz.

Auf das System von Secchi aufbauend entwickelte Williamina P. Fleming unter der Leitung von E. Pickering am Harvard College ein erweitertes System für den Henry Draper Katalog. Dieses Klassifizierungssystem wurde 1901 von Annie J. Cannon verbessert. Einige als unnötig erkannte Sterntypen wurden gestrichen und die Typen so umgestellt, dass eine kontinuierliche Sequenz entstand, außerdem wurden die verbliebenen Sterntypen durch dezimale Untergruppen weiter verfeinert. Mit diesen Verbesserungen war die Entwicklung des Henry-Draper-Systems (HD-System) im wesentlichen abgeschlossen. Dieses System wird nach einem Beschluss der Internationalen Astronomischen Union (IAU), welcher 1922 den Gebrauch des HD-Systems empfiehlt, heute noch zur Klassifizierung von Sternen herangezogen.

2.3 Entdeckung und Erforschung von chemisch pekuliaren Sternen⁷

Parallel zur Arbeit von Cannon untersuchte Antonia Maury 681 Sterne nördlich des Himmelsäquators. Genauso wie Cannon arbeitete auch Maury am Harvard College, und beiden Frauen stand es frei ihr eigenes Klassifizierungssystem zu entwickeln, solange diese kontinuierliche Sequenzen ergaben. Während Cannon allerdings auf der Arbeit von Flemming aufbaute, entwickelte Maury ihr eigenes System.

Maury stellte fest, dass eine einzelne Sequenz nicht ausreicht, um alle Sterne zu typisieren, sondern meinte, man müsse parallele Reihen annehmen. Ihr System bestand aus den Typen O bis V und den Gruppen I bis XXII, die im wesentlichen bis auf die Benennung den Typen von Cannon und ihrer dezimalen Unterteilung entsprachen. Zusätzlich zu

⁷Die folgende Darstellung der Erforschung von chemisch pekuliaren Sternen orientiert sich an H. M. Maitzen et al. 1996 [39] und verwendet Daten aus A. C. Maury 1897 [40].

dieser eindimensionalen Sequenz entwickelte Maury noch „Divisionen“, welche sie mit a, b, c und p bezeichnete. Die Divisionen a, b und c teilt die Spektren nach der Linienbreite der Absorptionslinien ein, während p für unbestimmte oder pekuliare Objekte stand.

Antonia Maury führte insgesamt 16 Sterne in ihrem Katalog auf, welche sie der Gruppe p zuordnete. Die Mehrheit dieser Sterne (7) ist in die Gruppe VIII eingeordnet, welche im HD-System mittleren A-Sternen entspricht. Berücksichtigt man zu diesen pekuliaren Sternen noch jene aus den benachbarten Gruppen VII und IX, erhält man den ersten implizit veröffentlichten Katalog von pekuliaren A-Sternen (Ap-Sterne), der aus insgesamt neun Objekten besteht. Preston verallgemeinerte die Gruppenbezeichnung der Ap-Sterne zu „chemisch pekuliare Sterne der oberen Hauptreihe“, kurz CP-Sterne. Diese Gruppe teilte Preston 1974 [51] in die Subgruppen CP1 bis CP4.

3 Kugelsternhaufen

3.1 Bedeutung von Kugelsternhaufen für die Wissenschaft

Kugelsternhaufen sind die ältesten bekannten Objekte der Galaxis. Durch diesen Umstand ermöglichen sie einen Blick in die Vergangenheit unserer eigenen Milchstraße. Sowohl die chemischen als auch die kinematischen Eigenschaften in der Frühphase unserer Galaxis können aus Kugelsternhaufen abgeleitet werden. Die Altersabschätzung von Kugelsternhaufen bietet auch die Möglichkeit ein minimales Alter für das Universum zu bestimmen.

Des weiteren bilden diese Objekte ein geradezu ideales Testfeld für Modellrechnungen massearmer Sterne. Durch die relative Nähe galaktischer Kugelsternhaufen zur Sonne können Einzelsterne spektroskopisch untersucht und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre alter massearmer Sterne in verschiedenen Entwicklungsstadien bestimmt werden.

3.2 Das galaktische Kugelsternhaufensystem

Das galaktische Kugelsternhaufensystem besteht aus ungefähr 150 bekannten Objekten. Harris schätzt die Zahl der Kugelsternhaufen auf 160 ± 10 . Gründe für die unvollständige Liste bekannter Kugelsternhaufen sind einerseits die Richtung galaktisches Zentrum durch Gas und Staub stark zunehmende Absorption des Lichtes und andererseits das Vorhandensein weit entfernter und leuchtschwacher Kugelsternhaufen in hohen galakti-

schen Breiten. Beides führt dazu, dass die sonst so hellen Objekte nur sehr schwer zu entdecken sind.¹

Die Kenntnis aller galaktischen Kugelsternhaufen ist für das Verständnis des galaktischen Halos, besonders für dessen Form und Ausdehnung, von besonderer Bedeutung. Das Verhältnis der Sterne in Kugelsternhaufen zu den Feldsternen des galaktischen Halos beträgt 1:100, trotzdem sind die Kugelsternhaufen aufgrund ihrer großen Helligkeit und der Möglichkeit, sie in großer Entfernung erforschen zu können, von unschätzbarem Wert für die Wissenschaft. Während sich ungefähr die Hälfte der Kugelsternhaufen innerhalb von 5 kpc um das galaktische Zentrum befindet, sind die entferntesten bis zu 100 kpc entfernt.¹

3.2.1 Farb-Helligkeits-Diagramm²

Die Strukturen in einem Farb-Helligkeits-Diagramm (CMD) stellen verschiedene Entwicklungsstadien der Sterne eines Kugelsternhaufens dar. Dabei muss beachtet werden, dass die genaue Position eines Sterns im CMD nicht nur vom Entwicklungszustand des Sterns und somit von seiner Masse abhängt, sondern auch noch von seiner Metallizität beeinflusst wird. Eine Darstellung eines für einen Kugelsternhaufen typischen CMD wird in Abbildung 3.1 anhand von M5 dargestellt. Die wichtigsten Bereiche des CMDs sind mit Bezeichnungen versehen.

Das berechnete untere Ende der Hauptreihe (MS) wird von Sternen mit einer Masse von $0.08 M_{\odot}$ gebildet, da bei noch masseärmeren Sternen keine Kernfusion im Sterninneren stattfinden kann. Allerdings ist das erkennbare Ende der Hauptreihe immer durch das Magnitudenlimit der Beobachtung vorgegeben.

Die Dicke der Hauptreihe kommt einerseits durch statistische Messfehler und andererseits durch unaufgelöste Doppelsterne zustande. Die Messungenauigkeit steigt mit schwächer werdenden Sternen an, wodurch die zunehmende Streuung zu kühleren Sternen hin erklärt werden kann. Unaufgelöste Doppelsterne erscheinen heller als ein Einzel-

¹vgl. W. E. Harris 2001 [23, Seite 231f].

²Die folgende Darstellung orientiert sich an K. M. Ashman et al. 1998 [1, Seite 5ff].

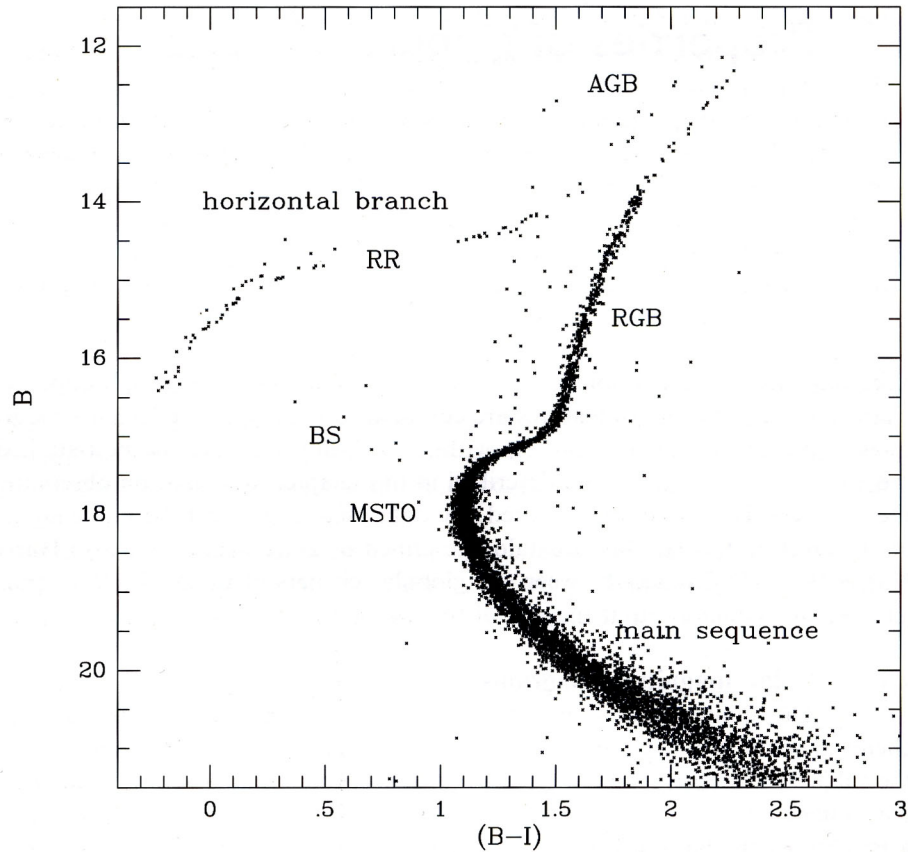


Abbildung 3.1: Darstellung des CMDs von M5 mit den wichtigsten Merkmalen eines Kugelsternhaufens. Die Graphik stammt aus Ashman et al. 1998 [1, Seite 6].

stern. Am stärksten ist dieser Effekt bei Doppelsternen gleicher Temperatur, da es bei diesen nicht zusätzlich zu einer Verschiebung in der Farbe kommt. Bei solchen Doppelsternsystemen bleibt der Wert von $(B-V)$ gleich, aber die Helligkeit in V steigt, da beide Partner nun als ein Stern erscheinen. Dabei beträgt die Verbreiterung der Hauptreihe durch diesen Effekt $0.75 m_V$.³

Der Abknickpunkt der Hauptreihe (MSTO) ist das Ende des Stadiums in welchem Sterne ihre Energiegewinnung durch Wasserstoffbrennen im Kern bestreiten. Die genaue Lage des MSTOs ist einerseits vom Alter (siehe 3.2.3) des Kugelsternhaufens und an-

³vgl. B. W. Carney 2001 [11, Seite 30]

dererseits von der Metallizität abhängig. Objekte mit höherer Metallizität haben einen rötteren und leuchtschwächeren MSTO als solche mit niedrigerer Metallizität bei gleichem Alter. Die Ursache für diese Abhängigkeit liegt in der steigenden Opazität der Sternatmosphäre durch die Elektronen der Metalle. Die sehr scharfe Grenze am MSTO deutet auf eine Entstehungsgeschichte der Kugelsternhaufen hin, in welcher die Sterne eines jeweiligen Kugelsternhaufens innerhalb relativ kurzer Zeit entstanden sind.

Nach dem Verbrauch des Wasserstoffs im Kern der Sterne kontrahiert derselbe und heizt sich dabei weiter auf. An der äußeren Grenze des Kerns wird die Temperatur je nach Masse des Sterns hoch genug, um in der darüber liegenden weniger dichten Schicht Wasserstoffbrennen durch den CNO-Zyklus einzuleiten. Die gestiegene Temperatur wirkt gegen die Gravitationskraft, sodass sich der Sternradius ausdehnt und sich die Effektivtemperatur verringert. Diese Entwicklung zeigt sich im CMD als Unterriesenast (SGB). In dieser Phase der Sternentwicklung bilden sich weitreichende Konvektionszonen.

Das Ende des SGBs ist erreicht, wenn der Stern voll konvektiv wird. Danach kann die überschüssige Energie aus der gesteigerten Temperatur des Kerns nicht mehr durch Expansion der äußeren Schichten verbraucht werden. Die darauf folgende Aufwärtsbewegung im CMD bringt den Stern entlang der Hayashi-Linie, dessen genaue Lage von der Metallizität abhängt, auf den Roten-Riesen-Ast (RGB). Da der RGB bei den meisten Kugelsternhaufen sehr wenig Streuung in der Temperatur aufweist, scheint die Variation in der Metallizität und der Physik individueller Sterne innerhalb eines Haufens gering zu sein.

Bei massearmen Sternen ($M_{\star} < 2.25M_{\odot}$) ist während dieser Entwicklung der Kern entartet. Um die Fusion von Helium einzuleiten, muss die Entartung aufgehoben werden. Dazu ist eine höhere Temperatur nötig als für den triple α -Prozess notwendig, und somit setzt das Heliumbrennen nach der Aufhebung der Entartung im Kern explosionsartig ein.

Nach dem Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes befindet sich der Stern auf dem Horizontalast (HB). Dieser Zustand ist durch Heliumbrennen im Kern und Wasserstoffbrennen in Schalen gekennzeichnet. Da die Sterne entlang des HBs die gleiche Leuchtkraft aber unterschiedliche Temperatur aufweisen, kann man den HB auch als

eine Sequenz sich ändernder Sternradien ansehen. So ist der Radius der kühleren Sterne am HB größer, wohingegen der Radius am heißeren Ende kleiner ist.

Durch eine annähernd konstante Leuchtkraft entlang des HBs, was einer konstant bleibenden Form der Schwarzkörperkurve der Sterne entspricht, aber einer unterschiedlichen Temperatur der Sterne verschiebt sich die Schwarzkörperkurve zu kürzeren (blauen) Wellenlängen. Diese Verschiebung erreicht bei den heißesten Sternen Beträge, welche die verwendeten Filter (z.B. B und I) auf den Rayleigh-Jeans Bereich der Schwarzkörperkurve bringt. Da in diesem Bereich die Differenz der beiden Filter einem konstanten Wert zustrebt, ändert sich die Farbe, also (B-I), noch heißerer Sterne nicht mehr. Allerdings nimmt die Helligkeit in beiden Filtern ab, was zu einem Abknicken des HBs nach unten führt (vgl.: Abbildung 3.1). Die Gründe für das unterschiedliche Aussehen der HBs verschiedener Kugelsternhaufen werden in 3.2.4 erklärt.

Die Entwicklung der Sterne am HB läuft aufgrund des weniger wirkungsvollen Heliumbrennens und der höheren Leuchtkraft im Vergleich zur Hauptreihe schneller als das Hauptreihenstadium ab. Die folgenden Stadien der Sternentwicklung ähneln denen in der RGB-Phase, wobei das Helium in einer Schale unterhalb der Wasserstoffbrennschale fusioniert. Im CMD gelangt der Stern wieder nahe der Hayashi-Linie auf den Asymptotischen Riesenast (AGB). In dieser Phase sind wie schon am RGB das Mixing und der Massenverlust wichtige Bestandteile der Sternentwicklung. Am Ende der AGB-Phase fusioniert das Helium nicht ruhig, sondern es kommt zu mehreren He-Flashes, welche das Mixing noch stärker antreiben als in der RGB-Phase.

Nach dem letzten He-Flash bewegt sich der Stern im CMD nach links, und kann nach dem Abstoßen der Hülle einen Planetarischen Nebel (PN) bilden. Diese Entwicklungsphase erfolgt auf einer sehr kurzen Zeitskala. Aufgrund der schnellen Entwicklung sind nur sehr wenige Sterne in dieser Phase der Entwicklung zu beobachten. Für das Entstehen eines PNs muss die Masse des Zentralsterns nach dem Massenverlust mindestens $0.55 M_{\odot}$ betragen. Nach dieser Phase produziert der Stern keine Energie mehr über Kernfusion und kühlt als Weißer Zwerg aus.⁴

⁴vgl. D. Schönberner 1983 [57]

Eine wegen ihrer Entstehung Fragen aufwerfende Gruppe von Sternen sind die Blue Stragglers (BSs). Diese liegen in der Verlängerung der Hauptreihe jenseits des MSTOs. Alle Sterne, die auf der Hauptreihe in dieser Region des CMDs waren, müssten beim Alter der Kugelsternhaufen schon auf dem SGB bzw. RGB sein. Die einfachste Erklärung für die Existenz dieser Sterne wäre eine zweite, jüngere Sternentstehung, in welcher die BSs entstanden sind, die sich somit noch in ihrem Hauptreihenstadium befinden. Allerdings existiert in Kugelsternhaufen so gut wie kein Gas zwischen den Sternen, aus welchem sich zu einem späteren Zeitpunkt Sterne hätten formen können.

Die nach heutiger Sicht wahrscheinlichste Entstehungsgeschichte geht von einem Massentransfer zwischen zwei Sternen aus. Dieser Massentransfer kann einerseits in einem Doppelsternpaar von einem über die Roche-Grenze hinaus aufgeblähten Riesen auf seinen sich noch auf der Hauptreihe befindlichen Partner erfolgen, andererseits zwischen zwei kollidierenden Sternen. Keine dieser Möglichkeiten kann allein die Existenz aller BSs erklären, darum scheinen beide gemeinsam die Ursache für BSs zu sein.

3.2.2 Entfernungsbestimmung⁵

Die Entfernungsbestimmung ist von entscheidender Bedeutung für alle Parameter des galaktischen Kugelsternhaufensystems, welche mit der räumlichen Verteilung von Kugelsternhaufen variieren. Da die Entfernung von Kugelsternhaufen zu groß für eine direkte Bestimmung mittels Parallaxenmessung ist, kann der Abstand zur Sonne nur mit indirekten Methoden erschlossen werden. Die meisten Techniken beruhen auf Vergleichen von Helligkeiten.

Zu diesem Zweck wird der Entfernungsmodul verwendet:

$$m_v - M_v = 5 * \log(r) - 5 + A_v$$

Dabei macht der Korrekturterm A_v bei den meisten Kugelsternhaufen nur einen kleinen Betrag aus, da die meisten Objekte sich nicht in der galaktischen Ebene befinden,

⁵Die folgende Darstellung orientiert sich an K. M. Ashman et al. 1998 [1, Seiten 31ff].

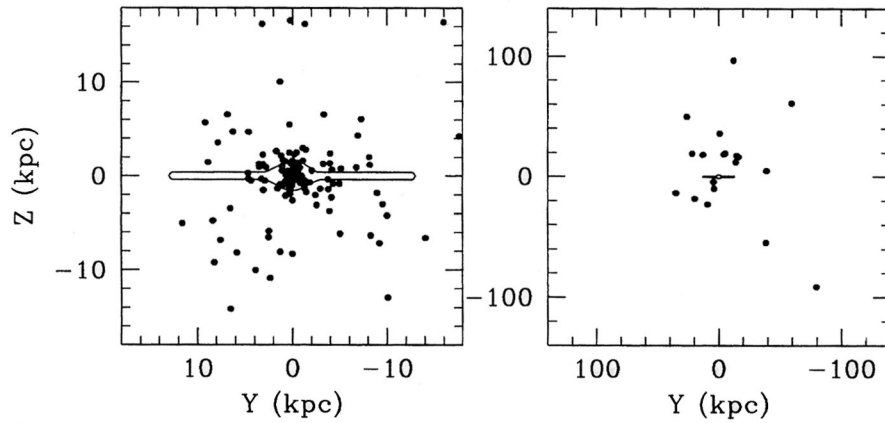


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Verteilung der Kugelsternhaufen um die galaktische Scheibe. Die Position der Sonne und des galaktischen Zentrums liegt bei (0,0). Die Blickrichtung ist somit entlang der X-Achse. Die Graphik stammt aus Harris 2001 [23, Seite 228].

und sich somit in der Sichtlinie zu den Kugelsternhaufen nicht viel galaktischer Staub befindet, der eine Absorption verursachen würde (vgl. Abbildung 3.2).

Harris versuchte die mit steigender galaktischen Breite b abnehmende Verfärbung der Kugelsternhaufen zu quantifizieren. Sein Ergebnis für die nördliche galaktische Hemisphäre ($b > 0$) betrug $E_{(B-V)} = 0.060 * (\operatorname{cosec}|b| - 1)$, für die südliche Hemisphäre ($b < 0$) erhielt er $E_{(B-V)} = 0.045 * (\operatorname{cosec}|b| - 1)$.⁶

Eine Methode zur Entfernungsbestimmung stützt sich auf Unterzwerge (SDs) in Sonnennähe mit bekannter scheinbarer Helligkeit und Parallaxe. Diese Sterne werden mit der scheinbaren Helligkeit äquivalenter Sterne der Hauptreihe eines Kugelsternhaufens verglichen, um mittels Entfernungsmodul auf die Entfernung des Kugelsternhaufens zu schließen. Die Problematik dieser Methode liegt in der Tatsache, dass man photometrische Messungen von sehr schwachen Hauptreihensternen des Kugelsternhaufens benötigt. Dabei nimmt die photometrische Genauigkeit mit zunehmender Entfernung ab.

⁶vgl. W. E. Harris 2001 [23, Seite 228].

Die Methoden, welche Shapley anwandte um die Entfernung festzulegen, wurden schon unter 1.2 erwähnt. Eine heute oft verwendete Technik nutzt, genauso wie Shapleys Methode, die RR-Lyrae Sterne. Der Vorteil liegt in der wesentlich höheren Leuchtkraft dieser Sterne gegenüber den Objekten auf der Hauptreihe eines Kugelsternhaufens. Die absolute mittlere Helligkeit von RR-Lyrae Sternen ist von der Metallizität der Objekte abhängig. Die Metallhäufigkeit eines Objektes wird in Einheiten von $[\text{Fe}/\text{H}]$ ⁷ angegeben. Die übliche Formel zur Berechnung der absoluten Helligkeit von RR-Lyrae Sternen ist von der Form:

$$M_v(RR) = c_0 * [\text{Fe}/\text{H}] + c_1$$

c_0 und c_1 sind Konstanten, allerdings ist die Kalibration der Konstanten noch unsicher. So verwendeten Harris et al. 1991 [22]: $M_v(RR) = 0,20 * [\text{Fe}/\text{H}] + 1,00$, wohingegen Sandage und Tammann 1995 [55] argumentierten, dass sich bei dieser Formel die Entfernungsmodule von RR-Lyrae Sternen und Cepheiden in der Großen Magellanschen Wolke deutlich unterscheiden würden. Sie berechneten die absolute Helligkeit von RR-Lyrae Sternen mit $M_v(RR) = 0,30 * [\text{Fe}/\text{H}] + 0,94$. Im Metallizitätsbereich der meisten Kugelsternhaufen im galaktischen System führt diese Formel zu 0,2 – 0,3 kleineren Magnituden der absoluten Helligkeit, d.h. die Entfernung ist um bis zu 15 % größer.

3.2.3 Altersbestimmung⁸

Die zwei grundlegenden Ansätze zur Altersbestimmung sind eine absolute und eine relative Methode. Die absolute Altersbestimmung stellt eine minimale Grenze für das Alter des Universums dar, wohingegen das relative Alter der Kugelsternhaufen die Vorgänge der Entstehung der Milchstraße enthüllt.

Absolute Altersbestimmung

Die am häufigsten verwendete Methode zur Bestimmung des absoluten Alters von Kugelsternhaufen basiert auf einer Bestimmung der Masse der Sterne am MSTO. Da diese

⁷ $[\text{Fe}/\text{H}] = \log(\text{Fe}/\text{H})_{\star} / \log(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}$

⁸Die folgende Darstellung orientiert sich an K. M. Ashman et al. 1998 [1, Seiten 14ff].

Masse nicht aus Messungen direkt bestimmt werden kann, muss man aus der scheinbaren Helligkeit des MSTOs (m_v), der Absorption (A_v), und der Entfernung (r) mittels Entfernungsmodul (siehe 3.2.2) die absolute Helligkeit des MSTOs (M_v) bestimmen. Über stellare Atmosphärenmodelle, welche bei metallarmen Sternen am genauesten sind, kann man die Energieproduktion im Kern der Sterne berechnen (bolometrische Helligkeit) und die Effektiv-Temperatur (T_{eff}) des Sterns. Für die Modelle werden auch die Metallizität und der Heliumanteil im Stern benötigt. Bolometrische Helligkeit und Effektiv-Temperatur werden mit den Ergebnissen der Berechnungen vom Sterninneren verglichen und ergeben somit eine Masse der Sterne und deren Alter. Die größten Fehlerquellen bei dieser Methode setzen sich aus den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Entfernung der Kugelsternhaufen zusammen, aber auch die Metallizität und andere Elementhäufigkeiten (z.B.: He) sind nicht vernachlässigbar. Die Technik der Altersbestimmung lässt sich auch mit der Farbe des MSTOs durchführen, allerdings sind diese Modellrechnungen zur Altersbestimmung mit größeren Unsicherheiten verbunden als die zur Messung mittels der scheinbaren Helligkeit des MSTOs.

Weitere Methoden in der Altersbestimmung beruhen einerseits auf Massen- und Massenverlustrechnungen am RGB, wobei der Massenverlust durch die Morphologie des HBs bestimmt wird, und andererseits auf der stellaren Leuchtkraftfunktion, wobei diese Methode weniger anfällig für Fehler in der Entfernungsbestimmung und in den Sternentwicklungsrechnungen ist.

Relative Altersbestimmung

Der Vorteil einer relativen Altersbestimmung begründet sich auf der Tatsache, dass Fehler in den stellaren Modellen weniger ins Gewicht fallen als bei der absoluten Bestimmung. Für einen relativen Vergleich eignen sich Haufen mit gleicher Metallizität besonders gut, da man die durch unterschiedliche Metallizität verursachten Effekte im CMD vernachlässigen kann, außerdem erleichtert es die Modellrechnungen.

Die am häufigsten angewandte Methode besteht in der Bestimmung des relativen Helligkeitsunterschiedes zwischen dem MSTO und der Helligkeit des HBs am Ort der

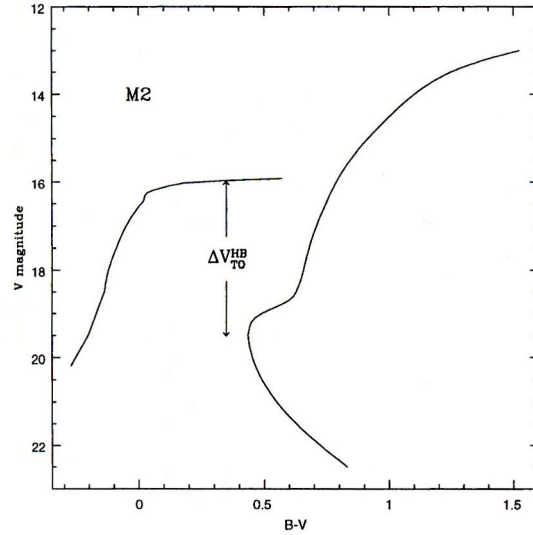


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung zur Messung des ΔV_{TO}^{HB} anhand von M2. Die Graphik stammt aus Carney 2001 [11, Seite 159].

RR-Lyrae. Diese Größe wird mit ΔV_{TO}^{HB} bezeichnet (siehe Abbildung 3.3). Der Vorteil dieser Technik besteht in der Unabhängigkeit der Meßgröße von Absorption und Verfärbung, da sowohl der MSTO als auch der HB von den Auswirkungen solcher Effekte gleich betroffen sind. Die Technik beruht auf der Annahme, dass sich die Leuchtkraft des HBs mit dem Älterwerden des Kugelsternhaufens nicht ändert, während die Leuchtkraft am MSTO mit dem Alter abnimmt.⁹

Der Betrag von ΔV_{TO}^{HB} ist bei Kugelsternhaufen mit ausschließlich blauen HB-Sternen möglicherweise nicht sehr genau festzustellen, wobei gerade diese Sternhaufen von besonderem Interesse für die Forschung sind, da sie vermutlich die ältesten Kugelsternhaufen sind. Eine weitere Unsicherheit ist die nicht genaue Horizontalität des HBs, was zu Komplikationen bei der Bestimmung von m_v des HBs führt. Auch Probleme bei der Bestimmung von $M_v(\text{RR})$ (siehe 3.2.2) spielen eine Rolle.

Eine andere Methode zur relativen Altersbestimmung basiert auf derselben Technik wie die absolute Altersbestimmung. Der Altersunterschied ergibt sich aus dem Vergleich

⁹vgl. B. W. Carney 2001 [11, Seite 158]

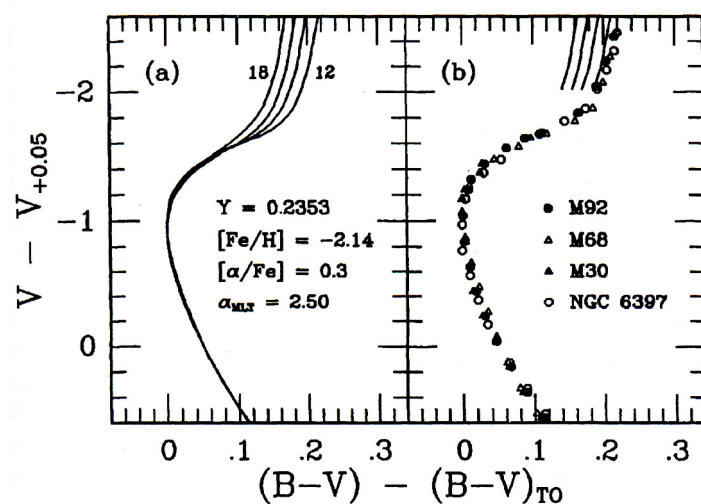


Abbildung 3.4: Darstellung der Relativen Altersbestimmung mittels gegeneinander verschobener CMDs. Die Graphik stammt aus Carney 2001 [11, Seite 163].

der M_v der MSTOs. Dazu benötigt man allerdings nur einen relativen Entfernungsmodul (siehe 3.2.2) und auch ein relatives A_v . Bei unterschiedlicher Metallizität der Haufen muss noch eine Korrektur durch stellare Atmosphärenmodelle erfolgen.

Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Helligkeit des MSTO kann bis zu ± 0.1 mag betragen. Bei Techniken, welche sich unter anderem auf diese Größe beziehen, führt diese Unsicherheit zu Altersbestimmungen, die mit 10% Fehler behaftet sind. Um diese Unsicherheiten zu vermeiden, entwickelte Vandenberg et al. 1990 [68] eine Methode, welche den Farbunterschied zwischen MSTO und der Basis des RGBs berücksichtigt. Beide Punkte im CMD sind für junge Kugelsternhaufen blauer als bei älteren, allerdings ist die Farbänderung des MSTOs mit zunehmendem Alter stärker. Diese Tatsache wird in Abbildung 3.4 dargestellt. Diese Methode verschiebt im CMD mehrere Kugelsternhaufen so, dass sie sich an einem Punkt der Hauptreihe, der 0.05 mag *röter* als der MSTO ist, überlagern. Es wird das unterschiedliche Alter durch eine unterschiedliche Lage des RGBs dargestellt.

Da die Farbe des RGBs durch die Metallizität entscheidend beeinflusst wird, ist diese Technik am besten für Haufen mit gleicher Metallizität zu verwenden. Desweiteren ist

ein gleiches Verhältnis von $[\alpha/\text{Fe}]$ wichtig, da auch dieses die Lage des RGBs beeinflusst. Diese Methode wird nur für relative Altersbestimmungen und für Kugelsternhaufen mit ähnlicher Metallizität empfohlen.¹⁰

3.2.4 Das Problem des zweiten Parameters

Der Vergleich von CMDs unterschiedlicher Kugelsternhaufen zeigt deutlich Abweichungen in der Form und Lage verschiedener Äste. Die morphologischen Unterschiede im RGB können durch eine unterschiedliche Metallhäufigkeit erklärt werden. Das unterschiedliche Aussehen der HBs verschiedener Kugelsternhaufen ist hingegen nicht so einfach zu erklären. Sandage und Wallerstein 1960 [54] bemerkten erstmals, dass metallärmere Kugelsternhaufen dazu neigen vorwiegend blaue Horizontaläste (BHBs) zu besitzen, während metallreiche Kugelsternhaufen vorwiegend rote Horizontaläste (RHBs) ihr eigen nennen. Deswegen wird Metallizität als erster Parameter angesehen.

Um die unterschiedliche Gestalt des HBs in mathematischer Form erfassen zu können, entwickelte Mironov 1972 [46] den Parameter $B/(B + R)$, wobei B und R für die Zahl der Sterne auf der blauen und der roten Seite des Instabilitätsstreifens stehen. Zinn entwickelte 1986 [71, Seite 81] die Formel weiter, indem er die Sterne innerhalb des Instabilitätsstreifens in den Parameter miteinbezog. Sein Parameter lautet $(B - R)/(B + V + R)$, wobei die Benennung der Variablen wie oben ist und die Variable V die Zahl der Sterne innerhalb des Instabilitätsstreifens darstellt.

Da allerdings auch Kugelsternhaufen mit sehr ähnlicher Metallizität unterschiedliche HB-Morphologien aufweisen, muß noch ein weiterer Parameter für die Gestalt des HBs verantwortlich sein. Ein klassisches Beispiel für Kugelsternhaufen mit einem zweiten Parameter sind die Haufen M13, M3 und NGC 7006. Bei diesen Objekten ist die Metallizität $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.6$. Angefangen bei M13 mit einem deutlichen blauen HB über M3 mit einem mittleren HB zu NGC 7006 mit einem vorwiegend roten HB lässt sich an diesem Beispiel die unterschiedliche Morphologie der HB bei gleicher Metallizität sehr gut illustrieren (vgl. Abbildung 3.5).

¹⁰vgl. B. W. Carney 2001 [11, Seite 164]

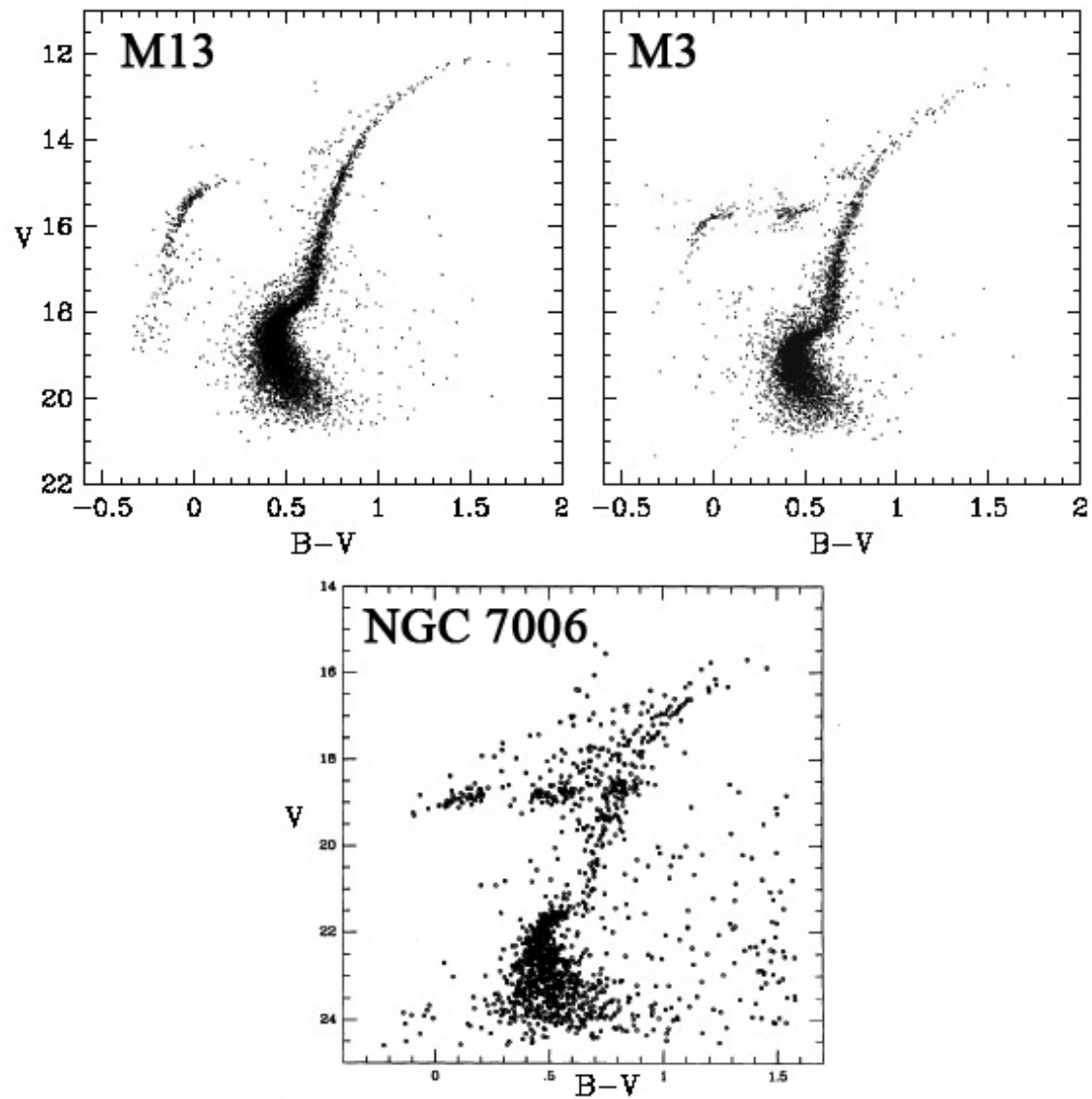


Abbildung 3.5: CMDs von M13, M3 und NGC 7006 zeigen einen blauen, einen mittleren bzw. roten HB. Die Graphiken der CMDs von M13 und M3 stammt aus Cho et al. 2005 [12, Seite 1025, Fig. 2a bzw. Seite 1024, Fig. 1a]. Die Graphik des CMDs von NGC 7006 stammt aus Buonanno et al. 1991 [10, Seite 1021, Fig. 3a]

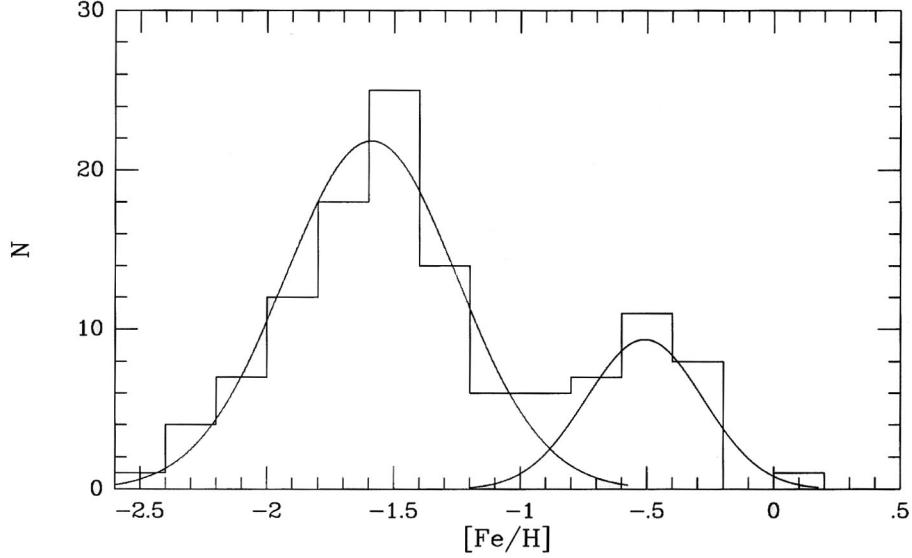


Abbildung 3.6: Darstellung der Metallizitätsverteilung der galaktischen Kugelsternhaufen. Die Graphik stammt aus Ashman et al. 1998 [1, Seite 37].

3.2.5 Metallizitätsverteilung von galaktischen Kugelsternhaufen¹¹

Die in Abbildung 3.6 dargestellte Verteilung der Anzahl der Kugelsternhaufen bezogen auf deren jeweilige Metallizität zeigt einen deutlichen Trend hin zu zwei Häufungspunkten der Metallizität. Der metallärmere Häufungspunkt bei $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.59$ ist wesentlich stärker ausgeprägt als der metallreichere bei $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.51$. Die entsprechenden Dispersionen der über die Verteilung gelegten Gaußkurven betragen $\sigma = 0.34$ beziehungsweise $\sigma = 0.23$.

Diese zwei unterschiedlichen Häufungswerte legen den Schluss nahe, dass es sich um zwei unterschiedliche Populationen von Kugelsternhaufen handelt. Zinn 1985 [70] argumentierte, dass die metallreichen Kugelsternhaufen räumliche und kinematische Eigenschaften einer „dicken Scheibe“ aufweisen.¹² Die räumliche Verteilung der metallreichen

¹¹Die folgende Darstellung orientiert sich an K. M. Ashman et al. 1998 [1, Seite 37ff].

¹²Andere Forscher wie van den Bergh 1993 [9] gehen davon aus, dass die metallreichen Kugelsternhaufen eher dem galaktischen Bulge zuzuordnen sind, aber es ist schwierig bei der geringen Anzahl von metallreichen Haufen zu einem eindeutigen Schluss zu gelangen. Diese Frage könnte durch die

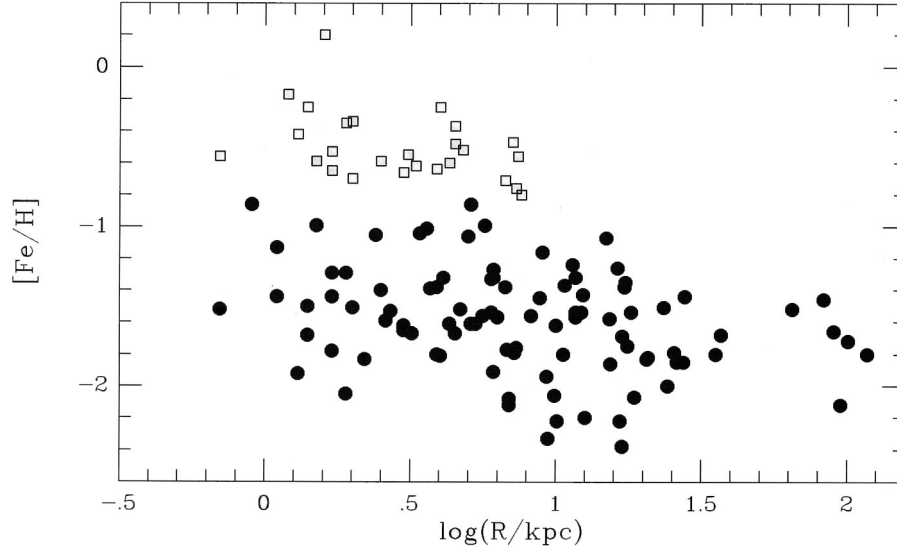


Abbildung 3.7: Darstellung des radialen Trends der Metallizitätsverteilung der galaktischen Kugelsternhaufen. Ausgefüllte Kreise stellen die Kugelsternhaufen im Halo dar, während die nicht ausgefüllten Quadrate die Kugelsternhaufen der Scheibe markieren. Die Graphik stammt aus Ashman et al. 1998 [1, Seite 40]

Kugelsternhaufen ist abgeflacht, und sie rotieren als System um das galaktische Zentrum. Konträr dazu verhalten sich die Kugelsternhaufen des Halosystems. Diese zeigen keine oder nur wenig Nettorotation als System und sind sphärisch verteilt.

Abgesehen von den soeben beschriebenen Unterscheidungsmerkmalen der zwei Subsysteme sind keine weiteren festzustellen. So untersuchte Armandroff 1993 [2, Seite 48ff] die Leuchtkraftfunktion beider Systeme, konnte jedoch nichts statistisch Signifikantes erkennen. Auch der Vergleich von M_v mit der Metallizität zeigt keine Tendenz.

Bei der Untersuchung von radialen Trends der Metallizität ist eine Unterscheidung der zwei Systeme unerlässlich, da sonst einzelne Aspekte des jeweiligen Subsystems möglicherweise verloren gehen. In Abbildung 3.7 ist die Unterscheidung der Subsysteme dargestellt. Ohne diese Differenzierung gäbe es aufgrund der metallreichen Kugelsternhaufen,

Erforschung von Kugelsternhaufen um andere Spiralgalaxien beantwortet werden.

welche sich bis etwa 8 kpc ausdehnen, einen negativen Metallizitätsgradienten. Nach einer Entfernung des Scheibensystems scheint bei den Halo-Kugelsternhaufen innerhalb von etwa 8 kpc nur ein sehr schwacher negativer Gradient zu existieren. Grund dafür könnte eine Verunreinigung der Statistik durch falsch zugeordnete Scheibenhaufen sein, da nicht für alle Kugelsternhaufen genaue kinematische Untersuchungen vorliegen. Das Scheibensystem scheint auch einen schwachen negativen Gradienten zu besitzen, wobei sich dieser wiederum durch genauere kinematische Daten einzelner Haufen leicht ändern könnte. Zusätzlich fand Armandroff 1993 [2, Seite 48] einen statistisch signifikanten Gradienten des Scheibensystems mit dem Abstand zur galaktischen Scheibe Z (etwa 2.7σ Abweichung).

4 Chemisch pekuliare Sterne am blauen Horizontalast

4.1 Spektroskopische Untersuchungen an blauen Horizontalaststernen

Greenstein et al. 1966 [17] fanden einen He-Mangel in alten Halo B Sternen. Die Erklärungsversuche für das geringe Vorhandensein von He in diesen Objekten führte zur Diffusionstheorie, welche in Abschnitt 4.2 behandelt wird. Abnormale He-Unterhäufigkeiten am BHB wurden auch von Baschek 1975 [4] beschrieben. Glaspey et al. 1989 [16] untersuchten zwei Sterne (CL 1007 und CL 1083) im Kugelsternhaufen NGC 6752. Der Stern mit 16.000 K wies eine um Faktor 50 höhere Häufigkeit in Fe als der Haufen auf, während der kühlere Stern mit 10.000 K keine Pekuliarität in Fe aufwies. Die Häufigkeit von Mg entspricht bei beiden Sternen dem Durchschnitt des Haufens.

Die Untersuchungen von Peterson et al. 1995 [50] von Sauerstofflinien in BHB Sternen und deren Rotationseigenschaften führten zur Erkenntnis einer möglicherweise bimodalen Verteilung der Rotationsgeschwindigkeiten von BHB Sternen in M13. Um diese Erkenntnis zu festigen und das möglicherweise damit in Zusammenhang stehende Problem des zweiten Parameters zu lösen, begannen Möhler et al. und Behr et al. eine Reihe von spektroskopischen Untersuchungen auch an heißeren BHB Sternen.

Behr et al. 2000 [6] fanden ebenfalls eine bimodale Verteilung der Rotationsgeschwindigkeiten am BHB, wobei ab einer $T_{eff} > 11.000$ K nur mehr der langsam rotierende Anteil der Verteilung mit $v \sin i < 10 \text{ km s}^{-1}$ auftrat. Diese abrupte Änderung in der Ro-

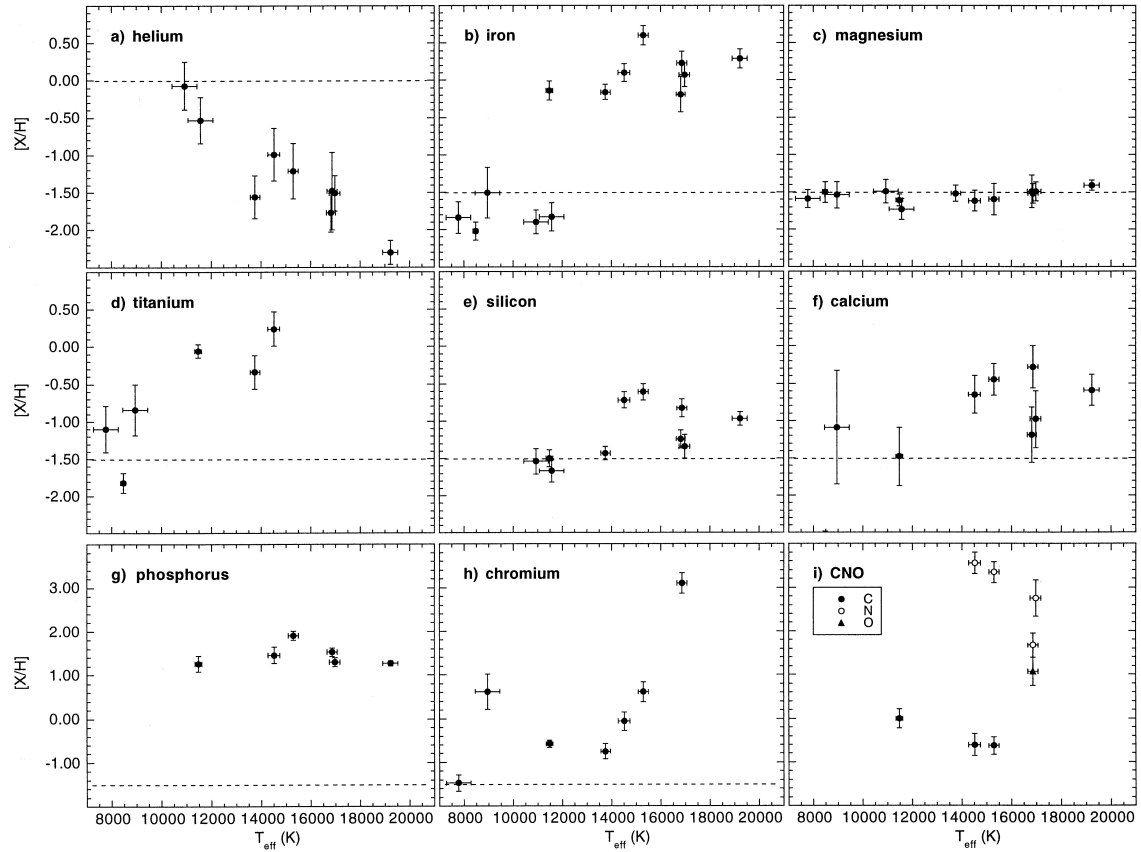


Abbildung 4.1: Häufigkeiten von He, Fe, Mg, Ti, Si, Ca, P, Cr, CNO von BHB Sternen in M13 bezogen auf die jeweilige Temperatur der Sterne. Die strichlierten Linien stellen den Mittelwert des jeweiligen Elements in M13 dar. Graphik aus Behr et al. 1999 [5, Seite 137].

tationsverteilung fällt in der Temperatur zusammen mit der von Ferraro et al. 1998 [14] als „G1“¹ bezeichneten Lücke im CMD von M13.

Die Elementhäufigkeitsbestimmungen von Behr et al. 1999 [5], in Abbildung 4.1 dargestellt, ergaben Ähnlichkeiten zu denen von Glaspey et al. Der He-Anteil sinkt zu den heißeren Sternen (19.000 K) von einer erwarteten solaren Häufigkeit um einen Faktor von 100. Fe liegt bei den kühleren Sternen im Haufenmittel von $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1,51$, steigt dann allerdings bei $T_{\text{eff}} \sim 12.000$ K abrupt auf solare Häufigkeit. Ti zeigt einen ähnli-

¹vgl. Abschnitt 4.3

chen Trend wie Fe, aber deutlich weniger ausgeprägt. Si und Ca sind nur leicht erhöht, wogegen P und Cr deutlich über dem Haufenmittel liegen. Mg zeigt ähnlich der Untersuchung von Glaspey et al. keinerlei Trend mit der Temperatur und entspricht dem erwarteten Mittel der Häufigkeit des Kugelsternhaufens. Die CNO Elemente zeigen auch Überhäufigkeiten, allerdings beruhen die Messungen dieser Elemente nur auf einer Linie pro Element.

Behr et al. 2000 [7] bestätigten ihre an M13 gewonnen Erkenntnisse mit Messungen an M15. Die Messung von Ti deutete allerdings eher auf einen kontinuierlichen Anstieg der Häufigkeit mit der Temperatur als auf einen abrupten hin. Die Häufigkeiten der Elemente Fe und Ti erreichten beide solare Werte, was bei diesem extrem metallarmen Kugelsternhaufen ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2,4$) einen Anstieg von Fe um einen Faktor von 300 bedeutet. Da die Sterne dieser Untersuchung nicht die direkte Umgebung der Lücke „G1“² von Ferraro et al. 1998 [14] abdecken, kann nicht so präzise auf den Zusammenhang zwischen „G1“ und dem Auftreten der chemischen Pekuliarität geschlossen werden wie bei der Untersuchung von M13. Im Gegensatz zu M13, wo nur langsam rotierende Sterne heißer als „G1“ gemessen wurden, existieren im Sample von M15 zwei Sterne, die um den Faktor zwei schneller rotieren als die vergleichbaren Sterne in M15. Diese schnell rotierenden heißen Sterne zeigen keine chemischen Pekuliaritäten und stützen die Annahme von Michaud et al. 1970 und 1983 [44, 45], dass schnelle Rotation zu meridionalen Strömungen führen kann, welche die Atmosphäre durchmischen.

Da sowohl in M13 als auch in M15 die Fe-Häufigkeiten auf solare Werte steigen, vermuten Behr et al. ein möglicherweise existierendes gemeinsames oberes Limit der Häufigkeit, welches durch Diffusion erreicht werden kann. Dabei stellt sich ein Gleichgewicht zwischen gravitationellem Absinken und strahlungsgetriebener Anhebung der Elemente ein.³

Vergleichbare systematische Effekte in BHB Sternen, welche Behr et al. entdeckt haben, fand auch Möhler et al. 1999 [47]. Allerdings waren diese Spektren von NGC 6752

²vgl. Abschnitt 4.3

³vgl. Abschnitt 4.2

von einer niedrigeren Auflösung als jene von Behr et al. Dennoch zeigen die 18 Sterne mit $T_{eff} > 11.500$ K eindeutig solare Fe Werte ($[Fe/H] \sim +0,1$), wohingegen Mg der Metallizität des Haufens entspricht.

4.2 Diffusionsmechanismus

Greenstein et al. 1967 [18] äußerten die Vermutung, die aufgetretenen He-Unterhäufigkeiten bei BHB Sternen könnten durch gravitationelles Absetzen der He-Atome erzeugt werden. Michaud et. al. 1970, 1983 ([44], [45]) bearbeiteten diese Idee in theoretischen Arbeiten.

Für den Mechanismus des gravitationellen Absetzens muss die äußere Atmosphäre des Sterns radiativ und stabil sein. Die Voraussetzung einer stabilen Atmosphäre schließt Konvektion und Materieströmungen in größeren Dimensionen aus. In einer solchen Umgebung diffundiert He durch das größere mittlere Molekulargewicht im Vergleich zu H nach unten. Der He-Gehalt im Stern bleibt konstant, aber die Schichten der Atmosphäre, in welchen die He-Absorptionslinien erzeugt werden, sind durch eine He-Unterhäufigkeit gekennzeichnet. Dadurch kommt es bei einer Messung der He-Häufigkeit mittels Bestimmung der Linienstärken zu einem Mangel an He.

Weitere Berechnungen von Michaud et al. ergaben, dass jene Bedingungen, welche die Diffusion von He begünstigen, auch zu einer Anreicherung von schweren Elementen in der Photosphäre führen, da schwerere Elemente durch radiative Beschleunigung nach oben gedrückt werden. Ob Elemente nach oben oder nach unten diffundieren, lässt sich aus dem Vergleich der Gravitationsbeschleunigung g am jeweiligen Ort der Atome mit der radiativen Beschleunigung g_R berechnen. Ohne selektiven Massenverlust und Mixing weisen die Ergebnisse auf eine Überhäufigkeit um den Faktor $10^3 - 10^4$ bei schweren Elementen hin. Die Grenze der Überhäufigkeit wird mit der Sättigung der Linien begründet. Auf die Möglichkeit einer noch größeren Häufigkeit von P, Ga, und Eu wird verwiesen.

Dieser Mechanismus gilt als Ursache der Pekuliarität bei CP2 Sternen der oberen Hauptreihe. Nach den Berechnungen von Michaud et al. und den qualitativ damit über-

einstimmenden Erkenntnissen von Behr et al. und Möhler et al. kann man davon ausgehen,⁴ dass dies auch der Grund für die Pekuliarität von Sternen am BHB ist.

4.3 Photometrische Besonderheiten von blauen Horizontalaststernen

Weitere wichtige Ergebnisse, die zu einer Bestätigung des Diffusionsmechanismus in BHB Sternen führten, lieferten Grundahl et al. 1998 [19]. Ihre Messungen erfolgten im Strömgrens-System und zeigten im u Filter überhelle Sterne am BHB von M13 im Vergleich zum Null-Alter-Horizontal-Ast (ZAHB). Der „Sprung“ tritt bei einer Farbe von $(u - y)_0 = 0,95$ auf und Sterne, die auf der heißeren Seite dieser Grenze liegen, sind um bis zu 0,4 mag heller als der ZAHB.

In der darauf aufbauenden Arbeit von Grundahl et al. 1999 [20] konnte gezeigt werden, dass dieses Phänomen nicht nur bei M13, sondern bei allen Kugelsternhaufen auftritt, welche mit ihrem BHB solche Farben bzw. Temperaturen erreichen, wobei es für das Auftreten des Sprungs im u Filter irrelevant erscheint, welche Metallizität und welche HB-Morphologie der Kugelsternhaufen besitzt. Auch ist das Einsetzen der Überhelligkeit bei allen Kugelsternhaufen innerhalb der Fehlergrenzen der Messungen bei derselben Temperatur ($T_{eff} \sim 11.500$ K) vorhanden. Bei M13 scheint bei ($T_{eff} \sim 20.000$ K) ein Ende der Überhelligkeit am BHB zu bestehen, und die u Helligkeit der Sterne entspricht dem ZAHB. Die drei anderen Kugelsternhaufen M2, M79 und NGC 6752 erreichen mit ihren BHBs ebenfalls das heiße Ende des „Sprunggebietes“, scheinen jedoch eine unterschiedliche Endtemperatur zu haben.

Der Temperaturbereich des u Sprungs ($20.000 \text{ K} > T_{eff} > 11.500 \text{ K}$) entspricht auch jenem, in welchen abnormal niedrige $\log g$ Werte von BHB Sternen gemessen wurden. Daher vermuten Grundahl et al. einen gemeinsamen Auslöser für beide Effekte. Nach ihrer Ansicht wäre dies die Überhäufigkeit von Metallen in der Atmosphäre und somit der Diffusionsmechanismus.

⁴vgl. Abschnitt 4.1

Ferraro et al. 1997 und 1998 [13, 14] untersuchten mit dem Hubble Space Telescope (HST) Kugelsternhaufen auf besondere Eigenschaften im BHB. Dabei konnten sie zeigen, dass in den Haufen M13 und M80 mehrere Lücken im CMD des BHBs existieren. Da sich einige dieser Lücken bei den Haufen an derselben Stelle befanden, gingen sie davon aus, dass es sich um „wirkliche“ Lücken handelt und nicht um statistisch zufällig entstandene. Sie vermuteten, dass die Entstehung dieser Lücken auf unterschiedliche physikalische Prozesse beim Massenverlust in der frühen Phase des RGBs zurückzuführen sei.

Die sowohl in M13 als auch in M80 auftretende Lücke „G1“ bei ($T_{eff} \sim 11.000$ K) scheint sowohl mit dem Beginn der chemischen Pekuliarität als auch mit dem Sprung in der u Helligkeit in Verbindung zu stehen. Die Lücke „G3“ in M13 bei ($T_{eff} \sim 19.000$ K) ist statistisch nicht sehr signifikant, dennoch könnte ein Zusammenhang des heißen Endes des Gebietes mit dem u Sprung in M13 bestehen.

4.4 Das Δa System

Hinweise in der Arbeit von Wolff 1967 [69] und Erkenntnisse von Kodaira 1969 [30] mittels Spektrumscanner zeigten erstmals die Existenz einer Flussdepression bei ungefähr $5200\text{\AA}$. Maitzen et al. wiesen zwischen 1972 und 1975 photometrisch daraufhin die Existenz dieser Depression nach⁵. Schließlich entwickelte Maitzen 1976 [36] ein Filtersystem zur Detektion von Ap-Sternen. Da heutzutage Prestons Klassifizierung⁶ allgemeine Verbreitung gefunden hat, werden im Folgenden diese Sterne mit CP2 bezeichnet. Das System besteht aus drei Filtern mittlerer Halbwertsbreite, wovon zwei Filter das Kontinuum an beiden Seiten der Depression und der dritte Filter die Einsenkung der Strahlungs-
menge bei $5200\text{\AA}$ direkt misst. Als Kontinuumsfilter werden am langwelligen Ende der Depression der y -Filter des Strömogensystems und am kurzwelligen ein Filter mit der Bezeichnung g_1 verwendet. Die Depression selbst wird im Filter g_2 erfasst. In Abbildung 4.2 ist die Transparenzkurve der Filter g_1 und g_2 dargestellt. Darunter wurde zum Vergleich ein Spektrumscan von 108 Aqr im entsprechenden Wellenlängenbereich aufgetragen.

⁵vgl. H. M. Maitzen 1972-1975: [32], [33], [34] und [35].

⁶vgl. G. Preston 1974 [51]

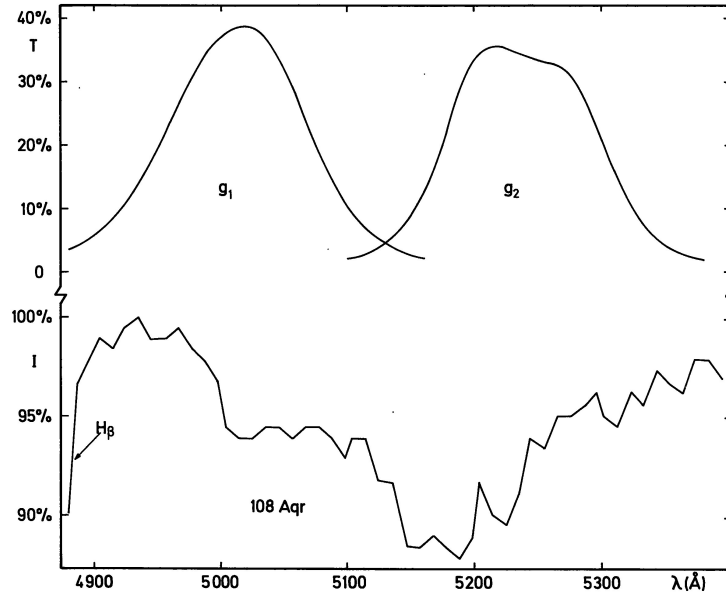


Abbildung 4.2: Filter g_1 und g_2 im Vergleich zur 5200Å Depression von 108 Aqr. Die Auflösung des Spectrumscans beträgt 10Å. Graphik ist aus Maitzen 1976 [36, Seite 225].

Über diese Filter wird der Index a berechnet:

$$a = g_2 - (g_1 - y)/2$$

Die Kontinuumsfilter g_1 und y liegen in der Wellenlänge symmetrisch um den Depressionsfilter g_2 , um Farbeinflüsse auf den Index so gering wie möglich zu halten, so kürzt sich z.B. die interstellare Verfärbung heraus.

Durch die unterschiedlichen Halbwertsbreiten und Durchlässigkeiten der Filter, die nichtlineare Flußverteilung der Sterne und die ebenfalls nichtlineare spektrale Empfindlichkeit der Detektoren besitzen „normale“ Sterne einen von 0 verschiedenen a -Wert, welcher zudem eine leichte lineare Abhängigkeit von der Farbe aufweist. Deshalb ist der eigentliche Pekuliaritätsindex Δa :

$$\Delta a = a - a_0$$

Wobei gilt: $a_0 = a_0(b - y)$ bzw. $a_0 = a_0(B - V)$ und a_0 bezeichnet die a -Werte eines

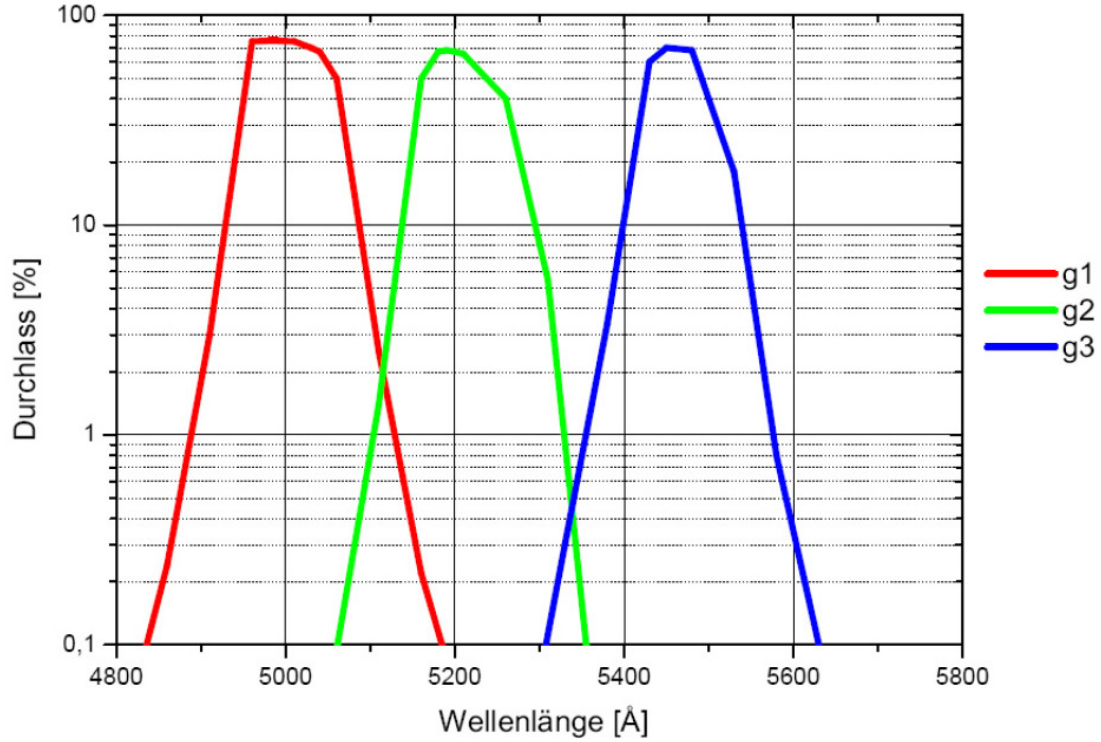


Abbildung 4.3: Filterkurven

Normalsterns an der Stelle $(b-y)$ bzw. $(B-V)$. Die Lage der Normalsterne im Diagramm a gegen $(b-y)$ wird als Normalitätslinie bezeichnet. Alle Sterne, die mehr als 3σ von dieser Linie abweichen, können als chemisch peculiar angesehen werden.

Die Vorteile des Filtersystems gegenüber der Suche von CP2-Sternen mittels Spektroskopie liegen in der wesentlich größeren Reichweite, bei Anwendung von CCD-Photometrie auch dadurch, dass viele Sterne eines Sternhaufens gleichzeitig zu messen sind.

Seit der Einführung des Filtersystems wurden auch Arbeiten publiziert, die sich mit einer möglichen Verbesserung des Systems und weiteren Einsatzmöglichkeiten beschäftigten. Maitzen und Vogt untersuchten 1983 [37] den Einfluß von Variabilität der CP-Sterne auf das Δa -System. Die Erkenntnis, dass ihre Variabilität im Allgemeinen nur eine sehr kleine Amplitude im a -Wert verursacht, zeigt die Fähigkeit des Systems, CP2-Sterne

Filter	Wellenlänge [Å]	Halbwertsbreite [Å]	maximaler Durchlaß [%]
g1	5007	126	78
g2	5199	95	68
g3	5466	108	70

Tabelle 4.1: Filtertabelle

auch in einer ungünstigen Phase der Periode sicher entdecken zu können. 1989 wurde von Maitzen und Pavlovski [38, 49] die Erkenntnis gewonnen, dass Be/Ae und λ Bootis Sterne signifikant negative Δa -Werte aufweisen.

Für die Untersuchung des Kugelsternhaufens M13 in dieser Arbeit wurden die Filter, die in Abbildung 4.3 dargestellt sind, verwendet. Da sich im Zuge von Verbesserungen am System auch die Transparenzkurve des y-Filters von Strömgren leicht änderte, trägt dieser die Bezeichnung g3. Dieser Filter ist jetzt annähernd gleich breit in der Wellenlänge wie die anderen Filter. Die zentralen Wellenlängen, Halbwertsbreiten, sowie die maximale Transparenz der einzelnen Filter sind in Tabelle 4.1 festgehalten.

5 Die Messung von M13 im Δ a-System

5.1 Objektauswahl und Aufnahmegewinnung

Das Ziel dieser Arbeit ist zu zeigen, ob chemisch pekuliare Sterne am BHB von Kugelsternhaufen im Δ a-System identifizierbar sind. Die Grundlage für diese Machbarkeitsstudie bildet die Arbeit von Behr et al. 1999 [5], die zeigen konnten, dass chemisch pekuliare Sterne am BHB in M13 existieren und ähnliche chemische Eigenschaften wie CP2-Sterne aufweisen (vgl. Abschnitt 4.1). Grund für das Vorhandensein dieser Sterne in M13 scheint die Existenz eines langen BHBs zu sein, da chemische Pekuliaritäten nur ab einer $T_{eff} > 11.500$ K aufzutreten scheinen.

Die Kooperation mit Ilian Iliev vom Institut für Astronomie der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften und die Möglichkeit den Kugelsternhaufen M13 von der nördlichen Hemisphäre aus aufzunehmen bestärkten das Vorhaben M13 als Testobjekt zu wählen. Das geringe $E(B - V)$ und das somit ebenfalls geringe A_V von M13 ermöglichten mit dem National Astronomical Observatory Rozhen (2m Ritchey-Chretien-Coude Teleskop) die benötigte scheinbare Helligkeit m_V zu erreichen um chemisch pekuliare Sterne am BHB zu identifizieren. Da noch keine Suchkarten von Behr et al. [5] zum Zeitpunkt der Aufnahmen verfügbar waren, wurden drei Felder gewählt um einen möglichst großen Bereich des Kugelsternhaufens abzubilden.

Die Bilder mit dem Aufnahmezeitpunkt und der Belichtungsdauer sowie dem abgebildeten Feld sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Das Seeing während der Aufnahmen betrug ein

bis zwei Bogensekunden. Die Aufnahmegewinnung wurde von Ilian Iliev durchgeführt. Um die bei CCD Aufnahmen üblichen Korrekturen anbringen zu können wurden Bias, Dark und Flatfield Aufnahmen angefertigt.

Tabelle 5.1: Aufnahmen

Bild	Beobachtungsdatum	Beobachtungszeit (UT)	Belichtungszeit (hh:mm:ss)	Feld	Filter
cd1	03.07.2003	20:01:59	00:01:40	Süden	g_3
cd2	03.07.2003	20:15:03	00:01:40	Süden	g_3
cd3	03.07.2003	20:17:46	00:01:40	Süden	g_3
cd4	03.07.2003	20:21:39	00:01:41	Süden	g_1
cd5	03.07.2003	20:24:24	00:01:40	Süden	g_1
cd6	03.07.2003	20:27:49	00:01:40	Süden	g_2
cd7	03.07.2003	20:30:33	00:01:40	Süden	g_2
cd8	03.07.2003	20:36:12	00:01:40	Süden	g_3
cd9	03.07.2003	20:38:56	00:01:40	Süden	g_3
cd10	03.07.2003	20:45:34	00:01:39	Süden	g_1
cd11	03.07.2003	20:48:45	00:01:40	Süden	g_1
cd12	03.07.2003	20:52:12	00:01:43	Süden	g_2
cd13	03.07.2003	20:54:59	00:01:40	Süden	g_2
cd14	03.07.2003	21:15:36	00:01:40	Südwesten	g_2
cd15	03.07.2003	21:18:20	00:01:39	Südwesten	g_2
cd16	03.07.2003	21:23:42	00:01:40	Südwesten	g_1
cd17	03.07.2003	21:26:26	00:01:40	Südwesten	g_1
cd18	03.07.2003	21:29:35	00:01:40	Südwesten	g_3
cd19	03.07.2003	21:32:19	00:01:40	Südwesten	g_3
cd20	03.07.2003	21:55:19	00:01:40	Südwesten	g_2

Tabelle 5.1: Aufnahmen

Bild	Beobachtungsdatum	Beobachtungszeit (UT)	Belichtungszeit (hh:mm:ss)	Feld	Filter
cd21	03.07.2003	21:58:03	00:01:39	Südwesten	g_2
cd22	03.07.2003	22:01:26	00:01:40	Südwesten	g_1
cd23	03.07.2003	22:04:09	00:01:40	Südwesten	g_1
cd24	03.07.2003	22:08:11	00:01:40	Südwesten	g_3
cd25	03.07.2003	22:10:54	00:01:40	Südwesten	g_3
cd26	03.07.2003	22:14:44	00:01:40	Westen	g_3
cd27	03.07.2003	22:17:28	00:01:40	Westen	g_3
cd28	03.07.2003	22:21:19	00:01:40	Westen	g_1
cd29	03.07.2003	22:24:03	00:01:46	Westen	g_1
cd30	03.07.2003	22:27:22	00:01:40	Westen	g_2
cd31	03.07.2003	22:30:06	00:01:40	Westen	g_2
cd32	03.07.2003	22:33:30	00:01:40	Westen	g_3
cd33	03.07.2003	22:36:14	00:01:39	Westen	g_3
cd34	03.07.2003	22:39:38	00:01:40	Westen	g_1
cd35	03.07.2003	22:42:22	00:01:40	Westen	g_1
cd36	03.07.2003	22:46:05	00:01:40	Westen	g_2
cd37	03.07.2003	22:48:49	00:01:40	Westen	g_2

5.2 Korrektur der Aufnahmen und Photometrie mit IRAF

Die Bearbeitung der Aufnahmen sowie die Gewinnung der Photometrie erfolgte mit dem Programm IRAF. Die Korrekturen, die an einer CCD Aufnahme anzubringen sind, sorgen für einheitliche Helligkeitsmessungen verschiedener Aufnahmen. So wird aus mehre-

ren Bias-Aufnahmen ein Biasbild gemittelt um einen technischbedingten Offset der Helligkeit von den wissenschaftlichen Aufnahmen abziehen zu können. Dieser Offset dient der Vermeidung von negativen Pixelwerten, welche durch das Ausleserauschen entstehen können. Da Ladungsträger in den einzelnen Pixeln einer CCD nicht nur durch Photonen sondern auch thermisch erzeugt werden, sind zur Korrektur Dunkelstromaufnahmen (Darks) zu machen. Diese Aufnahmen korrigieren den mit steigender Temperatur immer größer werdenden Betrag des Dunkelstroms. Allerdings wird bei Subtraktion des Darks nur der systematische Anteil korrigiert, nicht aber die auftretende Streuung. Um ungleiche Empfindlichkeit und ungleichmäßige Ausleuchtung des Detektors auszugleichen werden sogenannte Flatfields aufgenommen. Dazu wird eine gleichmäßig beleuchtete Fläche aufgenommen, sei es in der Kuppel selbst oder gegen den Himmel in der Dämmerung. Diese Flatfields werden für jeden Filter aufgenommen um mögliche Transmissionsvariationen (inkl. Verunreinigungen) der Filter mit auszugleichen. Diese Aufnahmen werden ebenfalls um den Bias und den Dunkelstrom korrigiert, und auf einen gewissen Betrag normiert. Danach werden die wissenschaftlichen Aufnahmen durch die korrigierten Flatfields dividiert.

Da ein Kugelsternhaufen wie M13 aus sehr eng beieinander stehenden Sternen besteht, wurde bei der Photometrie auf die Point Spread Funktion (PSF) zurückgegriffen. Unter der PSF versteht man die Abbildung einer Punktquelle auf dem Detektor, welche nicht mehr einem Punkt entspricht. Im Idealfall wird eine Punktquelle bei einer runden Apertur als Kreis mit Kreisringen, welche den einzelnen Beugungsmaxima entsprechen, dargestellt. Bei einer realen Photometrie ist die Form der PSF nicht so einfach zu bestimmen. So ist zum Beispiel die Erdatmosphäre durch die Luftbewegungen, welche das Seeing verursachen, ein Faktor, der das ursprüngliche Beugungsbild verschmiert. Um einzelnen Sternen, welche in einem Kugelsternhaufen durch einen sehr geringen Winkelabstand voneinander getrennt sein können, die entsprechenden Helligkeitswerte zuzuordnen zu können, muß eine PSF für die jeweilige Aufnahme angefertigt werden. Diese PSF wird jedem Stern auf dem Bild zugewiesen, und für nah beieinander stehende Sterne wird eine Lösung der Einzelhelligkeiten durch simultanes Anpassen der PSF an

die beteiligten Sterne erreicht. Durch Subtraktion der errechneten PSF der Sterne eines Bildes ist die Detektion von schwächeren Sternen, die zunächst von helleren überstrahlt waren, möglich.

Die Photometrie von Sternen mittels PSF wurde in IRAF mit dem Package DAOPHOT realisiert. Zunächst wurden mit dem Befehl DAOFIND die Positionen von Sternen, die einen gewissen Grenzwert in der Helligkeit übersteigen, auf den Aufnahmen bestimmt. Dieser Wert wird in der Einheit Analog Digital Unit (ADU) angegeben. Um einen Startwert der Helligkeiten für die acPSF zu erhalten, wird eine Aperturphotometrie auf die Sterne angewendet. Dazu werden die Halbwertsbreiten (FWHMs) mittels der hellsten Sterne auf der Aufnahme bestimmt, welche den Radius der Aperturphotometrie festlegen. In der Aperturphotometrie wird auch der Himmelshintergrund berücksichtigt: innerhalb des Aperturradius werden alle Photonen gezählt, auch die des Himmelshintergrundes. Über eine Kreisringfläche in einem gewissen Abstand zum Sternzentrum wird für jeden Stern einzeln der Himmelshintergrund bestimmt und, entsprechend auf die jeweilige Aperturgröße des Sternes skaliert, vom Stern abgezogen. Für die vorliegenden Daten betrug der Aperturradius 10 Pixel, der für den Himmelshintergrund verwendete Radius betrug ebenfalls 10 Pixel. Die so ermittelten Helligkeiten werden wiederum als Startwerte für das PSF-Fitting verwendet. Für die PSF selbst werden nun möglichst helle Sterne ausgewählt, die isoliert stehen und in ihrer Helligkeit im linearen Bereich der CCD liegen. Somit wird die PSF auch in den Randbereichen akkurat, was einerseits wichtig für die genaue Helligkeitsbestimmung, andererseits für die Identifizierung schwacher, sich überlagernder Sterne ist. Um eine Kontinuität für die vorliegenden Aufnahmen von M13 zu erhalten, wurden für die jeweiligen Aufnahmefelder möglichst immer dieselben Sterne verwendet.

In Abbildung 5.1 ist anhand einer Aufnahme gezeigt, welche Sterne für die PSF ausgewählt wurden. Der innere Kreis zeigt den für die Aperturphotometrie verwendeten Aperturradius an, der äussere Kreis stellt die Grenze des zur Bestimmung des Himmelshintergrundes verwendeten Gebietes dar.

Die aus dieser Auswahl von Sternen gewonnene PSF ist in Abbildung 5.2 gezeigt. Es

ist eine leichte Defokussierung zu erkennen, da der dunkle Bereich in der Mitte der PSF eine Abbildung des Sekundärspiegels des Teleskopes ist. Außerdem ist ein komatischer Effekt des Teleskops durch den Anstieg der Helligkeit von der linken oberen hin zur rechten unteren Ecke zu bemerken.

Nun wird die berechnete PSF auf jeden mittels DAOFIND identifizierten Stern zur Bestimmung der Helligkeiten angewendet. Ein weiterer Schritt wäre, die bereits identifizierten Sterne von der Originalaufnahme abzuziehen, um etwaige lichtschwächere Sterne mittels DAOFIND finden zu können. Da in vorliegendem Fall die Fehler der Helligkeiten bereits einen zu hohen Wert angenommen haben, wurde auf das weitere Auffinden von schwächeren Sternen verzichtet.

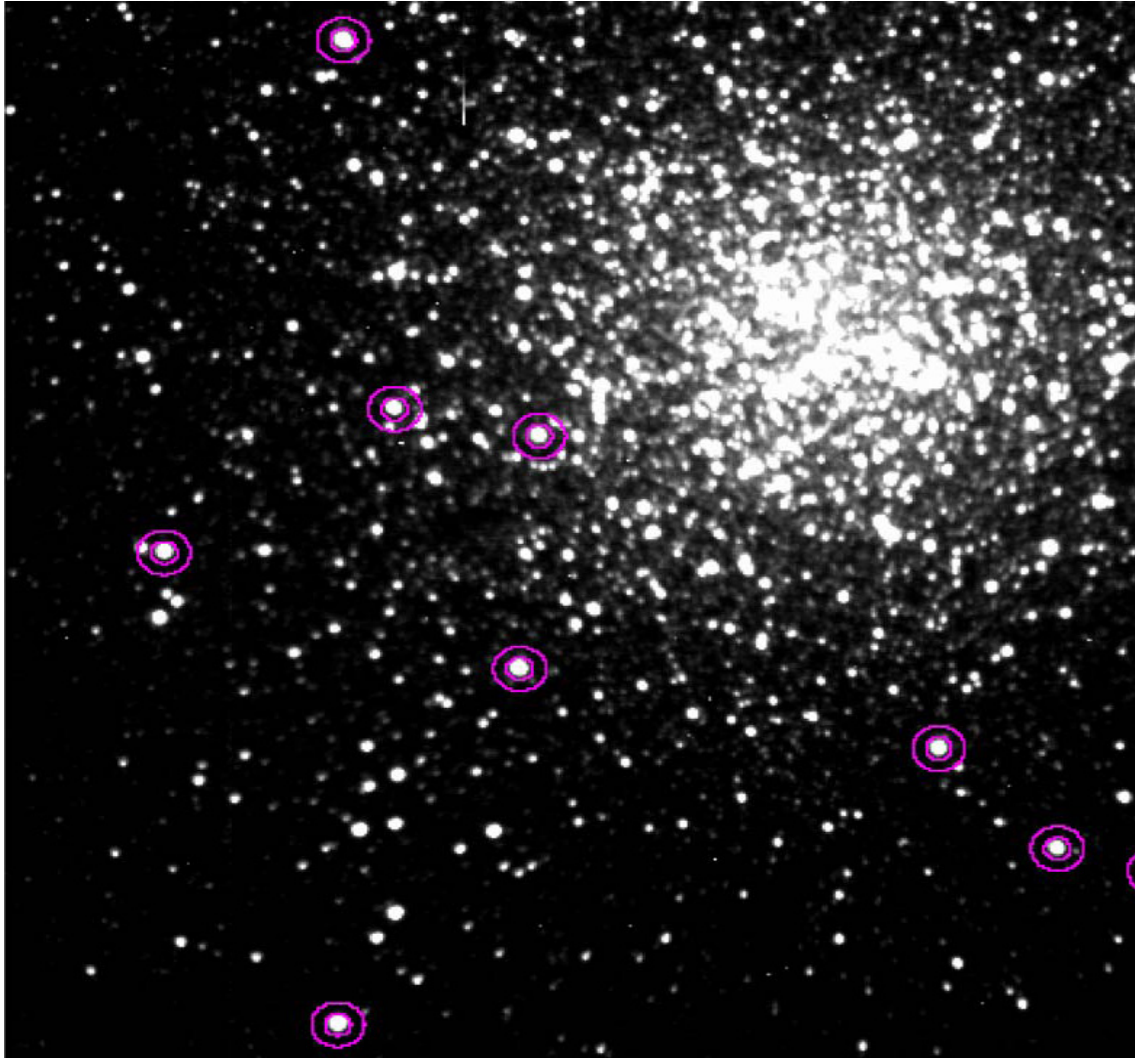


Abbildung 5.1: Beispielsterne für PSF

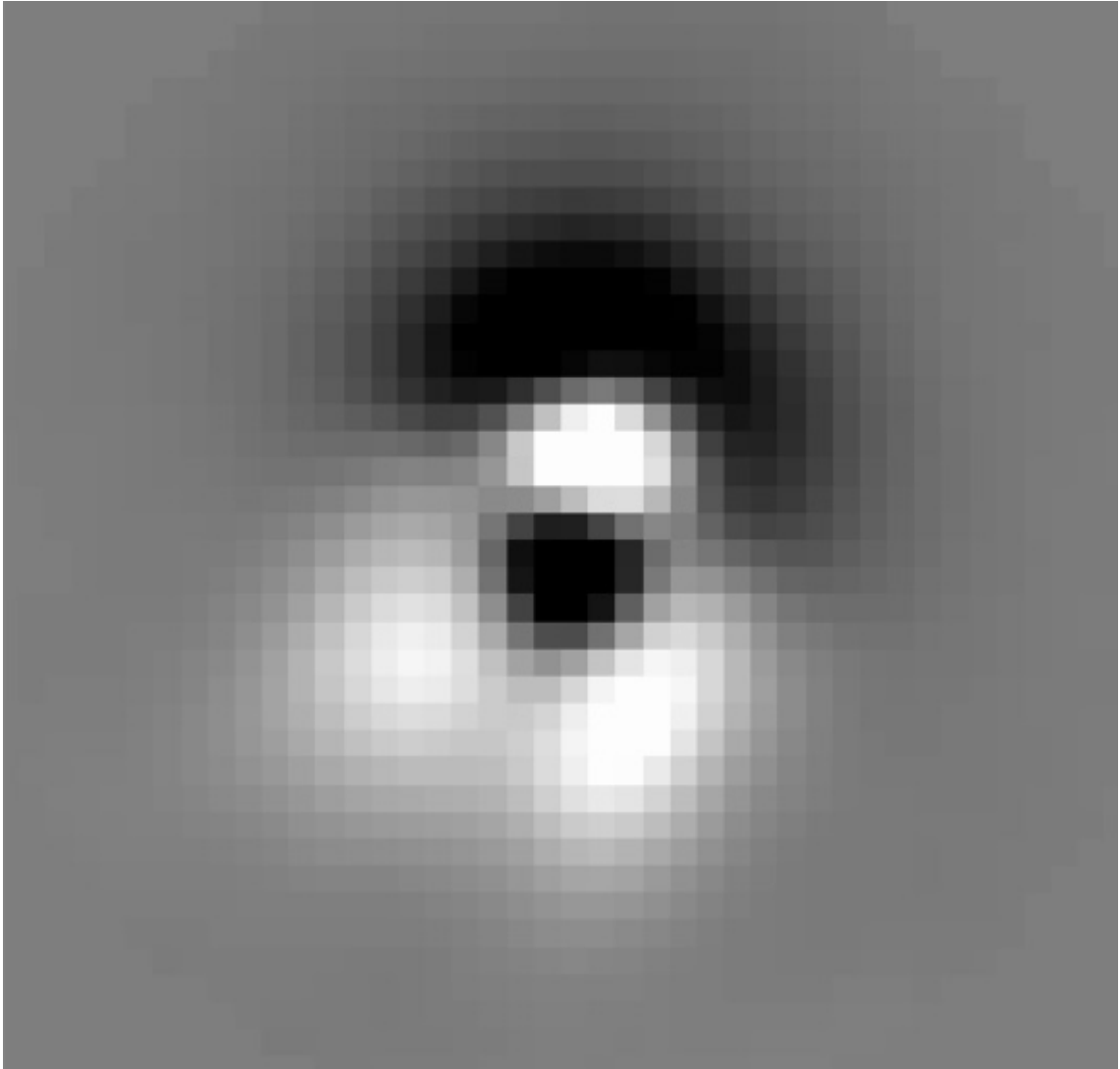


Abbildung 5.2: Beispiel einer typischen PSF aus den markierten Sternen der Abbildung 5.1

5.3 Mittelung der Daten und Fehlerrechnung

Da die Pixelkoordinaten eines Sterns auf den verschiedenen Aufnahmen unterschiedliche Werte aufweisen, musste erst eine Korrelation der Pixelkoordinaten eines Sterns auf den unterschiedlichen Aufnahmen erreicht werden. Zu diesem Zweck wurde der Stern M13 Arp II-90 [3], welcher auf allen Aufnahmen vorhanden ist, als neuer Nullpunkt festgelegt. Alle anderen Sterne eines Bildes erhielten dann relative Koordinaten zu diesem Stern, um später eine eindeutige Identifizierung eines Sterns auf den unterschiedlichen Aufnahmen zu ermöglichen. Die durch das Seeing und die Bestimmung der Helligkeit mittels PSF verursachte statistische Verschiebung der Pixelkoordinaten der Sternörter wurde mit Hilfe eines Programmes berechnet: ein Stern wurde als derselbe Stern auf unterschiedlichen Aufnahmen identifiziert, wenn seine Koordinaten innerhalb von ± 3 Pixel lagen und auf dieser Aufnahme kein weiterer Stern in diesen Intervallgrenzen vorhanden war.

Um noch vorhandene Helligkeitsdifferenzen einzelner Bilder auszugleichen, wurde von allen Bildern eine mittlere Helligkeit der abgebildeten Sterne errechnet. Von diesen mittleren Helligkeiten wurde wiederum ein Mittelwert gebildet. Nun konnte damit eine Differenz der Einzelbilder von diesem Mittelwert gebildet und als Korrektur an jedem einzelnen Bild angebracht werden. Somit erhielt die Helligkeitsmessung jedes einzelnen Sterns eines Bildes dieselbe Korrektur.

Die Mittelung der Helligkeiten eines Sterns von den verschiedenen Aufnahmen erfolgte ohne Gewichtung. Die Graphik 5.3 zeigt ein CMD der Filter g1 und g3 des Δ a-Systems, in welchem alle Sterne mit mindestens 3 Messungen in allen Filtern dargestellt sind. Das von denselben Sternen gebildete Δ a-Diagramm zeigt die Graphik 5.4.

Die Fehler wurden nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet:

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}$$

Dabei ist σ_f der Fehler einer berechneten Größe, f ist die Funktion zur Berechnung der Größe. x_i entspricht den unterschiedlichen Messungen, aus denen mittels der Funktion f das Messergebnis berechnet wird, σ_{x_i} ist der Messfehler der einzelnen Messungen.

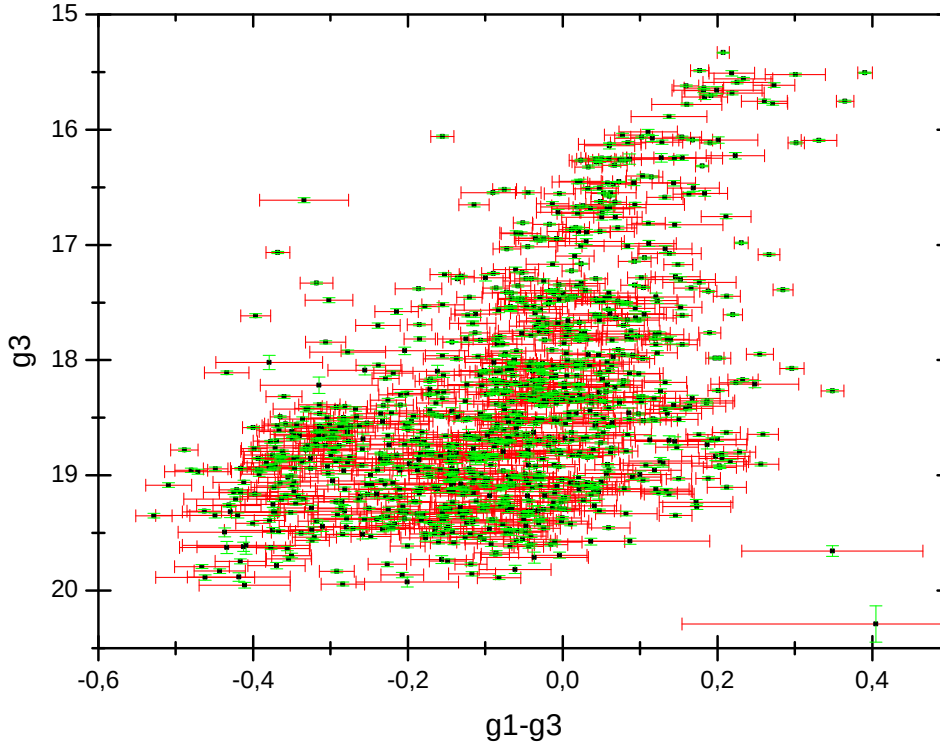


Abbildung 5.3: CMD im Δa -System aller Sterne mit mindestens drei Messungen in allen Filtern. Zur Veranschaulichung wurden die Fehler eingezeichnet. Die Nullpunkte des Graphen sind instrumentell.

Es wurden die oben angeführten Schritte zur Korrektur etwaiger noch vorhandener Helligkeitsdifferenzen in die Fehlerrechnung einbezogen. Nach der Mittelung der Einzelmessungen wurde getrennt davon die Fehlerrechnung mit den von IRAF bestimmten Fehlern erneut durchgeführt. Anschließend wurde aus diesen zwei voneinander unabhängigen Fehlern mit erneuter Fehlerfortpflanzung der Gesamtfehler eines jeden Sterns in jedem Filter berechnet. Für die nötige Bestimmung der Fehler in a und $g1-g3$ wurde die Fehlerfortpflanzung erneut auf die Fehler der einzelnen Filter angewendet. Abbildung 5.5 zeigt die Histogramme der Fehler in $g3$, $g1-g3$ und a . In den Diagrammen ist außer-

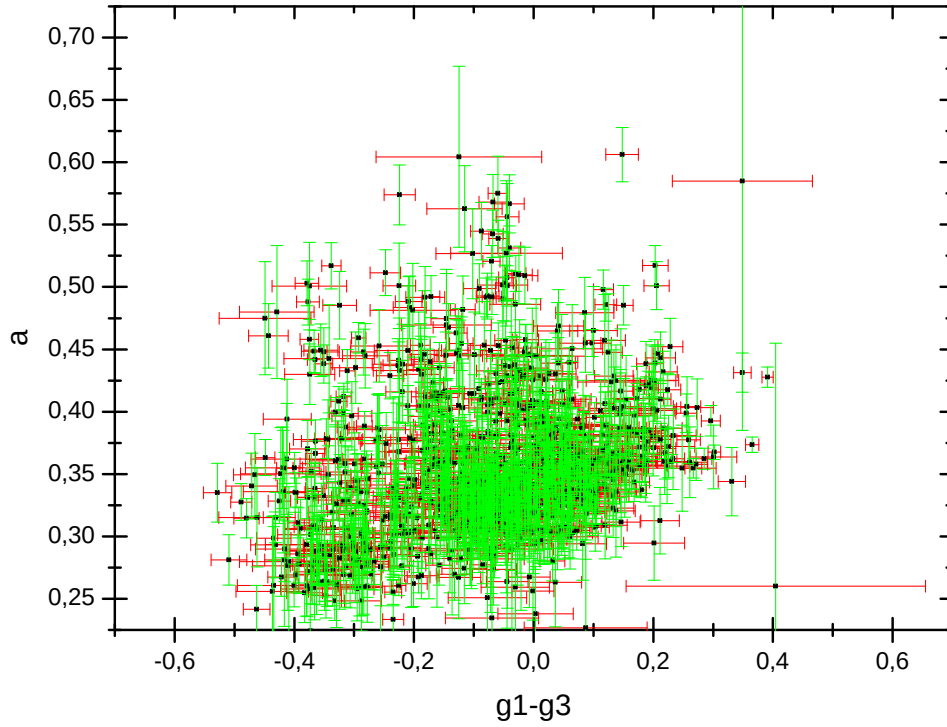


Abbildung 5.4: Δa -Diagramm aller Sterne mit mindestens drei Messungen in allen Filtern. Zur Veranschaulichung wurden die Fehler eingezeichnet. Die Nullpunkte des Graphen sind instrumentell.

dem die berechnete Normalverteilung der Fehler eingezeichnet. Die einzelnen Werte der Kurven sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Zu beachten ist, dass der Fehler in $g1-g3$ im Mittel größer ist als der Fehler in a , da in a die Fehler der Filter $g1$ und $g3$ nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nur zu einem Viertel eingehen.

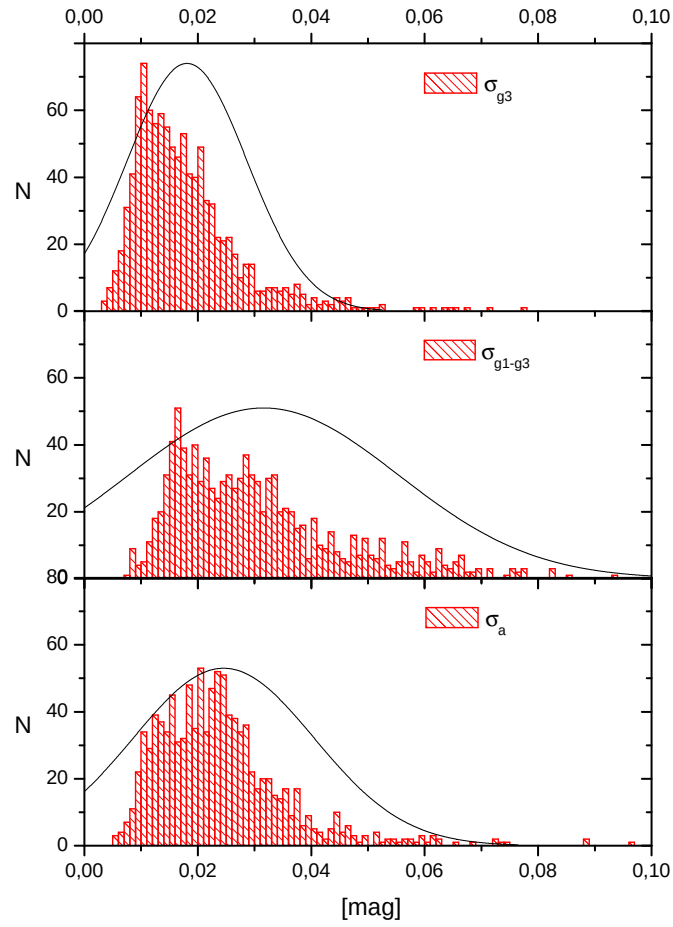


Abbildung 5.5: Fehler in $g3$, $g1-g3$ und a

Fehler	Mittelwert [mag]	Standardabweichung [mag]	Standardfehler des Mittelwertes [mag]
σ_{g3}	0,018	0,011	$3,281 * 10^{-4}$
σ_{g1-g3}	0,032	0,024	$7,384 * 10^{-4}$
σ_a	0,025	0,016	$4,944 * 10^{-4}$

Tabelle 5.2: Werte der Normalverteilungskurven der Fehlerhistogramme

5.4 Auswertung der Daten

Zur endgültigen Analyse der Messdaten wurden nur jene Sterne verwendet, welche in $g1-g3$ und a kleinere Fehler als die in Tabelle 5.2 angegebenen Mittelwerte haben. Damit wurden 558 Sterne für eine weitere Betrachtung herangezogen. Die vollständige Tabelle dieser Sterne ist im Anhang in der Tabelle A.1 auf den Seiten I bis XVI nachzulesen. Die angegebenen Koordinaten beziehen sich auf den in Abschnitt 5.3 angegebenen Stern. Ein Pixel entspricht etwa $0,32''$.

Abbildung 5.6 zeigt das Δa -Diagramm der ausgewählten Sterne. Die angezeigte Ausgleichsgerade wurde durch Iteration ermittelt. Die Grundlage für die Iteration bildete das Vorhersageband mit einem Konfidenzwert von 95% (dies entspricht 3σ). Sterne, die außerhalb des Vorhersagebandes liegen, können als Sterne mit signifikanten Δa -Werten angesehen werden. Diese Sterne sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. In Abbildung 5.6 sind sie mit farbigen Fehlerbalken versehen.

Da stark von der Ausgleichsgerade abweichende Sterne die Lage derselben beeinflussen, und die Ausgleichsgerade eine Normalitätslinie darstellt, wurde eine Iteration durchgeführt, bei welcher die signifikanten Sterne zur Bildung der Ausgleichsgerade nicht mitberücksichtigt wurden. Diese Gerade (rot) ist in Abbildung 5.6 mit dem neu berechneten Vorhersageband (blau) eingezeichnet. Jene Sterne, welche erst nach der Iteration außerhalb des Vorhersagebandes lagen, sind in Abbildung 5.6 mit schwarzen Fehlerbalken eingezeichnet und in Tabelle 5.4 aufgelistet.

Alle Sterne, die nach der Iteration innerhalb des Vorhersagebandes liegen, können als chemisch nicht pekuliar angesehen werden, und sind ohne Fehlerbalken eingezeichnet. Mittels blauer Fehlerbalken ist der maximale Fehler in $g1-g3$ und in a in diesem Diagramm eingezeichnet. Die Formel für die Normalitätslinie nach der Iteration ist:

$$a = 0,360(\pm 0,002) + 0,097(\pm 0,011) * (g1 - g3)$$

Um die in Abbildung 5.6 signifikanten Sterne auf deren Lage im CMD überprüfen zu können und deren mögliche Lage am BHB festzustellen, wurden Korrelationen der Filter zu den Filtersystemen von Strömgren und Johnson berechnet. Dazu wurden Messungen

von Grundahl et al. 1998 [19]¹ für die Korrelation zum Strömgrensystem verwendet. Die Vergleiche zum Johnsonsystem wurden aus den Arbeiten von Kadla 1966 [27] und Rey et al. 2001 [52] abgeleitet.

Da in weiterer Folge in dieser Arbeit nur auf die Strömgrenrelationen genauer eingegangen wird, sind die Abbildungen zu den Korrelationen zum Johnsonsystem im Anhang abgebildet (Abbildungen B.1 bis B.4 auf den Seiten XVII und XVIII). Die Ergebnisse der Korrelationsrechnungen sind in den Tabellen 5.5 und 5.6 aufgelistet. Die Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen die Korrelationen von g_3 zu y bzw. (g_1-g_3) zu $(b-y)$.

Daraus wurde das CMD im Strömgrensystem errechnet, welches in Abbildung 5.9 dargestellt ist. Rot eingezeichnet sind Sterne, die signifikante Δa -Werte aufweisen. Jene Sterne mit signifikanten Δa -Werten nach der Iteration sind grün eingezeichnet. Nicht signifikante Sterne sind als schwarze Datenpunkte dargestellt.

Um das Wiederauffinden der signifikanten Sterne zu ermöglichen wurden Suchkarten angefertigt. Diese Karten wurden getrennt für signifikante Sterne *vor* und *nach* der Iteration angefertigt, und sind in den Abbildungen 5.10 und 5.11 dargestellt. Um einen Vergleich mit den Sternen aus den Arbeiten von Behr et al. 1999 [5] und 2003 [8] zu ermöglichen wurde analog zu Behr 2003 der Stern Arp IV-49 aus Arp 1955 [3] markiert. Die Nummern beziehen sich auf die Identitätsnummer der Stern in den Tabellen 5.3 bzw. 5.4. In den Karten liegt Norden oben und Osten links.

¹Dankenswerterweise zur Verfügung gestellt von F. Grundahl.

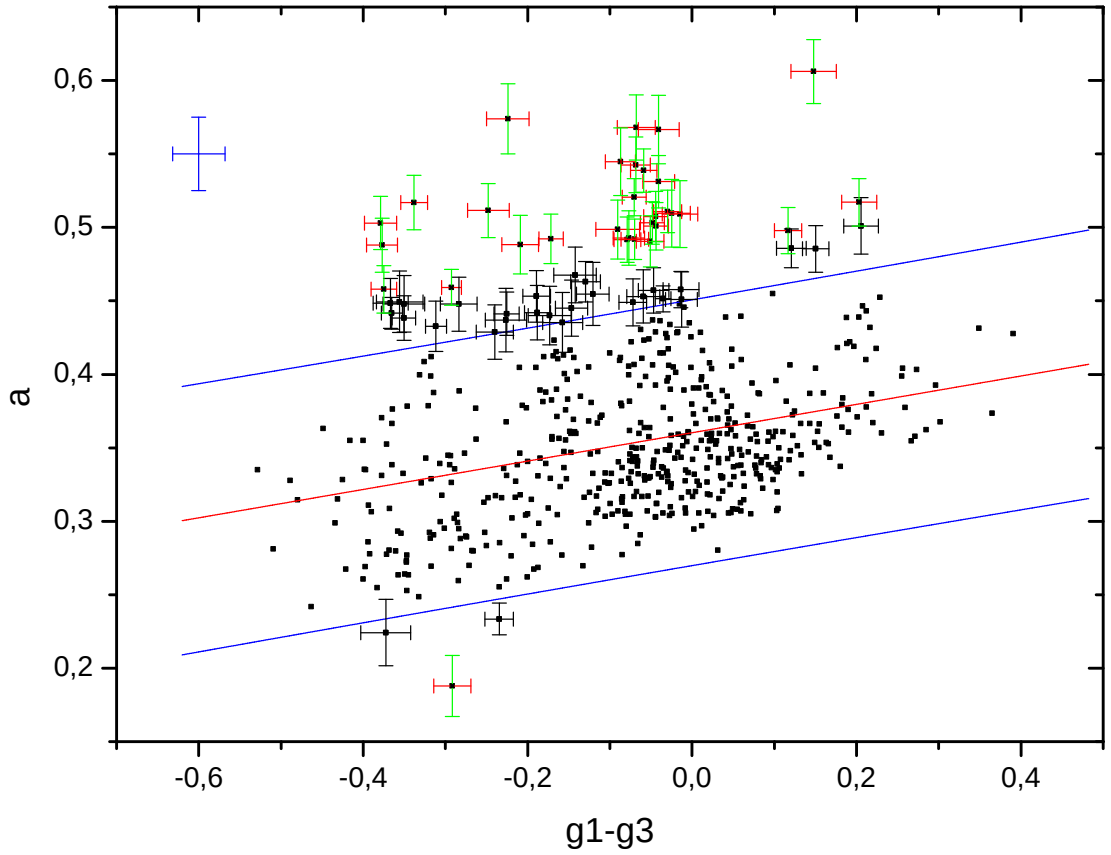


Abbildung 5.6: Δa -Diagramm mit den signifikanten Sternen (bunte Fehlerbalken), den signifikanten Sternen nach der Iteration (schwarze Fehlerbalken), den chemisch nicht peculiaren Sternen (ohne Fehlerbalken). Eingezeichnet sind die Normalitätsline nach der Iteration (rot), das Vorhersageband für 95% nach der Iteration (blau) und der maximale Fehler des Diagramms (blaue Fehlerbalken).

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	Δa [mag]
2	-686,487	-134,547	-0,044	0,015	19,223	0,010	0,501	0,016	0,145
14	-820,948	-17,796	-0,068	0,023	19,615	0,016	0,568	0,022	0,214
26	-941,761	208,677	-0,087	0,018	19,684	0,012	0,545	0,023	0,193
51	-885,834	-120,498	-0,375	0,016	18,826	0,011	0,458	0,016	0,134
61	-820,115	-96,789	-0,048	0,014	18,990	0,009	0,503	0,014	0,147
64	-712,992	-82,229	-0,338	0,016	19,504	0,011	0,517	0,019	0,189
79	-736,027	-39,170	-0,041	0,025	19,602	0,013	0,567	0,023	0,210
87	-781,744	1,152	-0,070	0,014	19,093	0,010	0,521	0,013	0,167
97	-940,551	38,959	-0,030	0,017	19,023	0,010	0,511	0,014	0,153
101	-781,924	48,451	-0,044	0,014	19,313	0,009	0,507	0,017	0,151
102	-814,885	49,109	-0,059	0,016	19,480	0,011	0,539	0,015	0,184
108	-827,754	68,297	-0,015	0,022	19,602	0,013	0,509	0,023	0,150
115	-739,282	86,004	-0,051	0,017	19,330	0,011	0,491	0,017	0,135
117	-903,395	88,152	-0,379	0,020	19,391	0,015	0,503	0,018	0,179
122	-893,711	108,523	-0,041	0,019	19,526	0,013	0,531	0,018	0,175
130	-944,253	151,616	-0,377	0,019	19,630	0,012	0,488	0,018	0,164
140	-891,413	184,977	-0,070	0,017	19,242	0,012	0,492	0,014	0,138
188	-57,914	413,406	-0,224	0,026	19,436	0,021	0,574	0,024	0,235
197	-910,478	433,849	-0,172	0,015	19,411	0,009	0,492	0,017	0,148
240	-331,157	809,272	0,148	0,027	18,754	0,022	0,606	0,022	0,232
243	-662,002	-137,995	-0,069	0,018	19,472	0,010	0,543	0,019	0,189
255	-975,242	-36,029	-0,293	0,012	18,411	0,006	0,459	0,012	0,127
295	-924,419	175,824	-0,079	0,016	19,263	0,012	0,492	0,015	0,139
298	-820,229	184,822	-0,077	0,019	19,428	0,016	0,493	0,018	0,140
329	-70,672	318,309	-0,248	0,026	19,530	0,019	0,511	0,018	0,175
351	-631,096	-108,223	-0,025	0,022	19,300	0,010	0,510	0,023	0,152
360	-157,502	-14,878	-0,292	0,023	19,833	0,013	0,188	0,021	-0,144
461	-244,301	481,697	-0,090	0,027	19,396	0,010	0,499	0,020	0,147
525	-352,430	-731,492	0,203	0,021	18,931	0,011	0,517	0,016	0,137
546	491,308	-360,236	0,117	0,017	18,512	0,008	0,498	0,016	0,126
558	508,722	-474,262	-0,209	0,022	19,316	0,014	0,488	0,020	0,148

Tabelle 5.3: Sterne mit signifikanten Δa -Werten

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	Δa [mag]
	-890,397	-129,403	-0,365	0,013	18,491	0,008	0,442	0,011	0,117
15	-791,348	-13,172	-0,035	0,010	18,220	0,005	0,451	0,009	0,095
22	-906,825	105,305	-0,351	0,014	19,005	0,009	0,438	0,015	0,112
35	-345,588	598,576	-0,013	0,019	19,277	0,014	0,451	0,019	0,092
38	-220,065	759,342	-0,356	0,028	19,636	0,017	0,449	0,021	0,123
83	-155,377	-24,493	-0,235	0,017	18,815	0,007	0,233	0,011	-0,104
92	17,866	18,316	-0,350	0,025	19,696	0,021	0,448	0,019	0,122
98	-893,476	41,148	-0,311	0,013	18,680	0,008	0,433	0,017	0,103
138	-728,722	183,092	-0,072	0,017	19,187	0,013	0,449	0,016	0,096
146	-310,552	221,882	-0,373	0,030	19,104	0,012	0,224	0,023	-0,100
157	-713,085	282,889	-0,129	0,018	19,356	0,013	0,463	0,014	0,115
162	-794,215	293,486	-0,142	0,026	19,491	0,020	0,468	0,019	0,121
170	-853,238	326,558	-0,146	0,020	19,134	0,014	0,445	0,019	0,099
218	-469,226	536,681	-0,284	0,022	19,516	0,014	0,448	0,018	0,115
224	-889,913	553,185	-0,188	0,016	19,336	0,011	0,442	0,019	0,100
235	-259,442	734,272	-0,014	0,022	17,911	0,010	0,458	0,012	0,099
236	-914,340	741,045	-0,121	0,020	18,941	0,007	0,455	0,021	0,106
328	-833,126	314,122	-0,157	0,024	18,830	0,021	0,435	0,020	0,090
334	-726,453	372,369	-0,173	0,026	18,935	0,020	0,440	0,020	0,097
341	-798,584	489,057	-0,240	0,023	19,384	0,018	0,429	0,018	0,092
343	-739,983	566,267	-0,227	0,025	19,772	0,020	0,437	0,022	0,099
352	-592,303	-96,122	-0,047	0,018	19,043	0,011	0,457	0,015	0,101
404	-640,828	-120,655	-0,367	0,021	19,488	0,016	0,448	0,017	0,124
408	-698,242	-44,966	-0,059	0,020	18,644	0,014	0,453	0,018	0,099
523	-274,755	-833,173	0,121	0,018	17,866	0,014	0,486	0,013	0,114
526	-283,626	-730,434	0,206	0,021	18,813	0,011	0,501	0,019	0,121
538	401,847	-478,726	-0,226	0,015	18,890	0,010	0,441	0,015	0,103
545	345,202	-373,134	-0,189	0,017	18,913	0,012	0,453	0,018	0,111
547	275,029	-358,236	0,150	0,016	19,031	0,011	0,485	0,016	0,111

Tabelle 5.4: Sterne mit signifikanten Δa -Werten nach der Iteration

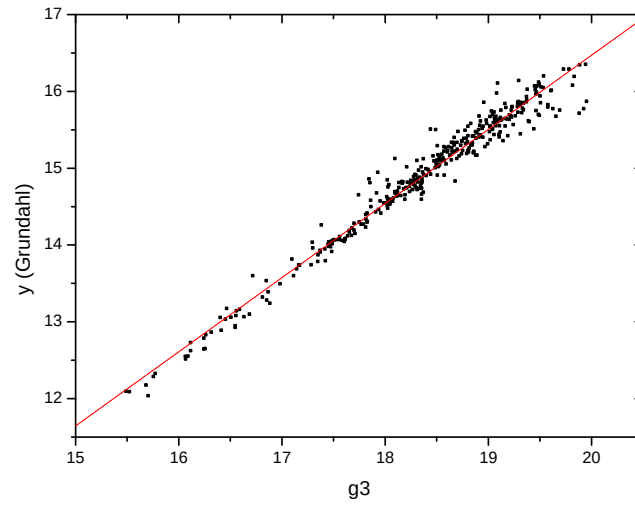


Abbildung 5.7: Korrelation der $g3$ Werte mit y Werten von Grundahl et al. 1998 [19]

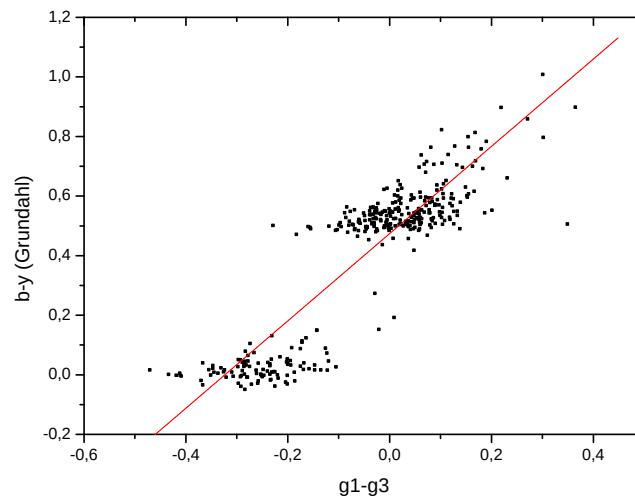


Abbildung 5.8: Korrelation der $(g1-g3)$ Werte mit $(b-y)$ Werten von Grundahl et al. 1998 [19]

Filter	k	σ_k	d	σ_d
			[mag]	[mag]
y(Grundahl)	0,965	0,009	-2,828	0,164
V(Rey)	0,977	0,009	-3,118	0,162
V(Kadla)	0,965	0,006	-2,887	0,114

Tabelle 5.5: Korrelationen mit g3 nach der Formel: $Filter = k * g3 + d$

Farbe	k	σ_k	d	σ_d
			[mag]	[mag]
b-y(Grundahl)	1,465	0,039	0,474	0,006
B-V(Rey)	2,189	0,099	0,459	0,018
B-V(Kadla)	1,832	0,108	0,659	0,022

Tabelle 5.6: Korrelationen mit (g1-g3) nach der Formel: $Farbe = k * (g1 - g3) + d$

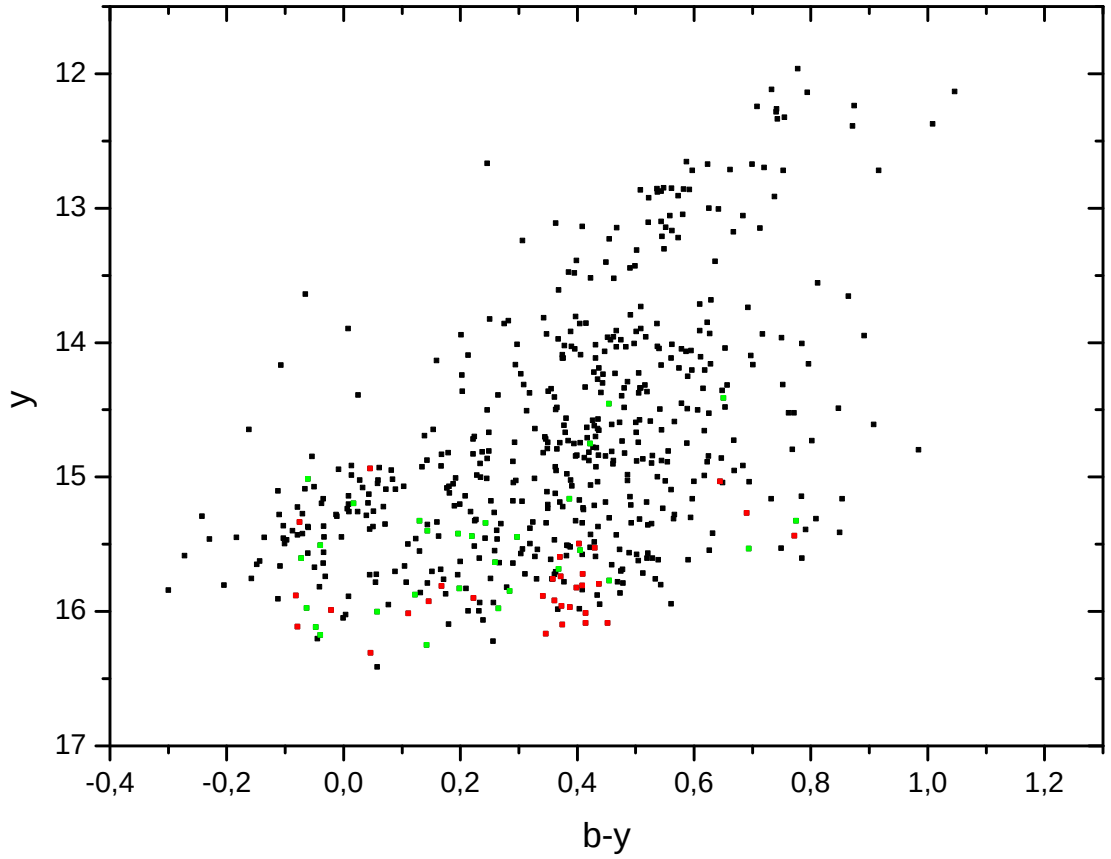


Abbildung 5.9: Errechnetes CMD im Strömgrensystem nach den Gleichungen aus den Tabellen 5.5 und 5.6. Rote Datenpunkte stellen die in Δa signifikanten Sterne dar, grüne Datenpunkte entsprechen jenen Sternen, welche nach der Iteration als signifikant angesehen werden können, und schwarze Datenpunkte zeigen Sterne, die nach der Iteration innerhalb des in Abbildung 5.6 dargestellten Vorhersagebandes liegen.

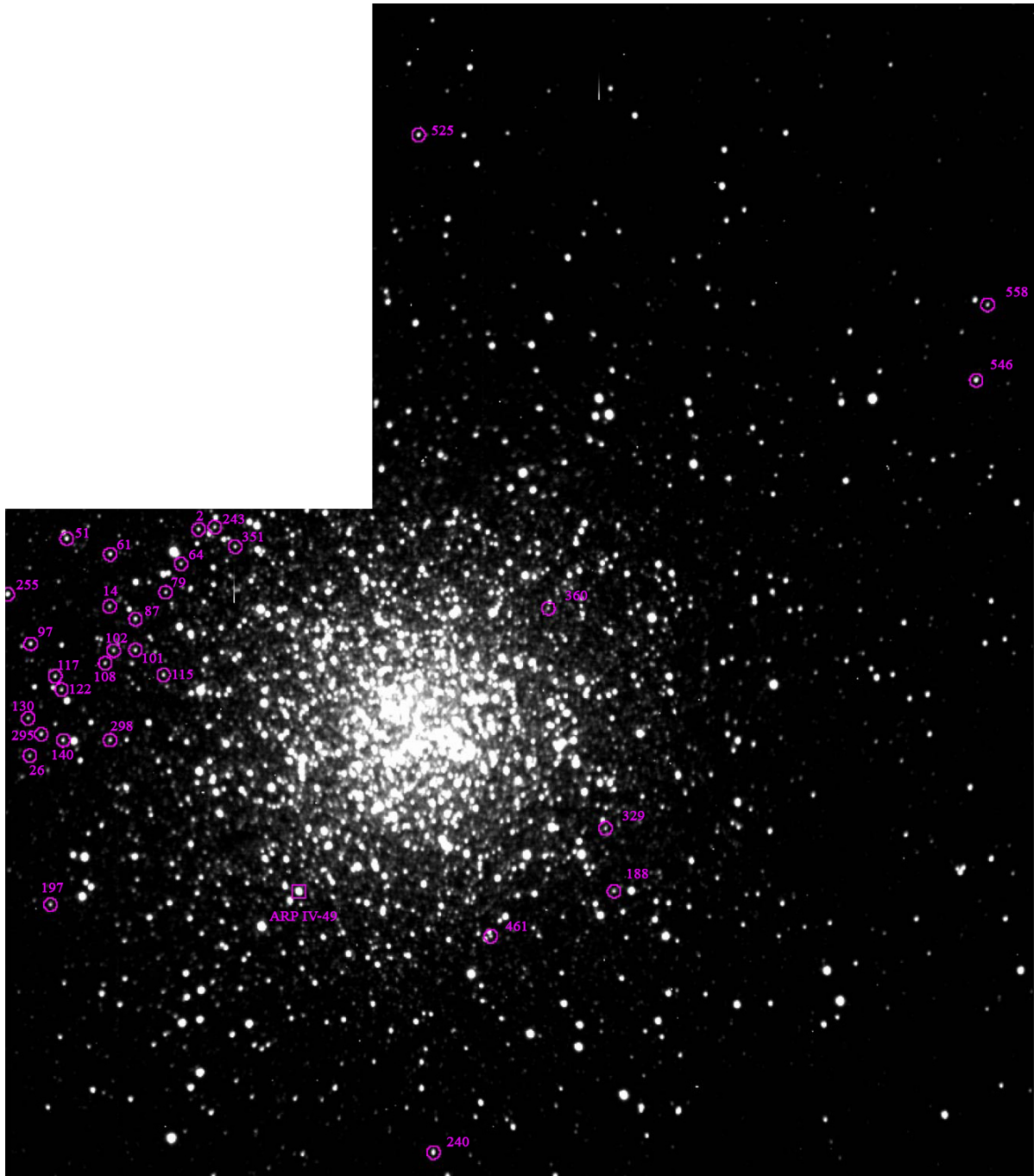


Abbildung 5.10: Suchkarte der Sterne mit signifikanten Δa -Werten. Eingezeichnet ist zur Orientierung der Stern Arp IV-49 aus Arp 1955 [3]. Die Nummern der Sterne entsprechen der ID sowohl in der Tabelle 5.3 als auch in der Tabelle der Photometrie im Anhang auf den Seiten I bis XVI. Norden ist oben und Osten ist links.

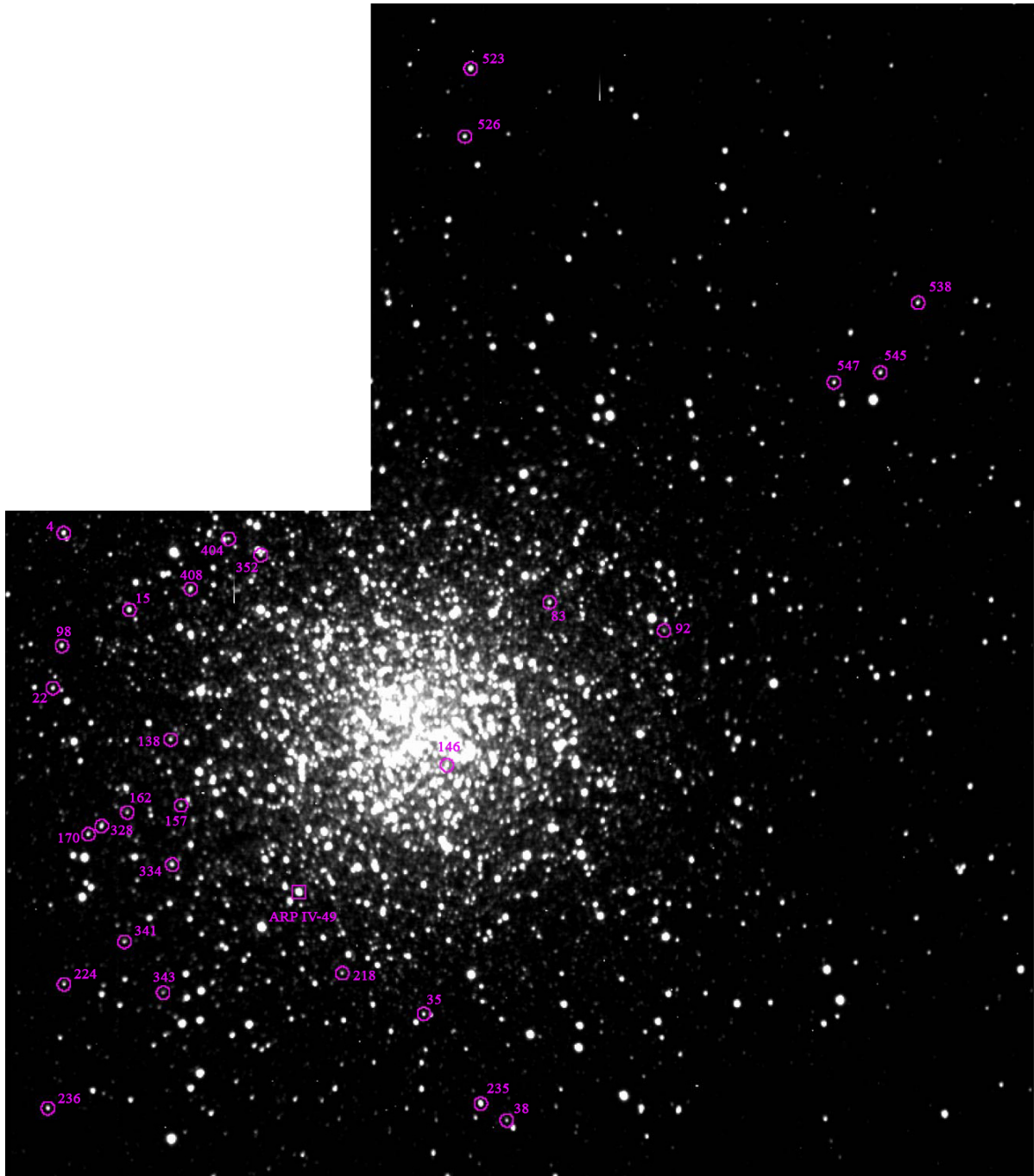


Abbildung 5.11: Suchkarte der Sterne mit signifikanten Δa -Werten nach der Iteration. Eingezeichnet ist zur Orientierung der Stern Arp IV-49 aus Arp 1955 [3]. Die Nummern der Sterne entsprechen der ID sowohl in der Tabelle 5.4 als auch in der Tabelle der Photometrie im Anhang auf den Seiten I bis XVI. Norden ist oben und Osten ist links.

6 Interpretation und Ausblick

Aufgrund der geringen Anzahl der Messungen, die meisten Sterne konnten nur etwa viermal in jedem Filter gemessen werden, ist der Fehler der Sterne zu groß für eine verlässliche Bestimmung der einzelnen Δa -Werte (vgl. Tabelle 5.2). Dies spiegelt sich auch in der großen Streuung der Daten im Δa -Diagramm (siehe Abbildung 5.6 und Abbildung 5.4 mit den eingezeichneten Fehlerbalken) und im errechneten Strömgren CMD (siehe Abbildung 5.9) wider. Dennoch ist deutlich eine statistische Asymmetrie um die Normalitätslinie zu erkennen, in dem Sinn, dass positive Abweichungen von ihr systematisch größer sind als die negativen. Ein weiterer Grund für die großen Fehler und die signifikante Streuung liegt im Seeing, das zwischen etwa ein bis zwei Bogensekunden lag. Auch die unter Abschnitt 5.2 aufgeführten Probleme mit den PSFs steigerten sowohl die Fehler als auch die Streuung der Messwerte.

Dennoch konnten Sterne mit deutlichen Δa -Werten identifiziert werden. Davon liegen einige ($-0,1 \leq (b - y) \leq 0,1$) am BHB (vgl. Abbildung 5.6). Ein Vergleich mit den von Behr et al. 1999 [5] untersuchten Sternen führte allerdings zu keinem Ergebnis, da diese aufgrund des Seeings und der damit verbundenen relativ schlechten Auflösung der Aufnahmen nicht identifiziert werden konnten oder eine zu niedrige Helligkeit besaßen, um gemessen zu werden, oder aber die Fehler der Messung waren zu groß. Die leichte Defokussierung der Aufnahmen erlaubte nur ein Erkennen von chemisch peculiar Sternern in den Randgebieten des Sternhaufens, da eine genaue Messung dieser lichtschwachen Objekte im Zentrum nicht möglich war. Dies verhinderte zusätzlich die angestrebte genau Messung der von Behr et al. gefundenen Sterne im Δa -System. Eine weitere Untersuchung der Sterne am BHB mittels Spektroskopie könnte die aus den

Δa -Werten vermutete chemische Pekuliarität beweisen.

Eine weitere interessante Gruppe von Sternen mit deutlichen Δa -Werten liegt bei etwa $0,3 \leq (b - y) \leq 0,5$ (vgl. Abbildung 5.6). Es ist offensichtlich, dass diese Gruppe von Sternen nicht am BHB liegt, allerdings ist aufgrund der großen Streuung im Diagramm nicht eindeutig festzustellen, ob es sich um Blue Stragglers oder um Sterne nahe dem MSTO handelt. Was die auffällige Häufung von Sternen mit positiven Δa -Werten an dieser Stelle im CMD verursacht, kann aus den vorliegenden Daten nicht erschlossen werden. Allerdings könnten synthetische Rechnungen von Sternatmosphären im Δa -System dazu führen, dass dieses Ergebnis besser verstanden wird.

Es wurden insgesamt drei Sterne mit negativen Δa -Werten gemessen. Wie Maitzen und Pavlovski¹ zeigen konnten, weisen λ Bootis bzw. Ae/Be Shell Sterne negative Werte auf. Es ist unwahrscheinlich, dass sich solche Sterne in einem Kugelsternhaufen befinden, da Ae/Be Shell Sterne junge Sterne sind. λ Bootis Sterne durchqueren die Wolken des Interstellaren Mediums und werden dadurch peculiar.² Erst eine weitere spektroskopische Untersuchung dieser Sterne könnte deren astrophysikalische Prozesse aufzeigen.

Wie die obigen Darstellungen zeigen, sind zur Erlangung weiterer wissenschaftlicher Erkenntnisse mehr Daten mit zusätzlich einer besseren Fokussierung erforderlich. Durch Δa -Messungen anderer Kugelsternhaufen können weitere Sterne mit CP2 ähnlichem Erscheinungsbild identifiziert werden. Die Verwendung größerer Teleskope sowie eine größere Anzahl von Messungen können die Streuung der photometrischen Daten am BHB minimieren.

¹vgl. Maitzen 1989 [38] und Pavlovski 1989 [49]

²vgl. E. Paunzen 2003 [48]

Anhang

A Tabelle der Photometrie

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
1	-660,637	-152,175	-0,039	0,008	18,094	0,005	0,436	0,009	0,417	14,631
2	-686,487	-134,547	-0,044	0,015	19,223	0,010	0,501	0,016	0,410	15,720
3	-107,280	-131,582	0,077	0,029	17,510	0,011	0,338	0,022	0,586	14,067
4	-890,397	-129,403	-0,365	0,013	18,491	0,008	0,442	0,011	-0,061	15,014
5	-276,611	-117,682	-0,220	0,020	19,205	0,014	0,276	0,014	0,151	15,703
6	-378,408	-115,394	0,086	0,019	18,511	0,012	0,322	0,019	0,600	15,034
7	-216,073	-83,356	0,105	0,009	17,370	0,007	0,309	0,006	0,627	13,932
8	-663,952	-76,351	-0,039	0,014	18,173	0,006	0,414	0,010	0,417	14,707
9	-125,135	-64,747	0,072	0,022	17,909	0,010	0,305	0,016	0,579	14,452
10	-191,891	-64,094	0,180	0,008	16,315	0,005	0,337	0,006	0,738	12,915
11	-781,308	-54,114	-0,015	0,011	17,400	0,006	0,448	0,008	0,452	13,961
12	-297,018	-28,455	0,009	0,020	17,744	0,012	0,324	0,015	0,487	14,293
13	30,741	-27,803	-0,106	0,023	18,872	0,017	0,333	0,018	0,319	15,381
14	-820,948	-17,796	-0,068	0,023	19,615	0,016	0,568	0,022	0,374	16,098
15	-791,348	-13,172	-0,035	0,010	18,220	0,005	0,451	0,009	0,422	14,752
16	-617,060	4,384	-0,231	0,017	18,398	0,011	0,316	0,012	0,135	14,924
17	-715,227	13,627	0,060	0,009	16,579	0,005	0,410	0,008	0,562	13,169
18	-587,006	63,263	0,012	0,017	18,694	0,013	0,297	0,016	0,492	15,210
19	-238,651	71,281	0,053	0,023	18,506	0,018	0,367	0,016	0,551	15,028
20	-528,891	87,238	0,068	0,015	16,632	0,010	0,372	0,012	0,573	13,220
21	-484,885	103,729	-0,077	0,018	17,861	0,014	0,329	0,017	0,361	14,406
22	-906,825	105,305	-0,351	0,014	19,005	0,009	0,438	0,015	-0,040	15,510
23	-885,347	125,636	0,012	0,013	17,226	0,008	0,398	0,009	0,491	13,793
24	-286,996	141,318	-0,347	0,030	19,143	0,022	0,273	0,022	-0,035	15,643
25	-586,394	177,536	-0,047	0,015	17,293	0,009	0,337	0,012	0,405	13,858

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
26	-941,761	208,677	-0,087	0,018	19,684	0,012	0,545	0,023	0,346	16,165
27	-241,695	270,926	-0,358	0,027	18,553	0,011	0,293	0,024	-0,051	15,074
28	-509,626	336,564	-0,008	0,016	18,351	0,010	0,306	0,017	0,462	14,878
29	-577,320	383,713	-0,063	0,022	19,084	0,009	0,291	0,014	0,382	15,586
30	-319,189	436,307	-0,025	0,022	17,636	0,012	0,326	0,020	0,437	14,189
31	-630,729	469,987	-0,100	0,020	19,091	0,013	0,414	0,015	0,328	15,593
32	-681,508	477,928	-0,480	0,021	18,955	0,019	0,314	0,016	-0,229	15,462
33	-430,323	514,260	0,026	0,018	18,338	0,015	0,381	0,016	0,513	14,866
34	-622,888	560,986	-0,377	0,017	18,709	0,013	0,331	0,017	-0,079	15,224
35	-345,588	598,576	-0,013	0,019	19,277	0,014	0,451	0,019	0,455	15,772
36	-281,748	651,472	-0,318	0,024	19,399	0,017	0,399	0,020	0,009	15,889
37	-342,759	652,740	-0,010	0,020	19,153	0,015	0,446	0,017	0,459	15,653
38	-220,065	759,342	-0,356	0,028	19,636	0,017	0,449	0,021	-0,047	16,118
39	-181,325	-159,844	0,021	0,031	19,121	0,022	0,408	0,023	0,505	15,622
40	-297,080	-159,479	0,071	0,014	17,488	0,010	0,356	0,009	0,578	14,046
41	-494,692	-159,021	0,016	0,013	17,450	0,003	0,376	0,012	0,498	14,009
42	-574,324	-156,520	-0,063	0,009	18,025	0,005	0,392	0,010	0,381	14,564
43	-283,682	-146,438	0,047	0,019	19,309	0,015	0,306	0,015	0,543	15,803
44	-609,308	-145,233	-0,136	0,009	17,295	0,004	0,385	0,009	0,275	13,860
45	-300,546	-144,762	0,037	0,018	18,371	0,010	0,389	0,014	0,528	14,898
46	-373,872	-134,274	0,032	0,025	19,065	0,014	0,343	0,018	0,521	15,568
47	-597,744	-139,285	0,073	0,008	16,453	0,004	0,394	0,009	0,581	13,047
48	-264,305	-137,498	0,083	0,012	17,503	0,009	0,331	0,008	0,595	14,060
49	-363,091	-127,766	0,078	0,018	17,952	0,011	0,332	0,015	0,589	14,493
50	-203,372	-120,895	0,063	0,015	18,050	0,013	0,324	0,010	0,567	14,588
51	-885,834	-120,498	-0,375	0,016	18,826	0,011	0,458	0,016	-0,075	15,337
52	-243,458	-113,075	-0,271	0,017	19,462	0,009	0,270	0,012	0,077	15,951
53	-688,620	-112,705	-0,331	0,011	18,779	0,007	0,400	0,012	-0,011	15,292
54	-290,510	-106,600	-0,200	0,016	18,602	0,010	0,305	0,011	0,181	15,120
55	-410,894	-105,020	0,163	0,021	16,560	0,015	0,354	0,015	0,713	13,150
56	-185,870	-100,559	-0,235	0,014	19,049	0,011	0,255	0,010	0,130	15,552
57	-723,626	-99,786	0,208	0,008	15,331	0,004	0,446	0,007	0,778	11,965
58	-173,162	-97,610	-0,192	0,019	18,486	0,015	0,267	0,013	0,192	15,009
59	-454,662	-97,480	0,093	0,021	17,143	0,005	0,354	0,014	0,610	13,713
60	-545,410	-97,377	-0,143	0,012	17,844	0,005	0,361	0,011	0,265	14,389
61	-820,115	-96,789	-0,048	0,014	18,990	0,009	0,503	0,014	0,403	15,495
62	-426,595	-93,979	-0,202	0,030	18,561	0,020	0,304	0,019	0,177	15,081

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
63	-334,012	-82,906	-0,234	0,027	19,368	0,013	0,285	0,018	0,131	15,860
64	-712,992	-82,229	-0,338	0,016	19,504	0,011	0,517	0,019	-0,021	15,991
65	-158,518	-73,946	-0,252	0,015	19,165	0,008	0,292	0,011	0,105	15,664
66	-348,419	-73,653	0,149	0,019	17,170	0,014	0,354	0,012	0,693	13,739
67	-110,206	-71,386	0,084	0,026	17,653	0,010	0,329	0,018	0,597	14,205
68	-228,426	-69,353	0,059	0,008	17,559	0,006	0,312	0,006	0,561	14,114
69	-739,700	-65,925	-0,018	0,009	17,511	0,004	0,428	0,007	0,447	14,068
70	-280,529	-66,319	0,104	0,015	17,986	0,009	0,320	0,010	0,626	14,526
71	-606,783	-56,114	0,002	0,014	18,201	0,007	0,390	0,012	0,477	14,734
72	-258,540	-61,661	-0,204	0,018	19,378	0,010	0,290	0,014	0,175	15,870
73	34,091	-51,805	0,176	0,017	18,646	0,015	0,371	0,014	0,732	15,164
74	-421,688	-51,539	-0,219	0,025	18,112	0,019	0,302	0,020	0,153	14,648
75	-406,996	-50,687	0,166	0,022	17,374	0,016	0,353	0,015	0,717	13,936
76	-213,054	-42,789	-0,225	0,012	18,844	0,008	0,261	0,008	0,144	15,355
77	-374,073	-39,993	0,133	0,026	18,428	0,018	0,332	0,018	0,669	14,953
78	-490,467	-39,527	0,093	0,018	17,349	0,005	0,338	0,013	0,610	13,911
79	-736,027	-39,170	-0,041	0,025	19,602	0,013	0,567	0,023	0,414	16,086
80	-243,698	-38,015	0,056	0,013	18,276	0,008	0,338	0,010	0,556	14,806
81	-399,698	-36,994	0,133	0,027	18,193	0,017	0,345	0,019	0,668	14,727
82	-525,510	-26,948	0,038	0,016	18,313	0,008	0,330	0,012	0,529	14,842
83	-155,377	-24,493	-0,235	0,017	18,815	0,007	0,233	0,011	0,130	15,326
84	-678,197	-24,415	-0,326	0,013	18,940	0,008	0,408	0,012	-0,003	15,447
85	-563,694	-12,220	0,043	0,012	17,472	0,007	0,365	0,010	0,538	14,031
86	-300,545	-5,777	0,271	0,020	15,772	0,016	0,358	0,013	0,871	12,390
87	-781,744	1,152	-0,070	0,014	19,093	0,010	0,521	0,013	0,371	15,595
88	-227,078	7,138	0,059	0,028	19,455	0,012	0,307	0,024	0,561	15,944
89	-624,576	12,610	-0,289	0,014	18,743	0,010	0,335	0,012	0,051	15,257
90	-652,252	15,156	-0,001	0,013	18,056	0,007	0,404	0,012	0,472	14,594
91	-473,178	16,202	0,097	0,016	17,792	0,007	0,336	0,013	0,615	14,340
92	17,866	18,316	-0,350	0,025	19,696	0,021	0,448	0,019	-0,040	16,176
93	-523,000	20,222	0,032	0,020	18,846	0,009	0,340	0,015	0,521	15,356
94	-678,142	23,528	-0,035	0,015	18,922	0,011	0,415	0,013	0,423	15,429
95	-544,217	25,760	-0,275	0,019	18,841	0,014	0,290	0,015	0,071	15,351
96	-506,927	38,549	0,115	0,014	16,411	0,007	0,382	0,010	0,642	13,007
97	-940,551	38,959	-0,030	0,017	19,023	0,010	0,511	0,014	0,430	15,527
98	-893,476	41,148	-0,311	0,013	18,680	0,008	0,433	0,017	0,018	15,196
99	-288,470	41,833	0,123	0,025	17,938	0,020	0,358	0,021	0,654	14,480
100	-538,562	45,371	-0,037	0,017	18,286	0,009	0,337	0,015	0,420	14,816

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
101	-781,924	48,451	-0,044	0,014	19,313	0,009	0,507	0,017	0,409	15,807
102	-814,885	49,109	-0,059	0,016	19,480	0,011	0,539	0,015	0,387	15,968
103	-205,129	63,459	0,061	0,024	17,453	0,015	0,345	0,015	0,563	14,013
104	-8,631	55,149	-0,149	0,024	19,744	0,019	0,361	0,022	0,256	16,222
105	-624,991	56,453	-0,010	0,013	18,074	0,006	0,358	0,010	0,459	14,611
106	-675,830	63,206	-0,026	0,011	18,030	0,008	0,390	0,010	0,435	14,569
107	-527,162	64,229	0,027	0,024	19,219	0,015	0,304	0,021	0,513	15,717
108	-827,754	68,297	-0,015	0,022	19,602	0,013	0,509	0,023	0,452	16,085
109	-271,121	71,047	0,094	0,025	17,552	0,021	0,361	0,018	0,611	14,108
110	-423,757	71,535	0,102	0,028	18,360	0,017	0,335	0,021	0,623	14,888
111	-313,713	72,807	0,122	0,026	17,484	0,022	0,372	0,024	0,653	14,042
112	-455,952	73,105	-0,289	0,022	18,860	0,010	0,302	0,017	0,050	15,370
113	-154,684	76,297	0,018	0,031	18,134	0,014	0,327	0,019	0,501	14,670
114	-432,059	103,607	0,102	0,018	17,284	0,015	0,361	0,011	0,623	13,849
115	-739,282	86,004	-0,051	0,017	19,330	0,011	0,491	0,017	0,399	15,823
116	-326,446	87,133	-0,248	0,025	18,995	0,022	0,316	0,022	0,110	15,500
117	-903,395	88,152	-0,379	0,020	19,391	0,015	0,503	0,018	-0,081	15,882
118	-569,485	88,154	-0,032	0,016	18,039	0,011	0,349	0,012	0,426	14,578
119	-284,798	99,866	-0,284	0,019	18,527	0,015	0,295	0,024	0,058	15,048
120	-517,550	102,351	-0,027	0,022	19,389	0,015	0,304	0,019	0,434	15,880
121	-934,640	104,494	-0,317	0,013	18,686	0,008	0,412	0,011	0,009	15,202
122	-893,711	108,523	-0,041	0,019	19,526	0,013	0,531	0,018	0,414	16,013
123	-697,328	114,132	-0,030	0,014	18,080	0,010	0,425	0,009	0,429	14,618
124	-656,224	116,521	-0,026	0,012	18,310	0,010	0,323	0,011	0,436	14,839
125	-488,804	119,150	-0,026	0,022	18,858	0,015	0,310	0,016	0,436	15,368
126	-236,632	122,932	0,154	0,025	16,065	0,009	0,350	0,016	0,700	12,673
127	-224,789	130,375	-0,286	0,030	19,289	0,013	0,305	0,020	0,055	15,783
128	-178,217	143,958	-0,160	0,023	19,579	0,016	0,324	0,020	0,239	16,064
129	-655,516	149,306	-0,317	0,011	18,622	0,007	0,329	0,010	0,009	15,140
130	-944,253	151,616	-0,377	0,019	19,630	0,012	0,488	0,018	-0,079	16,113
131	-451,002	152,282	-0,113	0,019	17,765	0,011	0,322	0,016	0,308	14,313
132	-471,009	158,871	-0,066	0,023	19,286	0,018	0,285	0,018	0,378	15,781
133	-297,035	156,903	0,128	0,027	16,109	0,019	0,351	0,021	0,662	12,715
134	-849,270	158,432	-0,314	0,014	18,464	0,011	0,387	0,011	0,014	14,988
135	-761,834	159,081	-0,020	0,011	17,686	0,008	0,401	0,009	0,445	14,237
136	-463,237	168,669	-0,301	0,021	18,557	0,016	0,295	0,018	0,033	15,078
137	-561,477	181,178	-0,318	0,021	17,333	0,009	0,288	0,024	0,008	13,896

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
138	-728,722	183,092	-0,072	0,017	19,187	0,013	0,449	0,016	0,368	15,685
139	-795,156	184,690	-0,063	0,013	19,005	0,011	0,430	0,016	0,382	15,510
140	-891,413	184,977	-0,070	0,017	19,242	0,012	0,492	0,014	0,372	15,739
141	-874,761	186,944	0,049	0,012	16,624	0,010	0,406	0,009	0,545	13,212
142	-644,415	191,036	-0,051	0,012	16,809	0,008	0,364	0,010	0,399	13,390
143	-379,734	216,075	0,043	0,032	16,279	0,026	0,342	0,024	0,537	12,880
144	-865,425	216,200	-0,074	0,013	18,261	0,012	0,422	0,010	0,365	14,792
145	-548,115	217,427	-0,067	0,017	17,534	0,009	0,344	0,012	0,375	14,090
146	-310,552	221,882	-0,373	0,030	19,104	0,012	0,224	0,023	-0,072	15,605
147	-254,896	229,246	0,058	0,031	16,463	0,013	0,349	0,021	0,559	13,057
148	-375,551	235,883	-0,347	0,031	18,645	0,019	0,272	0,024	-0,035	15,163
149	-545,595	258,765	-0,040	0,015	17,293	0,008	0,320	0,012	0,415	13,858
150	-648,179	259,302	-0,393	0,018	18,854	0,010	0,311	0,012	-0,103	15,364
151	-338,704	265,250	-0,098	0,023	19,264	0,017	0,332	0,022	0,330	15,760
152	-533,914	271,156	-0,398	0,016	19,164	0,009	0,269	0,014	-0,108	15,663
153	-272,616	277,229	-0,100	0,030	18,489	0,014	0,326	0,024	0,327	15,012
154	-319,785	278,014	-0,041	0,024	17,784	0,014	0,332	0,024	0,414	14,332
155	-362,786	279,015	-0,075	0,030	19,208	0,018	0,305	0,024	0,363	15,705
156	-546,817	280,134	-0,090	0,018	18,289	0,008	0,307	0,014	0,342	14,819
157	-713,085	282,889	-0,129	0,018	19,356	0,013	0,463	0,014	0,284	15,849
158	-398,340	283,426	-0,031	0,029	17,668	0,021	0,333	0,022	0,429	14,220
159	-303,638	283,984	-0,394	0,022	18,949	0,013	0,286	0,023	-0,103	15,456
160	-440,594	288,125	-0,067	0,028	17,559	0,020	0,337	0,024	0,376	14,114
161	-267,063	288,761	-0,046	0,029	17,533	0,013	0,341	0,024	0,406	14,090
162	-794,215	293,486	-0,142	0,026	19,491	0,020	0,468	0,019	0,265	15,979
163	-653,222	297,532	-0,052	0,017	17,241	0,011	0,358	0,010	0,397	13,807
164	-356,096	299,641	-0,061	0,023	18,197	0,015	0,317	0,020	0,385	14,730
165	-467,416	308,768	-0,085	0,019	18,719	0,013	0,313	0,021	0,350	15,234
166	-348,545	313,456	-0,074	0,026	17,941	0,019	0,334	0,024	0,366	14,483
167	-369,293	315,098	-0,043	0,026	18,717	0,019	0,312	0,020	0,410	15,232
168	-434,561	320,481	-0,042	0,031	18,329	0,020	0,347	0,018	0,412	14,857
169	-475,094	324,309	-0,067	0,016	18,706	0,011	0,320	0,011	0,375	15,222
170	-853,238	326,558	-0,146	0,020	19,134	0,014	0,445	0,019	0,259	15,634
171	-317,223	336,570	0,084	0,023	16,115	0,012	0,342	0,019	0,597	12,721
172	-532,620	342,103	-0,332	0,016	18,765	0,010	0,248	0,016	-0,013	15,279
173	-697,937	342,918	-0,109	0,017	17,967	0,014	0,372	0,014	0,314	14,508
174	-414,747	343,678	-0,081	0,030	19,111	0,025	0,307	0,024	0,354	15,612

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
175	-575,146	356,950	-0,085	0,020	18,690	0,011	0,277	0,015	0,350	15,206
176	-280,611	357,897	-0,008	0,025	16,946	0,010	0,335	0,019	0,462	13,523
177	-876,306	359,491	-0,185	0,016	17,692	0,011	0,389	0,010	0,203	14,243
178	-782,822	361,907	-0,397	0,019	17,615	0,017	0,335	0,012	-0,107	14,168
179	-858,759	362,720	-0,155	0,015	16,059	0,013	0,400	0,010	0,246	12,667
180	-373,374	383,962	-0,317	0,016	18,744	0,010	0,269	0,023	0,009	15,258
181	-404,670	391,281	0,006	0,018	17,474	0,012	0,327	0,019	0,483	14,033
182	-682,319	392,806	-0,126	0,018	18,661	0,011	0,368	0,016	0,290	15,178
183	-717,667	393,185	-0,449	0,016	18,944	0,014	0,363	0,015	-0,183	15,450
184	-507,323	398,698	0,031	0,021	19,104	0,016	0,280	0,016	0,520	15,606
185	-612,821	401,592	-0,077	0,017	18,962	0,008	0,406	0,013	0,361	15,469
186	-655,955	403,627	-0,125	0,017	19,141	0,012	0,405	0,015	0,290	15,641
187	-849,128	408,046	-0,123	0,017	17,610	0,014	0,381	0,011	0,294	14,164
188	-57,914	413,406	-0,224	0,026	19,436	0,021	0,574	0,024	0,146	15,925
189	-533,989	414,778	0,053	0,016	16,552	0,006	0,358	0,010	0,552	13,143
190	-307,810	416,727	-0,383	0,030	18,892	0,022	0,255	0,024	-0,087	15,401
191	-688,391	416,922	-0,399	0,016	18,767	0,013	0,335	0,016	-0,110	15,280
192	-482,961	422,694	-0,239	0,025	18,953	0,017	0,317	0,021	0,124	15,460
193	-444,812	428,508	-0,035	0,020	18,541	0,010	0,377	0,019	0,423	15,062
194	-431,629	432,036	0,030	0,018	17,397	0,013	0,355	0,016	0,517	13,958
195	-729,973	432,068	-0,154	0,020	18,277	0,017	0,355	0,015	0,249	14,807
196	-531,373	433,735	-0,003	0,027	19,286	0,012	0,435	0,020	0,469	15,781
197	-910,478	433,849	-0,172	0,015	19,411	0,009	0,492	0,017	0,222	15,901
198	-642,712	434,175	-0,086	0,016	18,831	0,010	0,380	0,016	0,347	15,342
199	-362,071	442,878	-0,077	0,022	19,229	0,014	0,400	0,024	0,361	15,726
200	-322,328	448,578	-0,044	0,026	19,073	0,017	0,303	0,024	0,409	15,576
201	-760,569	454,244	-0,154	0,022	18,132	0,019	0,376	0,018	0,249	14,667
202	-699,299	455,352	-0,162	0,021	18,283	0,019	0,356	0,014	0,237	14,813
203	-590,423	467,800	0,160	0,016	15,620	0,008	0,387	0,011	0,708	12,244
204	-339,197	471,492	-0,304	0,021	18,500	0,017	0,318	0,021	0,028	15,023
205	-263,095	477,880	-0,377	0,030	18,925	0,022	0,370	0,023	-0,079	15,432
206	-362,739	479,091	-0,294	0,021	18,609	0,015	0,345	0,022	0,044	15,128
207	-497,636	483,425	0,024	0,019	17,790	0,010	0,360	0,015	0,509	14,338
208	-308,068	487,415	-0,066	0,025	18,080	0,016	0,341	0,021	0,377	14,617
209	-530,571	492,263	-0,209	0,017	18,391	0,009	0,346	0,014	0,167	14,917
210	-644,804	499,450	-0,329	0,017	18,419	0,013	0,326	0,013	-0,009	14,944
211	-398,846	497,012	0,005	0,017	18,294	0,014	0,350	0,016	0,481	14,823

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
212	-557,713	507,192	-0,295	0,016	18,677	0,007	0,338	0,013	0,042	15,193
213	-459,503	508,992	0,043	0,015	17,294	0,009	0,374	0,011	0,537	13,859
214	-610,373	509,053	-0,365	0,016	19,066	0,011	0,338	0,014	-0,061	15,568
215	-415,630	524,819	0,023	0,021	17,790	0,015	0,370	0,018	0,507	14,337
216	-657,510	527,263	-0,148	0,024	19,444	0,019	0,416	0,020	0,257	15,934
217	-529,436	530,939	0,011	0,019	18,629	0,011	0,396	0,017	0,491	15,147
218	-469,226	536,681	-0,284	0,022	19,516	0,014	0,448	0,018	0,058	16,002
219	-705,509	538,740	-0,185	0,020	17,815	0,019	0,343	0,015	0,203	14,361
220	-273,670	539,598	0,182	0,025	15,641	0,015	0,379	0,017	0,741	12,264
221	-580,499	549,226	-0,061	0,018	19,007	0,010	0,411	0,016	0,385	15,512
222	-665,001	550,938	-0,180	0,024	19,337	0,020	0,412	0,023	0,209	15,830
223	-510,121	552,608	0,023	0,017	18,039	0,008	0,386	0,014	0,507	14,577
224	-889,913	553,185	-0,188	0,016	19,336	0,011	0,442	0,019	0,198	15,829
225	-258,486	556,913	-0,057	0,029	18,546	0,021	0,399	0,020	0,391	15,067
226	-256,906	579,743	-0,052	0,028	18,816	0,020	0,424	0,019	0,397	15,328
227	-334,813	599,849	0,013	0,019	18,830	0,014	0,416	0,017	0,493	15,341
228	-545,909	606,392	-0,307	0,016	18,744	0,011	0,339	0,014	0,025	15,258
229	-466,940	608,249	0,021	0,016	18,211	0,010	0,386	0,013	0,505	14,744
230	-357,424	611,268	0,031	0,020	17,821	0,015	0,369	0,017	0,520	14,367
231	-492,569	612,030	-1,000E-3	0,016	19,036	0,010	0,425	0,021	0,472	15,540
232	-421,067	671,784	0,041	0,029	19,264	0,026	0,439	0,020	0,534	15,759
233	-846,444	715,227	-0,088	0,015	18,168	0,008	0,409	0,014	0,345	14,702
234	-789,345	729,064	-0,400	0,014	18,585	0,008	0,355	0,012	-0,112	15,105
235	-259,442	734,272	-0,014	0,022	17,911	0,010	0,458	0,012	0,454	14,454
236	-914,340	741,045	-0,121	0,020	18,941	0,007	0,455	0,021	0,297	15,448
237	-371,540	741,632	-0,324	0,022	19,564	0,016	0,343	0,023	0,000	16,049
238	-267,294	755,583	-0,045	0,019	19,346	0,009	0,429	0,024	0,409	15,839
239	-210,431	771,154	-0,010	0,030	18,281	0,014	0,389	0,018	0,459	14,811
240	-331,157	809,272	0,148	0,027	18,754	0,022	0,606	0,022	0,690	15,268
241	-268,387	-154,827	0,022	0,017	18,803	0,013	0,344	0,012	0,507	15,315
242	-423,487	-151,941	-0,029	0,021	19,090	0,013	0,417	0,017	0,432	15,592
243	-662,002	-137,995	-0,069	0,018	19,472	0,010	0,543	0,019	0,373	15,961
244	-248,966	-129,985	0,043	0,016	18,475	0,013	0,385	0,009	0,537	14,998
245	-648,114	-119,073	-0,032	0,014	18,249	0,008	0,428	0,013	0,427	14,780
246	-309,046	-106,001	-0,194	0,018	18,700	0,010	0,284	0,013	0,190	15,216
247	-172,723	-112,864	0,048	0,017	18,350	0,010	0,346	0,013	0,545	14,878
248	-236,537	-111,712	0,063	0,016	18,765	0,009	0,315	0,013	0,566	15,279
249	-143,232	-91,708	-0,048	0,020	19,492	0,009	0,406	0,022	0,404	15,979

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
250	-573,956	-82,816	0,000	0,024	19,371	0,013	0,380	0,019	0,474	15,863
251	-178,141	-61,736	-0,172	0,009	18,300	0,006	0,286	0,007	0,222	14,830
252	-561,077	-52,454	-0,030	0,018	18,697	0,008	0,395	0,014	0,430	15,213
253	-390,267	-50,586	-0,126	0,030	18,356	0,020	0,299	0,019	0,290	14,883
254	-232,819	-37,818	0,037	0,015	18,836	0,011	0,329	0,012	0,528	15,347
255	-975,242	-36,029	-0,293	0,012	18,411	0,006	0,459	0,012	0,045	14,936
256	-309,145	-27,882	0,104	0,024	19,042	0,012	0,339	0,022	0,626	15,545
257	-325,911	-23,008	0,118	0,028	18,331	0,016	0,342	0,020	0,647	14,860
258	-353,456	-21,811	-0,195	0,028	18,529	0,021	0,315	0,021	0,188	15,050
259	-471,777	-20,038	-0,122	0,019	18,506	0,009	0,282	0,014	0,295	15,028
260	-465,823	-12,617	-0,201	0,023	19,613	0,017	0,262	0,018	0,180	16,097
261	-507,619	-19,670	-0,351	0,017	19,324	0,011	0,333	0,015	-0,041	15,817
262	-502,151	-15,898	0,019	0,018	19,074	0,012	0,319	0,014	0,502	15,576
263	-592,305	-12,773	0,192	0,013	15,703	0,006	0,422	0,010	0,755	12,324
264	-315,344	0,572	0,078	0,025	18,217	0,016	0,359	0,020	0,588	14,749
265	-105,356	-6,142	0,008	0,025	18,503	0,016	0,306	0,017	0,486	15,026
266	-342,575	-1,254	0,119	0,029	18,522	0,018	0,348	0,021	0,649	15,044
267	-412,380	5,565	0,143	0,028	16,464	0,023	0,366	0,018	0,684	13,058
268	-495,574	5,639	0,069	0,015	17,638	0,008	0,347	0,011	0,574	14,191
269	-506,860	17,421	0,091	0,018	17,960	0,012	0,344	0,012	0,607	14,501
270	-562,586	14,238	0,081	0,012	16,262	0,006	0,387	0,010	0,592	12,863
271	-216,382	23,569	0,003	0,019	19,295	0,011	0,332	0,020	0,478	15,789
272	-131,722	33,082	0,049	0,028	18,719	0,010	0,308	0,018	0,546	15,234
273	-494,974	35,249	0,022	0,015	17,675	0,007	0,355	0,011	0,506	14,226
274	-462,773	45,159	0,037	0,031	19,104	0,009	0,320	0,023	0,529	15,605
275	-468,352	40,245	-0,086	0,022	18,591	0,008	0,378	0,015	0,349	15,110
276	-550,755	49,667	0,000	0,020	19,204	0,011	0,342	0,018	0,475	15,701
277	-650,971	51,946	-0,058	0,018	19,015	0,010	0,423	0,015	0,388	15,520
278	-410,439	83,035	0,111	0,022	16,813	0,016	0,361	0,015	0,636	13,395
279	-550,587	82,401	-0,035	0,023	19,019	0,016	0,305	0,017	0,422	15,523
280	-245,707	97,136	0,002	0,028	19,190	0,015	0,294	0,021	0,477	15,688
281	-218,990	102,480	0,168	0,026	16,091	0,007	0,343	0,016	0,720	12,698
282	-644,707	116,056	-0,347	0,021	19,057	0,018	0,277	0,014	-0,034	15,560
283	-682,756	110,359	0,177	0,012	15,489	0,009	0,418	0,009	0,733	12,117
284	-586,214	110,740	-0,005	0,014	17,348	0,009	0,361	0,012	0,467	13,910
285	-468,105	111,239	-0,037	0,016	18,351	0,009	0,330	0,013	0,420	14,878
286	-669,371	113,091	-0,044	0,015	18,832	0,010	0,303	0,015	0,409	15,343

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
287	-212,609	113,761	0,022	0,025	17,829	0,009	0,318	0,016	0,506	14,375
288	-500,736	119,252	-0,073	0,031	19,495	0,022	0,350	0,024	0,367	15,983
289	-398,171	131,440	0,045	0,029	17,488	0,019	0,370	0,021	0,540	14,046
290	-556,360	142,415	-0,226	0,023	18,347	0,016	0,368	0,018	0,143	14,875
291	-552,553	149,081	-0,209	0,028	18,302	0,021	0,318	0,019	0,168	14,831
292	-194,888	170,179	-0,164	0,021	19,446	0,011	0,371	0,021	0,233	15,935
293	-276,904	172,784	-0,008	0,031	18,376	0,015	0,309	0,024	0,462	14,903
294	-521,239	167,514	-0,102	0,018	18,826	0,010	0,326	0,015	0,324	15,337
295	-924,419	175,824	-0,079	0,016	19,263	0,012	0,492	0,015	0,358	15,758
296	-322,939	177,212	0,182	0,024	15,661	0,019	0,364	0,020	0,741	12,283
297	-448,091	178,805	-0,076	0,027	18,398	0,016	0,362	0,023	0,362	14,924
298	-820,229	184,822	-0,077	0,019	19,428	0,016	0,493	0,018	0,361	15,918
299	-704,178	188,013	-0,071	0,015	18,212	0,011	0,407	0,009	0,371	14,744
300	-623,655	192,714	-0,319	0,026	18,722	0,018	0,292	0,022	0,006	15,236
301	-463,944	196,623	-0,172	0,019	18,184	0,010	0,329	0,014	0,222	14,718
302	-317,873	202,527	-0,008	0,028	17,396	0,015	0,328	0,021	0,462	13,958
303	-527,441	213,085	-0,004	0,020	16,556	0,012	0,360	0,012	0,468	13,147
304	-747,538	216,797	-0,346	0,020	18,941	0,015	0,378	0,016	-0,033	15,448
305	-669,646	217,416	-0,064	0,014	18,134	0,009	0,360	0,009	0,380	14,669
306	-516,120	220,714	-0,431	0,021	19,259	0,011	0,315	0,020	-0,158	15,755
307	-585,237	223,461	-0,116	0,015	19,069	0,009	0,306	0,011	0,303	15,571
308	-730,753	232,298	-0,365	0,016	18,860	0,012	0,367	0,010	-0,061	15,370
309	-398,645	232,892	0,047	0,027	17,954	0,023	0,325	0,024	0,542	14,496
310	-684,978	233,037	0,048	0,015	16,274	0,011	0,378	0,010	0,544	12,875
311	-608,239	235,582	-0,057	0,017	17,471	0,010	0,328	0,012	0,390	14,030
312	-451,823	237,625	-0,434	0,029	18,109	0,016	0,299	0,018	-0,162	14,646
313	-353,186	238,606	-0,075	0,027	18,427	0,020	0,326	0,021	0,364	14,952
314	-641,848	238,991	-0,369	0,020	18,569	0,013	0,280	0,015	-0,066	15,089
315	-177,720	241,866	-0,263	0,024	19,205	0,016	0,377	0,022	0,088	15,702
316	-529,233	243,394	-0,100	0,020	18,105	0,013	0,312	0,016	0,328	14,641
317	-688,280	249,604	-0,115	0,020	18,665	0,013	0,367	0,013	0,306	15,181
318	-795,566	257,557	-0,087	0,021	18,183	0,016	0,411	0,015	0,346	14,717
319	-506,873	258,595	-0,058	0,017	17,356	0,008	0,331	0,011	0,389	13,919
320	-659,600	264,448	-0,089	0,015	17,248	0,010	0,340	0,010	0,343	13,815
321	-390,565	265,579	-0,035	0,028	16,944	0,022	0,336	0,024	0,423	13,521
322	-456,637	271,127	-0,105	0,022	18,991	0,014	0,303	0,017	0,320	15,496
323	-592,458	277,200	-0,125	0,022	18,520	0,013	0,320	0,015	0,291	15,042

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
324	-572,507	286,097	-0,421	0,023	19,126	0,009	0,267	0,015	-0,143	15,627
325	-413,793	286,950	0,218	0,029	15,511	0,024	0,387	0,024	0,794	12,138
326	-758,493	298,463	-0,416	0,014	18,942	0,011	0,355	0,012	-0,135	15,449
327	-309,954	297,816	0,019	0,027	16,727	0,015	0,349	0,025	0,502	13,312
328	-833,126	314,122	-0,157	0,024	18,830	0,021	0,435	0,020	0,243	15,341
329	-70,672	318,309	-0,248	0,026	19,530	0,019	0,511	0,018	0,111	16,016
330	-340,749	330,696	-0,085	0,021	18,258	0,011	0,315	0,023	0,349	14,789
331	-439,787	346,674	-0,047	0,021	18,214	0,017	0,340	0,019	0,405	14,746
332	-471,196	363,744	-0,043	0,023	18,728	0,016	0,312	0,020	0,411	15,242
333	-553,415	366,054	-0,053	0,016	17,490	0,010	0,317	0,011	0,396	14,048
334	-726,453	372,369	-0,173	0,026	18,935	0,020	0,440	0,020	0,220	15,442
335	-260,915	372,602	-0,054	0,022	18,219	0,013	0,307	0,019	0,395	14,751
336	-483,615	400,449	0,005	0,025	17,940	0,020	0,320	0,017	0,480	14,482
337	-345,777	403,753	-0,131	0,017	17,273	0,009	0,316	0,018	0,282	13,839
338	-862,479	422,724	-0,044	0,017	16,547	0,014	0,393	0,014	0,409	13,138
339	-547,541	427,717	-0,026	0,023	17,724	0,014	0,370	0,020	0,435	14,273
340	-407,550	446,345	-0,029	0,019	17,459	0,013	0,331	0,022	0,431	14,018
341	-798,584	489,057	-0,240	0,023	19,384	0,018	0,429	0,018	0,122	15,875
342	-617,539	517,304	-0,076	0,016	18,604	0,013	0,382	0,012	0,363	15,123
343	-739,983	566,267	-0,227	0,025	19,772	0,020	0,437	0,022	0,142	16,250
344	-349,052	672,596	0,008	0,020	18,460	0,016	0,391	0,016	0,486	14,984
345	-348,922	712,305	0,018	0,022	18,056	0,017	0,359	0,015	0,500	14,594
346	-605,700	725,259	-0,165	0,017	19,508	0,012	0,415	0,019	0,232	15,995
347	-522,501	-163,168	-0,028	0,017	18,397	0,006	0,406	0,016	0,432	14,923
348	-101,993	-143,293	-0,186	0,030	17,381	0,011	0,299	0,024	0,201	13,943
349	-378,686	-141,294	-0,225	0,028	19,296	0,020	0,331	0,020	0,144	15,791
350	-544,500	-125,557	-0,017	0,018	18,670	0,007	0,429	0,016	0,449	15,186
351	-631,096	-108,223	-0,025	0,022	19,300	0,010	0,510	0,023	0,438	15,794
352	-592,303	-96,122	-0,047	0,018	19,043	0,011	0,457	0,015	0,405	15,547
353	-447,573	-73,183	0,103	0,023	18,317	0,007	0,307	0,019	0,625	14,846
354	-166,015	-68,176	-0,250	0,016	19,287	0,009	0,283	0,011	0,108	15,782
355	-731,895	-67,886	-0,027	0,012	18,105	0,007	0,434	0,010	0,435	14,641
356	-353,021	-63,965	-0,187	0,029	19,129	0,017	0,269	0,018	0,200	15,630
357	-663,443	-50,329	-0,283	0,013	18,500	0,010	0,389	0,012	0,059	15,023
358	-106,639	-29,450	-0,293	0,030	19,229	0,011	0,326	0,020	0,045	15,726
359	-407,856	-24,403	0,062	0,028	18,799	0,020	0,332	0,020	0,565	15,311
360	-157,502	-14,878	-0,292	0,023	19,833	0,013	0,188	0,021	0,046	16,309

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
361	-555,562	-14,345	0,055	0,016	18,360	0,010	0,308	0,012	0,555	14,888
362	-274,303	-10,955	0,031	0,022	18,670	0,018	0,370	0,020	0,519	15,187
363	-242,000	-7,050	0,190	0,013	16,115	0,010	0,361	0,010	0,753	12,721
364	-581,793	-5,764	0,048	0,015	17,614	0,007	0,362	0,011	0,544	14,167
365	-590,786	0,433	-0,284	0,028	19,943	0,016	0,260	0,022	0,058	16,415
366	-535,957	4,164	0,044	0,020	19,115	0,011	0,305	0,015	0,539	15,616
367	-461,964	17,505	-0,158	0,022	18,949	0,014	0,277	0,016	0,242	15,456
368	-321,622	23,054	0,153	0,027	17,542	0,020	0,361	0,024	0,697	14,098
369	-298,373	28,734	0,098	0,027	18,120	0,016	0,357	0,023	0,618	14,656
370	-631,950	62,616	-0,025	0,013	18,119	0,008	0,358	0,011	0,437	14,654
371	-679,506	79,032	-0,321	0,029	19,537	0,021	0,379	0,023	0,004	16,023
372	-411,396	98,605	0,108	0,029	18,912	0,017	0,342	0,023	0,632	15,420
373	-586,523	129,531	0,102	0,014	16,066	0,009	0,396	0,012	0,623	12,674
374	-265,695	140,233	-0,266	0,023	18,494	0,018	0,280	0,023	0,084	15,017
375	-240,501	172,857	-0,281	0,029	18,404	0,014	0,288	0,022	0,061	14,930
376	-277,451	191,438	0,019	0,027	17,356	0,015	0,336	0,019	0,501	13,919
377	-545,946	202,804	-0,065	0,018	17,464	0,011	0,332	0,012	0,378	14,023
378	-393,209	220,303	-0,004	0,030	17,474	0,024	0,320	0,021	0,467	14,032
379	-444,145	224,341	0,043	0,025	16,256	0,021	0,359	0,015	0,537	12,857
380	-664,830	247,478	-0,081	0,016	17,797	0,010	0,305	0,012	0,355	14,344
381	-575,637	257,502	0,023	0,015	16,265	0,008	0,356	0,010	0,508	12,866
382	-615,871	266,652	-0,097	0,020	19,034	0,010	0,305	0,018	0,332	15,538
383	-385,861	277,442	-0,354	0,029	19,725	0,020	0,292	0,022	-0,045	16,204
384	-332,977	281,129	-0,054	0,026	16,903	0,016	0,329	0,021	0,395	13,482
385	-444,620	301,073	-0,390	0,026	18,963	0,016	0,306	0,023	-0,097	15,469
386	-374,826	315,357	-0,371	0,031	18,761	0,018	0,277	0,024	-0,070	15,275
387	-496,138	323,522	0,033	0,017	16,325	0,011	0,360	0,010	0,523	12,924
388	-488,807	345,133	-0,017	0,022	16,821	0,008	0,359	0,016	0,449	13,402
389	-589,877	352,776	-0,400	0,022	19,417	0,016	0,261	0,017	-0,113	15,907
390	-555,264	407,037	-0,021	0,018	17,751	0,010	0,343	0,016	0,444	14,300
391	-651,168	459,746	-0,371	0,021	18,914	0,015	0,352	0,018	-0,070	15,422
392	-368,740	511,434	0,005	0,018	17,790	0,014	0,367	0,018	0,481	14,338
393	-798,014	546,719	-0,489	0,018	18,779	0,014	0,328	0,015	-0,242	15,291
394	-682,285	564,699	-0,060	0,021	16,897	0,018	0,350	0,015	0,386	13,476
395	-832,952	569,631	-0,171	0,015	18,167	0,011	0,382	0,015	0,224	14,701
396	-704,192	574,797	-0,156	0,022	17,961	0,019	0,347	0,014	0,246	14,502
397	-805,644	585,920	-0,181	0,020	18,624	0,013	0,381	0,018	0,208	15,142
398	-609,567	615,401	-0,013	0,021	16,642	0,017	0,343	0,015	0,455	13,229

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
399	-754,378	646,242	-0,210	0,015	19,189	0,012	0,405	0,016	0,166	15,687
400	-581,342	646,436	-0,425	0,019	19,150	0,015	0,328	0,018	-0,149	15,650
401	-590,732	652,884	-0,141	0,017	19,137	0,012	0,360	0,017	0,267	15,637
402	-629,635	701,066	-0,178	0,020	19,510	0,018	0,388	0,021	0,214	15,997
403	-540,544	727,940	-0,111	0,018	19,225	0,014	0,371	0,018	0,311	15,722
404	-640,828	-120,655	-0,367	0,021	19,488	0,016	0,448	0,017	-0,063	15,976
405	-115,144	-113,318	0,079	0,027	17,700	0,009	0,344	0,020	0,589	14,251
406	-343,134	-65,399	0,084	0,030	18,646	0,017	0,340	0,019	0,597	15,163
407	-488,823	-52,426	-0,005	0,020	18,925	0,011	0,333	0,017	0,467	15,433
408	-698,242	-44,966	-0,059	0,020	18,644	0,014	0,453	0,018	0,387	15,162
409	-227,440	-42,734	0,079	0,021	19,117	0,016	0,354	0,018	0,590	15,618
410	-390,192	-28,124	-0,175	0,027	18,745	0,020	0,309	0,022	0,218	15,258
411	-328,743	-8,217	-0,164	0,025	18,373	0,020	0,305	0,022	0,234	14,900
412	-189,202	4,278	-0,024	0,021	19,459	0,010	0,305	0,023	0,438	15,947
413	-325,071	54,020	-0,215	0,028	17,579	0,024	0,316	0,024	0,159	14,134
414	-537,907	58,464	-0,030	0,022	18,979	0,015	0,334	0,019	0,429	15,485
415	-481,765	63,908	0,012	0,017	16,867	0,008	0,355	0,014	0,491	13,447
416	-320,356	112,711	0,035	0,021	18,048	0,017	0,331	0,021	0,525	14,586
417	-237,548	102,072	0,019	0,027	18,354	0,011	0,307	0,017	0,502	14,881
418	-640,353	108,937	-0,028	0,018	18,250	0,012	0,348	0,013	0,433	14,782
419	-513,303	109,740	-0,345	0,022	19,242	0,016	0,263	0,020	-0,031	15,739
420	-272,694	114,462	-0,051	0,026	18,309	0,020	0,330	0,024	0,399	14,839
421	-543,611	129,778	-0,080	0,026	19,262	0,021	0,296	0,021	0,357	15,758
422	-202,802	165,174	-0,071	0,027	18,670	0,018	0,317	0,024	0,371	15,186
423	-463,870	156,346	-0,133	0,030	19,325	0,018	0,270	0,021	0,280	15,819
424	-594,955	161,667	-0,052	0,017	18,316	0,012	0,329	0,017	0,397	14,845
425	-552,727	173,082	-0,085	0,019	18,208	0,012	0,337	0,015	0,349	14,741
426	-252,678	178,032	-0,084	0,031	17,815	0,011	0,316	0,021	0,350	14,361
427	-433,772	182,856	-0,267	0,026	18,424	0,019	0,280	0,018	0,082	14,949
428	-124,312	210,503	-0,190	0,021	19,232	0,015	0,405	0,019	0,196	15,729
429	-509,010	222,191	-0,392	0,024	18,990	0,018	0,278	0,023	-0,100	15,495
430	-530,181	223,413	-0,086	0,017	17,374	0,009	0,327	0,011	0,348	13,936
431	-278,125	249,044	-0,306	0,026	17,845	0,014	0,300	0,023	0,025	14,390
432	-449,425	265,742	-0,075	0,022	17,958	0,010	0,341	0,013	0,363	14,500
433	-565,615	285,094	-0,463	0,022	19,310	0,013	0,242	0,019	-0,205	15,804
434	-445,104	377,199	0,067	0,016	16,309	0,008	0,365	0,013	0,573	12,908
435	-452,789	380,948	-0,314	0,027	18,389	0,016	0,291	0,016	0,013	14,915

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
436	-857,032	400,877	-0,163	0,016	18,480	0,013	0,410	0,012	0,235	15,003
437	-270,151	423,539	-0,114	0,024	19,033	0,016	0,308	0,023	0,306	15,537
438	-684,317	608,980	-0,153	0,019	17,258	0,017	0,329	0,014	0,250	13,824
439	-711,246	614,450	-0,115	0,020	16,653	0,017	0,347	0,013	0,306	13,240
440	-736,995	630,522	-0,528	0,024	19,350	0,019	0,335	0,024	-0,300	15,843
441	-635,519	631,337	-0,155	0,018	18,336	0,015	0,337	0,014	0,246	14,864
442	-602,368	646,950	-0,170	0,018	19,009	0,015	0,356	0,017	0,224	15,513
443	-684,285	689,606	-0,075	0,015	16,519	0,013	0,346	0,012	0,364	13,111
444	-698,417	711,970	-0,178	0,018	17,536	0,014	0,339	0,012	0,213	14,093
445	-480,066	711,979	-0,062	0,017	18,452	0,012	0,367	0,017	0,383	14,976
446	-667,591	749,490	-0,151	0,016	18,660	0,013	0,383	0,013	0,252	15,177
447	-596,773	-103,436	0,024	0,010	17,164	0,005	0,404	0,010	0,509	13,733
448	-434,689	-60,013	0,132	0,024	16,588	0,014	0,366	0,018	0,667	13,178
449	-542,451	7,167	-0,027	0,025	18,513	0,014	0,351	0,022	0,435	15,035
450	-697,917	24,435	0,017	0,017	16,849	0,011	0,391	0,018	0,499	13,430
451	-489,768	29,676	0,106	0,017	17,113	0,008	0,336	0,013	0,629	13,684
452	-495,871	43,791	-0,017	0,020	18,316	0,011	0,347	0,015	0,448	14,845
453	-259,081	90,963	0,106	0,029	17,604	0,025	0,350	0,021	0,629	14,158
454	-482,220	94,387	-0,297	0,025	18,775	0,016	0,345	0,021	0,039	15,288
455	-350,585	194,581	-0,029	0,029	17,560	0,022	0,327	0,024	0,431	14,115
456	-282,338	208,422	0,184	0,029	15,717	0,020	0,384	0,023	0,743	12,337
457	-474,743	205,892	-0,116	0,018	17,682	0,013	0,317	0,015	0,304	14,233
458	-466,355	236,352	-0,106	0,016	17,829	0,007	0,327	0,011	0,319	14,375
459	-280,665	263,174	-0,358	0,021	19,175	0,014	0,263	0,018	-0,050	15,673
460	-313,278	344,941	0,051	0,027	16,248	0,012	0,337	0,023	0,548	12,849
461	-244,301	481,697	-0,090	0,027	19,396	0,010	0,499	0,020	0,341	15,887
462	-651,129	494,785	-0,365	0,023	18,866	0,019	0,376	0,017	-0,060	15,375
463	-153,294	27,304	-0,013	0,025	18,793	0,011	0,316	0,019	0,455	15,305
464	-442,120	77,595	0,002	0,028	17,853	0,018	0,373	0,020	0,476	14,398
465	-301,612	116,972	-0,293	0,025	18,878	0,020	0,281	0,024	0,045	15,387
466	-431,262	157,825	0,074	0,028	16,259	0,022	0,364	0,018	0,582	12,860
467	-298,954	180,259	0,051	0,027	16,719	0,021	0,330	0,021	0,549	13,304
468	-504,428	192,779	-0,072	0,018	17,034	0,010	0,344	0,012	0,368	13,608
469	-237,905	216,486	-0,360	0,023	18,318	0,015	0,280	0,017	-0,054	14,847
470	-539,479	209,268	-0,347	0,026	18,856	0,018	0,253	0,018	-0,034	15,366
471	-445,829	273,953	-0,509	0,030	19,084	0,021	0,281	0,020	-0,272	15,586
472	-144,350	318,324	-0,187	0,032	18,687	0,026	0,331	0,024	0,199	15,203

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
473	-519,972	319,459	-0,072	0,018	17,412	0,010	0,341	0,017	0,368	13,973
474	-439,664	97,973	-0,262	0,024	18,570	0,016	0,356	0,023	0,089	15,090
475	-560,625	125,448	-0,011	0,015	17,421	0,010	0,351	0,010	0,457	13,981
476	-207,691	131,451	-0,274	0,029	18,573	0,010	0,289	0,017	0,072	15,093
477	-243,070	163,556	0,060	0,030	16,250	0,012	0,338	0,018	0,561	12,852
478	-179,556	222,208	-0,206	0,022	19,267	0,017	0,379	0,023	0,171	15,763
479	-530,572	233,195	-0,368	0,015	17,067	0,009	0,309	0,010	-0,065	13,639
480	-663,888	241,656	-0,229	0,017	18,158	0,014	0,336	0,017	0,139	14,692
481	-620,933	260,835	-0,068	0,019	17,559	0,010	0,350	0,013	0,375	14,115
482	-441,237	268,721	0,024	0,031	17,334	0,028	0,355	0,018	0,509	13,897
483	-391,105	301,883	0,273	0,027	15,614	0,020	0,403	0,023	0,874	12,238
484	-298,233	303,268	-0,349	0,022	18,682	0,011	0,264	0,023	-0,038	15,198
485	-308,246	-143,196	-0,058	0,024	18,501	0,018	0,364	0,023	0,389	15,023
486	-274,546	202,996	0,078	0,023	16,048	0,016	0,336	0,022	0,587	12,656
487	-341,129	224,920	7,500E-4	0,027	17,420	0,021	0,317	0,022	0,475	13,980
488	-438,894	39,217	-0,200	0,027	18,551	0,022	0,341	0,023	0,181	15,071
489	-226,625	60,982	0,103	0,021	16,403	0,016	0,334	0,013	0,625	12,999
490	-308,151	348,033	0,048	0,024	16,508	0,017	0,349	0,023	0,544	13,101
491	-267,328	123,683	0,033	0,019	16,513	0,011	0,315	0,013	0,522	13,105
492	-422,770	96,932	0,029	0,029	17,767	0,023	0,353	0,020	0,516	14,315
493	-466,929	-176,486	-0,029	0,016	18,166	0,007	0,398	0,012	0,432	14,700
494	-207,929	-173,761	-0,285	0,031	19,227	0,025	0,299	0,021	0,056	15,724
495	-373,543	-173,082	-0,201	0,025	18,290	0,020	0,377	0,015	0,179	14,820
496	-577,509	-181,396	-0,048	0,013	18,653	0,006	0,437	0,014	0,404	15,170
497	-553,808	-189,086	-0,023	0,013	17,826	0,005	0,405	0,013	0,441	14,372
498	-213,589	-196,026	-0,006	0,028	17,679	0,021	0,354	0,021	0,465	14,230
499	-234,217	-210,425	0,011	0,028	19,063	0,023	0,429	0,023	0,489	15,565
500	513,785	-27,238	0,150	0,024	18,513	0,020	0,404	0,022	0,694	15,035
501	534,407	30,444	-0,170	0,030	18,815	0,024	0,358	0,024	0,225	15,326
502	75,835	-211,923	0,256	0,023	18,905	0,014	0,404	0,024	0,849	15,413
503	294,106	-207,274	0,220	0,012	17,606	0,006	0,367	0,021	0,796	14,159
504	183,892	-186,991	0,259	0,020	18,644	0,016	0,377	0,019	0,853	15,161
505	504,509	36,574	0,143	0,030	18,389	0,024	0,387	0,022	0,684	14,916
506	417,494	114,332	-0,253	0,029	18,549	0,010	0,313	0,021	0,103	15,070
507	420,516	174,688	-0,277	0,029	18,706	0,009	0,346	0,019	0,068	15,221
508	154,304	189,568	-0,212	0,028	18,935	0,013	0,338	0,022	0,163	15,442
509	130,717	185,115	0,099	0,026	17,651	0,008	0,328	0,020	0,618	14,204
510	124,101	199,155	-0,214	0,022	18,826	0,012	0,327	0,021	0,160	15,337

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
511	153,482	-288,439	0,224	0,022	18,196	0,009	0,418	0,013	0,802	14,729
512	-61,967	-801,657	0,229	0,021	18,800	0,016	0,452	0,023	0,809	15,312
513	203,202	-734,215	0,349	0,015	18,266	0,011	0,431	0,016	0,985	14,797
514	106,823	-653,243	0,212	0,017	17,447	0,014	0,378	0,013	0,784	14,006
515	71,818	-547,192	-0,152	0,013	19,261	0,011	0,397	0,016	0,252	15,757
516	489,469	-481,096	-0,156	0,017	18,490	0,012	0,413	0,012	0,245	15,012
517	98,668	-471,772	-0,147	0,013	19,045	0,011	0,360	0,015	0,259	15,549
518	-181,085	-412,606	0,155	0,012	17,613	0,012	0,366	0,008	0,701	14,167
519	-241,036	-411,536	0,125	0,014	17,768	0,014	0,375	0,009	0,657	14,316
520	-59,368	-374,381	0,201	0,013	18,264	0,011	0,371	0,009	0,768	14,794
521	55,713	-326,167	0,267	0,014	17,084	0,011	0,355	0,008	0,865	13,656
522	-84,106	-304,466	0,231	0,009	16,983	0,007	0,360	0,006	0,812	13,558
523	-274,755	-833,173	0,121	0,018	17,866	0,014	0,486	0,013	0,651	14,411
524	-25,120	-760,442	0,255	0,017	17,948	0,015	0,399	0,015	0,847	14,490
525	-352,430	-731,492	0,203	0,021	18,931	0,011	0,517	0,016	0,772	15,438
526	-283,626	-730,434	0,206	0,021	18,813	0,011	0,501	0,019	0,775	15,325
527	110,279	-708,397	0,296	0,016	18,072	0,011	0,393	0,012	0,908	14,609
528	-264,312	-686,801	0,203	0,014	17,983	0,010	0,439	0,014	0,771	14,524
529	140,282	-617,736	0,216	0,024	18,881	0,017	0,432	0,017	0,791	15,390
530	-308,165	-603,811	0,197	0,012	17,983	0,008	0,419	0,013	0,762	14,523
531	113,486	-601,773	0,212	0,018	18,627	0,015	0,410	0,015	0,784	15,145
532	-387,901	-585,468	-0,144	0,017	18,955	0,014	0,411	0,015	0,263	15,461
533	-49,388	-585,013	0,188	0,016	19,026	0,014	0,439	0,018	0,749	15,530
534	-311,252	-578,927	-0,139	0,016	18,837	0,012	0,402	0,014	0,269	15,348
535	-126,490	-544,978	0,190	0,014	17,764	0,013	0,376	0,010	0,752	14,313
536	85,505	-499,405	-0,144	0,014	18,889	0,012	0,369	0,013	0,263	15,398
537	-401,515	-493,926	-0,169	0,015	18,804	0,011	0,412	0,014	0,227	15,316
538	401,847	-478,726	-0,226	0,015	18,890	0,010	0,441	0,015	0,144	15,399
539	-398,859	-478,044	0,048	0,011	18,114	0,008	0,417	0,009	0,545	14,650
540	154,161	-476,168	-0,165	0,014	19,104	0,012	0,390	0,013	0,233	15,605
541	-357,020	-445,755	0,119	0,014	17,811	0,012	0,406	0,009	0,649	14,358
542	300,039	-433,342	0,098	0,015	18,468	0,009	0,455	0,011	0,617	14,991
543	-87,720	-428,804	-0,147	0,015	18,752	0,013	0,347	0,011	0,258	15,266
544	-174,164	-374,283	0,082	0,015	18,791	0,014	0,387	0,013	0,594	15,303
545	345,202	-373,134	-0,189	0,017	18,913	0,012	0,453	0,018	0,197	15,421
546	491,308	-360,236	0,117	0,017	18,512	0,008	0,498	0,016	0,645	15,034
547	275,029	-358,236	0,150	0,016	19,031	0,011	0,485	0,016	0,694	15,534

Tabelle A.1: Photometrie

ID	X-Koordinate [Pixel]	Y-Koordinate [Pixel]	g1-g3 [mag]	σ_{g1-g3} [mag]	g3 [mag]	σ_{g3} [mag]	a [mag]	σ_a [mag]	b-y [mag]	y [mag]
548	-78,866	-331,267	0,302	0,011	16,115	0,009	0,367	0,006	0,916	12,721
549	334,716	-330,980	0,391	0,009	15,506	0,006	0,428	0,008	1,046	12,133
550	287,274	-325,644	0,188	0,011	17,404	0,008	0,421	0,007	0,750	13,964
551	-169,055	-316,652	-0,123	0,025	18,211	0,022	0,346	0,021	0,293	14,744
552	59,237	-308,566	0,285	0,013	17,389	0,010	0,362	0,008	0,891	13,950
553	-63,392	-306,662	0,365	0,011	15,754	0,009	0,373	0,006	1,009	12,373
554	-367,690	-312,612	0,060	0,014	18,575	0,009	0,439	0,012	0,561	15,095
555	-155,418	-455,870	-0,120	0,016	17,456	0,014	0,333	0,011	0,297	14,015
556	-416,604	-325,640	-0,168	0,017	18,464	0,014	0,423	0,014	0,228	14,988
557	-85,139	-628,081	0,212	0,025	19,104	0,014	0,443	0,021	0,784	15,606
558	508,722	-474,262	-0,209	0,022	19,316	0,014	0,488	0,020	0,168	15,810

B Johnsonkorrelationen

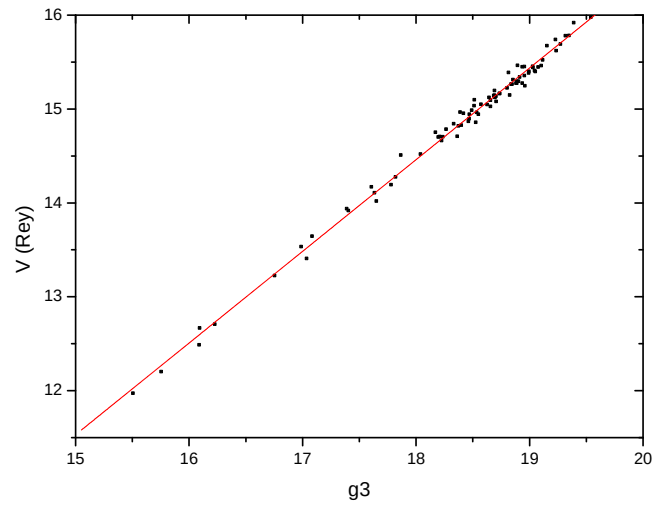


Abbildung B.1: Korrelation der $g3$ Werte mit V Werten von Rey et al. 2001 [52]

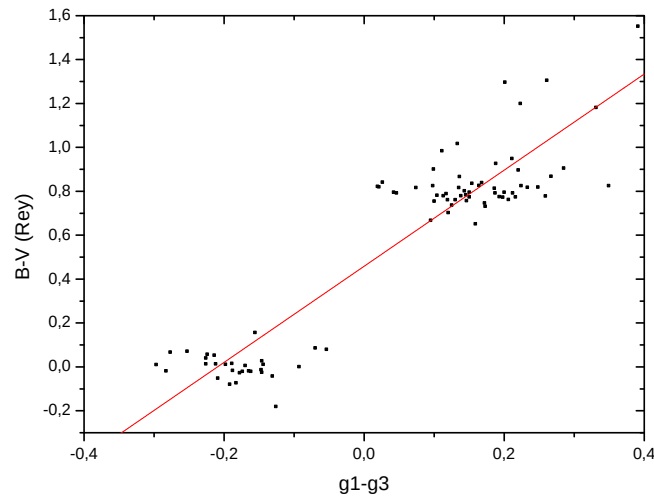


Abbildung B.2: Korrelation der $(g1-g3)$ Werte mit $(B-V)$ Werten von Rey et al. 2001 [52]

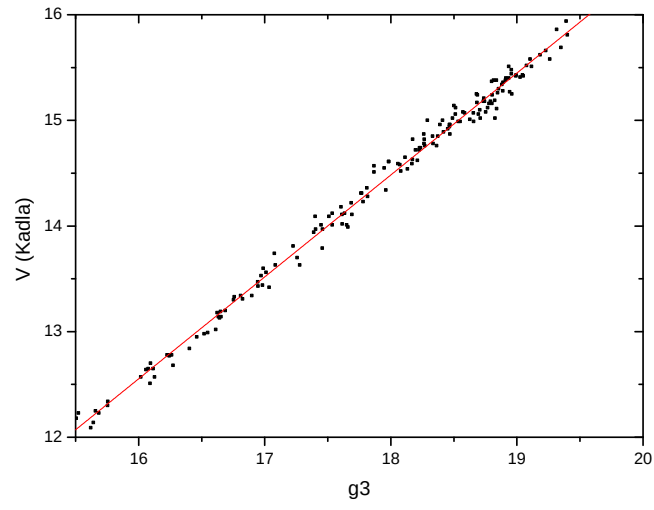


Abbildung B.3: Korrelation der $g3$ Werte mit V Werten von Kadla 1966 [27]

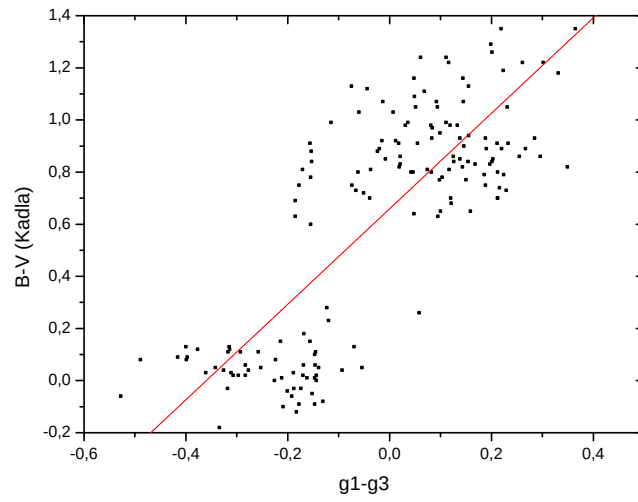


Abbildung B.4: Korrelation der $(g1-g3)$ Werte mit $(B-V)$ Werten von Kadla 1966 [27]

C Abkürzungsverzeichnis

ADU Analog Digital Unit, vgl. 5.2

AGB Asymptotischer Riesenast (engl. asymptotic giant branch), vgl. 3.2.1

BHB blauer Horizontalast (engl. blue horizontal branch), vgl. 3.2.4

BS Blue Straggler, vgl. 3.2.1

CMD Farb-Helligkeits-Diagramm (engl. color-magnitude diagram), vgl. 3.2.1

FWHM Halbwertsbreite (engl. Full Width Half Maximum), vgl. 5.2

HB Horizontalast (englisch horizontal branch), vgl. 3.2.1

HST Hubble Space Telescope

IAU Internationale Astronomische Union

MS Hauptreihe (engl. main sequence), vgl. 3.2.1

MSTO Abknickpunkt der Hauptreihe (engl. main sequence turn off), vgl. 3.2.1

PN Planetarischer Nebel, vgl. 3.2.1

PSF Point Spread Funktion, vgl. 5.2

RGB Roter-Riesen-Ast (engl. red giant branch), vgl. 3.2.1

RHB roter Horizontalast (engl. red horizontal branch), vgl. 3.2.4

SD Unterzwerg (engl. Subdwarf), vgl. 3.2.2

SGB Unterriesenast (engl. subgiant branch), vgl. 3.2.1

ZAHB Null-Alter-Horizontal-Ast (engl. zero age horizontal branch), vgl. 4.3

D Zusammenfassung

Es wurde ein kurzer geschichtlicher Überblick über die Erforschung sowohl der Kugelsternhaufen als auch der chemisch peculiaren Sterne gegeben. Die physikalischen Eigenschaften des Galaktischen Kugelsternhaufensystems wurden ebenso wie die Erforschung von chemisch peculiaren Sternen am HB erörtert.

Da diese Arbeit eine Machbarkeitsstudie war, ob chemisch peculiare Sterne am HB mittels Δa -Photometrie detektierbar sind, wurde ein möglicher Nutzen der Δa -Photometrie in Bezug auf die Erforschung von Kugelsternhaufen hervorgehoben. Die Anwendung dieser Methode erfolgte am Beispiel von M13.

Die einzelnen Schritte der Photometrie und deren Ergebnisse wurden präsentiert. Aufgrund schlechter Daten konnte der angestrebte Vergleich mit den Daten von Behr et al. 1999 [5] nicht ausgeführt werden. Dennoch gibt es Hinweise auf die Entdeckung chemisch peculiarer Sterne am HB. Außerdem konnte eine auffällige Ansammlung von Sternen mit deutlichen Δa -Werten jenseits des HB entdeckt werden. Für ein Verständnis dieser Objekte bedarf es jedoch noch weiterer Forschung.

Literaturverzeichnis

- [1] K. M. Ashman, S. E. Zepf, Globular Cluster Systems, Cambridge [u.a.] 1998
- [2] T. E. Armandroff, The Disk population of Globular Clusters. In: The Globular Cluster – Galaxy Connection, ASP Conference Series 48, G. Smith & J. P. Brodie [Hg], San Francisco 1993
- [3] Halton C. Arp, Color-Magnitude Diagram For Seven Globular Clusters. In: The Astronomical Journal 60, 1955, S. 317ff
- [4] B. Baschek, Abundance anomalies in early-type stars. In: Problems in stellar atmospheres and envelopes, New York 1975
- [5] B. B. Behr et al., Striking photospheric abundance anomalies in blue horizontal-branch stars in Globular Cluster M13., Astrophysical Journal 517, 1999, S. 135ff
- [6] B. B. Behr et al., New spin on the problem of horizontal-branch gaps: Stellar rotation along the blue horizontal branch of Globular Cluster M13. In: Astrophysical Journal 528, 2000, S. 849ff
- [7] B. B. Behr et al., Rotation and abundances of blue horizontal-branch stars in Globular Cluster M15. In: Astrophysical Journal 531, 2000, S. 37ff
- [8] B. B. Behr, Chemical abundances and rotation velocities of blue horizontal-branch stars in six Globular Clusters. In: Astrophysical Journal Supplement Series 149, 2003, S. 67ff
- [9] S. van den Bergh, The Proto-Galaxy, Globular Clusters, and Quasars. In: Astrophysical Journal 411, 1993, S. 178ff
- [10] R. Buonanno et al., CCD photometry of Globular Clusters IV. NGC 7006. In: Astronomical Journal 102, 1991, S. 1005ff

- [11] B. W. Carney, Stellar evolution in Globular clusters. In: *Star Clusters*, Berlin [u.a.] 2001
- [12] D. Cho et al., Different characteristics of the bright branches of the Globular Clusters M3 and M13. In: *Astronomical Journal* 129, 2005, S. 1922ff
- [13] F. R. Ferraro et al., Hubble space telescope ultraviolet observations of the cores of M3 and M13. In: *Astrophysical Journal* 484, 1997, S. 145ff
- [14] F. R. Ferraro et al., Multimodal distributions along the horizontal branch., In: *Astrophysical Journal* 500, 1998, S. 311ff
- [15] Owen Gingerich, Messier and His Catalogue II. In: *Sky and Telescope* 12, 1953, S. 288ff
- [16] J. W. Glaspey et al., Abundance anomalies in hot horizontal-branch stars of the Globular Cluster NGC 6752. In: *Astrophysical Journal* 339, 1989, S. 926ff
- [17] G. S. Greenstein et al., The weakness of Helium lines in Globular Cluster and Halo B stars. In: *Astrophysical Journal* 146, 1966, S.618ff
- [18] G. S. Greenstein et al., Helium Deficiency in old Halo B stars. In: *Nature* 213, 1967, S. 871ff
- [19] F. Grundahl et al., Strömgren Photometry of Globular Clusters: The distance and age of M13, evidence for two populations of horizontal-branch stars. In: *Astrophysical Journal* 500 , 1998, S. 179ff
- [20] F. Grundahl et al., Hot horizontal-branch stars: The ubiquitous nature of the "jump" in Strömgren u, low gravities, and the role of radiative levitation of metals. In: *Astrophysical Journal* 524, 1999, S. 242ff
- [21] E. Halley, An Account of several Nebulæ or lucid Spots like Clouds, lately discovered among the Fixt Stars by help of the Telescope. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 29, 1717, S. 390ff
- [22] W. E. Harris et al., The luminosity distribution of Globular clusters in three giant Virgo Ellipticals. In: *Astrophysical Journal Supplement Series* 76, 1991, S. 115ff
- [23] W. E. Harris, Globular Cluster Systems. In: *Star Clusters*, Berlin [u.a.] 2001

- [24] William Herschel, Catalogue of One Thousand new Nebulæ and Clusters of Stars. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 76 Part 2, 1786, S. 457ff
- [25] William Herschel, Catalogue of a second Thousand of new Nebulæ and Clusters of Stars; with a few introductory Remarks on the Construction of the Heavens. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 79 Part 2, 1789, S. 212ff
- [26] Helen Sawyer Hogg, A Third catalogue of variable stars in globular clusters comprising 2119 Entries. In: Publications of the David Dunlap Observatory University of Toronto, vol. 3, no. 6, 1973
- [27] Z. I. Kadla, Issledovanie scharovogo skoplenija M13. In: Izvestija Glavnoj Astronomičeskoj Observatorii v Pulkove 181, 1966, S. 93ff
- [28] Gottfried Kirch, Stella nebulosa prope pedem borealem Ganymedis observata[...] In: Ephemeridum motuum coelestium [...], Leipzig 1681
- [29] G. Kirchhoff, Über die Fraunhofer'schen Linien. In: Gesammelte Abhandlungen von G. Kirchhoff, Leipzig 1882
- [30] K. Kodaira, Osawa's peculiar star HD 221568. In: Astrophysical Journal 157, 1969, S. 59ff
- [31] E. Lommel (Hg.), Joseph von Fraunhofer's gesammelte Schriften, München 1888
- [32] H. M. Maitzen et al., 11-Farben-Photometrie des magnetisch veränderlichen HD 125248. In: Astronomy and Astrophysic 16, 1972, S. 385ff
- [33] H. M. Maitzen et al., Lichtelektrische Beobachtung des Ap Sterns HD 98088. In: Astronomy and Astrophysic Supplement Series 11, 1973, S. 327ff
- [34] H. M. Maitzen et al., Zur Periodenbestimmung und Pekuliarität des kühlen Ap-Sterns HD 203006 (ϑ Mic). In: Astronomy and Astrophysic 32, 1974, S. 21ff
- [35] H. M. Maitzen et al., Zur Veränderlichkeit des pekuliaren A Sterns HD 49976. In: Astronomy and Astrophysic 44, 1975, S. 405ff
- [36] H. M. Maitzen, Lichtelektrische Filterfotometrie der Flußdepression bei 5200 Å in pekuliaren A-Sternen. In: Astronomy and Astrophysics 51, 1976, S. 223ff

- [37] H. M. Maitzen, Vogt, Photoelectric photometry of peculiar and related stars. In: Astronomy and Astrophysic 123, 1983, S. 48ff
- [38] H. M. Maitzen, K. Pavlovski, Δa -photometry of λ Bootis stars. In: Astronomy and Astrophysics 219, 1989, S. 253ff
- [39] H. M. Maitzen, Two decades of Δa photometry In: Hvar Observatory Bulletin 22, 1998, S. 83ff
- [40] Antonia C. Maury, Spectra of bright stars. In: Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College 28, Part I, 1897
- [41] Charles Messier, Catalogue des Nébuleuses & des amas d'Étoiles, que l'on découvre parmi les Étoiles fixes sur l'horizon de Paris; observées à l'Observatoire de la Marine, avec differens instruments. In: Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 1771, Paris 1774, S. 435ff
- [42] Charles Messier, Catalogue des Nébuleuses & des amas d'étoiles observées à Paris. In: Connoissance des Temps, pour [...] 1783, Paris 1780
- [43] Charles Messier, Catalogue des Nébuleuses & des amas d'étoiles observées à Paris. In: Connoissance des Temps, pour [...] 1784, Paris 1781, S. 227ff
- [44] G. Michaud et al., Diffusion processes in peculiar A stars. In: Astrophysical Journal 160, 1970, S. 641ff
- [45] G. Michaud et al., Diffusion, meridional circulation and mass loss in Fm-Am stars. In: Astrophysical Journal 269, 1983, S. 239ff
- [46] A. V. Mironov, Hartwick's two dimensional clasification of Globular Clusters. In: Soviet Astronomy 16, 1972, S. 105ff
- [47] S. Möhler, Physical parameters of hot horizontal-branch stars in NGC 6152: Deep mixing and radiative levitation. In: Astronomy and Astrophysics 346, 1999, S. 1ff
- [48] E. Paunzen, Chemical peculiar stars of the upper main sequence, Universitäts Habillitatio-
ons Schrift Wien 2003

- [49] K. Pavlovski, H. M. Maitzen, Δa -photometry of Be/ shell stars. In: Astronomy and Astrophysics Supplement Series 77, 1989, S. 351ff
- [50] R. C. Peterson et al., Rotation and Oxygen line strengths in blue horizontal-branch stars., In: Astrophysical Journal 453, 1995, S. 214ff
- [51] G. Preston, The chemically peculiar stars of the upper main sequence. In: Annual review of astronomy and astrophysics 12, 1974, S. 257ff
- [52] S. Rey et al., CCD Photometry of the classic second-parameter Globular clusters M3 and M13. In: Astronomical Journal 122, 2001, S. 3219ff
- [53] Rolf Riekher, Fernrohre und ihre Meister, Berlin 1990
- [54] A. Sandage, G. Wallerstein, Color Magnitude Diagram for the Disk Globular Cluster NGC 6356. In: Astrophysical Journal 131, 1960, S. 598ff
- [55] A. Sandage, G. A. Tammann, Bias properties of extragalactic distance Indicators IV Demonstration of population incompleteness bias inherent in the Tully-Fisher Method applied to clusters. In: Astrophysical Journal 452, 1995, S. 1ff
- [56] J. Scheiner, Der grosse Sternhaufen im Hercules Messer 13 nach Aufnahmen am Potsdamer photographischen Refractor. In: Anhang zu den Abhandlungen der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom Jahre 1892, Berlin 1892, S. 3ff
- [57] Detlef Schönberner, Late stages of evolution. II. Mass loss and the transition of Asymptotic Giant Branch stars into hot remnants. In: Astrophysical Journal 272, 1983, S. 708ff
- [58] Hermann Schultz, Historische Notizen über Nebelflecke. In: Astronomische Nachrichten 67, 1866, S. 1ff
- [59] P. Angelo Secchi, Die Sterne, Leipzig 1878
- [60] Waltraut Seitter, Aus der Geschichte der astronomischen Spektroskopie. In: Sterne und Weltraum 8/9, 1969, S. 212ff
- [61] Waltraut Seitter, Aus der Geschichte der astronomischen Spektroskopie. In: Sterne und Weltraum 10, 1969, S. 231ff

- [62] Waltraut Seitter, Aus der Geschichte der astronomischen Spektroskopie. In: Sterne und Weltraum 11, 1969, S. 264ff
- [63] Harlow Shapley, On the nature and cause of the cepheid variation. In: Contributions from the Mount Wilson Solar Observatory, no. 92, 1914
- [64] Harlow Shapley, Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. second part: Thirteen hundred stars in the Hercules cluster (Messier 13). In: Astrophysical Journal 45, 1917, S.123ff
- [65] Harlow Shapley, Star Clusters, New York 1930
- [66] Horace A. Smith, Solon Bailey and the Period-Luminosity-Relation. In: Journal of the American Association of Variable Star Observers, 26, 1997, S. 62ff
- [67] Horace A. Smith, Bailey, Shapley and Variable Stars in Globular Clusters. In: Journal for the History of Astronomy 31, 2000, S. 185ff
- [68] D. VandenBerg et al., Measuring age differences among Globular clusters having similar metallicities: A new method and first Results. In: Astronomical Journal 100, 1990, S. 445ff
- [69] S. C. Wolff, A spectroscopic and photometric study of the Ap stars. In: Astrophysical Journal Supplement Series 15, 1967, S. 21ff
- [70] R. Zinn, The Globular Cluster System of the Galaxy. IV - The Halo and Disk Subsystems. In: Astrophysical Journal 293, 1985, S. 424ff
- [71] R. Zinn, Globular Clusters in Local Group Galaxies. In: Stellar Populations, Norman [Hg], Cambridge[u.a.] 1986

Lebenslauf

Vorname: Hubert Michael Rudolf

Nachname: Baum

Geburtsdatum: 16. Februar 1980

Geburtsort: Wien

Eltern: Hubert Michael Rudolf Baum, Beamter
Eva Ingrid Martha Baum geb. Engelbrecht, Hausfrau

Schulbildung: 1986-1990 Volksschule Marianum, Wien 18.
1990-1994 Hauptschule Albertus Magnus Schule, Wien 18.
1994-1998 Oberstufenrealgymnasium Marianum, Wien 18.

Abschluss: Matura am 4. Juni 1998

Studium: Astronomie ab 1. Oktober 1998

1. Studienabschnitt: Abschluss am 7. November 2001

Zivildienst: 4. Februar 2008 - 31. Oktober 2008
KRD Lebenshilfe Niederösterreich, Sollenau

Tagungsteilnahmen: ÖGA² Tagung Innsbruck 2005
CP#AP Workshop Wien 2007, LOC Mitglied