

Super-Resolution: Photometrie der Veränderlichen in Kugelsternhaufen mit Amateur-Teleskopen

Thilo Bauer

Abstract: *Super-resolution can increase the angular resolution of images. Reliability and fidelity of photometry play an important role, if super-resolution methods shall be applied to astronomy. The scope of super-resolution is ambiguous depending on the field of research. Therefore, a unified concept of digital super-resolution is derived from considerations of optimal adaptation of detector and optics, in case of seeing-limited observations. Images of the globular cluster Messier 13 are obtained with a 20 cm Cassegrain telescope and DSLR, then processed with a novel super-resolution method. Gain in resolution, photometric range and accuracy of measurements of the variable stars are demonstrated from the color-magnitude diagram obtained.*

Einführung

Methoden der hochauflösenden Bildverarbeitung bilden heute einen Quasi-Standard, um auch mit bodengebundenen Teleskopen eine bessere Bildschärfe zu erhalten. *Labeyrie (1970)* schlug die Speckle-Interferometrie vor, um beugungsbegrenzte Autokorrelationen von Doppelsternen trotz Luftunruhe zu erhalten. *Welter & Worden (1980)* haben mit dieser Methode Durchmesser einiger Sterne bestimmt. *Schertl et al. (1995)* konnten mit Speckle-Masking kompakte Sternhaufen in Einzelsterne auflösen. Diese Arbeit zeigt jedoch auch gewisse Grenzen der Speckle-Methoden: Unter Einsatz des ESO 2.2 m Teleskops blieb die Reichweite begrenzt auf die 18. Magnitude, beugungsbegrenzte Auflösung konnte nicht erreicht werden. Verschiedene Methoden der Bildverarbeitung wurden entwickelt und in der Astronomie experimentell gegenüber gestellt, darunter auch der Richardson-Lucy Algorithmus (*Lucy 1974*). *Starck et al. (2002)* zeigen, dass der Algorithmus und seine späteren Modifikationen zu den besten Verfahren der Bildentfaltung gehört (die Aussage ist jedoch auf Simulationsrechnungen und Eigenschaften des Hubble Space Telescope bezogen, daher sollte die Behauptung nicht verallgemeinert werden, Anm. d. Verf.). Spätestens seit den 1990er Jahren existieren verschiedene, neue Ideen und Experimente, weitere Grenzen der Auflösung zu überwinden: *Super-Resolution Verfahren*. Sollten sie in der Astronomie anwendbar sein, stellen sie eine interessante Alternative dar, aus Seeing begrenzten Aufnahmen eine Bildauflösung nahe an der Beugungsgrenze zu erhalten.

Super-Resolution

Aus einer größeren Anzahl veröffentlichter Arbeiten über Super-Resolution sollen hier nur astronomisch relevante Arbeiten betrachtet werden. *Lucy (1992a,b)* und *Sementilli et al. (1993)* geben Abschätzungen für Grenzen und Aufwand an, die Bildauflösung über die Beugungsgrenze hinaus zu steigern. Theoretisch und mit numerischen Simulationen wird die Wahrscheinlichkeit diskutiert, mit solchen Methoden Artefakte in Abhängigkeit von Rauschgrößen zu erhalten. Ein Versuch die Oberfläche von α Ori mit dem HST mittels Super-Resolution abzubilden wurde von *Gilliland & Dupree (1996)* beschrieben. Innerhalb der Computerwissenschaften präsentieren *Abad et al. (2003)*,

Farsiu et al. (2004), Cristobal et al. (2008) sowie *Singh et al. (2008)* Techniken, welche das Unterschreiten der Pixeldimension ermöglichen, und verweisen auf mögliche Anwendungen in der Astronomie. *Willet et al. (2004)* entwarfen eine Super-Resolution Methode für die Astronomie basierend auf der Wavelet-Transformation. Die Anwendbarkeit in der Astronomie ist bislang jedoch lediglich behauptet. Ergebnisse beruhen auf numerisch simulierten Bilddaten, ohne auf die Physik der Detektoren einzugehen oder Standardmethoden der Astronomie zu berücksichtigen. Bezieht man Rauschgrößen und Eigenschaften astronomischer Detektoren in die Diskussion ein (*Gilliland 1992*), darf also zunächst bezweifelt werden, dass die Methoden in der Astronomie ohne weiteres anwendbar sind und zu verwertbaren Ergebnissen führen.

Unter den Super-Resolution Algorithmen unterscheidet man solche, die einzelne Bilder untersuchen, und solche, die mit Hilfe statistischer Verfahren mehrere bis sehr viele Bilder analysieren. Statistische Super-Resolution Verfahren sind das Mittel der Wahl für den Anwendungsfall in der Astronomie. Im Folgenden sollen die Mindestanforderungen an ein (digitales) Super-Resolution Verfahren formuliert werden, die geeignet sind, eine Anwendbarkeit in der Astronomie zu garantieren (*Bauer 2011*). Das Nichterfüllen eines dieser Kriterien stellt auch ein KO-Kriterium für eine untersuchte Methode dar, in dem Sinne, dass sie kein Super-Resolution Verfahren darstellt:

1. *Verbesserung des Sampling*: Super-Resolution soll eine höhere Bildauflösung bieten, welche einer Vervielfachung der ursprünglichen Anzahl der Pixel in jeder Dimension (Breite, Höhe) des Bildes entspricht.
2. *Verbesserung der Bildauflösung*: Die spatiale Auflösung oder Winkelaufklärung im astronomischen Bild soll eine deutliche Verbesserung der Bildschärfe gegenüber den Eingangsbildern aufweisen.
3. *Photometrische Treue*: In der erhaltenen, überaufgelösten Bildrekonstruktion sollen die gemessenen Verhältnisse der Intensitäten erhalten bleiben.

Diese Anforderungen ergeben auch die Feststellung, *dass man Bildinformation gefunden hat, welche innerhalb der Größe bzw. Abstände einzelner Pixel vorgefunden wurde, unter Beibehaltung der photometrischen Verhältnisse*. Die Vorstellung, mehrere Sterne auch innerhalb der Dimension eines einzigen Pixel getrennt abbilden zu können, muss für den Leser zunächst eine absurde Behauptung darstellen. Sie wird umso kurioser erscheinen, sobald man auch die Frage stellt, wie dies mit einem CCD mit geringen Füllfaktor oder einem RGB-Farbsensor mit Bayer Matrix (etwa bei einer digitalen Spiegelreflex-Kamera) überhaupt möglich sein kann, da hier Lücken zwischen den lichtempfindlichen Flächen existieren. Auf den ersten Blick scheinen obige Anforderungen somit ein unlösbares Problem darzustellen. Rein theoretisch oder mittels Simulationen begründete oder bewiesene Verfahren wird man zudem kritisch hinterfragen müssen, solange die Anwendung nicht mit Astrofotos bewiesen werden kann, die mit einem Teleskop gewonnenen wurden. Um die Plausibilität der Ergebnisse eines Super-Resolution Verfahrens zu überprüfen, erscheint es sinnvoll, erhaltene Ergebnisse mit solchen zu vergleichen, die von anderen Beobachtern mit anderen, größeren Teleskopen ohne Super-Resolution gewonnen wurden. Sowohl Positionen der (zwischen den Pixeln) gefundenen Sterne, als auch die photometrische Auswertung sollte in einem solchen Vergleich reproduziert werden können.

Anpassung von Optik und Detektor

Der Begriff Super-Resolution beschreibt verschiedene Dinge in den unterschiedlichen Disziplinen. So meint man in der Physik, Optik und Astronomie das Unterschreiten der Beugungsgrenze. In der Informationstechnologie beschreibt der Begriff Super-Resolution das Auffinden von Bildinformation im Subpixel-Bereich, oftmals ohne physikalische oder optische Aspekte zu betrachten. Daher erscheint es zweckmäßig den Begriff Super-Resolution derart zu vereinheitlichen, dass man beide Gültigkeitsbereiche von Super-Resolution vereint. Dies ist für den Anwendungsfall der Astronomie möglich und soll hier für die astronomische Beobachtung mit bodengebundenen Teleskopen hergeleitet werden. Sei α der Winkeldurchmesser der Beugungsfigur, D der Durchmesser der Teleskopöffnung und λ die Wellenlänge des Lichts. Das Rayleigh-Kriterium beschreibt nun einen Winkelabstand unter dem zwei Lichtquellen gerade noch getrennt erscheinen:

$$\sin \alpha = 1.22 \lambda/D.$$

Bereits mit kleinen Teleskopen bestimmen atmosphärische Störungen die Bildschärfe astronomischer Aufnahmen. Anstelle der idealen Beugungsfigur wird man in länger belichteten Aufnahmen und mit bodengebundenen Teleskopen ein mittleres Sternprofil erhalten, das einem Gauss-Profil oder in besserer Näherung einer Moffat-Funktion ähnelt (*Moffat 1969*). Unzulänglichkeiten von Teleskop-Montierung und Nachführung, Streulicht, optische Fehler und andere Probleme der (Amateur-) Teleskope liefern weitere Beiträge zur Verschlechterung der Bildschärfe in den Aufnahmen. Die Summe dieser Einflüsse, das Seeing, ergibt in der Praxis oft unsymmetrische, anstelle der theoretischen Sternprofile. So wird man Teleskopoptik und Detektor optimal auf das durchschnittlich oder im günstigen Fall zu erwartende Seeing anpassen (*Geyer 2010*). Das Whittaker-Shannon-Abtasttheorem (auch: Nyquist- oder WKS-Abtasttheorem) fordert, dass die durchschnittliche Halbwertsbreite der Seeingdisk zwei Pixel in der Aufnahme einnehmen soll, um optimale Auflösung und Rauschabstand zu erhalten. Hieraus ergibt sich über das mittlere Seeing für den Standort eine optimale Brennweite für den jeweiligen Detektor. Der Zusammenhang zwischen optimaler Brennweite des Teleskops f_{opt} , mittlerem Winkeldurchmesser der Seeingdisk α_{Seeing} , der so genannte Seeingparameter, und dem Pixelabstand d in Einheiten der Brennweite liefert:

$$\tan(\alpha_{Seeing} / 2) = d / f_{opt}.$$

Verlängert man die Brennweite über das Abtasttheorem hinaus, so wird das Licht auf eine steigende Fläche und Anzahl der Pixel verteilt. Damit gewinnt das Detektorrauschen gegenüber dem natürlichen Poisson-Rauschen der Lichtquanten an Einfluss, die Grenzgröße sinkt allmählich mit steigender Brennweite. In der Praxis des Teleskop-Designs wählt man eher eine optimistische Anpassung der Optik, um auch der Wahrscheinlichkeit Rechnung zu tragen, dass man ein besseres Seeing vorfindet. Ein einfaches Rechenbeispiel: Eine CCD Kamera mit Pixelabstand $10 \mu\text{m}$ und ein typisches Seeing von $3''$ ergeben eine optimale Brennweite f_{opt} von 1375 mm . Die gleiche, optimale Brennweite ist anzunehmen für eine Farbkamera oder DSLR mit Bayer-Farb-Matrix, bei welcher der Pixelabstand mit $5 \mu\text{m}$ angegeben ist, da hier die gesamte Bayer-Farb-Matrix als ein Bildelement aufgefasst werden muss. Daher ist die

Angabe der Pixelgröße im Falle einer solchen Farbkamera mit 2 zu multiplizieren. Herstellerangaben unterschlagen gelegentlich den Füllfaktor des Detektors, weswegen die angegebene Dimension nicht die Größe der Pixel, sondern deren Abstand meint, der sich aus der Anzahl der Pixel pro Kantenlänge des Bilddetektors ergibt. Auf Pixel interpolierende Techniken, wie sie von einigen Astroprogrammen angeboten werden, um die vom Kamerahersteller angegebene, nominelle Pixelauflösung der einzelnen Farbpixel zu erhalten, sollte generell verzichtet werden. Man kann für solche Methoden zeigen, dass sie zwar die Lücken zwischen den Farbpixeln auffüllen und so die Auflösung verdoppeln, jedoch zu Artefakten und sogar Verzerrung und Erhöhung der Rauschgrößen des Einzelbildes führen können (*Bauer 2008b*). Derartige Effekte sind unter anderem an deformierten und verbreiterten Histogrammen der Rauschwerte anstelle einer Gauss-Verteilung erkennbar. Diese Interpolationsalgorithmen kann man übrigens zu den Super-Resolution Verfahren zählen, die Einzelbilder analysieren. Die Erfolge solcher Methoden fallen sehr begrenzt aus und setzen für ein gutes Gelingen a priori Wissen über die im Bild enthaltenen Objekte voraus. Allgemein wird man in der Astronomie jedoch keine Annahmen über die beobachteten Objekte treffen können, denn man ist ja gerade am Aussehen der Objekte interessiert.

Ausgehend von optimaler Anpassung von Kamera und Detektor an das zu erwartende Seeing, findet man nun unmittelbar die gesuchte Vereinheitlichung des Begriffs *Super-Resolution*. Unter der Annahme, dass Super-Resolution Verfahren unter diesen Voraussetzungen auch tatsächlich funktionieren, beinhalten sie nun auf unterschiedlichen Skalen sowohl das Unterschreiten der Pixeldimension, als auch das Erreichen oder gar Unterschreiten der Beugungsgrenze ab einer bestimmten Steigerung der Auflösung. An dieser Stelle wird freilich schon im Vorgriff vorausgesetzt, dass solche bildgebenden Verfahren tatsächlich existieren und anwendbar sind. Der eigentliche Beweis steht jedoch noch aus.

Beliebigkeit der Auflösungsgrenze

Eine interessante Schlussfolgerung wurde von *Den Dekker & Van den Bos (1997)* formuliert. Die Autoren analysierten den Begriff der Auflösung in vielfacher Hinsicht und in mehreren Disziplinen (u.a. Optik und Informationstheorie). Sie stellen abschließend fest, dass jegliche Festlegung einer Auflösungsgrenze willkürlich gewählt ist. So stellt also auch das Rayleigh Kriterium keine echte Grenze im Sinne einer physikalischen Barriere dar, sondern lediglich eine willkürlich gewählte Grenze (das nahe stehende Dawes Kriterium beschreibt in der Tat eine bessere Auflösung verglichen mit dem Rayleigh Kriterium, beruht jedoch auf physiologischen Untersuchungen der visuellen Beobachtung und ist daher auf die Informationstheorie nicht ohne weiteres anwendbar, Anm. d. Verf.). Unter Berücksichtigung der Arbeiten von *Lucy (1992a,b)* sowie *Sementilli et al. (1993)* ist die Bildauflösung in gewisser Weise durch die Physik begrenzt, jedoch steigerungsfähig, maßgeblich limitiert durch das verfügbare Signal-Rauschverhältnis und durch die Gesamtzahl detektierter Photoquanten. So bleibt das Unterschreiten der klassischen Beugungsgrenze mit einem gewissen bis erheblichen Aufwand verbunden (Steigerung der Belichtungszeit), welcher den Arbeiten zu entnehmen ist. Auch optische Experimente zeigen bereits die Möglichkeit einer Steigerung der optischen Auflösung, etwa durch gezielten Einsatz

obstruierter Optiken, z.B. beim Cassegrain Teleskop, sowie dem Phasenkontrast- oder Inferenzkontrast-Mikroskop.

Beobachtungen von Messier 13

Der galaktische Kugelhaufen Messier 13 (NGC 6205) ist gut untersucht. Ein photoelektrisch mit dem 200" Palomar Teleskop bestimmtes Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD) wurde bereits von *Sandage (1970)* präsentiert. Die Messungen der Sternhelligkeiten blieben hier auf einen äußeren Ring mit mehr als 7' Radius um das Zentrum begrenzt, da die Sterne ansonsten nicht ohne Blend-Effekte durch Nachbarsterne vermessen werden konnten. *Piotto et al. (2002)* präsentieren neuere CCD Beobachtungen mit dem Hubble Space Telescope (HST). Mit der besseren Auflösung des HST konnten dabei auch Sterne im Zentrum des Haufens einbezogen werden. *Kopacki et al. (2003)* zählen mehr als 30 Veränderliche Sterne in Messier 13 auf und führen neben neu entdeckten Sternen vom Typ RR Lyrae, SX Phoenicis und BL Herculis auch Besonderheiten einiger der Sterne an. Diese Befunde lassen bereits ein langfristiges Beobachtungsprogramm sinnvoll erscheinen. Betrachtet man die Größe der Teleskope, mit denen bisherige Resultate gewonnen wurden, erscheint die Möglichkeit solche Beobachtungen mit Amateurteleskopen durchzuführen zunächst sehr begrenzt – auch aufgrund der hohen Sterndichte im Zentrum der Kugelhaufen.

Eigene Beobachtungen von M13 wurden am 4. August 2009, 23:10h MEZ mit einem 20cm Cassegrain Teleskop (f/6.5) durchgeführt. Als Kamera diente eine astronomifizierte Canon EOS 40D. Der interne UV/IR Blockfilter wurde hier gegen ein Klarglas getauscht, das auch Beobachtungen im UV und IR ermöglicht. Für die Belichtungen wurde ein Astronomik UV/IR Blockfilter verwendet, um Messungen in den Filterbereichen *r*, *g* und *b* (rot, grün und blau) zu erhalten. 285 Aufnahmen von Messier 13 wurden jeweils 30 Sekunden bei ISO 800 belichtet. Von dieser Serie wurden 100 Aufnahmen manuell aussortiert und der Verarbeitung nicht zugeführt, da sie Nachführfehler oder deutliche Seeing Artefakte aufwiesen. Für die Kalibration wurden jeweils 200 Aufnahmen für Bias, Flatfield und Dunkelstrom gewonnen und gemittelt. Die Belichtungszeit für Flatfield und zugehörigen Bias betrug 1/250 s je Einzelbelichtung. Die Einzelaufnahmen von Messier 13 wurden mit einer seit 2007 entwickelten Softwarearchitektur automatisch verarbeitet, welche auf Java und C Code basiert und bereits früher beschrieben wurde (*Bauer 2008a*). Erster Schritt des Super-Resolution Verfahrens ist die Bestimmung der Bildbewegung zwischen den Einzelbildern mit einem automatischen Verfahren, das präzise Positionen der Sterne mit bis zu 1/50 pix Genauigkeit liefert. Anschließend werden die Bilder zu einem höher aufgelösten Komposit addiert. Das Verfahren wurde bereits in verschiedenen Himmelsregionen an Galaxien, Sternhaufen und Nebeln mit langen Belichtungszeiten getestet (*Bauer 2008a, 2009, 2011*). Der letzte Schritt zu einem überaufgelösten Bild geschieht nun durch Verwendung einer neuen Methode der Bildentfaltung, welche das Richardson-Lucy Verfahren übertrifft und verglichen mit dieser Methode eine erheblich verbesserte Bildauflösung im Falle von Super-Resolution liefert (*Bauer & Weghorn 2012, in Vorbereitung*).

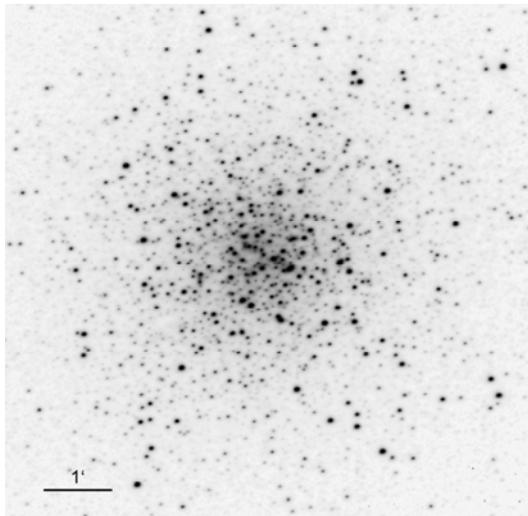
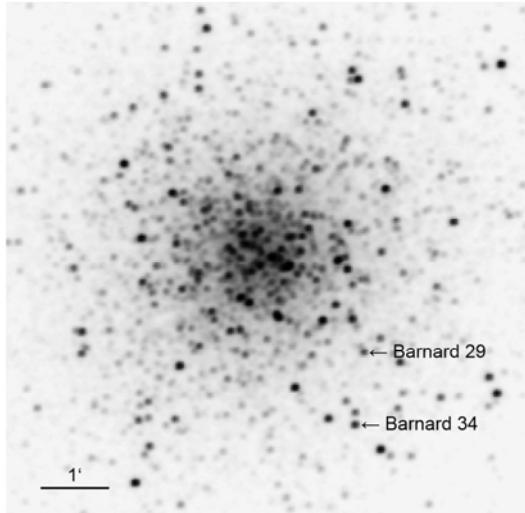


Abbildung 1: Oben: Komposit aus 185 Aufnahmen von Messier 13. Die Bildauflösung ist begrenzt durch Pixelgröße und Seeing und beträgt $1.83''/\text{pix}$. Unten: Super-Resolution Ergebnis, das aus der gleichen Bildserie gewonnen wurde. Die Bildauflösung liegt nun bei $0.45''/\text{pix}$. Die zahlreichen, besser aufgelösten Mehrfachsterne sind teilweise aus Klumpen lediglich ein Pixel großer Strukturen aus der Originalauflösung hervorgegangen. Die gefundenen Sterne können anhand von Aufnahmen mit dem Hubble Weltraum Teleskop bestätigt werden. Verwendete Kalibrationssterne sind markiert. Norden ist oben.

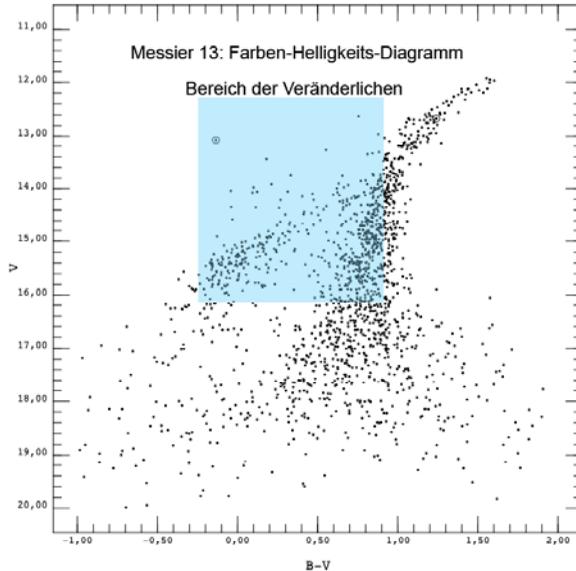


Abbildung 2: Das Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD) aus der photometrischen Auswertung des mittels Super-Resolution erhaltenen Bildes (Abb. 1, unten). Sterne sind mit einfacher Blendenphotometrie automatisch vermessen worden. Die beiden Referenzsterne sind mit Kreisen markiert. Die Anzahl detektierter Einzelsterne konnte von knapp 500 bei normaler Pixelauflösung auf knapp 1900 im überaufgelösten Bild gesteigert werden. Die Struktur der Hauptsequenz und des blauen Astes für das Zentrum des Haufens ist gut definiert und bestätigt den Gewinn an aufgelösten Sternen. Die horizontale Lücke im blauen Ast professionell bearbeiteter FHDs (*Sandage 1970, Piotto et al. 2002*) ist offenbar Folge der Selektion eingetragener Sterne. In eigenen Messungen ist der blaue Ast deutlich dichter besetzt mit RR-Lyrae-Sternen und anderen Veränderlichen im markierten Bereich bei Magnituden von $V=12$ bis $V=16$. Der zu erwartende Messfehler (als Funktion der Helligkeit) kann aus der Streuung des Diagramms abgeschätzt werden, welche jedoch auch eine Folge der Variabilität der Sterne im Helligkeitsbereich des blauen Astes ist.

Kalibration

Mittlere Wellenlängen, Breite und Verlauf der Transmission der Farbfilter sowie der Verlauf der Empfindlichkeitskurve des Detektor wird bei Farbkameras dazu führen, dass gemessene Farbhelligkeiten vom Standard abweichen. Um die gemessenen b und g Helligkeiten einer DSLR mit guter Genauigkeit in das Johnson BV System umrechnen, muss die Kalibration der Helligkeiten mindestens zwei Vergleichssterne einschließen. Diese sollten vom Spektraltyp und der Farbe her möglichst unterschiedlich sein, um auch die Farbdifferenzen mit geringem Fehler erfassen zu können. Im Experiment wurden die in Abb. 1 markierten Referenzsterne verwendet,

die zwei extreme Positionen im Roten und Blauen besetzen. Dies sind Barnard 34 ($B=13.91$, $V=12.67$), ein roter Riese auf der Hauptreihe, und Barnard 29 ($B=12.98$, $V=13.14$), ein heißer postAGB Stern, der vorwiegend UV emittiert und daher in Farbaufnahmen deutlich blau erscheint. Die Kalibration wurde nun wie folgt durchgeführt. Es wird angenommen, dass die gemessenen g Helligkeiten den V Helligkeiten des Standards gut entsprechen: $V = g$. Der Farbindex wurde mit einem linearen Ansatz aus der bekannten Farbdifferenz $B-V$ der beiden Referenzsterne bestimmt. Aus den gemessenen Intensitäten ergeben sich die instrumentellen $b-g$ Werte. Einsetzen der $b-g$ Messwerte und Umstellen der Gleichung lieferte nun die gesuchte Transformation der Messwerte. Für die Beobachtung ergab sich: $B-V = 1.67(b-g) - 0.83$. Die Filtersysteme der DSLR und des Johnson BV Systems schneiden und integrieren unterschiedliche Teile der gekrümmten Planck-Kurven der Sternspektren. Die Annahme, dass die instrumentellen g Helligkeiten den V Helligkeiten entsprechen, ist somit nur eine grobe Näherung. So findet man in der professionellen Literatur stets die V Magnituden als Funktion des Farbindex der Sterne bestimmt (Rey et al 2001). Solche Näherungen erfordern mehr als zwei Sterne zur Kalibration. Piotto et al. (2002) beschreiben eine Transformation der Helligkeiten mittels Polynomen höherer Ordnung und sogar iterative Durchläufe der einzelnen Sterne (die hier beschriebene Technik zur Kalibration darf jedoch bezweifelt werden und könnte auch die unterschiedlichen Deformationen der in der Arbeit abgebildeten FHDs der Kugelhaufen erklären, Anm. d. Verf.). Die Transformationsgleichungen sind für jede Kamera und jede Beobachtung individuell zu bestimmen, da Helligkeiten und Farben der Sterne auch von den aktuellen, atmosphärischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Beobachtung, sowie der Höhe der Objekte über dem Horizont abhängen. Für die Wiedergabe eines FHD in dieser Arbeit ist die beschriebene Kalibration jedoch ausreichend, um einen Beleg für die Wirksamkeit der durchgeführten Super-Resolution Verfahrens zu finden. Das erhaltene FHD stimmt bereits sehr gut mit dem von Sandage (1970) präsentierten Diagramm überein.

Kritische Diskussion

Die bisher veröffentlichten Super-Resolution Verfahren in der Informatik und Informationstheorie entziehen sich insofern einer Überprüfbarkeit, als eine Anwendbarkeit in der Astronomie von den Autoren bislang nur behauptet wurde und die Verfahren nur mit Hilfe simulierter Bilddaten oder konventionellem Fotomaterial gezeigt wurden. Typische Eigenschaften astronomischer Bilder und die Physik der Abbildung auf dem Detektor werden so in der Diskussion ausgeblendet, weshalb die behauptete Anwendbarkeit der Verfahren in der Astronomie bezweifelt werden muss. Um auch mit dem realen Detektor eine hohe Bildauflösung zu erhalten ist bei astronomischen Rohdaten naturgemäß eine sehr gut wirksame Rauschunterdrückung zwingend erforderlich. Die hier dargestellten Ergebnisse eines neuen Super-Resolution Verfahrens und der Vergleich mit früher veröffentlichten Farben-Helligkeits-Diagrammen, welche mit Großteleskopen gewonnen wurden, belegen, dass dennoch mindestens ein Verfahren existiert, das die gestellten Anforderungen erfüllt. Theorie und Details zum hier beschriebenen Super-Resolution Verfahren würden den Rahmen dieses Artikels sprengen und sollen der jeweiligen Erstveröffentlichung vorbehalten bleiben. Es ist gezeigt, dass die Anwendung der Methode insbesondere mit kleinen Teleskopen gute Erfolge hinsichtlich der Steigerung der Auflösung und dem Erhalt der

Photometrie erbringen kann. Erstmals konnten auch Veränderliche nahe dem Zentrum von Messier 13 mit einem Amateurteleskop photometrisch nachgewiesen werden.

Schlußbemerkungen

Ausgehend von optimaler Anpassung von Optik und Detektor lassen sich die unterschiedlichen Ideen vom Begriff Super-Resolution innerhalb der Astronomie vereinen in einer einzigen Methode. Eine Super-Resolution Methode hat diesen Namen jedoch erst dann verdient, wenn bewiesen ist, dass sie die formulierten Anforderungen vollständig erfüllt. Rauschgrößen in der Astronomie stellen hier zweifellos eine weitere Hürde dar, welche als Anforderung zu formulieren wäre. Erste Bildrekonstruktionen von Messier 13 mit einer neu entwickelten Super-Resolution Technik bilden einzelne Sterne auch dann noch sicher ab, wenn ihre Abstände geringer sind, als der Abstand der Pixel der Originalaufnahmen. Die helleren Veränderlichen können bis zum Zentrum gut aufgelöst und photometrisch untersucht werden. Sowohl Vergleichsaufnahmen mit dem HST, als auch das erhaltene Farben-Helligkeits-Diagramm bestätigen die Plausibilität der Ergebnisse. Das Projekt zur Beobachtung der Veränderlichen in Messier 13 steht jedoch erst am Anfang. Super-Resolution Techniken eröffnen neue Möglichkeiten in der Beobachtung mit bodengebundenen Teleskopen. Große Speicherkapazitäten und leistungsfähige Computer sind jedoch eine Voraussetzung für die Umsetzung eines solche Vorhabens. Der Aufwand für die Verarbeitung eines überaufgelösten Bildes liegt mit einem leistungsfähigen Intel Mac oder PC in der Größenordnung von Stunden, was eine weitere Automatisierung der Methode und der photometrischen Auswertung für die zeitaufgelöste Photometrie der Veränderlichen erforderlich macht.

Referenzen

- Abad J., Vega M., Molina R., Katsaggelos A., 2003, in Proc. IEEE ICASSP '03 Vol. 3. IEEE, pp 709–712.
- Bauer T., Weghorn H., 2012. In preparation.
- Bauer T., 2011. Proc. IADIS International Conference CGVCVIP 2011, p. 49-59, Rome, Italy, 2011, ISBN 978-972-8939-48-9.
- Bauer T., 2009. Proc. IADIS Multiconference, CGVCVIP 2009, Algarve, Portugal June 20-22, p. 3-15, ISBN: 978-972-8924-84-3.
- Bauer T., 2008a. Proc. IADIS Multiconference on Computer Science and Information Systems 2008, Amsterdam, Netherlands, p. 83-90, ISBN 978-972-8924-63-8.
- Bauer T., 2008b. In Proc. of the 4th Ann. Meeting on Information Technology & Computer Science, BA-University of Cooperative Education, Stuttgart, Germany, 27.
- Cristóbal G., Gil E., Sroubek F., Flusser J., Miravet C., Rodriguez F. B., 2008, Proc. of the SPIE, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XVIII, 7074, 70740C.

- Den Dekker A., Van den Bos A., 1997, *Laser Physics*, 6, 548.
- Farsiu S., Robinson D., Elad M., Milanfar P., 2004, *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 14, 47.
- Geyer, E. H., 2010. *Jenaer Jahrbuch zur Technik und Industriegeschichte*, Vol. 13, ISBN 978-3-939718-56-7.
- Gilliland R. L., 1992, in Howell S. B., ed., *Astronomical CCD observing and reduction techniques. Details of Noise Sources and Reduction Processes*. Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, CA, p. 68.
- Gilliland, Ronald L., Dupree, A. K., 1996, *ApJ*, 463, L29–L32.
- Johnson, H. L. & Morgan, W. W., 1953, *ApJ*, 117, 313.
- Kopacki G., Kolaczowski Z., Pigulski A., 2003, *A&A*, 398, 541.
- Labeyrie A., 1970, *A&A*, 6, 85.
- Lucy L. B., 1974, *AJ*, 79, 745.
- Lucy L. B., 1992a, *AJ*, 104, 1260.
- Lucy L. B., 1992b, *A&A*, 261, 706.
- Moffat, A. F. J., 1969, *A&A*, Vol. 3, p. 455.
- Piotto G., King I. R., Djorgovski S. G., Sosin C., Zoccali M., Saviane I., De Angeli F., Riello M., Recio-Blanco A., Rich R. M., Meylan G., Renzini A., 2002, *A&A*, 391, 945.
- Rey, S.-C., Yoon, S.-J., Lee, Y.-W.; Chaboyer, B.; Sarajedini, A., 2001, *AJ*, 122, 6, 3219.
- Sandage A., 1970, *ApJ*, 162, 841.
- Schertl D., Hofmann K.-H., Seggewiss W., Weigelt G., 1995, *A&A*, 302, 327.
- Sementilli P. J., Hunt B. R., Nadar M. S., 1993, *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*, 104, 2265.
- Singh M. K., Tiwary U. S., Kim Y.-H., 2008, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008.
- Starck, J. L., Pantin, E., & Murtagh, F. 2002, *PASP*, 114, 1051
- Welter, G. L.; Worden, S. P., 1980, *ApJ*, 242, 673-683.
- Willett R. M., Jermyn I., Nowak R. D., Zerubia J., 2004. In *Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII*, Proc. of the conf. Vol. 314., Astronomical Society of the Pacific, p. 107.