

Astrometrie mit der CCD – Kamera

von Erwin Heiser, Reinhard Schröder und Andreas Hänel
aus Sterne und Weltraum, August/September 1996, Seite 680 ff

Mit CCD-Kameras und leistungsfähigen Personalcomputern stehen Amateuren heute Möglichkeiten offen, die früher nur Fachastronomen hatten. Hier wird gezeigt, wie an einer Volkssternwarte mit einem 60-cm-Cassegrain-Teleskop, einer CCD-Kamera vom Typ ST-6 und leistungsfähigen Auswerteprogrammen (MIRA, MIPS und MIDAS) astrometrische Positionsgenauigkeiten bis zu 0,022 erreicht werden können.

Die Sternwarte

Die astronomische Arbeitsgemeinschaft im Naturwissenschaftlichen Verein Osnabrück e.V. betreibt seit einigen Jahren auf dem Oldendorfer Berg bei Melle, rund 25 Kilometer östlich von Osnabrück, in 220 Meter Höhe, eine Sternwarte mit einem 60-cm-Teleskop. Das Fernrohr ist ein klassisches Cassegrain-System mit einem Hauptspiegel von 60 cm Durchmesser, die Systembrennweite beträgt 7460 mm, das effektive Öffnungsverhältnis $f/12.4$. In den wenigen Nächten mit gutem Seeing zeigt das Fernrohr hervorragende Sternbildfiguren. Optik und Tubus wurden von der Firma Horst W. Kaufmann, Crailsheim, hergestellt. Die Montierung wurde nach einem Entwurf und unter Leitung von Alois Wagner als klassische Deutsche Montierung gebaut, deren beide Achsen über Schrittmotoren angetrieben werden. Das Fernrohr wird über einen PC gesteuert, das Steuerprogramm wurde von Reinhard Schröder geschrieben. Koordinaten der Beobachtungsobjekte können unmittelbar aus Katalogen (PPM, NGC,...) oder Ephemeriden (Planeten, Mond) übernommen oder manuell eingegeben werden. Die absolute Positioniergenauigkeit über den ganzen Himmel ist so gut, daß sich die Beobachtungsobjekte meist bereits beim ersten Anfahren im Gesichtsfeld eines langbrennweitigen Okulars oder der CCD-Kamera befinden. Als Empfänger wird die CCD-Kamera ST-6 von SBIG eingesetzt. Der Chip dieser Kamera ist 8.6 mm x 6.5 mm groß, was einem Bildfeld von $3' \times 3'9$ entspricht, und die Pixelgröße von 23 mm x 27 mm entspricht $0,62 \times 0,74$.

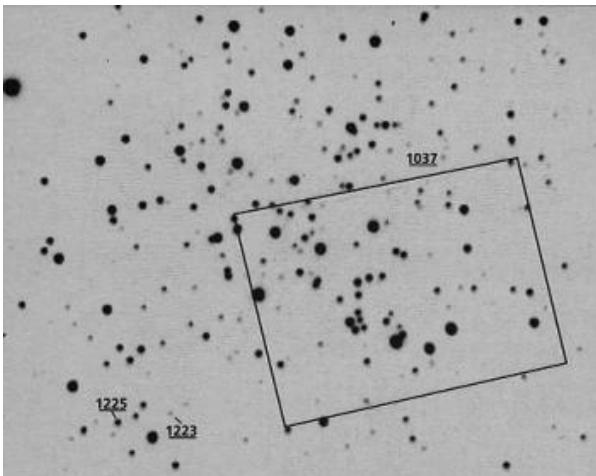


Abb. 1: Zentrum von M 67, mit dem C8 am 11. April 1994 aufgenommen. Das Bildfeld mißt $11'5 \times 15'2$, eingezeichnet ist das Feld der Abb.2

Zielsetzung

In erster Linie wird das Fernrohr für öffentliche Führungen eingesetzt. Auch wenn der Anblick himmlischer Objekte durch das Fernrohr ein Genuß sein kann, fordern Größe und Ausstattung der Sternwarte zu weitergehenden Beobachtungen heraus. Als Beobachtungsmöglichkeiten ohne größere Hilfsgeräte bieten sich hier Photometrie und Astrometrie an. Gerade die Positionsbestimmung mit CCDs kann inzwischen von Amateuren sehr erfolgreich durchgeführt werden. So berichtete

Brian Marsden (1995) vom Central Bureau for Astronomical Telegrams der IAU, daß rund 80% der ersten Positionen des Kometen Hale-Bopp von Amateuren mit CCD-Kameras gewonnen wurden. Früher wurden solche Aufnahmen meist auf Photoplatten gemacht und an aufwendigen Plattenmessmaschinen ausgemessen, was fast nur in professionellen Instituten möglich war. Inzwischen können ähnliche Ergebnisse mit Teleskopen der 20-cm-Klasse, einer CCD-Kamera, einem PC und einem guten Auswerteprogramm (z. B. Astrometrica von Herbert Raab) erzielt werden. Die uns vorliegende Version 2.0 von Astrometrica benutzt für die Vergleichssterne jedoch nur Sterne des Hubble Guide Star Catalogues (auf CD-ROM), die mit einer relativen Genauigkeit von $0,25$ für unsere Zwecke zu ungenau sind. Wir wollten nämlich testen, ob und wie schnell Eigenbewegungen oder gar Parallaxen von Sternen an einer Amateursternwarte gemessen werden können. Dazu mußte jedoch zunächst ermittelt werden:

- welche Auswerteprogramme sind einsetzbar, und dabei insbesondere:
- wie kann die Position der einzelnen Sternbilder auf dem CCD mit größtmöglicher Genauigkeit bestimmt werden,
- welches Ausgleichsprogramm zur Bestimmung der "Platten"-Konstanten liefert die beste Genauigkeit?

Beobachtungen

Auf Vorschlag von Michael Geffert von der Bonner Sternwarte wurde der Offene Sternhaufen M 67 beobachtet, da von diesem Sternhaufen Positionen hoher Genauigkeit vorliegen. Zuletzt haben Girard u. a. (1989) M 67 auf photographischen Aufnahmen des großen Yerkes-Refraktors, der immerhin eine Brennweite von 19.4 m und eine Öffnung von etwas mehr als 1 m besitzt, untersucht. Die Aufnahmen wurden zwischen 1904 und 1970 gewonnen, so daß Positionen mit einer Genauigkeit von $0''01$ ($=10$ mas $=10$ Millibogensekunden) für Sterne heller als 14 mag und $0''02$ für schwächere Sterne abgeleitet werden konnten, ebenso wie Eigenbewegungen. Der Katalog enthält diese Daten für 663 Sterne für die Epoche 1950.

Insgesamt wurden einige hundert Aufnahmen über den gesamten Haufen belichtet. Die meisten wurden mit einer Shapleylinse gewonnen, die die Effektivbrennweite auf 4230 mm reduziert, für weitere Aufnahmen wurde ein C8 oder ein 15-cm-Newtonteleskop verwendet (Abb. 1-3). Eingesetzt wurde auch ein Filterrad der Firma SBIG, das Filter zur Farbtrennung für Farbaufnahmen enthält. Um die maximale Chipempfindlichkeit im nahen Infrarot ausnutzen zu können, wurde das Infrarot-Sperrfilter entfernt. Dadurch lassen die Blau- und die Grün-Filter zusätzlich noch infrarote Strahlung durch, was für das Blau-Filter Durchlaßbereiche von 400-500 nm und 800-900 nm, für das Grün-Filter von 500-600 nm und 800-900 nm, für das Rot-Filter von 600-900 nm ergibt.

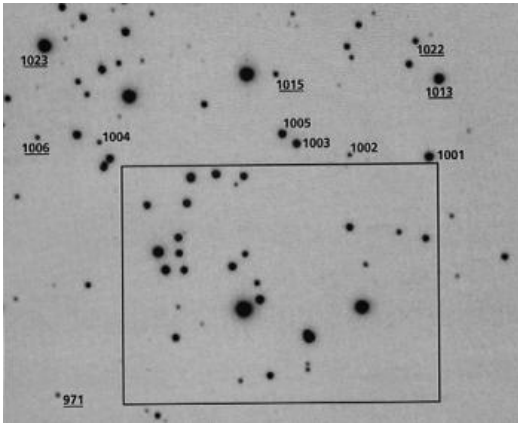


Abb. 2: Kombination von zwei Aufnahmen vom 20. April 1995, je 20 s mit dem 60 cm-Cassegrain-Teleskop mit Shapleylinse aufgenommen. Die Zahlen sind Katalognummern von Girard u.a., nicht unterstrichen sind Haufensterne, während Feldsterne unterstrichen sind. Eingezeichnet ist das Feld der Abb. 3.

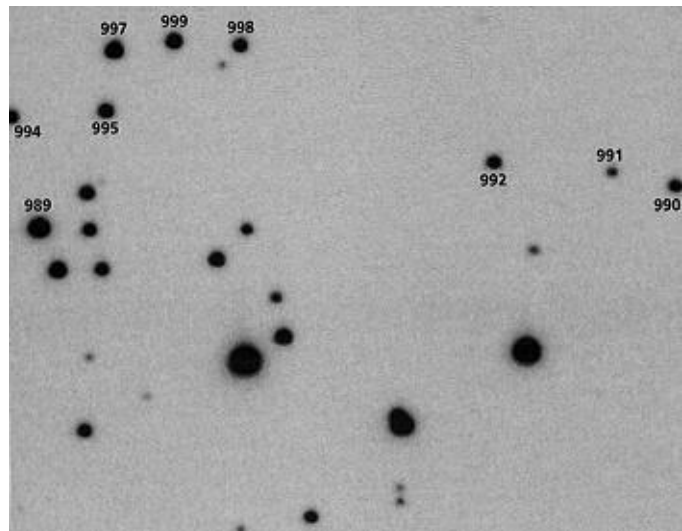


Abb. 3: Summe von zwei Aufnahmen vom 30. Januar 1995, je 20 s im Cassegrainfokus belichtet. Das Bildfeld beträgt etwa $3' \times 4'$.

Auswertungen

Wie bereits erwähnt, läßt sich das Problem der astronomischen Positionsbestimmung in zwei Schritte zerlegen: Die Messung der Sternpositionen auf dem CCD und die Bestimmung der Plattenkonstanten.

Die Messung der Sternpositionen

Am einfachsten könnte die Position eines Sterns auf dem CCD-Chip festgelegt werden, indem man das Bildelement (Pixel) mit der größten Intensität auswählt und die zugehörigen x- und y-Werte als die Position des Sterns annimmt. Meist wird sich das Sternbildchen über mehrere Pixel erstrecken und die Festlegung der Position nur mit dem hellsten Pixel ist zu ungenau. In den Auswerteprogrammen werden daher andere Methoden angewendet, um die Sternposition genauer (d.h. auf Bruchteile eines Pixels) festzulegen:

1. Schwerpunktmethode:

Es wird ein (meist quadratisches) Fenster festgelegt, dessen Größe so gewählt wird, daß einerseits die äußeren Flanken eines Sternbildchens noch erfaßt werden, andererseits nicht zuviel Hintergrund mitgenommen wird. In diesem Fenster werden die Intensitätswerte spalten- und zeilenweise aufsummiert und liefern zwei Randverteilungen (englisch: marginal distribution) in x und y. Für diese können leicht die Schwerpunkte bestimmt werden, die die Sternposition auf 0.1 bis 0.01 Pixel genau angeben. Die Variation oder die Wahl eines Wertes des Himmelshintergrundes ist allerdings besonders kritisch. Die Schwerpunktmethode ist bereits in der Ansteuersoftware der CCD-Kamera integriert.

2. Anpassung von Gaußverteilungen:

An die beiden Randverteilungen kann mit einem Ausgleichsverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate je eine eindimensionale Gaußkurve angepaßt werden, die ebenfalls genauere Werte für die x- und y-Koordinaten des Sternbildchens liefert.

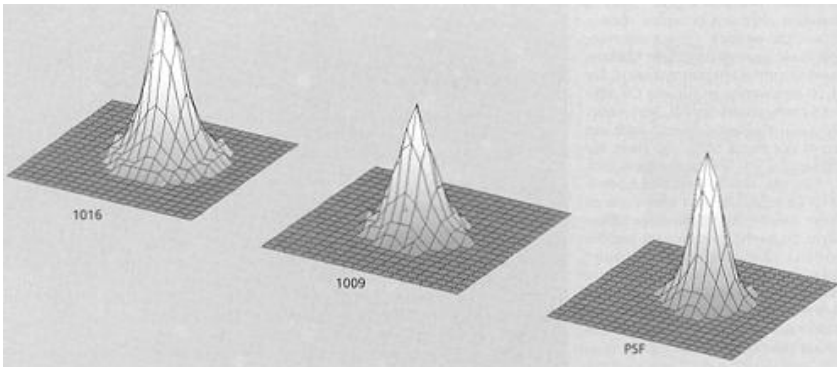


Abb. 4: Dreidimensionale Darstellung eines hellen (1016, $V = 10.31$ mag) und eines schwachen Sterns (1009, $V = 13.7$ mag) und der Point-Spread-Function (von links nach rechts), erstellt mit MIPS.

3. Bestimmung der Point Spread Function (Punktverbreiterungsfunktion):

Zunächst wird an mehrere helle (aber nicht überbelichtete) Sterne einer Aufnahme eine räumliche Glockenkurve (zweidimensionale Gaußverteilung mit unterschiedlichen Halbwertsbreiten in x und y) angepaßt. Doch die Sternbilder werden von dem mathematischen Modell abweichen. Daher werden entweder andere (oft kompliziertere) mathematische Modellverteilungen benutzt oder die Abweichungen von der Glockenkurve werden in einer zweidimensionalen Tabelle abgespeichert. Das nennt man die Punktverbreiterungsfunktion oder point spread function, kurz PSE. Sie beschreibt, wie ein punktförmig angenommenes Sternbild durch die Turbulenz der Erdatmosphäre, Einflüsse der Optik und des Empfängers in ein flächenhaftes Gebilde verbreitert wird. Nachdem die PSF zunächst mit Hilfe einiger heller Sterne bestimmt wurde, kann sie dann auf alle Sterne der Aufnahme angewendet werden (siehe Abb. 4). Auf diese Weise können für die Sterne genaue Positionen und vor allem genaue Helligkeiten abgeleitet werden. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß damit sogar überlappende Sternbilder sehr genau vermessen werden können. Ursprünglich wurde diese Methode für die Photometrie von Sternen in Gebieten hoher Sterndichte, beispielsweise in Kugelsternhaufen, entwickelt. Smirnov u. a (1995) haben dieses Verfahren kürzlich in einer Amateurzeitschrift beschrieben.

Bestimmung der "Platten"-Konstanten

Die auf dem CCD gemessenen Koordinaten x und y werden meist mit den relativen Himmelskoordinaten Delta alpha und Delta delta über folgenden Ansatz verknüpft:

$$\Delta\alpha \cos \delta = a + b x + c y + (c_1 x y + c_2 x^2 + c_3 y^2 + c_4 x^3 + c_5 y^3 + c_6 x y^2)$$

$$\Delta\delta = d + e x + f y + (f_1 x y + f_2 x^2 + f_3 y^2 + f_4 x^3 + f_5 y^3 + f_6 x y^2)$$

Mit Hilfe einiger identifizierter Sterne mit bekannten Koordinaten werden zunächst über ein Ausgleichsverfahren die Konstanten a, b, c, d, e, f (meist Plattenkonstanten genannt) bestimmt. Dieses Verfahren wurde schon immer in der photographischen Astrometrie benutzt und ist z. B. bei Montenbruck und Pfleger (1994, Kap. 12) ausführlich beschrieben. Während bei kleinen Bildfeldern der lineare Ansatz vor den Klammern ausreichend genau ist, müssen bei größeren Feldern und/oder komplizierteren optischen Systemen (z. B. Schmidt-Optiken) auch die höheren Terme in den Klammern ($c_1 - c_6$ und $f_1 - f_6$) berücksichtigt werden. Wichtig dabei ist, daß die Sternkoordinaten von der Katalogeпоche (z.B. 1950) auf das Aufnahmedatum umgerechnet werden müssen, wobei vor allem die Eigenbewegungen zu berücksichtigen sind.

Diese Auswerteverfahren konnten und wollten wir natürlich nicht selbst programmieren, sondern wir haben die Aufnahmen mit drei verschiedenen Programmen, die uns zur Verfügung standen, reduziert:

MIRA Professional.

Dieses kommerzielle Programm von Axiom Research, Inc. (Preis ca. 1400 DM, die eingeschränkte Version MIRA A/P kostet ca. 700.- DM, soll aber die gleichen astrometrischen Reduktionen ermöglichen) läuft auf IBM-kompatiblen PCs unter dem Betriebssystem DOS. Die Installation dieses Programms ist recht einfach und dank einer komfortablen Bedieneroberfläche ist es leicht zu benutzen. Die ersten Reduktionsschritte wurden damit durchgeführt:

- Mittelung mehrerer Dunkelaufnahmen und Abzug der Dunkelbilder von den Aufnahmen, allerdings wurden keine Flat-Field-Korrekturen angebracht.
- Umrechnung auf quadratische Pixelgrößen von 27 mm x 27 mm,
- Umwandlung vom Kameraeigenen Datenformat in das FITS (Flexible Image Transport System)-Format, das die Weiterverarbeitung mit dem später beschriebenen Programm MIDAS ermöglicht.

Die Positionen der Sternbilder werden in diesem Programm nach der Schwerpunktmethode für die beiden Randverteilungen (Methode 1) bestimmt. Ein Koordinatentransformationsprogramm (Calibrate Equatorial Coordinates) akzeptiert bis zu 10 Anhaltssterne. Nähere Einzelheiten über die verwendeten Ausgleichsmethoden gibt es nicht. Ursprünglich lieferte das Programm Positionen mit einer Genauigkeit von 0."1, was wohl auf einen Rundungsfehler durch die Ausgabe von zu wenig Stellen zurückzuführen war. Vor allem aus diesem Grunde hatten wir uns entschlossen, die beiden anderen Auswerteprogramme zu testen. Nachdem das Problem dem Hersteller mitgeteilt worden war, ist der Fehler inzwischen (Version 3.2) behoben und die Ausgabegenauigkeit auf 0."001 erhöht worden.

Der Fehler beim Ausgleich einer Aufnahme wird vom Programm im Mittel mit 0."035 angegeben. Durch Auswertung mehrerer Aufnahmen kann der Fehler weiter gedrückt werden, für typisch 6-8 Aufnahmen ergeben sich Standardabweichungen von 0."022 für die Differenzen der gemessenen gegenüber den Katalog-Koordinaten. Trotz dieser guten Genauigkeit nimmt die Auswertung einer größeren Anzahl von Aufnahmen mit vielen Sternen unverhältnismäßig viel Zeit in Anspruch. Ursachen sind vor allem die manuelle Ein- und Ausgabe der xy-Werte, der Katalogs- und der reduzierten sphärischen Koordinaten.

Mit MIRA wurden auch die Aufnahmen mit den anderen Brennweiten ausgewertet. Die Fehler sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Für die Auswertungen mit den folgenden Programmen haben wir 23 Aufnahmen (von 3 Feldern nahe dem Zentrum) vom 31. Januar 1995 ausgewählt, die im Cassegrainfokus gewonnen wurden. Die Belichtungszeiten betragen 20 s, die Grenzhelligkeit liegt bei etwa 17mag und die Halbwertsbreite der Sternbilder bei 2."5.

MIPS.

Dieses recht preisgünstige (ca. 500 DM) Programm (MIPS = Microcomputer Image Processing System) wurde von einer Gruppe um den französischen CCD-Experten Christian Buil entwickelt und von der Firma LE2RIM vertrieben. Es läuft unter DOS selbst bei relativ geringen Hardware-Anforderungen (vgl. die Beschreibung bei Federspiel und Sütterlin, 1995). Die kommandozeilenorientierte Benutzung ist zwar umständlich und gewöhnungsbedürftig, zeigt aber, daß wahrscheinlich professionelle Systeme wie MIDAS als Vorbild gedient haben dürften.

Die Positionen der Sternbilder können mit dem Befehl CENTRO nach der Schwerpunktmethode bestimmt werden. Dafür muß jeder Stern einzeln "angeklickt" und eine Identifikation für den Stern und die bestimmten xy-Koordinaten abgespeichert werden - ein Verfahren, das bei vielen Sternen und mehreren Bildern recht umständlich ist.

Wesentlich zweckmäßiger arbeitet der Befehl AUTOPHOT, mit dem zunächst alle meßbaren Sterne automatisch gesucht werden. Dann werden an diese Sterne zweidimensionale Gaußverteilungen gefittet und die PSF ermittelt. In einer Datei werden die Resultate (Position x und y, interne Helligkeit u.a.) abgespeichert. Die Ausführung dieses Befehls erfordert etwas Geduld und nimmt selbst auf einem schnellen Rechner mehrere Minuten in Anspruch. Leider werden keine Angaben über die Fehler der Positionen und Helligkeiten ausgegeben. Anschließend werden in der Ergebnisdatei die Sterne identifiziert, die im Katalog von Girard u. a. enthalten sind.

Mit dem Befehl ASTROM können nun für diese Sterne die "Plattenkonstanten" über ein Ausgleichsverfahren bestimmt werden. Aus der Streuung der Differenzen zwischen den Katalogkoordinaten und den aus den gemessenen xy-Koordinaten mit den "Plattenkonstanten" berechneten äquatorialen Koordinaten kann der mittlere Fehler bestimmt werden.

Für den Genauigkeitstest haben wir eine Rot-Aufnahme ausgewählt, die auch mit MIDAS ausgewertet wurde. Die xy-Koordinaten der Sterne auf der CCD-Aufnahme wurden mit AUTOPHOT bestimmt. Davon waren 20 Sterne im Katalog von Girard u.a. enthalten und ein linearer Ausgleich mit ASTROM ergab für diese Sterne einen mittleren Fehler von 0."028 in jeder Koordinate.

MIDAS.

Das Bildverarbeitungsprogramm MIDAS (Munich Image Data Analysis System) der Europäischen Südsternwarte ESO wird bereits seit über 10 Jahren an den professionellen Sternwarten benutzt, wofür bislang aufwendige Rechner mit Unix- oder VMS-Betriebssystemen notwendig waren. Seit kurzem stellt ESO das Programm auch für das Betriebssystem Linux, ein Unix-Dialekt für PCs, bereit. Vorteil dieses Betriebssystems ist, daß es kostenfrei zur Verfügung steht. Die Installation ist allerdings recht aufwendig, so daß eine gute Installationshilfe zu empfehlen ist. Wir haben gute Erfahrung mit der S.u.S.E.- Distribution (1995) gemacht, die mehrmals jährlich aktualisiert wird und zu einem Preis von knapp unter 100.- DM erhältlich ist. MIDAS ist ebenfalls kostenlos, für nicht registrierte Benutzer bislang jedoch nur über das Internet von der ESO erhältlich: <http://www.hq.eso.org/midas-info/midas.html>. Das Programm hat in komprimierter Form eine Speichergröße von 8 MB, die Dokumentation dazu 6 MB, was zu recht langen Übertragungszeiten (und damit Telefonkosten) führt. ESO plant allerdings die Herausgabe einer CD-ROM, komplett mit dem Betriebssystem Linux. jährlich erscheinen im November neue Versionen, zwischendurch gibt es kleinere Verbesserungen oder Fehlerkorrekturen (sog. patch levels). Im Gegensatz zu den beiden anderen Programmen erwies sich die Benutzung von MIDAS ohne kontinuierliche Unterstützung als recht mühsam und zeitaufwendig. An Hardware empfiehlt ESO mindestens einen 486er PC mit 8 (besser 16) MB RAM und mindestens 200 MB freiem Plattenplatz.

Da MIDAS die umfangreichsten Auswertemöglichkeiten zur Verfügung stellt und auch den zuverlässigsten Eindruck macht, haben wir damit die meisten Untersuchungen zur Genauigkeit unserer Beobachtungen angestellt.

Für einige Testaufnahmen wurden die Sternpositionen mit zwei Methoden bestimmt:

1. Beim Befehl CENTER/GAUSS wird zunächst ein Ausschnittfenster gewählt, das die Sterne optimal umrahmt. Durch Anklicken der Sterne werden für jeden Stern die Randverteilungen in x und y bestimmt und daran eine Gauß-Verteilung angepaßt, aus der die Position des Sterns abgeleitet wird. Dabei wird auch angegeben, mit welchem Fehler diese Positionen festgelegt wurden. Für eine Rot-Aufnahme ergab sich eine mittlere Zentriergenauigkeit von 0.026 Pixel, das entspricht 0.7 my oder 0."019, bei schwächeren Sternen sinkt sie allerdings auf 0.05 Pixel.
2. Mit der Photometrie-Software DAOPHOT werden Sterne automatisch gesucht, dann wird die PSF für die Aufnahme ermittelt und die Positionen und Helligkeiten der Sterne bestimmt. Dieses Programm dürfte wohl bei dem MIPS-Programm AUTOPHOT Pate gestanden haben. Die Fehler der Positionen werden hier leider nicht angegeben. Ein Vergleich mit den Positionen, die mit dem Befehl CENTER/GAUSS bestimmt wurden, ergab Streuungen, die vergleichbar sind mit den Fehlern der nach dieser Methode bestimmten Positionen (0."02). Da beide Methoden Fehler der gleichen Größenordnung liefern, wurde für die weiteren Untersuchungen DAOPHOT eingesetzt, da mit diesem Programm die Sterne automatisch erkannt werden. Die Ergebnisdateien können nach einigen Bearbeitungsschritten für die Koordinatentransformation verwendet werden.

Für die astrometrische Reduktionen ist in MIDAS das Astrometrieprogramm POS1 von Richard West implementiert, das sich durch einen angenehmen Bedienungskomfort auszeichnet, da z. B. die Korrektur der Eigenbewegung von der Katalogeпоche auf das Aufnahme datum automatisch vorgenommen wird.

Teleskop	Brennweite	Bildfeld	Abbildungsmaßstab	Mittlerer Fehler
Newton, 1:5	760 mm	30' × 39'	7"40 /Pixel	0"550
C8, 1:10	1950 mm	11'5 × 15'2	3"00 /Pixel	0"210
60-cm-Reflektor mit Shapley-Linse, 1:7	4230 mm	5'3 × 7'0	1"32 /Pixel	0"063
60-cm-Reflektor, 1:12.5	7460 mm	3'0 × 3'9	0"74 /Pixel	0"035

Tabelle 1: Positionsfehler bei verschiedenen Brennweiten. Die für das Newton-Teleskop und das C 8 angegebenen Fehler sind nur von wenigen Aufnahmen abgeleitet.

Stern	V [mag]	EB α [m"/Jahr]	Fehler [m"/Jahr]	EB δ [m"/Jahr]	Fehler [m"/Jahr]
783	13.40	9.38	0.32	4.83	0.19
		8.00	0.30	6.70	0.40
787	14.61	2.92	0.60	1.38	0.58
		3.10	0.40	1.70	1.00
1006	14.76	5.15	1.13	-0.49	0.44
		6.50	1.00	0.40	0.40
1013	11.68	6.08	0.14	5.01	0.10
		6.90	1.10	7.10	1.00
1015	14.30	18.25	0.40	4.14	0.42
		19.30	1.00	3.50	1.20
1022	14.02	0.67	0.48	9.14	0.30
		-0.50	0.90	8.30	1.20
1023	10.23	-4.26	0.12	1.02	0.12
		-4.50	0.40	2.70	0.90
1037	14.83	10.02	1.30	-22.92	1.14
		4.40	2.30	-21.10	1.00
1043	14.34	5.94	0.55	7.65	0.60
		6.30	0.50	7.40	1.00

Tabelle 2: Eigenbewegungen einiger Feldsterne. In der ersten Zeile sind jeweils die Eigenbewegungen und Fehler aus dem Katalog von Girard u.a. angegeben, in der zweiten Zeile die von uns bestimmten Werte. Auffällig sind die Abweichungen in alpha bei Stern 1037.

Außerdem wird der mittlere Fehler (Standardabweichung) des Ausgleichs angegeben, ebenso wie die Fehler für die einzelnen Sterne. Auf diese Weise können Sterne mit größeren Fehlern leicht aus der Liste der Vergleichssterne entfernt werden und die Plattenkonstanten neu bestimmt werden.

Zunächst einmal haben wir getestet, bis zu welchem Grad die Plattenkonstanten bestimmt werden müssen. Wie wir für unser kleines Bildfeld erwartet hatten, erwies sich ein linearer Ausgleich als vollkommen ausreichend, die Berücksichtigung von Gliedern höherer Ordnungen (in den Klammern der Formeln) erbrachte keine größere Genauigkeit.

Im nächsten Schritt haben wir auf den Aufnahmen alle Sterne (typisch 20-30) des Katalogs von Girard u.a. identifiziert und die Ausgleichsfehler bestimmt. Dabei zeigten Sterne heller als 10 mag und schwächer als 15 mag größere Fehler, ebenso wie die Aufnahmen durch das Blaufilter. Sie wurden daher bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Für die Aufnahmen in den verschiedenen Filterbereichen ergaben sich folgende mittlere Fehler:

Blau-Aufnahmen: 0"034
 Aufnahmen ohne Filter: 0"029
 Grün-Aufnahmen: 0"024
 Rot-Aufnahmen: 0"022

Dies zeigt, daß Aufnahmen im Roten deutlich geringere Fehler ergeben. Teilweise mag das auf die instrumentellen Unzulänglichkeiten (Rotdurchlässigkeit wegen fehlender Infrarot-Sperrfilter) zurückzuführen sein, teilweise auf atmosphärische Effekte.

Schließlich haben wir versucht, die Positionsfehler beim Vergleich mehrerer Aufnahmen zu bestimmen. Dabei gingen wir von einem eher realistischen Fall aus, daß etwa 8 Sterne als Anhaltsterne zur Verfügung stehen. Für alle anderen Sterne auf den Aufnahmen wurden dann über die Plattenkonstanten die Koordinaten bestimmt. Konnten wir Sterne auf unterschiedlichen Aufnahmen identifizieren, so haben wir die Differenzen und Streuungen der Koordinaten von den verschiedenen Aufnahmen bestimmt. Hierbei fanden wir einen mittleren Fehler von 0."024 (wobei allerdings die Blaufaufnahmen nicht berücksichtigt wurden).

Fazit

Heutzutage stehen einem Amateurastronomen mit der CCD-Technologie und leistungsfähigen PCs Arbeitsmöglichkeiten offen, die noch vor wenigen Jahren nur Fachastronomen zugänglich waren. Wir haben versucht, diese Möglichkeiten für astrometrische Messungen zu nutzen. Bereits mit relativ einfachen, leicht bedienbaren Auswerteprogrammen können wir mit unserem Instrumentarium Genauigkeiten von 0."03 erreichen. Ausgereizt werden die Messungen jedoch erst mit einem professionellen Programm wie MIDAS, womit die Genauigkeit bei der Auswertung einer Aufnahme bis auf 0."022 gesteigert werden kann. Durch Mittelwertbildung mehrerer Aufnahmen wird der Fehler noch weiter verringert. Damit kann zumindest für Sterne schwächer als 14 mag bereits die Genauigkeit von Girard u.a. erreicht werden, die immerhin mit dem größten Refraktor gearbeitet haben! Gleichzeitig ist klar, daß dies noch nicht unsere Genauigkeitsgrenze sein kann, da die Positionen der Vergleichssterne ja auch nicht viel genauer sind. Berücksichtigt man noch einige Mängel bei der Aufnahmetechnik (Filterung, fehlende Flat-Field-Korrektur), so sollte die interne Genauigkeit noch weiter gesteigert werden können. Andererseits stehen nur selten so genaue Positionen wie

in dem Sternhaufen M 67 zur Verfügung. jedenfalls haben wir durch diese Auswertungen ein Gefühl für unsere Meßgenauigkeit erhalten. Damit ist es immerhin möglich, die Parallaxen naher Sterne zu messen (Heiser u. Schröder, 1996).

Auch können bereits nach kurzen Zeitdifferenzen Eigenbewegungen gemessen werden. Die Sterne des Sternhaufens M 67 liegen in 2800 Lichtjahren Entfernung und zeigen Dispersionen in der Eigenbewegung von $0.0003/\text{Jahr}$ (oder $0.3 \text{ m}''/\text{Jahr}$). Mit unserer Meßgenauigkeit sollten über die Zeitdifferenz von $1995-1950 = 45$ Jahre Eigenbewegungen bis $0.7 \text{ mas}/\text{Jahr}$ nachweisbar sein. Damit stellen die Haufensterne ein gutes Bezugssystem dar, vor dem die Bewegungen der Feldsterne leicht auffallen, da deren Eigenbewegungen typisch 10-20mal größer sind. Für 9 Feldsterne konnten die Eigenbewegungen des Girard-Katalogs bestätigt werden (Tabelle 2). Zumindest einer dieser Sterne (Nr. 1037) zeigt allerdings eine deutlich abweichende Eigenbewegung in Rektaszension, die vermutlich auf einen schwachen, nicht aufgelösten Stern in unmittelbarer Nachbarschaft zurückzuführen ist. Insofern erscheint es mit unseren Mitteln sogar möglich, einen neuen Positionskatalog schwächerer Sterne für M 67 zu erstellen und Eigenbewegungen zu bestimmen - eine Projekt, das allerdings viel Zeit erfordert.

Literatur

[1] Bauer, B. u.a.: Installation, Konfiguration und erste Schritte mit S.u.S.E. Linux, 1995, Fürth, ISBN 3-930419-23-8

[2] Federspiel, M; Sütterlin, P: PC-Bildverarbeitungsprogramme für den Amateur. SuW 34, 932 12/1995

[3] Girard, T. M., Grundy, W. M., Läpez, C. E., van Altena, W. E: Relative proper motions and the stellar velocity dispersion of the open cluster M 67, 1989, Aj. 98, 227

[4] Heiser, E., Schröder, R.: Eigenbewegung und Parallaxe von Barnards Stern, 1996, SuW 35, 388 5/96

[5] Marsden, B. G.: CCDs and Comet Hale-Bopp, 1995, CCD Astronomy, Fall 1995, 50

[6] Montenbruck, O. Pflieger, T.: Astronomie mit dem Personal Computer, 1994, Springer, Berlin

[7] Smirnov, O. M., Ipatov, A. R, Samus, N. N.: PSF Photometry, 1995, CCD Astronomy, Spring 1995,14