Aufbau und Funktionsweise einer CCD-Kamera und ihre Anwendung in der Astronomie

Leonard Burtscher

Januar 2001

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3		
2	Technik der digitalen Bildverarbeitung 2.1 Die Entwicklung der Fotografie 2.2 Digital und Analog 2.2.1 Das analoge Bild 2.2.2 Das digitale Bild	4 4 4 4 5		
3	Die CCD-Kamera 3.1 Hardware 3.2 Software 3.2.1 Steuerung der CCD-Kamera Hardware 3.2.2 Elektronische Bildverarbeitung 3.3 Vorteile einer CCD-Kamera 3.4 Grenzen der CCD-Fotografie	5 7 7 7 8 9		
4	Praxisteil4.1 Die Schulsternwarte des Gymnasiums Penzberg4.2 Die CCD-Kamera SBIG ST-5C4.3 Montage der Kamera4.4 Bildaufnahme und -verarbeitung4.5 Bilder	11 12 13 13 15		
5	Weitere Anwendungen von CCD-Chips 5.1 Biotechnologie	19 19 19 19 20		
6	Ausblick	20		
A٦	bbildungsverzeichnis	22		
Li	teraturverzeichnis	23		
D	Dank			

1 Einleitung

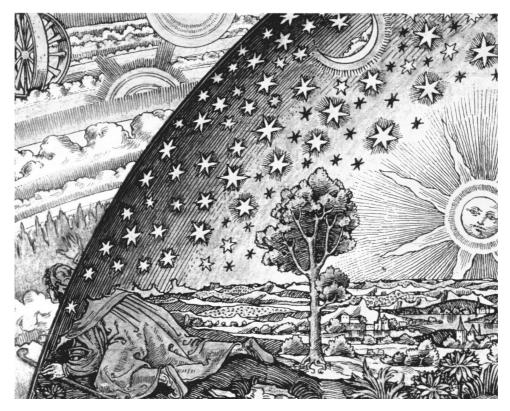


Abbildung 1: Das Bild zeigt einen Forscher, der das alte Lehrgebäude der Scholastik durchbricht und die Gesetze des Himmels erkennt [1].

Schon seit Menschengedenken interessierten sich alle Völker der Welt für die Erscheinungen des Himmels. Waren jedoch die frühen Astronomen auf visuelle Beobachtungen beschränkt (was sie aber nicht daran hinderte eindrucksvolle Thesen aufzustellen!), so stehen den zeitgenössischen Astrophysikern durch die Fortschritte in der Teleskoptechnik und in der Raumfahrt sowie dem allgemeinen materiellen Wohlstand ganz andere Möglichkeiten zur Verfügung.

Der Bau immer größerer erdgebundener Teleskope wie dem VLT in der Chilenischen Atacama-Wüste, die Entsendung von Sonden zur Erkundung ferner Planeten oder gar Kometen, die Beförderung astronomischer Teleskope in den Erdorbit, um die für die astronomische Beobachtung störende Atmosphäre zu umgehen, ermöglichen es den heutigen Forschern wieder ein Stück mehr hinter das "Räderwerk" des Himmels zu blicken...

Unabhängig von den technischen Höchstleistungen, die der astronomischen Grundlagenforschung in den letzten Jahrzehnten viele neue Einblicke verschafften, entwickelte sich in jüngster Zeit eine neuartige Technologie, ohne die heute der Großteil der modernen Welt gar nicht mehr denkbar wäre: Die Informationstechnologie mit ihren immer leistungsstärkeren Großrechnern.

Die hier vorgestellte CCD-Technik verknüpft gewissermaßen die Errungenschaften beider "high-tech"-Bereiche. Aufbau sowie Funktionsweise einer CCD-Kamera möchte ich im Folgenden beschreiben.

2 Technik der digitalen Bildverarbeitung

2.1 Die Entwicklung der Fotografie

Vor mehr als zwei Jahrtausenden beobachteten die Naturphilosophen im alten Griechenland, wie z.B. Thales von Milet [3, S.31], noch mit bloßem Auge die Himmelskörper. Damit konnten sie Sterne bis zur 6. Größenklasse erkennen. Galileo Galilei zeigte zu Beginn des 17. Jahrhunderts, dass durch den Einsatz von optischen Hilfsmitteln noch wesentlich schwächere Objekte am Himmel beobachtet werden können. So ist es mit einem Spiegelteleskop mit acht Zoll Öffnung bereits möglich Sterne bis zur 12. Helligkeitsgröße wahrzunehmen. Als schließlich im 19. Jahrhundert die Fotografie erfunden wurde, ermöglichten langbelichtete Aufnahmen die Beobachtung von astronomischen Objekten bis zur 20. Helligkeitsgröße und erstmals eine objektive astronomische Forschung im Bereich der Lichtwellenlängen, die also nicht mehr von der Tagesverfassung des jeweils beobachtenden Astronomen, sondern nur noch von der Qualität des Filmmaterials abhing. Mit der Entwicklung der CCD-Kameras in den 1980er Jahren wurde die Welt der Astrofotografie durch neuartige Aufnahme- und Verarbeitungsmöglichkeiten ein weiteres Mal revolutioniert. Erstmals war es auch Hobby-Astronomen mit geringen Mitteln möglich, wissenschaftliche astronomische Forschung zu betreiben. Die von den Sonden und Satelliten gemachten, faszinierenden Bilder der Objekte unseres Sonnensystems wären ohne CCD-Chips undenkbar gewesen.

2.2 Digital und Analog

Um die Vorzüge der digitalen Bildgewinnung und -verarbeitung besser verständlich zu machen, möchte ich im Folgenden die Bildgewinnung einer "herkömmlichen", d.h. analogen, Kamera mit der einer CCD-Kamera vergleichen.

2.2.1 Das analoge Bild

In einer herkömmlichen Kleinbildkamera wird das einfallende Licht im Fokus des Objektivs durch eine lichtempfindliche Substanz, den sog. Film, aufgenommen. Dabei neutralisieren die durch Licht von negativ geladenen Ionen (z.B. Bromid, Chlorid oder Jodid) gelösten Elektronen die in der Emulsion vorhandenen positiv geladenen Silberionen zu neutralen Silberatomen. In dem darauf folgenden notwendigen Entwicklungsprozess werden die entstandenen Silberatome zu metallischem Silber reduziert. [4, S.292].

Die Bildgewinnung beruht also auf einem chemischen Prozess, wobei die Anzahl der neutralisierten Silberatome zu der einfallenden Lichtmenge (und einigen Störeffekten, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll [5, S.145f]) proportional ist. Bei der Weiterverarbeitung des Bildes (Belichtung von Abzügen, Erstellung von Dias etc.) verliert das Bild an Qualität [6, S.17ff].

2.2.2 Das digitale Bild

Das digitale Bild ist aus vielen meist sehr kleinen Bildelementen, den sog. Pixeln (von engl. Pi[x]cture Element, zu deutsch Bildelement) aufgebaut, wobei jedem Pixel eine Farbtiefe zugeordnet ist. Die Farbtiefe wird in Bit gemessen und gibt an, wieviele Farben im Bild unterschieden werden. In einem Bild mit einer Farbtiefe von 8 Bit können $2^8 = 256$ verschiedene Farben unterschieden werden. Die Anzahl der Pixel multipliziert mit der Farbtiefe ergibt die Bildgröße, gewöhnlicherweise gemessen in MB (Megabyte = eine Million Byte, wobei einem Byte 8 Bit entsprechen).

Dieses digitale Bild kann nun mit elektronischen Mitteln verlustfrei weiterverarbeitet werden (siehe 3.2.2, Seite 7).

3 Die CCD-Kamera

Im Folgenden möchte ich erläutern, was zu einer CCD-Kamera gehört. Ich verwende hier die im Computerbereich übliche Unterteilung zwischen *Hardware* und *Software*.

Eine CCD-Kamera besteht im Wesentlichen aus:

- CCD-Kamerakopf (siehe 3.1)
- Steuerelektronik (siehe 3.1)
- Steuersoftware (siehe 3.2.1)

3.1 Hardware

Für ein genaues Verständnis der Funktionsweise eines technischen Gerätes empfiehlt es sich, den Aufbau des Gerätes zu kennen. Ich möchte daher zuerst auf die Technik eingehen, wie mithilfe des CCD-Chips Licht in elektrische Signale umgesetzt wird und wie diese wiederum zu einem digitalen Bild zusammengesetzt werden.

Die Abkürzung *CCD* kommt aus dem Englischen und heisst *charge-coupled device* (etwa: "Ladungsgebundenes Gerät"). Der CCD-Chip ist also gewissermaßen die "Schnittstelle" zwischen optischem und elektrischem Bildsignal.

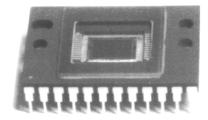


Abbildung 2: Ein typischer CCD-Chip (hier ein Kodak KAF-0400)

In einem CCD-Chip wird der von Einstein im Jahre 1905 erklärte fotoelektrische Effekt [7, S.1199ff] genutzt, bei dem Photonen Elektronen aus Metallen ausschlagen und so eine Spannung induziert wird. Im CCD-Chip wird für eine vom Benutzer gewählte Zeit der sog. Shutter (entspricht dem Verschluss bei einer herkömmlichen Spiegelreflexkamera) geöffnet und Licht fällt auf den CCD-Chip. In dieser Zeit baut sich eine Spannung analog zur Anzahl der eingestrahlten Photonen auf, wobei CCD-Chips eine im Vergleich zum menschlichen Auge verschobene Farb-Empfindlichkeit besitzen (siehe Abb. 3): während sie im kurzwelligen blauen Bereich weniger empfindlich sind, können sie längerwelliges Licht sogar noch bis in den nahen Infrarot-Bereich messen, für den das menschliche Auge nicht empfindlich ist.

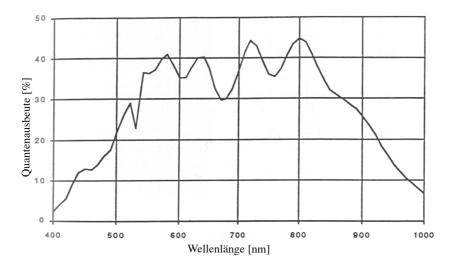


Abbildung 3: Die Quantenausbeute eines CCD-Chips in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Nach der Belichtung werden die induzierten Spannungen der einzelnen Pixel durch einen komplizierten Auslesemechanismus [8, S.32ff] an einen Signalprozessor weitergegeben, der diese in Helligkeitswerte umrechnet. Grob gesprochen werden die Ladungen, die sich aufgrund des Fotoeffekts in den einzelnen Bildelementen aufgebaut haben, pixelweise an den Rand verschoben und dort nach einer Signalverstärkung vom Analog-Digital-Konverter (ADC) in elektrische Signale umgewandelt, die vom Computer verarbeitet werden können. Sobald eine Zeile so umgewandelt ist, werden die Ladungen wieder um ein Bildelement weiter geschoben, so dass eine weitere Zeile ausgelesen werden kann. Die Genauigkeit der Umrechnung im ADC wird in Bit (siehe 2.2.2) angegeben.

Da der CCD-Chip im Infrarotbereich sehr empfindlich ist, muss der CCD-Kopf stets gut gekühlt werden, damit wenig Dunkelrauschen auftritt (siehe dazu 3.4). Die Kühlung wird mithilfe thermoelektrischer Kühlelemente (sog. Peltier-Elemente) erreicht. Dabei wird der Dunkelstrom in etwa pro 7° Temperaturrückgang halbiert.

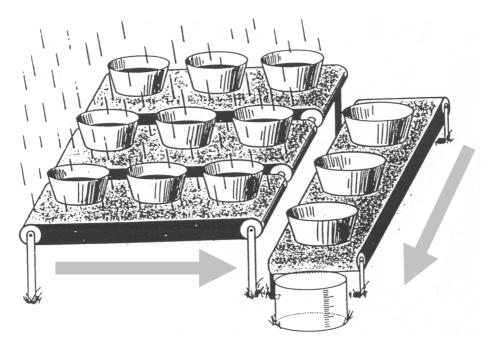


Abbildung 4: Diese bildhafte Darstellung beschreibt den Auslesemechanismus eines CCD-Chips.

3.2 Software

3.2.1 Steuerung der CCD-Kamera Hardware

Die Einstellung von Belichtungszeit, Dunkelabzug und anderen Aufnahmeparametern erfolgt in der Software des angeschlossenen PCs (meist ein tragbarer Computer). Die im Praxis-Teil (4.2) näher besprochene CCD-Kamera ST-5C wird mit der vom Hersteller mitgelieferten Software *CCDOPS* kontrolliert. Diese Software erlaubt gleichzeitig minimale Bildkorrekturen und einen Einblick in die Möglichkeiten der elektronischen Bildverarbeitung (siehe 3.2.2).

3.2.2 Elektronische Bildverarbeitung

Einer der Hauptvorteile der CCD-Fotografie sind die vielfältigen Möglichkeiten der Weiterverarbeitung mithilfe elektronischer Bildverarbeitungssoftware (EBV). In der am weitesten verbreiteten EBV Adobe Photoshop sind einfaches Ausschneiden und Vergrößern genauso unproblematisch machbar wie Schärfekorrekturen (mit den Filtern "Scharfzeichnen" oder "unscharf maskieren"), Tonwert-, Kontrast- oder Helligkeitskorrekturen. Andere Bildverarbeitungsprogramme wie das kostenlos erhältliche GIMP (*GNU Image Manipulation Program*) oder Corel Photopaint beherrschen im wesentlichen die gleichen Funktionen.

Darüber hinaus können digitale Bilder schnell und unkompliziert über das Internet verfügbar gemacht oder auf CD-ROMs lange Zeit verlustlos gespeichert werden.

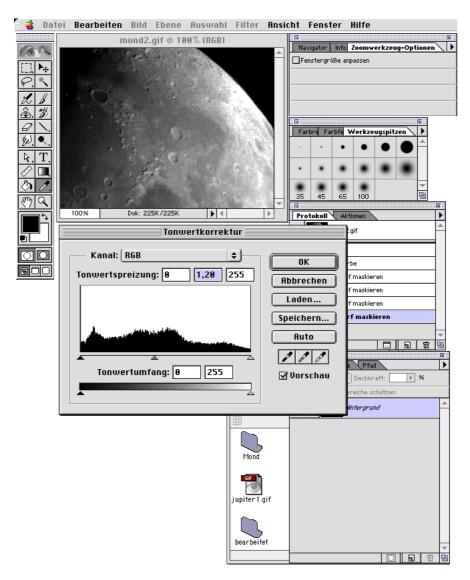


Abbildung 5: Die Standard-EBV Adobe Photoshop 5

3.3 Vorteile einer CCD-Kamera

CCD-Kameras bieten gegenüber herkömmlichen analogen Kameras, die eine Fotoemulsion belichten, zahlreiche Vorteile:

- Hohe Empfindlichkeit: CCD-Kameras besitzen eine wesentlich höhere Empfindlichkeit als selbst speziell behandelte fotografische Schichten. Während sog. "hypersensibilisierte" Fotofilme bei ca. 1600 ISO kaum mehr vernünftig verwendbar sind, da der Film sichtbar grobkörniger wird, haben CCD-Kameras eine Auflösung von bis zu 40.000 ISO bei moderater Körnung (abhängig vom CCD-Chip).
- Quantenhafte Genauigkeit: Während mit Fotoemulsionen quantitative Beobachtungen nur mit hohem Aufwand betrieben werden können, liegt es in der Natur der CCD-Chips jedem Pixel einen exakten (d.h. nur durch Störeffekte, siehe 3.4, beschränkten) Helligkeitswert zuzuordnen, wodurch es möglich ist, fotometrische Messungen durchzuführen,

und so z.B. die Umlauffrequenzen von Doppelsternen zu bestimmen.

- **Kein Schwarzschildeffekt:** Im Gegensatz zum fotochemischen Filmmaterial weisen CCD-Chips bis zur Sättigung (der sog. *full well capacity*) eine lineare Empfindlichkeit auf, wodurch die Bilder auch in sehr hellen Bereichen, wie im Inneren einer Galaxie, kontrastreich bleiben.
- Sofortige Verfügbarkeit der Bilder: Wenige Augenblicke nach der Aufnahme können CCD-Bilder bereits am Computermonitor betrachtet, korrigiert und bewertet oder nötigenfalls wiederholt werden.
- Kein Materialverbrauch: Es muss nicht darauf geachtet werden, dass unter Umständen sehr teures Filmmaterial verbraucht wird, sondern die Menge der Bilder wird nur noch durch die Festplattenkapazität des Computers und die Ausdauer des Anwenders limitiert.
- **Digitale Bilder:** Durch die digitale Natur der Bilder sind der nachträglichen Verarbeitung, Korrektur und Auswertung fast keine Grenzen gesetzt (siehe 3.2.2).
- Größerer Spektralbereich: Wie in Abbildung 3 gezeigt, ist der CCD-Chip nicht nur im sichtbaren Bereich, sondern auch noch im nahen Infrarot-Bereich empfindlich, wodurch sich dem Amateur-Astronom weitere Möglichkeiten eröffnen, wie z.B. die Beobachtung von Planeten im nahen IR-Bereich, die schärfere und kontrastreichere Bilder ermöglicht.

3.4 Grenzen der CCD-Fotografie

All den Vorteilen der CCD-Fotografie stehen leider auch einige Nachteile gegenüber, von denen sich aber die meisten lösen lassen.

- Kleines Bildfeld: Im Gegensatz zur herkömmlichen Fotografie ist das Bildfeld selbst einer großen CCD-Kamera nach wie vor deutlich kleiner. Die zur Zeit beste CCD-Kamera im Amateur-Astronomie-Bereich (SBIG ST-8) benutzt einen Chip mit 13,8 × 9,18mm² Bildfläche, während ein herkömmlicher Kleinbild-Film mit 36 × 24mm² fast die siebenfache Bildfläche bietet [10, S.15]. Durch Mosaik-Techniken (Aufteilen eines "großen" Objektes in mehrere kleinere Bilder) oder spezielle Linsen (sog. focal reducer), die die Brennweite des Teleskops erniedrigen und dadurch zu mehr Gesichtsfeld verhelfen, kann dieses Problem aber gelöst werden.
- Abhängigkeit von PC und Stromversorgung: Während ein "klassisch" ausgerüsteter Astrofotograf fast jeden nur erdenklichen Ort für die Fotografie aussuchen kann (beispielsweise besonders hohe Berggipfel wegen klarer Luft und wenig Streulicht), sind einem CCD-Fotografen trotz immer transportableren Teleskopen und Computerakkus durch die Akkulaufzeit und die Temperaturempfindlichkeit der Lithium-Ionen-Akkus in modernen Notebooks Grenzen gesetzt.

- Anschaffungskosten: Die Kosten für eine von der Qualität mit herkömmlichen Kleinbild-Filmen vergleichbare CCD-Kamera liegen nach wie vor im fünfstelligen DM-Bereich.
- Farbe: Wie eine fotochemische Emulsion ist auch ein CCD-Chip zunächst farbenblind. Während allerdings bei der herkömmlichen Fotografie eine Aufnahme auf einen Farbfilm genügt, um ein Farbbild zu erhalten, müssen mit einer CCD-Kamera drei Bilder in den Farbbereichen Rot, Grün und Blau "geschossen" werden, die anschließend vom Computer zu einem Farbbild zusammengefügt werden.



Abbildung 6: Dunkelabzug der CCD-Kamera ST-5C bei einer CCD-Chip-Temperatur von 3° C

- Dunkelstrom: Durch die hohe Empfindlichkeit des CCD-Chips gerade im Infrarot-Bereich, tritt auch bei geschlossenem Verschluss ein sog. Dunkelstrom auf. Dieser auch elektronisches Rauschen genannte Störeffekt kommt durch thermische Elektronen zustande. Das sind Elektronen, die alleine aufgrund der Wärmebewegung der Atome im CCD-Chip ausgeschlagen und ebenfalls registriert werden. Durch die Aufnahme eines Dunkelbildes (engl.: dark frame) lassen sich diese Effekte, die alleine von Temperatur und Belichtungszeit abhängen, vor der Aufnahme isoliert messen. Die Helligkeitswerte der einzelnen Pixel werden nach der Aufnahme des gewünschten Objekts von dem gewonnenen Bild abgezogen.
- Blooming: Wenn die sog. full well capacity erreicht ist und durch weitere einfallende Photonen die Spannung in einem Pixel nicht mehr weiter erhöht werden kann, wird die überschüssige Ladung an benachbarte Pixel weitergegeben. Dieser als Blooming bezeichnete Effekt lässt sich nur sehr schwer korrigieren. Zwar gibt es bei den meisten CCD-Chips sog. Anti Blooming Gates, die das Ausbloomen der Pixel vermindern sollen, deren Wirkung ist aber beschränkt. Das Bloomen kann nur durch Anpassung der Belichtungszeit, Abblenden des Objektivs oder durch Verwendung von Graufiltern verhindert werden.



Abbildung 7: Bei zu langen Belichtungszeiten wird die Ladung einzelner Pixel an benachbarte Pixel weitergegeben und es entstehen überlaufende Pixel.

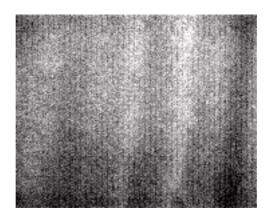


Abbildung 8: Durch die unterschiedliche Empfindlichkeit der einzelnen CCD-Pixel entsteht ein solches Bild bei der Aufnahme einer gleichmäßig beleuchteten Fläche (Bild: [9]).

• Flatfield: Es ist bislang nicht möglich, einen CCD-Chip herzustellen, dessen Pixel alle genau die gleiche Sensibilität aufweisen. Je nach Qualität des Chips kann es nur einzelne "helle" bzw. "dunkle", d.h. über- bzw. unterempfindliche, Pixel oder auch ganze Reihen oder Regionen solcher Pixel geben. Diesen Effekt kann man dadurch korrigieren, dass man eine gleichmäßig beleuchtete Fläche mit der CCD-Kamera aufnimmt. Die Helligkeitswerte des bereits dunkelstromkorrigierten Bildes werden nun noch durch die des Flatfield-Bildes geteilt und man erhält ein Bild eines simulierten idealen CCD-Chips.

4 Praxisteil

4.1 Die Schulsternwarte des Gymnasiums Penzberg

Als eine der wenigen Schulen südlich von München verfügt das Gymnasium Penzberg über eine eigene sehr gut ausgerüstete Sternwarte. In der weißen Baader-Kuppel befindet sich ein auf einer stabilen Alt AD-5 Montierung angebrachter 6,1 Zoll (155mm) Starfire Apochromat von Astro-Physics mit einer Brennweite von 1085mm, an den ein Vixen Leitfernrohr (100mm Öffnung bei



Abbildung 9: Die Schulsternwarte des Gymnasiums Penzberg

1000mm Brennweite) montiert ist. Seit Herbst 2000 steht der Arbeitsgemeinschaft Astronomie, die sich an der Schule um die Sternwarte kümmert, eine SBIG ST-5C CCD-Kamera (siehe 4.2) zur Verfügung.

4.2 Die CCD-Kamera SBIG ST-5C

Die CCD-Kamera ST-5C der Santa Barbara Instruments Group (SBIG) ermöglicht nicht nur einfache Nachführungsaufgaben, sondern kann als vollwertige CCD-Kamera zur Bildgewinnung eingesetzt werden.

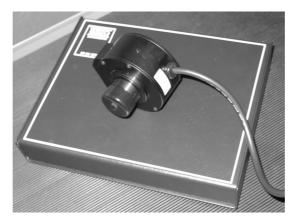


Abbildung 10: Die im Praxisteil eingesetzte CCD-Kamera ST-5C mit Steuercomputer

Hier die wichtigsten Eckdaten der Kamera:

4 PRAXISTEIL 13

CCD TC-255

Anzahl und Größe der Pixel 320x240 Pixel à $10 \cdot 10\mu m$, gesamt: 76800 Pixel

Full Well Capacity $50000 e^-$

Dunkelstrom $5e^-$ pro Pixel und Sekunde bei 0°C

Preis ca. DM 3000,-

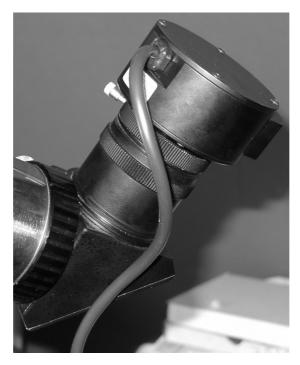


Abbildung 11: Der CCD-Kamerakopf wird an den Okularstutzen des Hauptfernrohrs geflanscht

4.3 Montage der Kamera

Die Kamera wird, wie in Abbildung 11 gezeigt, an den Okularstutzen des Hauptfernrohrs angebracht und mit dem Steuerungscomputer verbunden. Dieser wiederum ist an den Laptop, der die Steuerungssoftware enthält, und an das Stromnetz angeschlossen.

4.4 Bildaufnahme und -verarbeitung

Nach Einstellen des Objektes im Hauptfernrohr und Montage der CCD-Kamera an den Okularstutzen wie in 4.3 beschrieben, werden die Kamera sowie der Laptop eingeschaltet. Der arbeitsaufwändigste Schritt bei der Aufnahme des Bildes ist das Fokussieren der Kamera auf das Objekt. Da man sich hierbei nicht am Fokus eines Okulars orientieren kann, muss man fokussieren, ohne das Bild selber zu sehen. Dafür steht allerdings der "Focus"-Befehl der CCD-Steuersoftware *CCDOPS* zur Verfügung. In diesem speziellen Aufnahmemodus wird das Auslesen des Bildes, das normalerweise einige Sekunden dauert, auf weniger als eine Sekunde herabgesetzt, indem entweder nur ein Teil des Bildes ausgelesen wird (*Planet mode*) oder mehrere Pixel zu einem virtuellen Pixel zusammengefasst werden (sog. *Binning*), wobei die zu über-

tragende Bildmenge in beiden Fällen drastisch reduziert wird.



Abbildung 12: Die CCD-Kamera am 155mm-Aporchromaten der Schulsternwarte

Ist die richtige Schärfe gefunden, muss die Belichtungszeit an das Objekt angepasst werden. Hierbei hat man bei der ST-5C ein großes Intervall zur Verfügung: Die Kamera erlaubt Belichtungszeiten von 0,01s bis zu einer Stunde. Für die meisten Objekte empfiehlt sich allerdings eine Belichtungszeit von wenigen Sekunden, da die CCD-Kamera wegen ihrer hohen Empfindlichkeit schnell ein gut ausbelichtetes Bild liefert. Für sehr lichtschwache Deep-Sky-Fotografie sei hier nur die Möglichkeit des Track and Accumulate angesprochen, bei der mehrere kurz belichtete Bilder zu einem Bild aufaddiert werden. Dadurch wird in etwa die Sättigung eines "in einem Stück" belichteten Bildes erreicht, das Dunkelrauschen sowie die Verschiebung des Bildfeldes durch Nachführfehler der Montierung können aber stark reduziert werden.

Nachdem das Bild fertig eingestellt, fokussiert und die Belichtungszeit ermittelt worden ist, wird das Bild aufgenommen. Dazu wählt man den Befehl *Grab* (siehe Abbildung 13) in der Steuersoftware. Die Belichtungszeit, die man vorher im *Focus*-Modus eingestellt hat, wird übernommen. Der notwendige Dunkelabzug wird automatisch von der Kamera unmittelbar vor der Belichtung erstellt, was sicherstellt, dass das Dunkelbild hinsichtlich Belichtungszeit und Umgebungstemperatur genau den Aufnahmebedingungen entspricht.

Anschließend empfiehlt es sich, das Bild mithilfe einer elektronischen Bildverarbeitungssoftware (siehe 3.2.2) weiterzubearbeiten, um bessere Resultate zu erzielen.

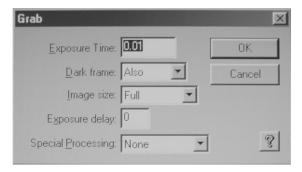


Abbildung 13: Nach dem Fokussieren des eingestellten Objekts wird mit dem Befehl *Grab* das Bild aufgenommen.

4.5 Bilder

Hier nun einige Aufnahmen, die ich im Winter 2000/2001 mit der schuleigenen CCD-Kamera SBIG ST-5C gemacht habe.

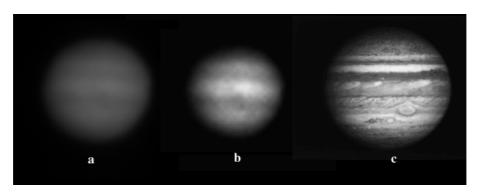


Abbildung 14: Der "Gasriese" Jupiter. Gegenüberstellung verschiedener Jupiteraufnahmen (siehe Text)

Das linke Bild (a) ist eine unbearbeitete Aufnahme des Planeten Jupiter. Die Belichtungszeit betrug 0,01s. Leider konnte bei diesem Bild nicht die gesamte Fläche des CCD-Chips ausgenutzt werden, da die Abbildung des Jupiters auf der CCD-Ebene bei 1200mm Brennweite noch recht klein ist. Eine Vergrößerung könnte durch eine sog. Barlow-Linse erzielt werden, die die Brennweite des Fernrohrs um den Faktor zwei oder drei (je nach Linse) vergrößert. Doch auch aus dem dunklen und im Original noch kleineren Bild (a) kann eine verwertbare Aufnahme gewonnen werden. Nach Korrektur von Helligkeit und Kontrast gewinnt man Bild (b). Zum Vergleich: Bild (c) wurde mit der CCD-Kamera WFPC2 (siehe 4.5 auf Seite 17) des Hubble Space Telescope aufgenommen.

Eine weitere Verbesserung des Bildes könnte erreicht werden, indem man mehrere Bilder aufnimmt und diese anschließend addiert – dadurch wird der Kontrast erhöht und Störeffekte (wie atmosphärische Luftturbulenzen, das sog. Seeing) werden entfernt.

Abbildung 15 habe ich in Adobe Photoshop stark aufgehellt, um die im Vergleich zum Planeten wesentlich schwächeren Jupiter-Monde Ganymed, Io,

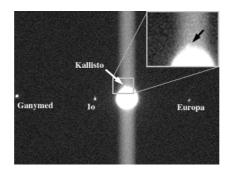


Abbildung 15: Jupiter mit seinen Monden am 26. Januar 2001. Speziell nachbearbeitetes Bild (siehe Text), um die galileischen Monde des Jupiter sichtbar zu machen.

Kallisto und Europa sichtbar zu machen. Die Stellung der Jupitermonde habe ich [11, S.26] entnommen.

Am Beispiel des Erdmondes möchte ich zeigen, wie aus einem unscharfen Bild mithilfe elektronischer Bildverarbeitung ein brauchbares Astrofoto erstellt werden kann.

Das unbearbeitete Bild des Erdmondes (16), am 5. Dezember 2000 von mir



Abbildung 16: unbearbeitetes Bild vom Erdmond

aufgenommen, ist unscharf. Man kann zwar versuchen, die Schärfe möglichst schon bei der Aufnahme optimal einzustellen, doch wenn dies nicht gelingt, ist es auch nachträglich noch möglich, das Bild "scharfzustellen".

Mit der aus der herkömmlichen Fotografie stammenden Technik der unschar-



Abbildung 17: Nachbearbeitetes Bild vom Erdmond

4 PRAXISTEIL 17

fen Maske [6, S.18ff], die in den meisten modernen Bildverarbeitungsprogrammen (siehe 3.2.2) als Filter auf jedes Bild angewendet werden kann, wird aus einem vorher unscharfen Bild (Abbildung 16) nach mehrmaliger Anwendung ein scharfes Bild (Abbildung 17).

Der entscheidende Vorteil der elektronischen Bildverarbeitung gegenüber herkömmlichen Methoden ist auch hier, dass das Ergebnis sofort nach Anwendung des "Filters" betrachtet werden kann, dass der Filter sehr einfach anzuwenden ist (keine aufwändige Dunkelkammerarbeit erfordert) und dass die Dosierung (d.h. Anzahl der Anwendungen) einfach kontrollierbar ist, da jeder Schritt in der Software wieder rückgängig gemacht werden kann.

In Abbildung 18 wird deutlich, welchen Fortschritt die CCD-Fotografie für

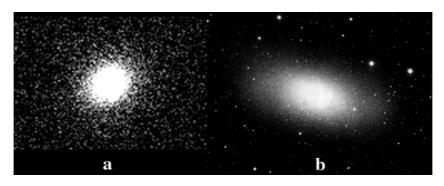


Abbildung 18: Collage zweier verschiedener Aufnahmen der größten Begleitgalaxie der Andromedagalaxie (siehe Text)

Amateur-Astronomen gebracht hat. Auf beiden Aufnahmen ist die Galaxie M110 (NGC205), die größere der beiden von der Erde aus mit einem Amateurfernrohr sichtbaren Begleitgalaxien der ca. 2,38 Millionen Lichtjahre entfernten Andromeda-Galaxie M31, zu sehen. Die Galaxie ist ^{mag}8.9 hell, also mit dem bloßen Auge nicht sichtbar. Aufnahme (a) habe ich bei sehr klarer Sicht am 26. Januar 2001 mit der CCD-Kamera ST-5C gemacht, (b) wurde von den Hale Observatories mit einem 200 Zoll-Teleskop (entspricht ca. 0,5m oder dem 33-fachen des Objektivdurchmessers des Schulteleskops) auf eine konventionelle Fotoplatte aufgenommen. Es zeigt sich also, dass mithilfe von CCD-Kameras auch kleinere Teleskope Ergebnisse liefern können, die von einer professionellen Aufnahme eines Großteleskops nicht mehr so weit entfernt sind. Durch Vergrößerungslinsen am Teleskop und Aufaddieren mehrerer Bilder könnte das CCD-Bild noch weiter verbessert werden.

In Abbildung 19 ist eine Collage aus drei Aufnahmen des Ringplaneten Saturn zu sehen. Bild (a) zeigt die unbearbeitete CCD-Aufnahme. In (b) wurde das Bild aus (a) in Kontrast und Helligkeit verstärkt. Zum Vergleich ist in (c) eine Aufnahme des $Hubble\ Space\ Telescope\ zu\ sehen$.

Das Weltraumteleskop Hubble ist mit verschiedenen CCD-Kameras ausgestattet. Meistens wird die **W**ide **F**ield and **P**lanetary **C**amera **2** (WFPC2) eingesetzt (wie auch hier). Diese eigens für das Weltraumteleskop entwickelte CCD-Kamera verwendet 48 Filter, um vom harten UV-Licht bis zum nahen Infrarot Bilder aufnehmen zu können. Die Aufnahmefläche der WFPC2

4 PRAXISTEIL 18

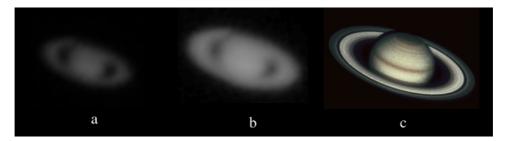


Abbildung 19: Collage dreier Aufnahmen des Planeten Saturn (siehe Text)

besteht aus einer Anordnung (array) von vier CCD-Chips, jeder mit einer Auflösung von 800×800 Pixeln, wodurch eine Auflösung von ca. 2,6 Millionen Bildpunkten erreicht wird.

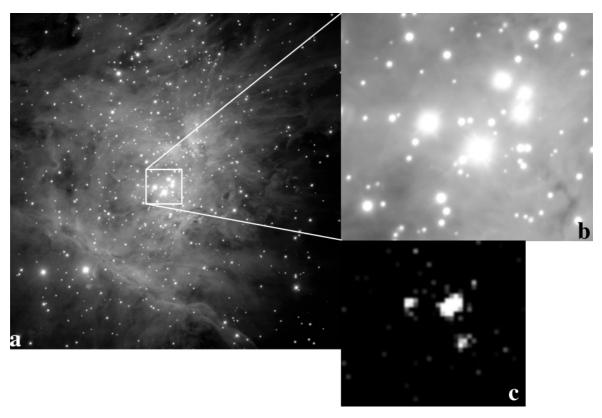


Abbildung 20: Das Trapez im Orionnebel zählt zu den beliebtesten Objekten der Amateurastronomen

In Bild (20a) ist eine Aufnahme des Orionnebels M42 im Sternbild Orion zu sehen. (a) wurde mit einem der vier Teleskope des Very Large Telescope (VLT) des European Southern Observatory (ESO) auf dem Cerro Paranal in Chile aufgenommen. Das VLT ist mit einer Anordnung von vier Acht-Meter-Teleskopen das größte optische Teleskop weltweit und liefert dank neuartigen Technologien wie CCD-Kameras und einer adaptiven Optik, die die Korrektur von atmosphärischen Störungen (siehe 4.5 auf Seite 15) erlaubt, Daten, die zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen führen. Das in (a) gezeigte Bild

wurde im Infrarot-Bereich mit der *Infrared Spectrometer And Array Camera* (ISAAC) aufgenommen.

Bild (b), eine Ausschnittsvergrößerung von (a) zeigt jene vier Sterne des Orionnebels, die das Trapez formen. In (c) ist die gleiche Region im kürzerwelligen Bereich mit der CCD-Kamera ST-5C dargestellt. Während (c) zwar schon deutlich pixelig, d.h. körnig, erscheint, (b) dagegen noch weiter vergrößert werden könnte, zeigt der Vergleich doch eindrucksvoll, wie auch mit kleineren Teleskopen wie dem Schulteleskop des Gymnasiums Penzberg durchaus eindrucksvolle Resultate erzielt werden können.

5 Weitere Anwendungen von CCD-Chips

In diesem letzten Abschnitt möchte ich anhand einiger Beispiele zeigen, wie vielfältig CCD-Kameras in anderen Bereichen der Wissenschaft und sogar in der Unterhaltungsindustrie eingesetzt werden können.

5.1 Biotechnologie

Die Biotechnologie ist heute einer der aussichtsreichsten Forschungszweige. Durch völlig neue Methoden und Techniken können Krankheiten nicht nur besser geheilt, sondern auch ihre Ursachen besser verstanden werden.

Nur ein Blick durch das Mikroskop reicht heute aber in vielen Bereichen nicht mehr aus. Es müssen Aufnahmen beispielsweise von Bakterienkulturen erstellt werden, die anschließend im Computer mit anderen Bildern verglichen werden. Auf dieser Grundlage lassen sich dann Schlussfolgerungen ziehen. Ein Vorteil der CCD-Technik sind in diesem Bereich vor allem die kostengünstigen Aufnahmen und die schnelle Verfügbarkeit der Ergebnisse.

5.2 Unterhaltungselektronik

Akzeptiert wird eine "neue Technologie" von der breiten Öffentlichkeit meist dann, wenn man sie in Alltagsgegenstände einbauen kann. Ein Paradebeispiel dafür ist die von Max Planck im Jahre 1900 vorgestellte Quantenmechanik. Anfänglich von vielen Menschen ignoriert, werden die Anwendungen dieser wichtigen Errungenschaft heute von vielen Menschen in Form von CD-Spielern (Laserabtastung der digitalen Information auf der CD-Scheibe) oder bei Fernsehern wie Computermonitoren (Anregung von Phosphoratomen im Monitor durch Kathodenstrahl und dadurch Erzeugen eines Monitorbildes) geschätzt. Dass auch der CCD-Technik eine ähnliche Erfolgsgeschichte teilweise schon gegönnt war und im Großen noch bevorsteht, zeigt die aktuelle Entwicklung im Bereich der Unterhaltungselektronik, die ich nachfolgend kurz schildern möchte.

5.2.1 Digitale Fotokameras

Wie lästig ist es doch, nach dem Abgeben des Urlaubsfilms beim Fotogeschäft tagelang warten zu müssen, um dann endlich die Bilder betrachten zu können.

6 AUSBLICK 20

Mit dem Erfolgszug der Computer und der Verbreitung des Internets ist der Wunsch, Bilder sofort nach der Aufnahme verfügbar zu haben, realisierbar geworden. Online-Magazine wie *spiegel.de* oder *sueddeutsche.de* haben den Anspruch, jede Nachricht innerhalb weniger Stunden ihren Lesern zu präsentieren – meist mit Bildern. Dies ist vernünftigerweise nur mit digitalen Kameras machbar.

Dabei handelt es sich um (heute noch meistens Kompakt-)Kameras, die Bilder nicht auf einer Fotoemulsion aufzeichnen, sondern mithilfe eines CCD-Chips. Da die Kameras mobil einsetzbar sein sollen, besitzen sie einen nicht-flüchtigen Zwischenspeicher (sog. Flash memory). Auf solchen Flash-Cards, die in etwa die Größe eines Fünfmarkstücks haben, können heute bis zu 60 Bilder in annähernd Foto-Qualität gespeichert werden.

Die CCD-Chips dieser Kameras unterscheiden sich allerdings von den astronomischen CCD-Chips. Erstere bieten heutzutage zwar Auflösungen bis zu 3 Megapixeln, während selbst große CCD-Kamera-Arrays wie die WFPC2 des Hubble Space Telescope "lediglich" 2,6 Megapixel (siehe 4.5 auf Seite 17) haben, können aber nur wenige Sekunden belichtet werden, da ansonsten der Dunkelstrom zu stark in Erscheinung tritt. Zum Vergleich: Selbst Amateur-CCD-Kameras wie die ST-5C können eine Stunde lang belichtet werden.

5.2.2 Videokameras

Auch im Bereich der bewegten Bilder setzen sich CCD-Chips gegen Fotoemulsionen durch. Seit den 80er Jahren werden z.B. von Sony kleine Videokameras für den Heimgebrauch, sogenannte *Camcorder* hergestellt, die die durch einen CCD-Chip gewonnen Bilder auf Magnetbändern (8mm, Hi8, VHS, S-VHS) speichern.

Wegen der für Kino-Maßstäbe immer noch zu geringen Auflösung der im Videobereich eingesetzten CCD-Chips – die ja nicht nur eine große Auflösung besitzen sondern auch schnell ausgelesen werden müssen – wird im Profi-Bereich auch heute noch eine fotochemische Emulsion belichtet. Die entwickelten Einzelbilder werden dann allerdings mithilfe modernster Computer digital weiterverarbeitet. Erst vor wenigen Monaten kam der erste vollkommen digital produzierte Film in die Kinos [12], bei dem zur Aufnahme ein CCD-Chip eingesetzt wurde, der mit 2,1 Megapixeln Auflösung bei 24 Bildern pro Sekunde schon sehr nah an die mit herkömmlicher Technik erzielten 2,3 Millionen Bildpunke bei ebenfalls 24 Bildern pro Sekunde heranreicht. Renommierte Film-Produzenten haben aufgrund des durchschlagenden Erfolgs dieser neuen Technik bereits deren Einsatz in ihren nächsten Filmen angekündigt [12].

6 Ausblick

Abschließend möchte ich einen Ausblick auf die weitere Entwicklung der CCD-Chips geben.

Auf der Photokina 2000 in Köln wurde von der Firma Foveon [13] bereits ein 16 Megapixel-CCD-Chip für Digitalkameras vorgestellt, der aber wohl erst

6 AUSBLICK 21

in einigen Jahren breite Anwendung finden wird. Dennoch zeigt dieser Umstand, dass – spätestens dann – die digitale Bildgewinnung und -verarbeitung nicht mehr nur etwas für Enthusiasten oder besonders fortschrittsfreundliche Menschen ist, sondern dass die digitale Technik die analoge überholt hat [14, S.82ff].



Abbildung 21: Die 3,3-Megapixel-Digitalkamera Sony Cybershot DSC-P1 ist nur wenig höher als ein Streichholz.

Aber welche weiteren Entwicklungen sind zu erwarten? Die Chips werden nicht nur mehr Pixel beherbergen [13] sondern auch noch kleiner werden, was den Bau immer kleinerer Kameras ermöglicht (siehe Abbildung 21).

Diese Fortschritte lassen sich natürlich auch im Bereich der astronomischen CCD-Kameras beobachten: So bietet SBIG mittlerweile mit der ST-10E eine CCD-Kamera mit annähernd 3 Megapixeln Auflösung [15] – und übertrifft damit sogar die WFPC2 (siehe 4.5 auf Seite 17) des Hubble Space Telescope an Bildauflösung! Es wird nun definitiv auch für den Amateur-Astronomen möglich, qualitativ hochwertige Bilder zu erstellen und dabei trotzdem all die Vorteile der CCD-Kameras zu nutzen. Damit ist es wesentlich mehr Menschen möglich, vom Räderwerk, das der wissbegierige Forscher in Abbildung 1 entdeckt, wieder ein Stückchen mehr zu erkennen...

Abbildungsverzeichnis

1	Holzschnitt von Camille Flammarion im Stil des 16. Jahrhun-	
	derts	3
2	Kodak CCD-Chip KAF-0400	5
3	Quantenausbeute eines CCD-Chips	6
4	Auslesemechanismus eines CCD-Chips	7
5	Bildschirmansicht Adobe Photoshop 5	8
6	Dunkelabzug	10
7	Blooming	11
8	Flatfield-Bild	11
9	Die Schulsternwarte des Gymnasiums Penzberg	12
10	SBIG ST-5C mit Steuercomputer	12
11	Die ST-5C wird an den Okularstutzen geflanscht	13
12	SBIG ST-5C am Teleskop	14
13	Aufnahme eines Objektes in der CCD-Steuersoftware CCDOPS	15
14	Aufnahmen des Jupiter mit verschiedenen Kameras	15
15	Jupiter mit Monden	16
16	unbearbeitetes Bild vom Erdmond	16
17	Nachbearbeitetes Bild vom Erdmond	16
18	Collage zweier Aufnahmen von M110	17
19	Saturn-Aufnahmen	18
20	Das Trapez im Orionnebel M42	18
21	Sony Cybershot DSC-P1	21

LITERATUR 23

Literatur

[1] Holzschnitt aus Camille Flammarion: L'atmosphère: météorologie populaire, Paris, 1888

- [2] Hamel, Jürgen: Geschichte der Astronomie, Birkhäuser-Verlag, Basel, 1998
- [3] Kunzmann, Peter; Burkard, Franz-Peter; Wiedmann, Franz: dtv-Atlas zur Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1991
- [4] Zimmermann, Helmut; Weigert, Alfred: ABC-Lexikon Astronomie, 8. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 1995
- [5] Schwinge, Wolfgang: Das Kosmos Handbuch Astrofotografie; Franckh-Kosmos Verlag Stuttgart, 1993
- [6] Acker, Agnès: Praxis der Astronomie, Birkhäuser Verlag, Berlin und Springer Verlag, Heidelberg, 1991
- [7] Tipler, Paul A.: Physik, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 1994
- [8] Martinez, Patrick; Klotz, Alain: A Practical Guide to CCD Astronomy, Cambridge University Press, Cambridge, 1998
- [9] Internet: http://www.astronomie.de
- [10] baader planetarium: Handbuch für die CCD-Kameras ST-4X bis ST-8
- [11] Neckel, Thorsten; Montenbruck, Oliver: Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2001, Verlag Sterne und Weltraum, Heidelberg, 2000
- [12] Internet: http://www.heise.de/newsticker/data/fr-22.07.00-000/
- [13] Internet: http://www.heise.de/newsticker/data/bo-23.09.00-000/
- [14] Meyer, Carsten: Eimerweise Pixel, Magazin für Computertechnik, c't, Ausgabe 14/1998
- [15] Internet: http://www.sbig.com/sbwhtmls/st10.htm

Dank

Danken möchte ich Herrn Dehm für die gute Zusammenarbeit bei der Inbetriebnahme und Verwendung der CCD-Kamera.

Außerdem bedanke ich mich bei den Teilnehmern der CCD-Mailingliste der Nürnberger Astronomischen Arbeitsgemeinschaft NAA für die Unterstützung bei der Literatursuche und der Auswertung von Ergebnissen.

Ich versichere, die Facharbeit selbst geschrieben zu haben un	ıd
nur die zitierten Quellen als Hilfsmittel zur Verfügung gehabt z	zu
naben.	

(Leonard Burtscher)