

Videokameras in der Astronomie

Der Hersteller »The Imaging Source« stellt eine ganze Serie neuer Farb- und Schwarz-Weiß-Kameras für astronomische Anwendungen bereit. Die Autoren des folgenden Beitrags untersuchten die Eigenschaften dieser Kameras und verglichen sie mit den »Klassikern« Philips ToUCam für die Planetenfotografie und Watec 120N für die Deep-Sky-Fotografie.

Von Christian und Peter Wellmann

Viele Amateurastronomen, die jahrelang mit einer Philips ToUCam Planetenbilder aufnahmen, stellen sich irgendwann die Frage, ob es nicht auch noch eine bessere Lösung gibt. Diese Frage gewinnt auch dadurch an Aktualität, dass fast alle Webcams auf die für die Hersteller unproblematischeren CMOS-Sensoren umgestellt werden, deren Eignung für astronomische Zwecke in keiner Weise nachgewiesen ist.

Wegen der stets vorhandenen Luftunruhe und der dadurch im Bild hervorgerufenen Unschärfe und Verzerrung kommen natürlich nur Videokameras mit einer schnellen Bildfolge in Betracht. Bei einer anschließenden Auswertung der vielen tausend Bilder eines Videos im Computer ermöglichen die Gesetze der Statistik und geeignete Schärfungsfilter erstaunliche Resultate. Doch welche neuen Kameras gewähren dem Astrofotografen einen Fortschritt in punkto Empfindlichkeit, Auflösung und Handhabung?

Auf dem Markt problemlos zu beschaffen sind die Kameras des Herstellers The Imaging Source (TIS). Hierbei handelt es sich eigentlich um Produkte für industrielle Zwecke, die es aber seit einiger Zeit

auch als astrofotografische Versionen gibt. Wir untersuchten einige dieser Kameras hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die Fotografie von Planeten, des Mondes und der Sonne im Vergleich zur weit verbreiteten ToUCam. Die Möglichkeit einer Langzeitbelichtung veranlasste uns, auch gleich die Eignung dieser Kameras für Deep-Sky-Aufnahmen im Vergleich zur Kamera 120N von Watec zu überprüfen. Dabei stießen wir übrigens im Internet auf widersprüchliche Daten von Chip- und Kamerahersteller bezüglich der Lichtempfindlichkeit und Auflösung.

Auswahl der Kameras

Digitale Kameras von The Imaging Source gibt es mit CCD-Chips von Sony in den Größen 640×480, 1024×768 und 1280×960 Pixel jeweils für monochrome oder Farbaufnahmen. Jede Kamera ist wahlweise mit einem USB- oder Firewire-Anschluss ausgestattet. Die Farbkameras können auch mit einem Infrarotsperfilter geliefert werden, auf das man aber bei astronomischen Kameras gerne verzichtet. Falls erforderlich, wird ein solches Filter später an Stelle eines Klarglasfilters als Staubschutz in das Filtergewinde des im

Lieferumfang enthaltenen Kamera-Adapters geschraubt.

Da die Lichteintrittsfenster vor den CCD-Chips nur mit äußerster Vorsicht und ohne Druck mit einem Wattestäbchen gereinigt werden dürfen, ist ein solcher Staubschutz ohnehin unverzichtbar. Bei der Auswahl sollte man beachten, dass für die Planetenfotografie 640×480 Pixel völlig ausreichen, bei Mond und Sonne ist die Größe 1280×960 Pixel ideal.

Von acht uns zur Verfügung stehenden TIS-Kameras untersuchten wir drei genauer (siehe Infokasten »Fünf Kameras im Vergleich« auf Seite 94). Aus den Ergebnissen konnten wir wegen Übereinstimmungen in den technischen Daten auch auf die anderen Kameras schließen.

USB oder Firewire? Die Stromversorgung der Kameras belastet den USB-Anschluss mit einem Strom von 0,5 Ampere bei einer Spannung von fünf Volt stark. Nutzt man einen Firewire-Anschluss, sind 0,2 Ampere bei zwölf Volt kein Problem. Preiswerte aktive Kabelverlängerungen, beispielsweise der Firma Lindy, arbeiten bei Firewire im Gegensatz zum USB problemloser. Nicht kompatible Schnittstellen gibt es seltener bei Firewire, die



Zwei Klassiker unter den digitalen Astrokameras sind die Watec 120N (links) und die unter Planetenfotografen verbreitete Philips ToUCam (Mitte). Die Eigenschaften dieser Geräte verglichen die Autoren mit Geräten des Herstellers The Imaging Source, von denen rechts im Bild eines zu sehen ist.

Datenrate spielt bei der Wahl keine Rolle. Wer über ein Notebook mit kleinem Firewire-Stecker ohne Stromversorgung verfügt, sollte es mit USB versuchen, in allen anderen Fällen ist Firewire die weniger problematische Lösung.

Monochrom oder Farbe?

Puristen werden sicherlich eine Monochromkamera wählen, ein Objekt nacheinander durch verschiedene Filter belichten und die so erhaltenen Aufnahmen im Computer zu einem Farbkomposit zusammensetzen. Belichtet man je ein Video durch ein Rot-, Grün- und Blaufilter, so kann man die drei gewonnenen Bilder später als RGB zu einem Farbbild kombinieren.

Bei einem LRGB-Komposit liefert ein monochromes Bild die Luminanz L. Darunter versteht man die Hell-Dunkel-Information des Objekts und damit das eigentliche Bild. Zusätzliche R-, G-, und B-Aufnahmen liefern die Farbinformation, die dann das Luminanzbild zum Farbbild macht. Ein Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Freiheit, passende Filter zu wählen. So ist beispielsweise für die Fotografie des Pferdekopfnebels ein H-alpha-Filter nahezu unverzichtbar, und ein Infrarotpassfil-

IN KÜRZE

Fragestellung: Wie gut eignen sich astronomische CCD-Videokameras von »The Imaging Source« für die Fotografie von Planeten, Mond und Deep-Sky-Objekten? Zum Vergleich werden die verbreiteten Klassiker Philips ToUCam für Planeten und Watec WAT 120N für Deep-Sky-Fotografie herangezogen. Dabei wird nicht nur auf technische Fragestellungen eingegangen, sondern auch das Erreichbare mit aussagekräftigem Bildmaterial belegt. Abschließend folgen ein Überblick über die Bildaufnahme-Software IC-Capture, sowie Anmerkungen zur Bildverarbeitung mit den Programmen Registax und Giotto.

Methode: Abbildungsschärfe, Lichtempfindlichkeit und Rauschverhalten der Kameras werden anhand von Belichtungsserien für Kurzzeitbelichtung untersucht. Dies ergibt ein klares Bild bezüglich der Eignung für Planeten- und Mondfotografie. Zusätzliche Belichtungsreihen mit langen Belichtungszeiten geben Auskunft über Rauschverhalten und Lichtempfindlichkeit im Hinblick auf die Deep-Sky-Fotografie.

Ergebnisse:

- Die monochrome DMK 21 ist ideal für Planetenaufnahmen im LRGB-Verfahren. Die farbige DBK 21 bietet für Optiken ab 20 Zentimeter Öffnung eine bequeme, gute Alternative für direkte Farbaufnahmen.
- Die weniger lichtempfindlichen monochromen Kameras DMK 31/41 eignen sich wegen ihrer kleinen Pixel und der größeren Pixelzahl hervorragend für die Fotografie des Mondes und der Sonne.
- Die entsprechenden Farbkameras eignen sich wegen ihrer erheblich geringeren Empfindlichkeit eher für die Sonnenfotografie.
- Alle Kameras eignen sich bedingt für die Aufnahme von Deep-Sky-Objekten mit langer Belichtungszeit. Die im Lieferumfang enthaltene Software IC-Capture ermöglicht eine sehr gute Steuerung der Kameras bei Video- und Bildaufnahmen.

ter für das Luminanzbild erhöht den Kontrast von Landschaftsstrukturen auf dem Mars. Nachteilig ist aber, dass wegen der Planetenrotation die erforderlichen drei RGB- oder vier LRGB-Videos unmittelbar hintereinander aufgenommen und später mit hohem Aufwand verarbeitet werden müssen.

Im Unterschied zu den RGB- und LRGB-Verfahren belichtet der mit einer Farbkamera ausgestattete Beobachter nur ein einziges Video und ist fertig! Ein Nachteil liegt hier aber in der Farbfiltermaske, die sich vor dem CCD-Chip befindet. Sie reduziert die Lichtempfindlichkeit und Schärfefeistung der Kamera und erschwert den Einsatz zusätzlicher Farbfilter. Wichtig ist es für den Anwender in erster Linie zu untersuchen, wie stark die Bildqualität und Empfindlichkeit einer Farbkamera unter dem Einfluss der Filtermaske leiden.

Planetenfotografie

Bei der anspruchsvollen Fotografie von Planeten geht es darum, durch die bestmögliche Nutzung der Auflösung des Teleskops auch feinste Details im winzigen fokalen Bild aufzuzeichnen. Dazu ist es unbedingt erforderlich, dass die Pixelgröße der Kamera möglichst exakt der Größe der kleinsten im fokalen Bild der Optik noch aufzulösenden Bildstruktu-

ren entspricht. Weist die Kamera zu große Pixel auf, so werden Details unterschlagen. Das fokale Bild sollte der Beobachter dann mit geeigneten Mitteln, beispielsweise mit einer Barlowlinse vergrößern. Sind die Pixel zu klein, so muss er wegen des zu großen fokalen Bildes auf dem

Eine wichtige Voraussetzung für gute Bilder ist die exakte Anpassung der Kamera an die Aufnahmeoptik.

Chip unnötig lange belichten, das fokale Bild sollte dann mit einer Reduzierlinse verkleinert werden.

Bei der Anpassung hilft die folgende Überlegung: Eine Optik bildet eine punktförmige Quelle als Beugungsfigur ab. Diese besteht aus einem zentralen Scheibchen, dem so genannten Airy-Scheibchen und lichtschwachen konzentrischen Beugungsringen, die das Scheibchen umgeben. Das fokale Bild eines flächenhaften Objekts setzt sich aus einander überlagernden Airy-Scheibchen zusammen. Der Durchmesser des von einer Optik mit dem Öffnungsverhältnis F bei einer Wellenlänge λ abgebildeten Airy-Scheibchens beträgt $2,5 \lambda F$. Würde man ein Airy-Scheibchen genau auf ein einzelnes Pixel der Breite x abbilden, so wäre $x = 2,5 \lambda F$. Will man auch die Kreisform

des Scheibchens ordentlich erfassen, so muss man es jedoch auf eine Fläche von mindestens 3×3 Pixeln abbilden. Unter Berücksichtigung der bei einem Interline-Transfer-Chip vorhandenen nicht lichtempfindlichen Zwischenräume zwischen den Pixeln ergibt das in etwa ein Quadrat

der Seitenlänge $5x$, und die obige Formel wird zu $5x = 2,5 \lambda F$. Damit gilt $F = 2x/\lambda$. So lässt sich jeder Videokamera ein Öffnungsverhältnis zuordnen, bei dem sie optimal genutzt wird.

Für die von uns untersuchten TIS-Kameras mit Pixelgrößen von 4,7 beziehungsweise 5,6 Mikrometern ergibt sich für eine mittlere Wellenlänge ein Öffnungsverhältnis von 17 beziehungsweise 20. Da sich bei den Farbkameras durch die geringere Bildschärfe die effektive Pixelgröße je nach Farbe und Form der Bildstrukturen im Mittel um einen Faktor 1,3 erhöht, steigen die Öffnungsverhältnisse für diese Kameras auf 22 beziehungsweise 26. Oberhalb dieses Werts verlängert man die Belichtungszeit unnötig ohne Detailgewinn, unterhalb davon verliert man Details zu Gunsten einer kürzeren Belich-

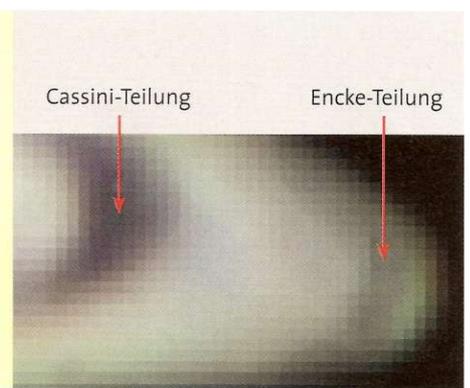
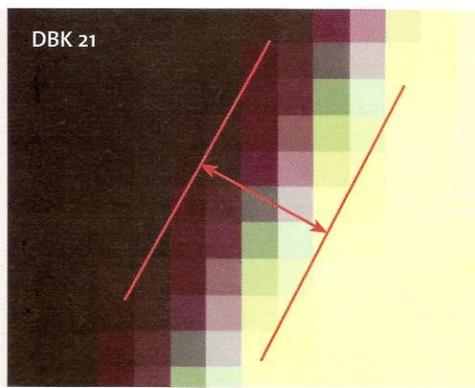
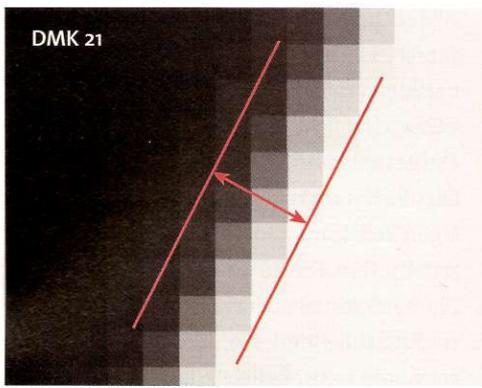
Fünf Kameras im Vergleich

Technische Daten der in diesem Beitrag beschriebenen Kameras im Vergleich. Die DBK- und DMK-Kameras von »The Imaging Source« gibt es mit CCD-Chips von Sony in den Größen 640×480 , 1024×768 und 1280×960 Pixel jeweils für

monochrome oder Farbaufnahmen, die klassische Watec-Kamera WAT 120N ist monochrom. Die Philips ToUCam arbeitet mit demselben CCD-Chip wie die DBK 21, ihre Elektronik ist jedoch in keiner Weise mit diesem vergleichbar!

Kamera	DMK 21AF04.AS	DBK 21AF04.AS	DMK 41AF02.AS	WAT 120N	TOU-Cam PRO
CCD-Chip	ICX 098 BL	ICX 098 BQ	ICX 205 AL	ICX 419 ALL	ICX 098 BQ
Chipgröße	4,6 × 4,0 mm	4,6 × 4,0 mm	7,6 × 6,2 mm	7,4 × 6,0 mm	4,6 × 4,0 mm
Bildformat	640 × 480	640 × 480	1280 × 960	768 × 576	640 × 480
Pixelgröße	5,6 × 5,6 µm	5,6 × 5,6 µm	4,65 × 4,65 µm	8,6 × 8,3 µm	5,6 × 5,6 µm
Belichtungszeit	$1/10000$ s – 60 min	$1/10000$ s – 60 min	$1/10000$ s – 60 min	$1/2000$ s – 10 s	$1/10000$ s – $1/25$ s
Maximale Bildrate*	60 fps	60/30 fps	15 fps	25 fps (interlace)	30 fps
Bilddaten	Y800 s/w	BY8/UYVY col.	Y800 s/w	PAL s/w	IYUV / I420 col.
Bildtiefe in Bit	8/10 intern	8/10 intern	8/10 intern	k. A.	8/10 intern
Verstärkung	0 – 36 dB	0 – 36 dB	0 – 36 dB	8 – 38 dB	k. A.
Stromverbrauch	200 mA/12 V	200 mA/12 V	200 mA/12 V	180 mA/12 V	k. A.
Datenübertragung	unkomprimiert	unkomprimiert	unkomprimiert	analoges Video	komprimiert
Gewicht	265 g	265 g	265 g	150 g	100 g
Größe des Kameragehäuses	50 × 50 × 56 mm	50 × 50 × 56 mm	50 × 50 × 56 mm	42 × 42 × 50 mm	48 × 48 × 69 mm

* Im Gegensatz zu den Angaben in den original Sony-Datenblättern liefern die TIS-Kameras auch bei der höchsten Bildrate die volle vertikale Auflösung. »fps« bedeutet Bilder pro Sekunde (englisch *frames per second*)



Die Abbildung veranschaulicht die Kantenschärfe der untersuchten Kameras. Die beiden Bilder links zeigen vergrößerte Aufnahmen einer Hell-dunkel-Kante, einmal mit der monochromen Kamera und ein weiteres Mal mit der Farbkamera aufgenommen. Die monochrome Kamera bildet die Kante schärfer ab. Den Unterschied von etwa 1,3 in der Breite verdeutlichen die roten Pfeile. Rechts ist eine mit dem der Pixelgröße optimal angepassten Öffnungsverhältnis aufgenommene Partie des Saturnrings zu sehen. Deutlich sind die Cassinische Teilung und die Encke-Teilung zu erkennen.

tungszeit, was jedoch bei sehr unruhiger Luft gelegentlich sinnvoll sein kann. Das bedeutet, dass bei einem üblichen Teleskop mit dem Öffnungsverhältnis 10 je nach Kamera und Luftunruhe (englisch Seeing) maximal eine 2,6-fach-Barlowlinse eingesetzt werden muss.

Wir verwenden die apochromatische Zweifach-Barlowlinse von Celestron, deren Verlängerungsfaktor durch Vergrößern des Kamera-Abstands auf bis zu dreifach gesteigert werden kann. Ein Newton-Teleskop mit Öffnungsverhältnis 5 würde eine bis zu fünffache Nachvergrößerung benötigen, um optimal an die Kameras angepasst zu sein. Man muss dann notgedrungen auf teurere Lösungen zurückgreifen, beispielsweise auf das Barlowsystem Televue Powermate oder den Baader-Flatfield-Konverter.

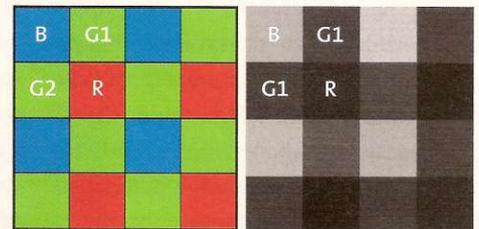
Dass diese theoretischen Betrachtungen gut zutreffen, belegen die oben gezeigten Aufnahmen einer scharfen Hell-dunkel-Kante mit den bis auf die Farbmaske technisch identischen Kameras DMK 21 und DBK 21. Bei Verwendung der Farbkamera bestätigt sich der oben erwähnte Faktor 1,3 in Form der größeren Breite der abgebildeten Kante.

Rechts daneben ist ein extrem vergrößerter Ausschnitt des Saturnrings zu sehen, den wir mit einem Öffnungsverhältnis von 26 aufgenommen haben. Die Cassini-Teilung ist grob sechs Pixel breit, und die mit dem verwendeten Teleskop gerade noch auflösbare Encke-Teilung ist mit einer Breite von zwei Pixeln zu erken-

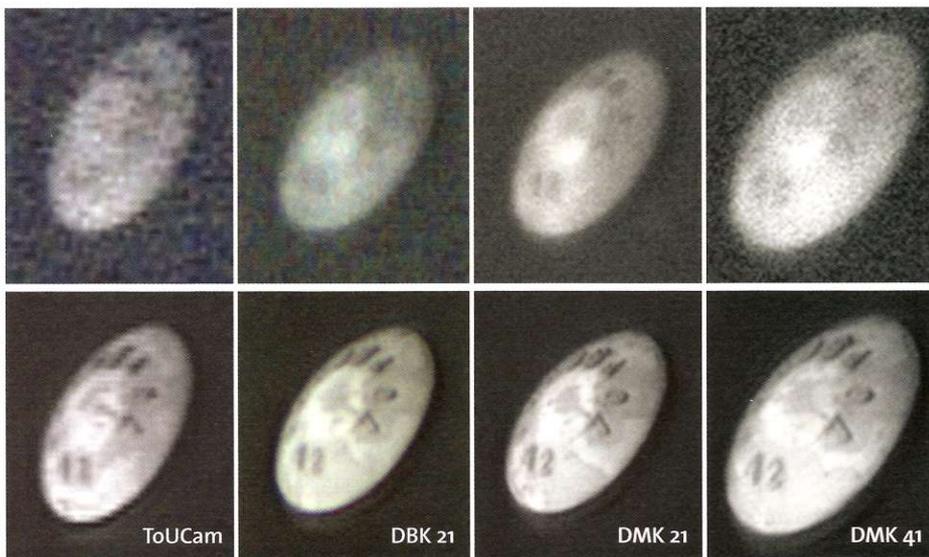
Wie kommt das Bild in den PC?

Die Schwarz-Weiß-Kameras von TIS lesen für jedes Pixel des CCD-Chips einen Grauwert in 256 Stufen aus. Dafür müssen acht Bit zum PC übertragen werden. Jeder dieser Werte liefert später im Schwarz-Weiß-Bild einen Bildpunkt. Bei den Farbkameras befindet sich vor dem CCD-Chip eine Filtermaske. Sie enthält in Gruppen von 2x2-Quadraten jeweils in der linken oberen Ecke ein blaues, in der rechten unteren Ecke ein rotes, und in den beiden restlichen Ecken ein grünes Filter. Sie ist in der farbigen Grafik dargestellt. Das Bild daneben zeigt einige Pixel aus der RAW-Aufnahme einer blaugrünen Fläche.

Jedes Pixel wird nun wie bei einer Schwarz-Weiß-Kamera in 256 Graustufen mit acht Bit ausgelesen, die in diesem RAW-Format zu übertragende Datenmenge ist also auch nicht höher als bei einer Schwarz-Weiß-Kamera. Die Bildpunkte des Farbbilds müssen nun aus diesem schwarz-weißen RAW-Bild berechnet werden. Da die zur Verfügung stehende Datenmenge nicht höher ist als bei einem reinen Schwarz-Weiß-Bild, müssen Einbußen bei der Bildqualität hingenommen werden. Wie sich diese Einschränkungen auswirken, hängt von der jeweiligen Umrechnung in das Farbbild ab. Normalerweise werden Grauwerte zu Lasten der Farbwerte möglichst exakt berechnet, da sie beim menschlichen Auge die Schärfe eines Bildes bestimmen. Die TIS-Kameras berechnen intern das UYVY-Farbformat, bei dem für einen Bildpunkt 16 Bit pro Pixel anfallen, mit doppelter Gewichtung des Grauwerts Y gegenüber den einzelnen Farbwerten U und V. Die TIS-Kameras müssen also für ein Farbbild doppelt so viele Daten zum PC übertragen, wie für ein Schwarz-Weiß- oder RAW-Bild.



Der Datentransfer von Kamera zum PC erfolgt nach den DCAM-Spezifikationen und belastet den 400-Mbit/s-Firewire-Bus bei dreißig 640x480-UYVY-Bildern pro Sekunde zu 64 Prozent. Das RAW-Format erfordert nur die halbe Datenmenge. Bei gleicher Belastung lassen sich doppelt so viele Bilder übertragen, was eine Bildfolge von 60 Bildern pro Sekunde ermöglicht. Deshalb lässt sich bei den TIS-Farbkameras wahlweise die interne Berechnung des Farbbilds ausschalten, die Kameras übertragen dann das RAW-Format BY8 und rechnen es erst im PC in ein UYVY-Farbbild um.



Bilder eines Schraubenkopfs auf einem entfernten Hausdach nahmen die Autoren mit verschiedenen Kameras auf. Die obere Zeile veranschaulicht das jeweilige Bildrauschen. Dargestellt sind hier Einzelbilder mit einer für alle Kameras gleichlangen grenzwertigen Belichtungszeit und gleichen Kamera-parametern. Die untere Zeile gibt die nach einer Addition von jeweils 1000 Aufnahmen und anschließender Bildbearbeitung erreichbare bestmögliche Bildschärfe wieder.

nen. 26 war also tatsächlich das optimale Öffnungsverhältnis für die verwendete Farbkamera.

■ **Abbildungsschärfe:** Um die Abbildungsschärfe der Kameras unter realen Bedingungen zu veranschaulichen, fotografierten wir mit einem Meade ETX bei absolut konstanten Lichtverhältnissen und gleicher Einstellung der Kameraparameter einen Schraubenkopf auf einem entfernten Dach. Das für die Kameras eigentlich zu kleine Öffnungsverhältnis 14 garantierte dabei ein absolut scharfes Bild auf dem CCD-Chip.

Unter günstigen Lichtbedingungen nahmen wir Videos mit tausend Bildern auf, mit einer Rate von dreißig Bildern pro Sekunde bei der DBK und den DMK-Kameras sowie 20 Bildern pro Sekunde bei der ToUCam. Die Aufnahmen überlagerten wir mit der Bildbearbeitungssoftware Giotto, und schärften sie anschließend mit Photoshop. Das Ergebnis zeigt die untere Zeile der obigen Abbildung, in der die Bildausschnitte mit dem Schraubenkopf dargestellt sind.

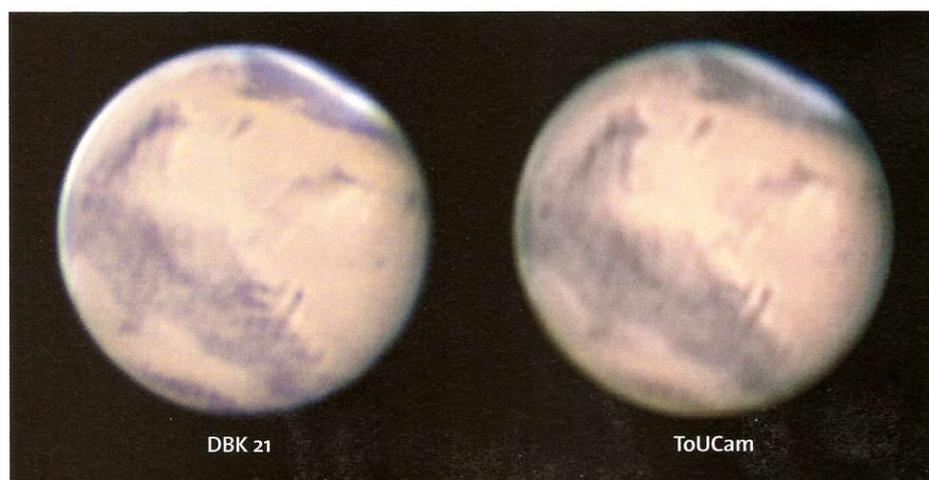
Obwohl die ToUCam denselben CCD-Chip nutzt wie die DBK 21, zeigt sie die geringste Schärfe. Dies ist nicht verwunderlich, weil die ToU-Cam mit der geringen Datenrate des USB 1.1 überträgt, und daher die Bilddaten komprimiert. Bei 20 Bildern pro Sekunde (englisch frames per second, fps) ist das Bild zwar unschärfer als bei geringeren Bildraten, es lässt sich aber wegen der Rauschfilterwirkung der starken Datenkompression extrem gut Nachschärfen. Deshalb verwenden wir die ToUCam prinzipiell nur mit 20 fps.

Deutlich besser schneidet die Farbkamera DBK 21 (640 × 480 Pixel) ab, Spitzenreiter sind aber die monochromen Kameras DMK 21 (640 × 480 Pixel), und DMK 41 (1280 × 960 Pixel). Das Bild der DMK 41 ist wegen der etwas kleineren Pixel (4,7 statt 5,6 Mikrometer) etwas größer als die Bilder der anderen Kameras. Die Kamera von Watec wurde hier nicht berücksichtigt, weil sie im Interlace-Verfahren arbeitet. Dabei werden zwei nacheinander erzeugte Halbbilder mit den geraden beziehungsweise ungeraden Zeilen zum Vollbild zusammengesetzt, was bei Luftunruhe zu einem

hässlichen »Kammeffekt« führt, hervorgerufen durch eine Verschiebung der beiden Teilbilder gegeneinander.

■ **Belichtungszeiten:** Da sich bei Öffnungsverhältnissen von 17 bis 26 leider keine sehr hellen Planetenbilder erzeugen lassen und die Belichtungszeiten wegen der erforderlichen hohen Bildrate nicht zu lang werden dürfen, ist das Rauschverhalten der Kameras bei geringer Lichtstärke ein sehr wichtiges Kriterium. Zur Überprüfung nahmen wir bei sonst gleich eingestellten Kameraparametern mit einer für alle Kameras gleichen, grenzwertigen Belichtungszeit Einzelbilder auf, die in der oberen Zeile der obigen Abbildung dargestellt sind. Die Aufnahmen verdeutlichen das Rauschverhalten der Kameras bei Kurzzeitbelichtung. Am schlechtesten schneidet die ToUCam ab, gefolgt von DMK 41, DBK 21 und DMK 21.

Senkt man durch Brennweitenverkürzung den wegen der kleineren Pixel etwas größeren Abbildungsmaßstab der DMK 41 auf das Niveau der anderen Kameras, so steigt die Lichtstärke zu Gunsten der



Den Planeten Mars nahmen die Autoren am 19. Dezember 2007 zweimal kurz nacheinander durch ein 30-Zentimeter-Schmidt-Cassegrain-Teleskop auf. Das linke Bild belichteten sie mit einer DBK 21, das rechte mit einer Philips ToUCam. In der linken Aufnahme treten die Details schärfer hervor.

DMK 41, dem Verhältnis der Pixelflächen entsprechend, um den Faktor 1,5 an. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache stellten wir folgendes fest: Um ein gleich großes Bildrauschen wie bei der DMK 21 zu erhalten, muss bei Kurzzeitbelichtung bei null Grad Celsius mit der DMK 41 etwa 1,9 Mal so lange, und mit der DBK 21 sogar 2,8 Mal so lange belichtet werden wie mit der DMK 21. Verzichtet man auf ein Infrarotfilter, so steigt die Empfindlichkeit aller Kameras um etwa ein Drittel.

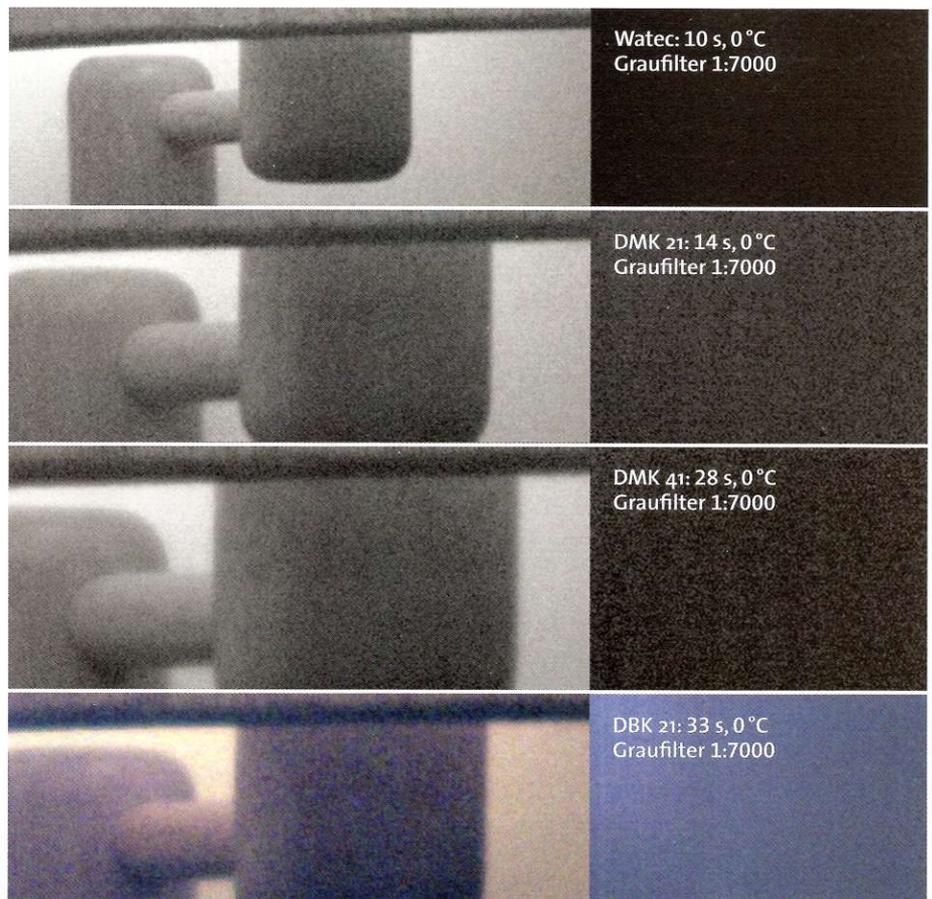
■ **Fazit:** Wer die oben angedeutete sehr aufwendige Bildverarbeitung nicht scheut, für den ist die DMK 21 der eindeutige Sieger. Besitzer kleiner Optiken, welche die volle Auflösung ihres Teleskops ausreizen wollen, sind ebenfalls mit der DMK 21 optimal bedient. Wer in einem Bruchteil der Zeit und mit geringer Erfahrung zu recht brauchbaren Ergebnissen kommen möchte, dem empfiehlt sich die DBK 21.

Auch Besitzer von Optiken mit großen Durchmessern müssen nicht unbedingt die hohe theoretische Auflösung ihres Teleskops voll nutzen und können daher mit etwas kleinerem Öffnungsverhältnis genügend helle und große Bilder erzeugen, um die Nachteile der Farbkamera auszugleichen. Auch ein Kompromiss wäre denkbar: Man erzeugt mit der DMK 21 ein Luminanzbild und die weniger kritische Farbinformation mit der DBK 21 oder der ToUCam.

Was sich mit der DBK 21 und einem 30-Zentimeter-Schmidt-Cassegrain-Teleskop bei einem Öffnungsverhältnis von 26 ohne Mühe erreichen lässt, und wie das Ergebnis im Vergleich zur ToUCam aussieht, zeigen die Marsbilder links unten, die wir kurz nacheinander unter identischen Bedingungen aufnahmen. Bei genauem Hinsehen ist die bessere Bildqualität der DBK 21 eindeutig zu erkennen. Die monochrome DMK 41 erfordert deutlich längere Belichtungszeiten. Sie ist daher, auch wegen der größeren Pixelzahl, für großflächige helle Objekte wie Mond und Sonne ideal, wie auch die Aufnahme der Hyginusrille auf Seite 102 zeigt.

Deep-Sky-Fotografie

Das Verhalten einer Kamera ändert sich gegebenenfalls deutlich mit der Belichtungszeit, daher lassen sich die bei der Planetenfotografie gewonnenen Daten nur begrenzt auf die Langzeitbelichtung übertragen, und es sind neue Untersuchungen



Bilder mit gleich großem Bildrauschen (linke Spalte) und die zugehörigen Dunkelstromaufnahmen (rechte Spalte) lassen einen Vergleich der Lichtempfindlichkeit der untersuchten Kameras zu.

erforderlich. Zum Vergleich zogen wir die bewährte Kamera 120N von Watec heran. Da Luftunruhe und Nachführfehler bei Langzeitbelichtung das Bild prinzipiell mehr oder weniger verschmieren, ist ein Betreiben der Kamera an der theoretischen Auflösungsgrenze der Optik keinesfalls sinnvoll.

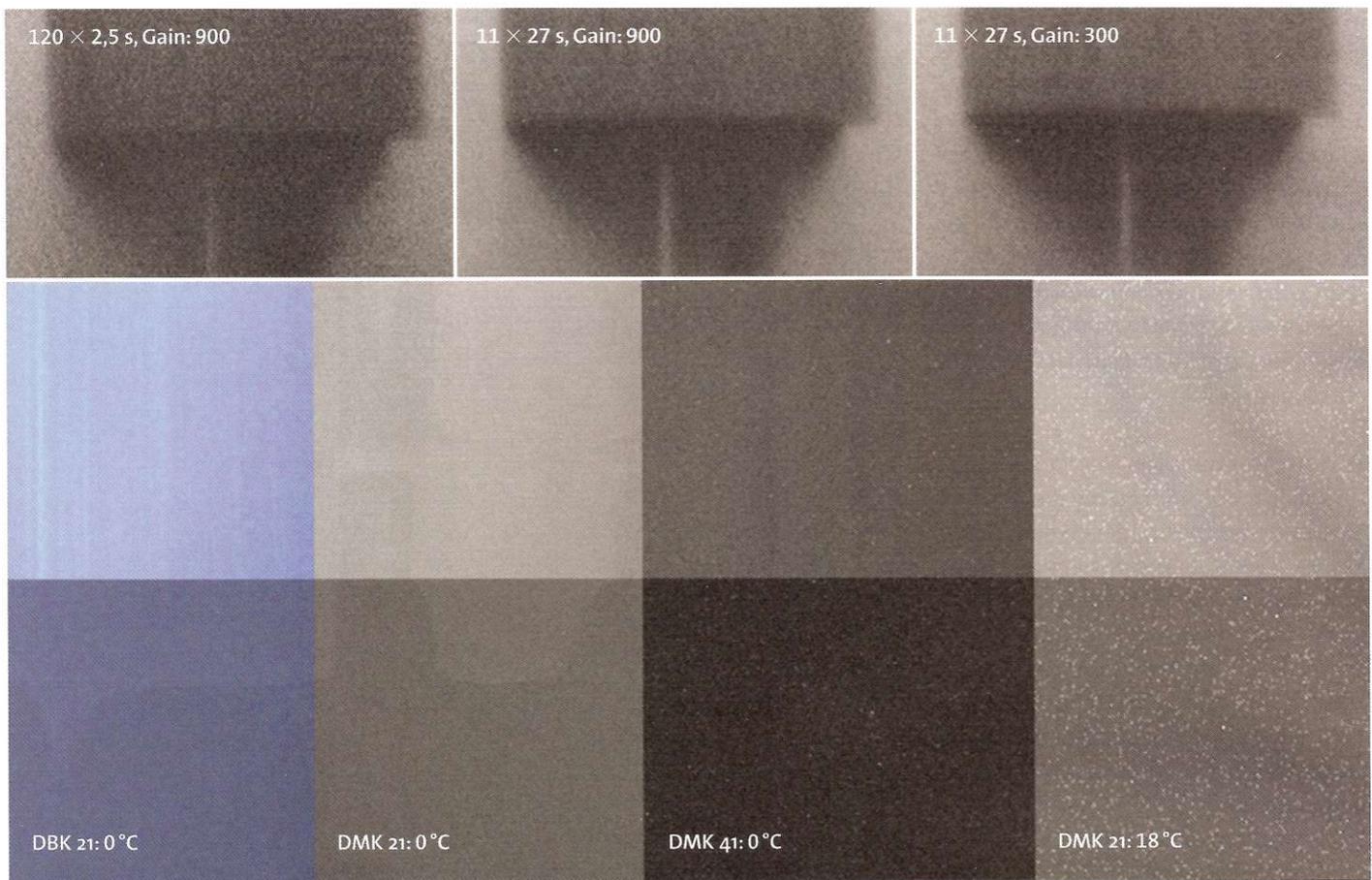
Ist bei den TIS-Kameras bei der Fotografie von Planeten ein Öffnungsverhältnis von bis zu 26 erforderlich, so sind die Kameras bei Deep-Sky-Aufnahmen hinsichtlich der Bildschärfe bereits beim Öffnungsverhältnis 10 oder sogar darunter weitgehend ausgereizt. Wegen der geringen Lichtstärke der Objekte ist es viel wichtiger zu klären, ob überhaupt noch rauscharme Bilder gewonnen werden können. Da viele Nebel und Galaxien im Vergleich zu Planeten riesengroß sind, ist es auch von erheblicher Bedeutung, wie groß der am Himmel dargestellte Ausschnitt ist.

■ **Belichtungszeiten:** Beim Vergleich der Belichtungszeiten müsste man eigentlich durch Anpassung der Brennweite dafür sorgen, dass das Testbild auf den

Chips aller Kameras stets exakt dieselbe Pixelzahl überdeckt. Dann ist die für eine vergleichbare Bildqualität erforderliche Belichtungszeit ein direktes Maß für die relative Empfindlichkeit der Kameras untereinander. Da uns kein Zoomobjektiv zur Verfügung stand, um diese Anpassung vorzunehmen, arbeiteten wir mit einer festen Brennweite, und passten die Lichtstärke durch Verändern der Blende an die Pixelgröße an. Ein Schönheitsfehler dieser Methode ist lediglich der mit der Pixelgröße variierende Abbildungsmaßstab.

Wir ermittelten dann bei gleicher Einstellung aller anderen Kameraparameter bei null Grad Celsius diejenige Belichtungszeit, die ein gleiches Rauschen wie bei einem zehn Sekunden belichteten Referenzbild der Watec ergab. Um die Helligkeit eines prominenten Deep-Sky-Objekts zu simulieren, setzten wir ein Neutralfilter 1:7000 vor die verwendete Zeiss-Optik, die Bildhelligkeit liegt damit weit unter der Helligkeit des Orionnebels.

Die so gewonnenen Aufnahmen identischer Qualität zeigt die Abbildung oben. Ihre Belichtungszeiten ermöglichen einen



Die Aufnahmen der oberen Zeile zeigen das Rauschen in Abhängigkeit von der Belichtungszeit und vom Verstärkungsfaktor (englisch *gain*). Die mittlere und untere Zeile zeigen für die genannte Kamera die linke obere beziehungsweise die rechte untere Ecke eines 315 Sekunden belichteten Darkframe.

direkten Vergleich der Kameras hinsichtlich einer Langzeitbelichtung. Im Ergebnis liegen die DMK 21 mit 14 Sekunden und die Watec mit zehn Sekunden annähernd gleichauf, die DBK 21 und DMK 41 liegen mit 28 Sekunden und 33 Sekunden grob um einen Faktor drei schlechter als die Watec, und etwa um einen Faktor zwei schlechter als die DMK 21.

■ **Dunkelstrom:** Bei der Fotografie sehr lichtschwacher Objekte mit langer Belichtungszeit liefern mehrere unerwünschte Effekte störende Helligkeitsstrukturen im Bild. Ein Großteil davon zeigt sich bereits, wenn man ein Bild bei völliger Dunkelheit, ein so genanntes Darkframe, aufnimmt. Einige dieser Effekte nehmen mit sinkender Temperatur ab, und die Kameras arbeiten umso besser, je kälter es ist. So zeigt beispielsweise unsere Watec bei einer Temperatur von zwanzig Grad Celsius auf einem Videomonitor mehr fehlerhaft helle Pixel als Sterne, bei Temperaturen unter null Grad Celsius ist dieser Effekt nicht mehr störend. Wir unter-

suchten die Kameras bei einer sinnvollen mittleren Temperatur von null Grad Celsius. Ausschnitte aus den zu unseren »Normbildern« gehörenden Darkframes sind verkleinert in der rechten Spalte des Bildes auf Seite 97 zu sehen. Einzig das Darkframe der Watec ist fast ideal schwarz, während bei allen TIS-Kameras eine deutlich ungleichmäßige Helligkeit zu erkennen ist.

Im Gegensatz zur Watec können TIS-Kameras länger als zehn Sekunden belichten, und es fragt sich, ab welcher Belichtungszeit die zunehmende Helligkeit im Darkframe eine weitere Steigerung nicht mehr zulässt. Dazu belichteten wir Darkframes bei einer Temperatur von null Grad Celsius 315 Sekunden lang. Die mittlere und untere Zeile der obigen Abbildung zeigt beginnend mit den blauen Feldern links jeweils die linke obere Ecke und darunter die rechte untere Ecke dieser Darkframes. Ideal schwarze Bilder zeigen sich erwartungsgemäß nicht, die bei allen drei Dunkelbildern von rechts unten nach links oben zunehmende, unerwünschte

Helligkeit ist auf die ungleichmäßige Erwärmung der Chips durch die Elektronik und gewisse Vorgänge beim Auslesen der Bildinformation zurückzuführen.

Um den Einfluss der Temperatur zu verdeutlichen, haben wir exemplarisch rechts in der Abbildung oben das Darkframe der DMK21 bei 18 Grad Celsius dargestellt. Zusätzlich zu der bei null Grad Celsius sichtbaren Aufhellung zeigen sich bei der höheren Temperatur noch hunderte unerwünschter, heller Pixel. Die große Helligkeit der Darkframes zeigt, dass mit 315 Sekunden für DMK 21 und DBK 21 die bei null Grad Celsius sinnvolle Belichtungsgrenze wohl erreicht ist, einzig die DMK 41 könnte noch längere Zeiten verkraften.

Alle Darkframes zeigen verschiedene ungleichmäßige Strukturen, zu deren Entfernung bei der Fotografie sehr lichtschwacher Objekte ein Flatfield zwingend erforderlich ist (siehe Infokasten »Wozu Darkframe und Flatfield?«). Zusätzlich können einige Kameras gewisse Bildstörungen zeigen, die wir hier nicht näher erläutern, weil sie sich beim Einhalten



Das links gezeigte Mosaik des Orionnebels besteht aus zwei Bildern. Die hierfür erforderlichen Videos umfassen 200 Belichtungen zu je fünf Sekunden. Das Farbkomposit des Pferdekopfnebels (rechts) basiert auf Aufnahmen mit einer Watec-Kamera.

folgender Regeln vermeiden lassen: Bei den 21er-Kameras mit Firewire sollten für Deep-Sky-Aufnahmen nur die Bildraten von 7,5 fps und weniger eingestellt werden. Mit den 31er- und 41er-Modellen sollte der Astrofotograf bei Deep-Sky-Aufnahmen länger als 0,3 Sekunden belichten.

■ **Zusammenfassung:** Um ein Deep-Sky-Objekt mit großer Winkelausdehnung auf dem kleinpixeligen, winzigen ¼-Zoll-Chip der TIS-Kameras mit 640×480 Pixeln unterzubringen, muss das Bild sehr klein sein. Das erfordert eine Aufnahmeoptik mit extrem kurzer Brennweite, wie sie sich bei handelsüblichen Teleskopen auch mit Reduzierlinsen kaum erreichen lässt. Diese Kameras eignen sich also primär zur Fotografie von planetarischen Nebeln und anderen kleinen Objekten. Etwas günstiger ist da schon der größere ½-Zoll-Chip der DMK41, der aber leider deutlich längere Belichtungszeiten benötigt.

Lediglich die Watec liefert einen lichtempfindlichen Chip mit ausreichender Größe, gepaart mit dem besten Dunkelstromverhalten ist sie daher für großflächigere Deep-Sky-Objekte der beste Kompromiss. Wie im oberen linken Teil der Abbildung auf Seite 98 zu erkennen ist, steigt die Qualität einer Aufnahme, wenn bei gleichbleibender Gesamtbelich-

tungszeit beispielsweise statt mit 120×2,5 Sekunden mit 11×27 Sekunden gearbeitet wird. Lässt die Montierung also längere Belichtungszeiten zu, so kann man auf diese Weise die Bildqualität der TIS-Kameras der auf zehn Sekunden begrenzten Watec weiter annähern.

Was sich mit relativ geringer Mühe und einem einfachen Spiegelobjektiv mit 50 Zentimetern Brennweite und Blende 5,6 erreichen lässt, zeigt die Abbildung des Orionnebels oben. Aufwändiger ist das

daneben gezeigte Komposit des Pferdekopfnebels oben. Es entstand unter Anwendung eines H-alpha-Filters für Luminanz und verlangte eine wesentlich umfangreichere Bildverarbeitung unter Einbeziehung eines Flatfields. 420 Bilder, je zehn Sekunden belichtet, waren für jedes Video erforderlich. Der zur Aufnahme verwendete Refraktor hatte eine Brennweite von 33 Zentimetern bei einem Öffnungsverhältnis von 3. Die sehr kurze Brennweite erzielten wir mit einem preiswerten kleinen 0,5-

Wozu Darkframe und Flatfield?

Ein Dunkelbild (englisch *darkframe*) ist eine Aufnahme bei völlig abgedunkelter Kamera, jede dort auftretende Helligkeit ist also unerwünscht. Dennoch sind die Helligkeitswerte eines Darkframes nicht gleich null. Sie entstehen unter anderem dadurch, dass aufgrund der Temperatur des Chips Ladungsträger aus dem Halbleitermaterial der Pixel ausgelöst werden. Die durch den Dunkelstrom verursachten Helligkeitswerte des Darkframes werden von denen des Objektbilds subtrahiert, der Dunkelstrom ist damit weitgehend eliminiert.

Ein Flatfield ist die Aufnahme eines schwach grauen, gleichmäßig ausgeleuchteten Hintergrunds, auf der sich alle Fehler des Chips in Form ungleichmäßiger Helligkeit abbilden. Dividiert man nun Pixel für Pixel die Helligkeitswerte des Objektbilds durch die Helligkeitswerte des Flatfields, so werden im günstigsten Fall alle genannten Störungen aus dem Bild entfernt. Darkframe und Flatfield müssen zusammen mit der eigentlichen Aufnahme unter möglichst identischen Bedingungen, also auch gleicher Temperatur und Belichtungszeit, aufgenommen werden. Eine nähere Erläuterung dieser Problematik würde allerdings den Rahmen dieses Berichts sprengen.

fach-Fokalreduktor, den wir anstelle des Klarglasfilters direkt auf das Filtergewinde der Kamera schraubten. Verwendet wurde die Watec. Mit den TIS-Kameras, vorzugsweise mit der DMK 21, lassen sich jedoch ähnliche Ergebnisse erzielen.

Wer die TIS-Kameras also für die Planetenfotografie erworben hat, kann – speziell bei niedrigen Außentemperaturen – ruhig einen Deep-Sky-Versuch wagen, muss sich aber mit sinkender Objektivhelligkeit auf einen immer größer und anspruchsvoller werdenden Arbeitsaufwand einstellen, bei dem das Ergebnis auch sehr von der fehlerfreien Funktion der zur Einrechnung des Flatfields verwendeten Software und von der Erfahrung des Fotografen abhängt.

Software

Wer mit der Watec erfolgreich arbeiten will, benötigt einen optimal funktionierenden analogen Videoeingang am PC, was wegen der oft miserablen Qualität der angebotenen Geräte ein schwer lösbares Problem ist! Die Installation der TIS-Kameras ist hingegen einfach, mit der beigefügten Software IC-Capture 2.0 lassen sich die Kameras (in der freigeschalteten Version auch die Watec) steuern. Sie ermöglicht die bequeme zeit- und bildgesteuerte Aufnahme von Videos und Bildserien. Das gewonnene Material lässt sich später mit Programmen wie Giotto oder Registax bestens verarbeiten. Die Nutzung der Funktionen von IC-Capture ist relativ einfach zu erlernen. Hierfür steht auch eine englischsprachige Hilfefunktion zur Verfügung, eine deutschsprachige Version ist in Vorbereitung. Im Folgenden werden daher nur Hinweise zu einigen Punkten gegeben, die sich dem Nutzer nicht sofort von selbst erschließen.

■ **Videoformat:** Zur Aufnahme von Schwarz-Weiß-Bildern wählt man für die Kamera das Format Y800, und den Codec (Codierungsverfahren im PC) »unspecified« oder Y800. Die erstellten Videos benötigen dann ein Minimum an Speicherplatz. Bei Farbbildern wählt man kameraintern UYVY, und den Codec »unspecified« oder UYVY. Die Wahl von »RGB24« erhöht den Speicherbedarf und bringt keinen erkennbaren Vorteil. Sind andere Codecs auf dem PC installiert, so kann der Anwender damit ebenfalls experimentieren, besonders gut bewährt sich bei uns ein mäßig komprimierender MJPG-Codec, der die Datenflut stark reduziert. Kameraintern kann auch das RAW-Format BY8 eingestellt werden,

was die Datenrate zum PC halbiert. Am PC benötigt man dann die Option »Debayering« in der Einstellung »BG« und »edge sensing« für die Wahl des Algorithmus zur PC-internen Umrechnung des RAW-Formats in das Farbformat, die den PC bei der Aufnahme zusätzlich belastet.

■ **Bildparameter:** Der Regler für die Helligkeit zeigt eine nur geringe Wirkung, normalerweise steht er ganz links. Die Einstellung der Verstärkung (englisch *gain*) sollte bei Deep-Sky-Aufnahmen relativ weit rechts stehen, sehr kritisch in Bezug auf die Bildqualität ist sie aber nicht, wie die identische Qualität der beiden Bilder im oberen rechten Teil der Abbildung auf

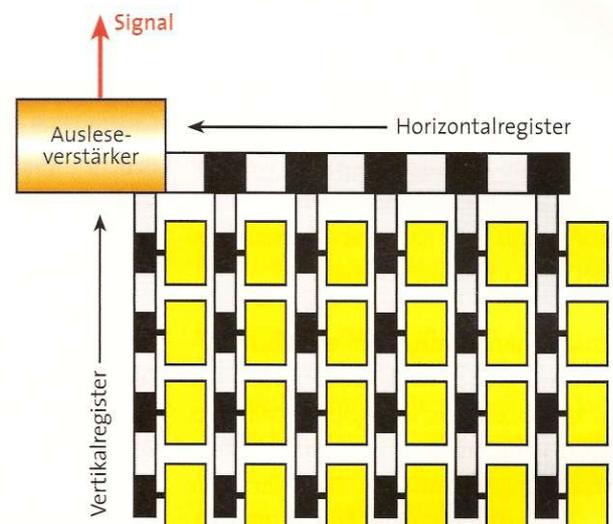
Seite 98 zeigt. Bei der Planetenfotografie positioniert man diesen Regler möglichst weit links, was aber wegen der dann erforderlichen langen Belichtungszeit nur begrenzt möglich ist.

Bei Farbbildern ist eine sehr genaue Einstellung der Farbbalance erforderlich, wir arbeiteten oft mit 60 für Blau und 26 für Rot, bei Aufnahmen ohne Infrarotsperrfilter reduzierten wir Rot auf 23. Der Regler für den Farbton (englisch *hue*) stand bei 180 in Mittelstellung. Da die Kameras zu einer eher kräftigen Farbgebung neigen, haben wir den Regler für die Farbsättigung aus der Mittelstellung leicht nach links auf Positionen zwischen 100 und 110 geschoben. Planeten sind helle Scheiben mit

Was ist ein Interline Transfer Chip?

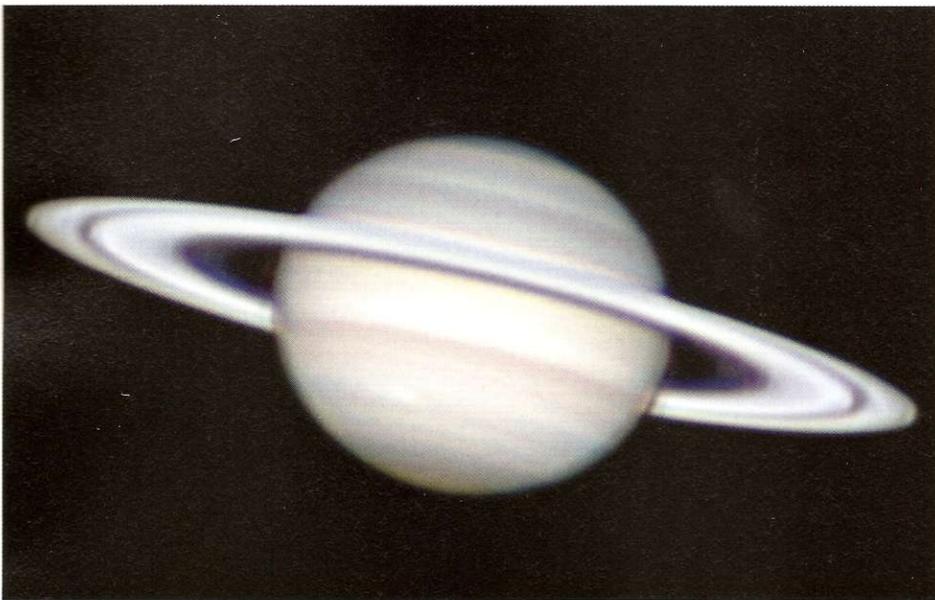
Bei einem CCD-Chip sind die lichtempfindlichen Pixel in Zeilen und Spalten angeordnet. Bei einem Interline Transfer Chip, wie er in den Kameras des Herstellers »The Imaging Source« verwendet wird, gibt es unmittelbar neben jedem aktiven Pixel einen nicht aktiven »Zwilling«. Diese Zwillinge bilden die Vertikalregister (siehe Grafik).

Am Ende der Belichtungszeit werden durch einen elektrischen Impuls (englisch *electronic shutter*) die Ladungen aller aktiven Pixel in die Vertikalregister geschoben, die aktiven Pixel können sofort neu belichtet werden. Dieses Verfahren ermöglicht sehr kurze Belichtungszeiten, und zum Beenden der Belichtung benötigt man keinen mechanischen Verschluss.



Die Ladungen der oberen Zeile werden nun im Horizontalregister Pixel für Pixel nach links in den Ausleseverstärker geschoben. Dann werden alle verbliebenen Pixelladungen in den Vertikalregistern um eine Position nach oben geschoben, um die zweite Zeile auszulesen. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis auch die letzte untere Zeile ausgelesen ist. Insbesondere die Ladung des letzten Pixels rechts unten muss also viele hundert oder tausend Mal umgeladen werden, bis sie ausgelesen werden kann. Es grenzt an ein Wunder, dass das überhaupt funktioniert!

Der Platzbedarf für die inaktiven Pixel reduziert die Größe der lichtempfindlichen Fläche auf dem CCD-Chip, und damit die Lichtempfindlichkeit, im ungünstigsten Fall um einen Faktor zwei. Es gibt daher Ausführungen, bei denen winzige Mikrolinsen das sonst verlorene Licht sammeln, und auf die aktiven Pixel lenken. Bei einem »Full Frame Chip« gibt es die inaktiven Zwillinge nicht, wodurch sich die Lichtempfindlichkeit erhöht. Während des Auslesevorgangs dürfen die Pixel allerdings nicht weiter belichtet werden, was normalerweise einen mechanischen Verschluss erfordert, und sehr kurze Belichtungszeiten ausschließt.



Saturn am 20. Februar 2008 um 00:05 Uhr MEZ, aufgenommen mit der Kamera DBK 21 von TIS. Die Autoren mittelten 5000 Bilder und schärfen mit der Software Giotto. Das Resultat zeigt Wolkenbänder, einen Sturm unten links und ganz außen im Ring sogar Andeutungen der Encke-Teilung!

kontrastarmen, hellen Bildteilen. Ein kleiner Gammawert differenziert diese hellen Bildteile besser, der Gammaregler steht deshalb ganz links.

Bei Deep-Sky-Objekten haben wir ein dunkles Bild mit wenig Aufhellung, ein großer Gammawert differenziert die dunklen Bildteile besser, der Regler sollte daher um so weiter rechts stehen, je lichtschwächer das Objekt ist. Die USB-Kameras weisen eine andere Skala für den Gammaregler auf, dort liegt der nutzbare Bereich etwa zwischen 100 und 220. Die Bildfrequenz der Kameras passt sich nicht fließend an die Belichtungszeit an, beispielsweise arbeitet die Kamera bei $\frac{1}{30}$ Sekunde optimal mit 30 fps, bei $\frac{1}{27}$ Sekunde fällt die Bildrate auf 15 fps, und viel Zeit zum Lichtsammeln wird verschenkt!

■ **Bildverarbeitung:** Für die Aufbereitung von Planetenbildern bevorzugen wir das Programm Giotto. Es arbeitet bei der Überlagerung und Schärfung mit dem Mexican-Hat-Filter hervorragend. Bei verauschten Planetenaufnahmen verwenden wir übrigens fast immer alle Bilder eines Videos. Dies verringert zwar zunächst die Schärfe des Summenbilds, das sich dann aber wegen des geringeren Rauschens stärker nachschärfen lässt. Eine Auswahl nach Bildqualität verlängert die Rechenzeit und ist nur sinnvoll, wenn genügend viele unverrauschte Bilder im Video zur Verfügung stehen, wie etwa bei Mondaufnahmen.

Da große Mondbilder der DMK 41 wegen der Luftunruhe nie über die ganze Fläche gleichmäßig scharf sind, bringt die Aufteilung des Bildes in mehrere Bereiche, die unabhängig voneinander bearbeitet werden, die Funktion »Multipoint« von

Registax, einen Gewinn an Bildschärfe. Großflächige Bilder prozessieren wir daher mit dem Programm Registax, und exportieren die Ergebnisse zum Schärfen nach Giotto. Unsere Deep-Sky-Bilder erstellen wir mit Giotto unter Einbeziehung eines Flatfields und verarbeiteten sie mit einer Bildtiefe von 16 Bit. Darkframes verwendeten wir nicht.

■ **Datensicherung:** Die Funktion »Region of interest« (ROI) gestattet bei den TIS-Kameras die Wahl beliebiger Bildausschnitte, und sollte bei der Planetenfotografie genutzt werden, um die große anfallende Datenmenge drastisch zu reduzieren. So benötigt man für ein farbiges Planetenvideo mit 5000 Bildern etwa zwei Gigabyte. Ein Schwarz-Weiß-Video der DMK 41 belegt im Vollformat für 850 Bilder knapp ein Gigabyte. Keinesfalls sollte der Astrofotograf massenhaft mittelmäßige Videos zeitaufwändig bearbeiten und archivieren!

Welche Kamera für welchen Zweck?

Überschlägig kann man sagen: Die kleinen 21er Kameras sind etwa doppelt so lichtempfindlich als die großen 31er und 41er. Farbversionen reduzieren die Empfindlichkeit um das Zwei- bis Dreifache. Die Monochromkameras DMK 31/41 mit 1024×768 beziehungsweise 1280×960 Pixeln eignen sich ideal für den Mond und die Sonne, ihre Farbversionen DBK 31/41 lassen sich für die Farbfotografie der Sonne einsetzen. Die Schwarz-Weiß-Kamera DMK 21 hält unangefochten den Spitzenplatz für die anspruchsvolle Planetenfotografie, und ihre Farbversion DBK 21 ist bei gerade noch akzeptabler Lichtempfindlichkeit un-

ser Geheimtipp für Benutzer großer Teleskope, ungeübte Anwender und bequeme Leute. Mit ihr und einem 30-Zentimeter-Schmidt-Cassegrain-Teleskop nahmen wir das Saturnfoto oben auf – bei einem Zeitaufwand von nur fünfzehn Minuten vom Video bis zum fertigen Bild!

Obwohl die Stärken speziell der großen Kameras nicht vorrangig in der Langzeitbelichtung liegen, eignen sich alle Versionen wegen ihrer sehr unkomplizierten Bedienbarkeit bestens zum Erlernen der Deep-Sky-Fotografie. Wer sehr engagiert arbeitet und auch einige Mühe nicht scheut, kann besonders mit den monochromen Versionen, bevorzugt mit der DMK 21, anscheinliche Ergebnisse erzielen. Eine teure, gekühlte CCD-Kamera ersetzen Videokameras jedoch auch wegen ihrer geringen Auslesetiefe von nur 256 Graustufen nicht.



CHRISTIAN WELLMANN promoviert im Fach Molekularbiologie an der TU München. Er betrieb das Hobby Astronomie bereits in sehr jungen Jahren und trat im Oktober 1997

erstmals in *Sterne und Weltraum* mit einem Bericht über Videoastronomie in Erscheinung.



PETER WELLMANN studierte Physik in München und betreibt Astronomie als Hobby. Im Alter von zwölf Jahren schliiff er seine ersten Spiegel mit Originalmaterial des Op-

tikkonstrukteurs Bernhard Schmidt, das an der Hamburger Sternwarte noch vorhanden war.