

Perfekte PIXEL

Die mathematischen Grundlagen hochaufgelöster Planetenbilder

VON MARKUS LANGLOTZ



Immer mehr und vor allem immer bessere Amateuraufnahmen von Mond und Planeten tauchen derzeit in den einschlägigen Printmedien und Internetforen auf. Derart faszinierende fotografische Ergebnisse sind keine Hexerei! Beachtet man einige grundlegende Zusammenhänge, so kann man mit der eigenen Ausrüstung ebenfalls gezielt an die Auflösungsgrenze gehen und durchaus selbst in den Bereich der hochauflösenden Fotografie der Objekte des Sonnensystems vorstoßen.

Wer den Mond schon einmal mit einem normalen Fotoobjektiv abgelichtet hat, beispielsweise auf einer Landschaftsaufnahme, ist meist enttäuscht, wie klein und unauffällig unser Trabant auf Fotos wirkt. Naturgemäß ist bei einer derart kleinen Mondabbildung der Detailreichtum äußerst gering. Wenn, dann sind bestenfalls die Mondmeere als Dunkelstrukturen zu erkennen. Das andere Extrem, mit immer längeren Äquivalentbrennweiten Strukturen immer höher zu vergrößern, resultiert meist ebenfalls in unbefriedigenden, verschwommenen und stark verrauschten Bildern. Auch hier kann man nicht gerade von scharfen, hoch aufgelösten Bildern sprechen. Irgendwo zwischen diesen beiden Extremen jedoch muss sich ein Bereich optimal aufgelöster Abbildung befinden. Das gesuchte Optimum ist naturgemäß abhängig von der verwendeten Teleskopöffnung und der eingesetzten Kamera.

Das Teleskop

Der zunächst augenscheinlichste Anteil an diesem Optimum wird im Teleskop zu suchen sein. Dessen Abbildungsleistung wird über die so genannte Modulationsübertragungsfunktion (engl.: modulation transfer function, MTF) beschrieben. Diese ist in ihrer typischen Form in Abb. 2 gezeigt. Aus dem Diagramm wird klar, dass sehr große Strukturen demzufolge mit 100% Bildkontrast nahezu verlustfrei wiedergegeben werden können, wohingegen der Bildkontrast für Strukturen an der Auflösungsgrenze der Optik langsam gegen Null geht.

Abb. 1: Wie kann man das Zusammenspiel von Kamera und Teleskop optimieren, um auch mit kleineren Teleskopen hochauflösende Planetenfotos zu erreichen? Das Bild zeigt Jupiter mit Großen Roten Fleck bei einer Äquivalentbrennweite von 6,4m, 6"-Refraktor, ALccd5, RGB.

Dies tritt bei einer maximalen Ortsfrequenz von $S_{\max} = D/\lambda$ [1] ein, wobei D der Durchmesser der Optik und λ die Wellenlänge ist. Dieser Wert ist um den Faktor 1,22 größer als der Kehrwert der Auflösung nach Rayleigh ($=1,22\lambda/D$ in rad), die in Abb. 2 bei einer normierten Ortsfrequenz von $1/1,22 = 0,82$ eingezeichnet ist. Da bei der digitalen Bildverarbeitung durch Schärfungsalgorithmen (Hochpassfilterung) eine Verstärkung insbesondere der hohen Ortsfrequenzen erfolgt, was letztendlich einer Kompensation der stetig fallenden MTF gleichkommt, ist es wichtig, mit der Kamera alle Strukturen zu erfassen, deren Kontrast mit einem Wert größer als Null übertragen werden. Dann und nur dann können auch kleinste Strukturen als Information im geschärften Summenbild zu Tage treten! Wenn es um höchstauflösende Planeten- und Mondfotografie geht, hat ein Teleskop somit ein nutzbares Auflösungsvermögen, das 22% über dem Rayleigh-Kriterium ($=138"/D$ bei einer Wellenlänge von 550nm und D in mm) und damit auch noch besser als die Auflösung nach Dawes ist! Dies ergibt eine fotografisch wirksame Auflösung von $113"/D$; im Folgenden wird die fotografisch wirksame Auflösung mit $110"/D$ angenommen. Indem man die Teleskopauflösung als tendenziell besser annimmt als sie in der Realität ist, hat man die Gewähr, wirklich alle Strukturen zu erfassen, die das Teleskop abbilden kann.

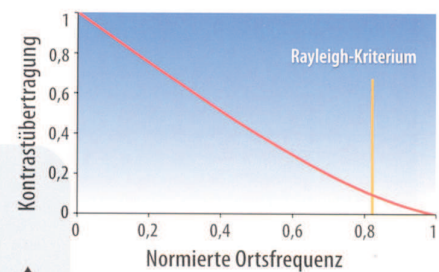


Abb. 2: Typischer Verlauf der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) eines Teleskops. Auf der Abszisse ist die so genannte normierte Ortsfrequenz S/S_{\max} aufgetragen. Dies ist nichts anderes als das Verhältnis des Auflösungsvermögens des Teleskops zur Strukturgröße. Links befinden sich also sehr große Strukturen, wohingegen rechts Strukturen in der Nähe des Auflösungsvermögens der Optik aufgetragen sind. Auf der Ordinate wird aufgezeichnet, zu welchem Prozentsatz der Objektkontrast für die jeweilige Strukturgröße in Bildkontrast umgewandelt werden kann.

Die Kamera

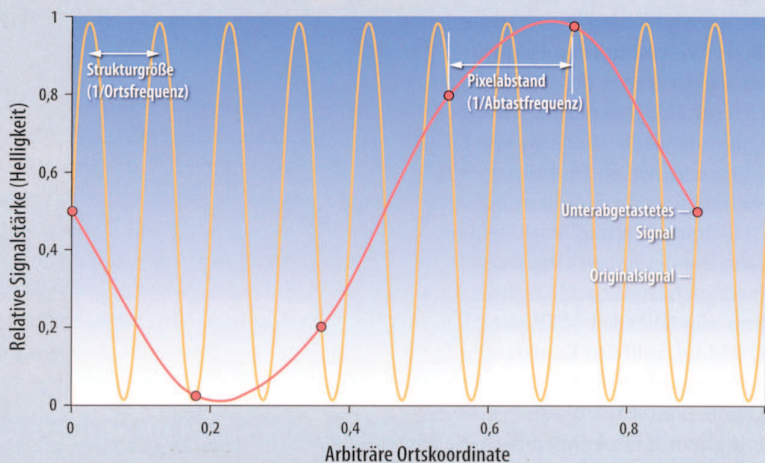
Nachdem bekannt ist, welche Informationen die Optik zu liefern imstande ist, muss betrachtet werden, wie diese Information von der Kamera erfasst wird. Hierzu ist die Beantwortung einer Frage essentiell: Wie groß wird eine Struktur in der Brennebene der Kamera abgebildet? Typischerweise ist die Primärbrennweite eines Teleskops für

Das Abtasttheorem von Shannon

Tastet man eine Bildfunktion mit einer Ortsfrequenz von S_{Bild} (Kehrwert der im Bild vorhandenen Strukturgröße) digital mit einer Abtastortsfrequenz von S_{Pixel} (1/Pixelgröße) ab, so enthält das resultierende, digitalisierte Bild neben der ursprünglichen, im Originalbild vorhandenen Spektralanteile auch sämtliche Spektralanteile der Ortsfrequenzen $nS_{\text{Pixel}} \pm S_{\text{Bild}}$ mit $n = 1 \dots \infty$. Wenn nun $S_{\text{Bild, max}}$ die maximale, von einer Optik übertragene Ortsfrequenz ist, so beinhaltet das Spektrum des abgetasteten Bildes auch die kritischen Spektralanteile der Frequenzen $nS_{\text{Pixel}} - S_{\text{Bild, max}}$. Die niederfrequenteste dieser durch die Digitalisierung entstandenen parasitären Oberwellen ist $S_{\text{Pixel}} - S_{\text{Bild, max}}$. Um sicher zu stellen, dass diese Spektralkomponente nicht das tatsächliche Bildspektrum stört, muss sie eine höhere Ortsfrequenz haben, als die höchste im Bild ursprünglich vorhandene Ortsfrequenz, nämlich $S_{\text{Bild, max}}$. Es muss also gelten:

$$S_{\text{Pixel}} - S_{\text{Bild, max}} > S_{\text{Bild, max}} \quad \text{oder} \\ S_{\text{Pixel}} > 2 S_{\text{Bild, max}}$$

In der digitalen Signalverarbeitung beschränkt man das Nutzsignal daher durch sehr steilflankige, so genannte Anti-Aliasing-Filter, um diese Bedingung einzuhalten. Beispielsweise werden Audio-CDs mit 44kHz abgetastet, wobei vorher das Nutzsignal hart auf 20kHz begrenzt wurde. Es wird also trotzdem 10% Abtastreserve hinzu gegeben. Da eine übliche Teleskop/Kamera-Kombination nicht über ein derartiges Anti-Aliasing-Element verfügt, und die MTF, eine sehr geringe Flankensteilheit aufweist, ist ein Samplingabstand von 25%, wie im Text erläutert, durchaus angebracht. Anhand nachfolgender Grafik soll veranschaulicht werden, was passiert, wenn zwischen Signal- und Abtastfrequenz ein zu geringer Abstand ist. Die gelbe Kurve zeigt ein fiktives Bildsignal, wohingegen die rote Kurve ein durch Unterabtastung generiertes Artefaktsignal beschreibt, welches im digitalisierten Bild vorhanden wäre, obwohl es in realitas nicht existiert!



Durch Abtastung einer Struktur mit einem zu großen Pixelabstand entsteht eine Bildfunktion, die nichts mehr mit der ursprünglichen Bildinformation zu tun hat. Derartige Artefaktbildung täuscht im Bild Strukturen vor, die in Wirklichkeit nicht vorhanden sind.

Pixelgrößen gängiger Kameras für Mond- und Planetenphotografie

Kameratyp	Pixelgröße
DMK21	5,6µm × 5,6µm
DMK31/DMK41	4,65µm × 4,65µm
ALccd5	5,2µm × 5,2µm
Skynyx-2	7,4µm × 7,4µm
ToUCam PRO	5,6µm × 5,6µm, RGGB-Bayer-Matrix
SPC9000	5,6µm × 5,6µm, RGGB-Bayer-Matrix

die hochauflösende Fotografie deutlich zu klein, folglich muss die Brennweite durch Einsatz eines sogenannten Projektivs (Barlowlinse, Okular) verlängert werden. Die auf diese Weise generierte fotografisch wirkungsvolle Brennweite wird als Äquivalentbrennweite ($f_{\text{äqu}}$) bezeichnet. Das Abbild einer Struktur, die eine Winkelausdehnung von α hat, erreicht eine Größe d , die linear mit der Äquivalentbrennweite steigt. Es gilt:

$$d = 2f_{\text{äqu}} \tan(\alpha/2)$$

Für die hier betrachteten kleinen Winkel kann man näherungsweise annehmen, dass der Wert des Tangens gleich dem seines Winkels ist, womit sich obige Gleichung erheblich vereinfacht:

$$d = \alpha f_{\text{äqu}}$$

Hierbei ist zu beachten, dass α im Bogenmaß einzusetzen ist. Eine Optik mit einer Äquivalentbrennweite würde also eine Struktur von 1" Durchmesser 4,8µm groß abbilden, bei Verzehnfachung der Äquivalentbrennweite wäre das Abbild dieser Struktur bereits 48µm groß und würde auf dementsprechend mehr Pixel abgebildet werden. Jede Vergrößerung birgt aber auch einen gewaltigen Nachteil: Wird eine Struktur n -fach vergrößert, wird sie nicht nur auf n^2 Pixel, sondern damit auch auf die n^2 -fache Fläche projiziert, wodurch sich ihre Helligkeit um den Faktor $1/n^2$ reduziert. In obigem Beispiel hätte also das 48µm große Abbild nur ein hundertstel der Helligkeit des 4,8µm großen Abbilds! Dieser Verlust an Helligkeit muss entweder durch die Belichtungszeit der Kamera oder die kamerainterne Signalverstärkung kompensiert werden, wobei die Bildqualität durch ersteres aufgrund des atmosphärischen Seeing, durch zweiteres aufgrund des Verstärkerrauschens massiv beeinträchtigt wird.

Wie gezeigt, ergeben alle Teleskop/Kamerakombinationen vergleichbare Belichtungszeiten. In der Praxis liegen diese im zweistelligen Millisekundenbereich, wodurch das Seeing sehr gut eingefroren werden kann. Grundvoraussetzung für hochauflösende Fotografie ist natürlich sehr gutes Seeing.

Dem Optimum auf der Spur

Die ideale Kombination aus Äquivalentbrennweite und Pixelgröße liegt somit bei der kleinstmöglichen Äquivalentbrennweite, die noch eine vollständige Erfassung aller durch das Teleskop abbildbaren Strukturen erlaubt. Hierzu ist die Kenntnis der Pixelgröße unerlässlich. Tab. 1 zeigt diesen Wert für einige in der Planeten- und Mondfotografie übliche Standardkameras. Wie viele Pixel sind nötig, um eine Struktur mit

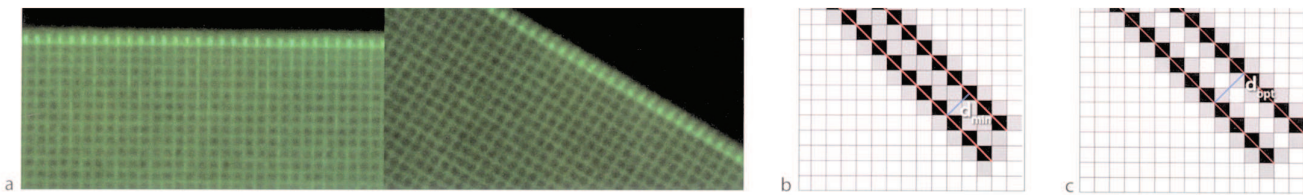


Abb. 3: Abbildung eines Gitters bei paralleler und gedrehter Sensorausrichtung (a). Die geometrischen Verhältnisse sind rechts dargestellt (b,c). Liegt eine Struktur 45° zur Sensormatrix geneigt, wird diese durch die Abtastung in der Breite verschmiert. Um zwei derartige geneigte Parallelen noch ansatzweise trennen zu können, ist ein Abstand von d_{\min} nötig, der sich aus $\sqrt{(1,5^2+1,5^2)}$ Pixeldurchmesser zu 2,12 Pixeldurchmesser berechnet. Der optimale Abstand, bei dem zwischen den verbreiterten Linienbildern noch komplett unangesteuerte Pixel verbleiben, womit eine maximale Kontrastübertragung gewährleistet ist, errechnet sich analog zu 2,82 Pixeldurchmessern. Bezogen auf den senkrecht oder waagrecht abbildbaren Linienabstand von 2 Pixeln, ergibt dies eine um den Faktor 1,06 bzw. 1,41 verringerte Auflösung, die durch entsprechende Brennweitenverlängerung kompensiert werden muss.

einem bestimmten Durchmesser sicher zu erfassen? Hier liefert das so genannte Shannonsche Abtasttheorem (vgl. Kasten) die Lösung: Um eine bestimmte Struktur ohne Informationsverlust abzutasten, muss sie mindestens auf zwei Pixel abgebildet werden. Da es im Fall einer Abbildung auf genau zwei Pixel zu Informationsverlusten oder (was weitaus schlimmer ist) zu Pseudoinformation in Form von Artefakten kommen kann, sollte hier ein gewisser Sicherheitsabstand aufgeschlagen werden. Im Weiteren wird von einer robusten Abtastung ausgegangen, wenn eine Struktur auf zweieinhalb Pixeln abgebildet wird. Dieser zusätzliche Abstand begründet sich darin, dass ein abbildendes Teleskopsystem keine steiflankigen Tiefpasselemente enthält, die wie ein Antialiasing-Filter (vgl. Kasten) wirken würden. Die MTF selbst weist ja eine sehr geringe Flankensteilheit auf, wodurch davon ausgegangen werden muss, dass Strukturen bis mindestens hinab zur Auflösungsgrenze des Teleskops auch wirklich im Bild vorhanden sein werden und damit fehlerfrei abgetastet werden müssen. Bei handelsüblichen CCD- und CMOS-Chips sind die Pixel in einer rechteckigen Dotmatrix angeordnet. Im Gegensatz zu einer wabenförmigen Anordnung, wie beispielsweise der Super-CCD-Technologie von Fuji, zeigt diese orthogonale Pixelanordnung eine starke angulare Anisotropie: Die Sensorauflösung, auf die es letztendlich ankommt, ist stark richtungsabhängig. In Abb. 3a wurde zur Verdeutlichung dieses Effekts eine monochromatisch grün beleuchtete Gitterstruktur an der Sensorauflösungsgrenze fotografisch erfasst. In der linken Bildhälfte erkennt man, dass die senkrechten Strukturen am oberen Gitterrand pixelgenau mit maximaler Helligkeit und damit hohem Kontrast scharf abgebildet werden. In der rechten Bildhälfte wurde lediglich der Bildsensor nach links geneigt, wodurch sich der Bildinhalt im Uhrzeigersinn dreht, wenn das Bild wieder waagrecht dargestellt wird. Aufnahmeabstand, Öffnungsverhältnis,

Aufnahmebrennweite, Fokus- und Belichtungseinstellungen wurden unverändert belassen. Deutlich erkennt man die nun reduzierte Sensorauflösung: Zum einen ist die maximale Helligkeit der feinen Linien geringer (reduzierter Objektkontrast), zum anderen werden die Linien in die Breite verschmiert (höhere effektive Pixelgröße). Um diesen Effekt zu kompensieren, müsste die Aufnahmebrennweite und somit der Abbildungsmaßstab entsprechend erhöht werden. Aus einfachen geometrischen Überlegungen (Abb. 3b/c) ergibt sich, dass für Strukturen mit einem Richtungsvektor mit 45° Neigung zur Pixel-Matrix die resultierende Auflösung am geringsten ist. Optimalerweise müsste die Äquivalentbrennweite um den Faktor $\sqrt{2} = 141\%$ erhöht werden, um derartig orientierte Strukturen ohne Kontrastverlust zu erfassen. Um entsprechende Strukturen überhaupt detektieren zu können, ist eine Brennweitenverlängerung um zumindest den Faktor $\sqrt{1,125}=106\%$ vonnöten.

Kleine Rechnerei

Nun liegen alle notwendigen Informationen vor, um die optimale Kombination aus Kamera, Teleskop und Äquivalentbrennweite zu berechnen. Den ersten Hinweis liefert die Teleskopauflösung, die weiter oben zu $110''/D$ angegeben wurde. Um mit dieser zugeschnittenen Größengleichung weiter arbeiten zu können, muss diese erst in Bogenmaß umgerechnet werden, indem man mit π multipliziert und durch 3600° und 180° dividiert. Außerdem sollte D in Metern anstatt Millimetern eingesetzt werden, wodurch noch durch 1000 geteilt werden muss. Multipliziert mit der (gesuchten) Äquivalentbrennweite ergibt sich der lineare Durchmesser einer Struktur an der Auflösungsgrenze des Teleskops in der Brennebene des Bildsensors:

$$d = f_{\text{äqu}} [\text{m}] \cdot 0,110^\circ \cdot \pi / (D [\text{m}] \cdot 3600^\circ \cdot 180^\circ)$$

Um eine robuste Abtastung zu gewährleisten, muss die Struktur auf 2,5 Pixel projiziert werden. Aufgrund der anisotro-

pen Sensorauflösung sollte die Pixelzahl nochmals erhöht werden auf $1,41 \cdot 2,5 \text{ Pixel} = 3,5 \text{ Pixel}$. Somit muss gelten, dass der lineare Durchmesser einer Struktur in der Brennebene des Teleskops mindestens 3,5 Mal so groß wie die Pixelgröße ist. Durch Umstellen obiger Gleichung und Ausmultiplizieren der Konstanten ergibt sich folgender Zusammenhang für das optimale Öffnungsverhältnis zur hochauflösenden Fotografie:

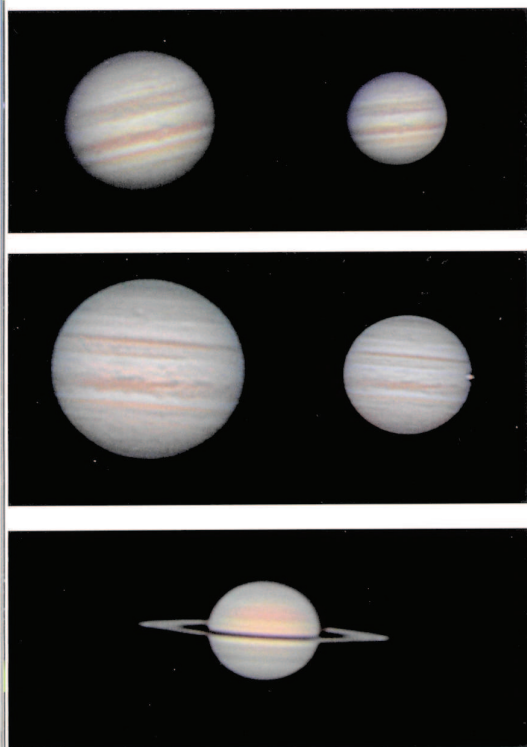
$$\text{Öffnungsverhältnis } f_{\text{äqu}}/D = 6,6 \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{Pixelgröße}$$

Wird in dieser Gleichung der Pixeldurchmesser der Kamera in μm eingesetzt, ergibt sich direkt das optimale Öffnungsverhältnis.

Interessanterweise hängt also das optimale fotografische Öffnungsverhältnis nur von der Pixelgröße der verwendeten Kamera ab: Eine größere Öffnung hat zwar eine höhere Auflösung zur Folge, dieser wird aber bereits durch die über das Öffnungsverhältnis definierte höhere Äquivalentbrennweite Rechnung getragen. Am Beispiel einer Kamera DMK21 mit $5,6 \mu\text{m}$ Pixelgröße kann dies veranschaulicht werden: Das optimale Öffnungsverhältnis beträgt bei einer Pixelgröße von $5,6 \mu\text{m}$ ziemlich genau $f/37$. Bei einem Teleskop mit 3" Öffnung (76mm) ergäbe sich somit eine ideale Äquivalentbrennweite von $37 \times 76 \text{mm} = 2,8 \text{m}$. Bei

Abb. 4: Der Krater Copernicus bei einer Äquivalentbrennweite von 5m, 6"-Refraktor, ToUCam PRO, G-Kanal.





▲ **Abb. 6: Jupiter bei zwei verschiedenen Äquivalentbrennweiten** von 3,5m und 6,9m, 6"-Refraktor, ALccd5, LRGB. Gegenüber der ToUCam PRO in Abb. 5 bietet die ALccd5 eine konstante Auflösung in allen Farbkanälen.

▲ **Abb. 7: Saturn bei einer Äquivalentbrennweite von 6,9m**, 6"-Refraktor, ALccd5, LRGB.

einem Sechszöller hingegen wäre die optimale Brennweite bereits doppelt so groß, nämlich 5,6m. Das doppelt so hohe Auflösungsvermögen des in diesem Beispiel genannten Sechszöllers gegenüber dem Dreizöller kann durch die sich ergebende doppelte Äquivalentbrennweite auch eine doppelt so hohe Bildauflösung bewirken. Interessanterweise ist die für eine derart angepasste Aufnahmebrennweite nötige Belichtungszeit im Wesentlichen teleskop- und kameraunabhängig! Da alle siliziumbasierten Bildsensoren in etwa grob vergleichbare spektrale Quantenwirkungsgrade besitzen, hängt die erzielbare Signalstärke der Bildinformation weitestgehend von der Pixelgröße ab, also dem Quadrat der Pixelgröße. Kleinere Pixel bedingen ein geringeres Öffnungsverhältnis und damit eine in dem Maße höhere Leuchtdichte des Abbilds auf dem Chip,

Surftipp

Homepage des Autors:
astronomie.n-t-l.de

◀ **Abb. 5: Jupiter mit Europas Schatten** bei zwei verschiedenen Äquivalentbrennweiten von 2,4m und 5,5m, 6"-Refraktor, ToUCam PRO.

indem die Pixelfläche kleiner geworden ist! Durch kleinere Äquivalentbrennweiten bei kleineren Öffnungen wird auch der Effekt des geringeren Lichtsammelvermögens kleinerer Optiken kompensiert.

Vorteile bei der Bildverarbeitung

Wie bereits besprochen, zeigt jedes abbildende System ein über die MTF abgebildetes Tiefpassverhalten. Dies bedeutet, dass zu immer kleiner werdenden Strukturen die Kontraste immer weniger stark ins Bild übertragen werden. Um diesen Tiefpasseffekt zu kompensieren, muss die Bildinformation mit einem Hochpassfilter überlagert werden, was nichts anderes ist als Bildschärfung. Die Schärfung überlagert Bilder hat also nichts mit der Korrektur von vermeintlichen Fehlern der Optik zu tun, sondern ist integraler Bestandteil der Signalverarbeitungskette, findet in diesem Schritt doch die abschließende Frequenzgangkorrektur statt. Die in diesem Artikel hergeleiteten, für eine optimale Bilderfassung nötigen Abbildungsmaßstäbe machen sich nun genau bei diesen Bildschärfungsprozessen positiv bemerkbar. Wie bereits erwähnt, ist jedes Bild von einem gewissen Rauschteppich überlagert. Dieser stochastische Signalanteil ist naturgemäß für jeden Bildpixel leicht unterschiedlich, mithin liegt also der größte Ortsfrequenzanteil des Rauschens sehr nahe bei $S_{\text{[Pixel]}}$. Nun wird durch den optimalen Abbildungsmaßstab die kleinste, abbildbare Struktur auf 3,5 Pixel dispergiert. Dies bedeutet, dass man das Bild vor oder bei der Schärfung (»mexican hat-Filter«) mit einem Radius von 2 bis 3 Pixeln rauschfiltern kann, ohne Bildinformationen zu verlieren. Zusätzlich zum Stacking kann also das Rauschen nochmals reduziert werden, wodurch die Neigung zur Artefaktbildung bei der Bildschärfung deutlich vermindert wird.

Die Praxis nach der Theorie

Abb. 4 zeigt den Mondkrater Copernicus mit einer Äquivalentbrennweite von ziemlich exakt 5m. Die Aufnahme entstand an einem 6"-Refraktor und einer Philips ToUCam Pro mit einer Pixelgröße von $5,6\mu\text{m}$, das Öffnungsverhältnis von $f/33$ liegt also bereits sehr nahe am errechneten Optimum. Bei dieser Aufnahme ist die Detailfülle noch nicht optimal, da aufgrund der

Bayermatrix des CCD-Chips (Farbfilter) die Linienauflösung reduziert und rein theoretisch eine dementsprechend nochmals höhere Äquivalentbrennweite nötig gewesen wäre. In der Praxis sollte aber auch für eine Bayermatrix-Kamera nicht höher vergrößert werden als in obiger Formel angegeben, da durch die Transmissionsverluste der Farbfilter und das nochmals höhere Rauschen kein Informationsgewinn mehr erzielbar ist: Bei Farbkameras muss man das etwas geringere Auflösungsvermögen als gegeben hinnehmen. Um diesen Effekt etwas zu kompensieren, wurde in Abb. 4 lediglich der Grünanteil des Bildes verwendet, da die Bayermatrix im Grünkanal zumindest jeden zweiten Pixel der Dotmatrix zur Verfügung hat.

Abbildung 5 zeigt einen Vergleich von Jupiter mit Europas Schatten, aufgenommen am 24.8.2008 am 6"-Refraktor, einmal mit 2,4m Brennweite ($f/16$) und einmal mit 5,5m Brennweite ($f/36$). Man erkennt deutlich den Zugewinn an Bilddetails. Anhand zweier LRGB-Aufnahmen mit einer ALccd5-Kamera, die eine konstante Sensorauflösung über alle Farbkanäle gewährleistet, wird dieser Effekt noch deutlicher (Abb. 6). Auch hier entstanden beide Aufnahmen unmittelbar hintereinander am 28.7.2009 am 6"-Refraktor, die eine mit 3,5m Äquivalentbrennweite, die andere mit 6,9m.

Diskussion der Ergebnisse

Anhand der gezeigten Bildbeispiele kann sehr gut illustriert werden, dass ein optimaler Abbildungsmaßstab zur hochauflösenden Sonnensystemfotografie mitunter deutlich längere Äquivalentbrennweiten bedingt, als gemeinhin in manchen Praxisempfehlungen zu lesen ist. Durch die dargelegten theoretischen Überlegungen lässt sich dies auch in einer Berechnungsvorschrift abbilden. Neben einem Maximum an in den Bildern enthaltener Information lässt sich diese aufgrund der Abbildungsgröße auch sehr gut aus dem prinzipiell vorhandenen Rauschteppich extrahieren. Es lohnt also durchaus, für die hochauflösende Fotografie sehr lange Äquivalentbrennweiten heranzuziehen. Verschwiegen werden darf aber nicht, dass bei derartigen Anpassungen an den Sensor die Optik perfekt justiert und das Projektiv von sehr hoher Güte sein muss: Mit einer 20€-Billigbarlowlinse werden die hier gezeigten Ergebnisse nicht zu bewerkstelligen sein.

[1] Suiter, H. R.: Star Testing Astronomical Telescopes, Willmann-Bell Inc., Richmond (2009)