

Digitale Filmkameras im Einsatz in der Astronomie

Digitale Filmkameras haben seit einigen Jahren die 35mm-Filmaufnahme ersetzt. Die ersten digitalen Filmkameras kamen etwa 2005 auf den Markt; ihre theoretische Konzeption reicht allerdings weiter zurück.^[1] Digitale Filmkameras grenzen sich gegenüber Fernsehkameras ab durch die Verwendung eines einzigen, großen CMOS-Sensors, zumeist im Format Super-35mm, und durch die Aufzeichnung eines Bilddatenstroms mit einem gegenüber dem standardisierten Fernsehsignal nach ITU-R BT.709 höheren Dynamikumfang. Die digitalen Filmkameras der ersten Generation, z. B. die Arri D-21, Red One oder Sony F-35, wiesen noch Lichtempfindlichkeiten auf, die der von 35mm-Farbnegativfilmmaterialien entsprach: 100 bis maximal 800 ISO.

Technologisch befruchtend auf die weitere Entwicklung wirkten und wirken auch die Innovationen der in großen Serien und in raschen Zyklen auf den Markt gebrachten digitalen Fotokameras der gehobenen Qualitätsklasse mit Filmfunktion. So erreichen Kameras der aktuellen Generation inzwischen auch weit höhere Empfindlichkeiten als zu Beginn, z. T. über 20.000 ISO. Die gestiegene Empfindlichkeit sowie einige technologische Vorteile großer CMOS-Sensoren gegenüber kleinen CCDs erschließen professionellen digitalen Filmkameras und semiprofessionellen digitalen Fotokameras mit Filmfunktion ein neues Anwendungsfeld: Auch in der Astronomie gibt es zeitlich rasch ablaufende Phänomene, deren Dokumentation im Laufbild neue Möglichkeiten für die Forschung mit sich bringt. Allerdings kennen professionelle Astronomen aktuelle professionelle Filmkameras in der Regel nicht.

Der Autor beschäftigt sich seit 28 Jahren professionell mit der elektronischenameratechnik und seit 18 Jahren als Amateur mit der Astronomie, dieser Artikel ist der Versuch eines Brückenschlags zwischen zwei üblicherweise getrennten Welten. Im Folgenden werden vier verschiedene Anwendungsfälle von digitalen Filmkameras bzw. Fotokameras mit Filmfunktion für die Astronomie vorgestellt.

Live-Übertragung: Merkurtransit

Einen der einfachsten Anwendungsfälle stellt die Live-Übertragung eines astronomischen Phänomens für ein größeres Publikum dar. Ein konkretes Beispiel hierfür war die Live-Übertragung des Durchgangs des Planeten Merkur vor der Sonne am 9. Mai 2016, der zufällig genau in der Mittagspause des Eröffnungstages der Jahrestagung der Fernseh- und Kinotechnischen Gesellschaft vom 9. bis 11. Mai 2016 im Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig seinen Anfang nahm.

Merkurtransite sind relativ seltene Ereignisse: Der zuletzt in Deutschland beobachtbare hatte am 7. Mai 2003 stattgefunden.^[2] Früher war die exakte Registrierung der Kontaktzeiten wissenschaftlich relevant, weil damit eine sehr genaue Vermessung der Merkurbahn um die Sonne ermöglicht wurde. Die Merkurbahn ist elliptisch, doch dreht sich die Bahnellipse jährlich um 5,74" um die Sonne. Der Betrag dieser sogenannten Periheldrehung lässt sich mit der klassischen Newton'schen Gravitationslehre allein nicht erklären, sondern erst mit der Einstein'schen Allgemeinen Relativitätstheorie.

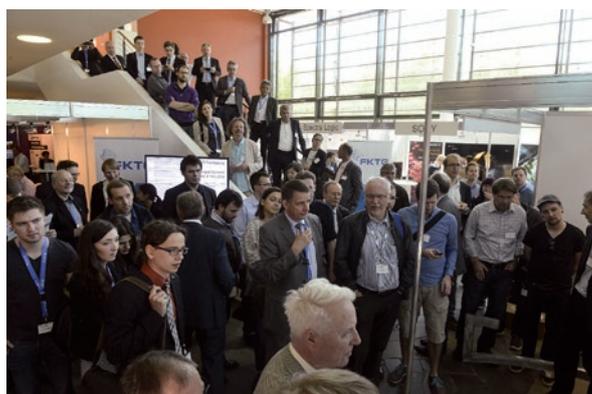
Die Beobachtung des Merkurtransits am 9. Mai 2016 erfolgte an einem achromatischen Linsenteleskop mit 100 mm Öffnung und 1.100 mm Brennweite mit einer semiprofessionellen Fotokamera mit Filmfunktion vom Typ Sony $\alpha 7S$. Das Full-HD-Signal der Kamera wurde mit einem 15 m langen HDMI-Kabel auf einen 65"-Monitor im Tagungszentrum übertragen. Die enorme Lichtfülle der Sonne wurde durch ein spezielles Keramikprisma gedämpft. Um das Merkurscheibchen auf dem Vollformatsensor der Sony $\alpha 7S$ gut auflösen zu können wurde die Brennweite des Teleskops mit Hilfe eines Projektionsokulars auf ca. 15.000 mm verlängert.

Zu Beginn des Transits gegen 13:12 Uhr MESZ war die Luft leider sehr unruhig, weil sich der Bürgersteig neben dem Leipziger Kubus bereits stark aufgeheizt hatte. Um den chromatischen Fehler der Luftunruhe und den chromatischen Fehler des Teleskops auszuschalten, wurde ein Schmalbandfilter mit 540 nm (Grün) und einer Halbwertsbreite von 10 nm eingesetzt und die Kamera im

^[1] Z. B. Slansky, Peter C.: Die digitale Filmkamera, Vortrag auf der Jahrestagung der Fernseh- und Kinotechnischen Gesellschaft am 12. Juni 2002 in Zürich.

^[2] www.peter-slansky.de.

Der Merkurtransit wurde live ins Tagungszentrum übertragen



Schwarzweißmodus betrieben. Bei einer Kamera mit einer Bayermaske werden dann nur noch die grün gefilterten Pixel angesprochen. Durch die native Auflösung der Sony $\alpha 7S$ von 4240 Pixel horizontal wird das Full-HD-Bild jedoch durch ein 2,2-fach Oversampling erzeugt, sodass dennoch keine Artefakte entstanden.

Angesichts der starken Luftunruhe ergab die Laufbildaufnahme einen großen Vorteil gegenüber der Einzelbildfotografie: Nachträglich konnten die wenigen scharfen Einzelbilder aus der Filmsequenz herausgesucht werden. Das hier gezeigte Bild ist das schärfste aus 20 Sekunden kurz nach dem 2. Kontakt. (Das ist der Moment, an dem sich die Merkurscheibe vollständig vom Sonnenrand trennt und Merkur als kleine schwarze Kreisscheibe vor der Sonne zu sehen ist.)

Zu den optischen Abbildungsverhältnissen eine kurze quantitative Betrachtung: Die Sonne erschien an dem Tag in einem scheinbaren Durchmesser von $0,528^\circ$ oder $1900''$. Zum Zeitpunkt des Transits befand sich Merkur in der geringsten Erddistanz; sein scheinbarer Durchmesser betrug $12''$, also $1/158$ des scheinbaren Sonnendurchmessers. Die native Auflösung des Sensors der Sony $\alpha 7S$ beträgt 4.240 Pixel horizontal; im Filmmodus werden diese in Echtzeit auf 1.920 Pixel heruntergesampelt. Bei einer Sensorbreite von 35,6 mm ergibt sich eine native Pixelgröße von $8,4 \mu\text{m}$ auf dem Sensor bzw. eine Pixelgröße von $18,5 \mu\text{m}$ im Full-HD-Bildsignal.

Auf dem Full-HD-Bild erstreckt sich das Abbild des $12''$ großen Merkurscheibchen über 48 Pixel, also entspricht ein Pixel im Bild $1/4''$. Durch den Schmalbandfilter liegen die Abbildungsfehler des verwendeten Teleskops unterhalb der Beugungsgrenze. Das Grenzaufklärungsvermögen eines Teleskops mit 100 mm Öffnung liegt bei einer Wellenlänge von 540 nm bei $1''$, damit war bei der verwendeten Beobachtungstechnik ein 4-fach-Oversampling gegeben.

Bei besseren Beobachtungsbedingungen wäre mit dem Real Time Code der Filmsequenzen eine Bestimmung der Kontaktzeiten mit einer Genauigkeit von theoretisch $1/25$ Sek. möglich gewesen. In Leipzig stand jedoch keine wissenschaftliche Auswertung im Vordergrund, sondern der Ereignischarakter der Live-Übertragung, die in der Mittagspause von mehr als 60 Konferenzteilnehmern betrachtet wurde. Theoretisch wäre mit der Sony $\alpha 7S$ über die HDMI-1.4-Schnittstelle auch eine Übertragung in UHD möglich gewesen, angesichts der Luftunruhe wäre hiermit jedoch kein Qualitätsgewinn erreichbar gewesen.



Der Autor mit seinem Equipment auf der FKTG-Fachtagung in Leipzig



Sonne und Merkur kurz nach dem 2. Kontakt

Laufbild-Dokumentation: Polarlichter

Sonnenbeobachtungen stellen keine Ansprüche an die Lichtempfindlichkeit der Kamera, im Gegenteil. Ganz anders verhält sich das bei Polarlichtern: Einerseits sind sie sehr dunkel, andererseits verändern sie sich zu bestimmten Momenten sehr rasch. Fotografien mit mehreren Sekunden Belichtungszeit können diese Veränderungen nicht auflösen. Hier bringen hochempfindliche digitale Filmkameras oder Fotokameras mit Filmfunktion einen echten Fortschritt: Mit ihnen ist es möglich, Polarlichter in Echtzeit aufzunehmen. Das ist auch für die Wissenschaft interessant.

Polarlichter gehören nur zur Hälfte zum Gebiet der Astronomie: Die Lichterscheinung wird von der Wechselwirkung der durch die Sonne emittierten Korpuskularstrahlung mit den Molekülen der oberen Erdatmosphäre, der Ionosphäre, verursacht. Diese Wechselwirkung der solaren Teilchen mit der Erdatmosphäre ist äußerst komplex und noch bei weitem nicht vollständig erforscht.^[3] Die Leuchterscheinung wird durch freie Elektronen ausgelöst, die mit den Atomen oder Molekülen des Niederdruckplasmas der Ionosphäre kollidieren. Polarlichter funktionieren also ähnlich wie Leuchtstoffröhren. Die Farben der Polarlichter richten sich nach den beteiligten Stoffen: Atomarer Sauerstoff ergibt gelbgrüne, atomarer Stickstoff blauviolette Polarlichter, während etwa molekularer, geladener Stickstoff zu roten Polarlichtern führt; insgesamt sind 18 Spektrallinien bzw. -bereiche der Elemente Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff an den Leuchterscheinungen im sichtbaren Licht beteiligt. Die Formen der Polarlichter sind äußerst vielfältig, handelt es sich doch um dreidimensionale Strukturen mit einer Höhe von mehreren hundert Kilometern, in die wir unter einer bestimmten Perspektive schräg von unten hineinschauen. Ihre zeitliche Entwicklung folgt hoch komplexen Abläufen, längeren ruhigen Phasen folgen mitunter rapide Wechsel mit scheinbaren Strukturgeschwindigkeiten bis zu 100 km/s .^[4]

^[3] Vgl. Pfoser, Andreas; Eklund, Tom: „Polarlichter“, Oculum Verlag, 2011



Polarlichter: 23.11.2014, 00:30 Uhr MEZ, Nordatlantik, 100 km südöstlich von Island.
 Sony α 7S mit Leitz R-Summilux 1.4/50 mm, F = 1.4, 128.000 ISO, 25 B/s, XAVC 8 Bit 4:2:0 50 Mbit/s.; Zeitabstand jeweils 2 Sek.

Aufgrund der Wechselwirkung der solaren Strahlung mit dem Magnetfeld der Erde treten Polarlichter – bei normaler Aktivität – bevorzugt in zwei um die beiden magnetischen Pole angeordneten ovalen Ringen auf. Das nördliche Polarlichtoval in der Gegend südlich von Island war im November 2014 das Ziel eines speziell für Polarlichtbeobachter angebotenen Beobachtungsfluges mit einer Chartermaschine. Aus 11.000 m Flughöhe waren optimale Beobachtungsbedingungen zu erwarten. Meine Aufnahmen aus dem Bordfenster heraus realisierte ich mit der Sony α 7S in Verbindung mit einem lichtstarken Leitz-Fotoobjektiv, wobei sich die hohe Kameraempfindlichkeit von bis zu 400.000 ISO besonders auszahlte.

Auch für die professionelle Polarlichtforschung sind hochaufgelöste Filmaufnahmen relevant; zeitlich synchronisierte Aufnahmen an mehreren verschiedenen Standorten ermöglichten z. B. eine 3D-Modellierung.

Sequenzanalyse: Meteore

Wie bei den Polarlichtern handelt es sich bei Meteoren nur zur Hälfte um ein astronomisches Phänomen: Die Ursache der Meteore sind kosmische Partikel, die in die Erdatmosphäre eintreten und darin verglühen. Dabei beruht die von uns beobachtete Leuchterscheinung nicht auf dem Glühen des eintretenden Partikels, sondern auf der Ionisation der Luft durch die hohe Eintrittsgeschwindigkeit von 12 bis 72 km/s. Die sogenannten Sternschnuppen werden durch Partikel zwischen 2 mg und 2 g verursacht; sie verglühen zumeist in ca. 80 km Höhe über dem Erdboden.^[5] Wie bei den Polarlichtern ist also auch bei den Meteoren die Ursache astronomisch, die resultierende Lichterscheinung jedoch irdischen Ursprungs.

Die meisten Meteorströme treten auf, wenn die Erde auf ihrer Jahresbahn um die Sonne eine von einem Kometen oder Asteroiden hinterlassene Partikelwolke durchquert.

Die bekannten Meteorströme treten daher zu einem festen Datum im Jahr auf, die Perseiden etwa am 12./13. August oder die Geminiden am 13./14. Dezember. Benannt werden die Meteore nach dem Sternbild, in dem ihr scheinbarer Ursprungsort liegt.

Doch kommt es auch immer wieder vor, dass die Erde bestimmte Partikelwolken zum ersten Mal durchquert, sodass ein neuer Meteorschwarm auftritt. Das war in der Nacht vom 23. auf den 24. Mai 2014 der Fall: Zum ersten Mal flog die Erde durch die Staubwolke, die der 2004 entdeckte Komet 209P/LINEAR hinterlassen hatte. Diese Staubwolke verursachte den neuen Meteorstrom der Camelopardaliden (Sternbild Giraffe; lat. Camelopardalis).

Für meine Beobachtung setzte ich eine Canon C 300 der Hochschule für Fernsehen und Film mit einem lichtstarken Zeiss-Filmobjektiv ein. Von meiner Dachterrasse in der Münchner Innenstadt konnte ich einen echten Glückstrefker landen: Den, meines Wissens, hellsten Camelopardaliden weltweit. Er fiel morgens um 03:58 Uhr MESZ während ich schlief nachdem ich von 23:00 bis 1:00 Uhr visuell keinen einzigen Meteor hatte sichten können.

Meine Aufnahme wurde durch den Astronomen und Wissenschaftsjournalisten Daniel Fischer an den Meteorforscher Peter Jenniskens vom SETI-Institut der NASA in Los Angeles weitergeleitet.^[6] Er und sein vierköpfiges Team hatten auf einem Beobachtungsflug über dem Pazifik mit einem Charterjet mit sieben CCD-Videokameras nur mittel-helle Camelopardaliden aufnehmen können.

Jenniskens kontaktierte mich und erhielt meine Filmdatei zur Auswertung. Zusammen mit Jim Albers erstellte er eine Sequenzanalyse meiner Filmaufnahme: Sie schnitten die Meteorspur einzelbildweise waagrecht aus und ordneten die schmalen Streifen senkrecht untereinander an. Hieraus lassen sich der zeitliche Verlauf des Meteorfalls sowie das Nachglühen der Meteorspur genau ablesen. (Es ist zu beachten, dass während der ersten Sekunde der zeitliche Maßstab nur halb so groß ist wie später, daher der Knick in der Bahnkurve nach einer Sekunde.) Mit diesem Bild auf dem Cover erschien Jenniskens' Artikel im WGN Journal of the International Meteor Organisation.^[7]

Der Kameraaufbau in der Münchner Innenstadt



[4] Ebenda.

[5] Unsöld, Albrecht; Baschek, Bodo: „Der neue Kosmos“, Springer Verlag, 1999

[6] <http://meteor.seti.org/>.

[7] WGN Journal of the International Meteor Organisation, Ausgabe 42:3, Juni 2014; http://meteor.seti.org/Jenniskens-camelopardalids_offprint.pdf

In der professionellen Meteorforschung werden sowohl Fotokameras bei Belichtungszeiten im Bereich von Sekunden bis zu Stunden eingesetzt als auch CCD-Kameras mit $\frac{1}{2}$ "-Sensoren, z. B. Watec-902H2 oder Lumenera Infinity 2-1R. Letztere benötigen einen Computer zum Betrieb. Wie meine Aufnahme zeigt, bieten sich aber durchaus auch digitale Filmkameras mit großem Sensor und hoher Lichtempfindlichkeit an, und zwar nicht nur wegen ihres autarken Betriebs und ihrer höheren Auflösung: Bei ausreichender Kameraempfindlichkeit ist die kurze Belichtungszeit der Laufbildaufnahme auch gegenüber der Fotografie im Vorteil. Hierzu soll kurz auf die Belichtungsverhältnisse bei der astronomischen Fotografie eingegangen werden.^[8]

In erster Näherung ist die Signalstärke S für das Objekt proportional zur Beleuchtungsstärke E der fotografischen Abbildung des Objekts auf dem Sensor, zur Belichtungszeit t_B und zur Empfindlichkeit der Kamera in ISO:

$$S \sim E * t_B * ISO$$

Das Produkt $E * t_B$ entspricht der Belichtung H .

Betrachten wir zunächst die Beleuchtungsstärke des Objekts auf dem Sensor: Gegenüber der normalen Fotografie am Tage muss bei der Astrofotografie unterschieden werden zwischen flächenhaften und punktförmigen Objekten. Für flächenhafte Objekte wie Galaxien, Gasnebel oder den Himmelshintergrund gilt wie bei der normalen Fotografie:

$$E_{\text{Fläche}} \sim \frac{1}{\frac{f}{D_{\text{Ep}}}}^2$$

Hierbei ist f die Brennweite und D_{Ep} der Durchmesser der Eintrittspupille des Objektivs. Der Bruch f/D_{Ep} entspricht der Blendenzahl F .

Punktförmige Objekte wie Sterne oder Meteore werden jedoch lediglich in Form eines kleinen Beugungsscheibchens auf den Sensor abgebildet. Hierfür gilt:

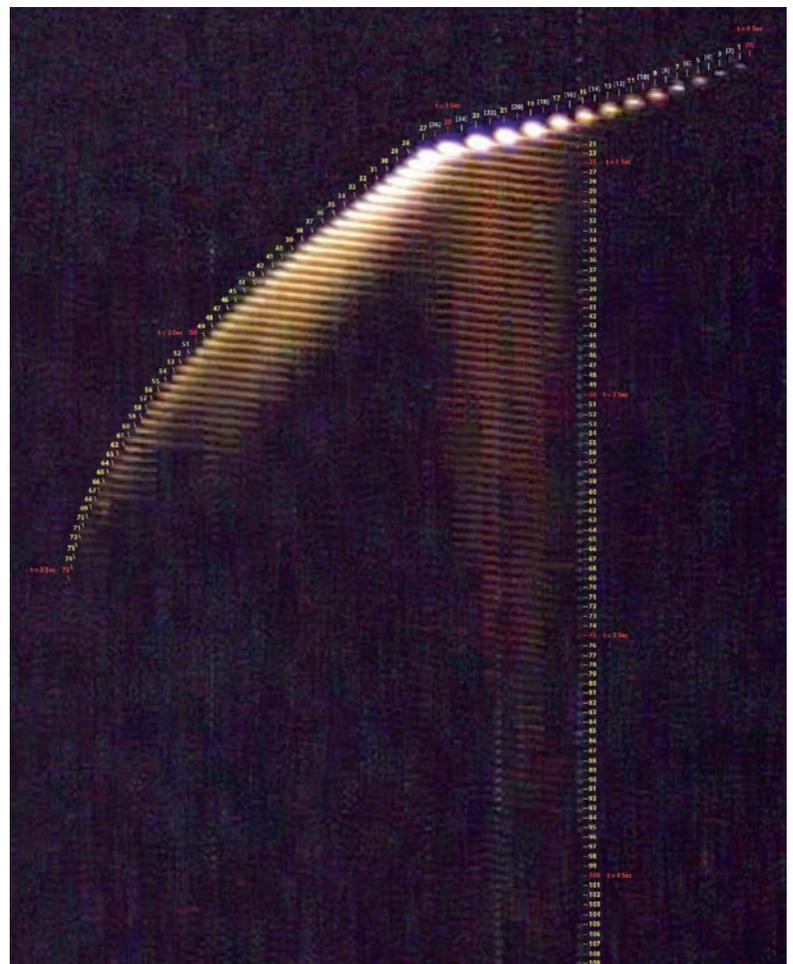
$$E_{\text{Punkt}} \sim \frac{1}{\frac{z}{D_{\text{Ep}}}}^2$$

Dabei ist z der Durchmesser des Beugungsscheibchens; dieser ist nur vom Auflösungsvermögen des Objektivs abhängig, er kann somit als Konstante betrachtet werden.

Aus der Gegenüberstellung der beiden Formeln ergibt sich, dass bei flächenhaften Objekten die Belichtung umgekehrt proportional zum Quadrat der Blendenzahl F ist, bei punktförmigen Objekten dagegen direkt proportional zum Quadrat der Eintrittspupille D_{Ep} . Bei gleichem Bildwinkel und gleicher Blendenzahl sind daher Kameras mit großem Sensor und entsprechend großer Brennweite und Eintrittspupille im Vorteil gegenüber Kameras mit kleinem Sensor und entsprechend kleiner Brennweite und Eintrittspupille!

Bei einer geeigneten Ausrichtung der Kamera quer zum Radianten bewegen sich die Meteore so schnell durch das Bildfeld der Kamera, dass ihre Spuren selbst bei einer Belichtungszeit von nur $1/25$ Sek. über mehrere Pixel verschmiert werden. (Nur ein Meteor der genau aus dem Radianten auf die Kamera zugeflogen käme würde keine Relativbewegung ausführen, sondern ortsfest aufleuchten.) Bei unbewegten Objekten ist die Belichtungszeit t_B identisch mit der Integrationszeit t_i des Sensors. Doch bei schnell bewegten Objekten wie Meteoren ergibt sich die Belichtungszeit aus der Zeit t_v , die das Abbild des Meteors über einen Pixel des Sensors streicht. So lange aber t_v kleiner ist als t_i – und das ist, wie gesagt, bei Meteoren zumeist der Fall – so lange treten die Meteore gegenüber dem Himmelshintergrund in der Laufbildaufnahme deutlicher hervor als in der länger belichteten Fotoaufnahme.

Für die Meteorforschung sind also digitale Filmkameras oder Fotokameras mit Filmfunktion mit einer Empfindlichkeit von mindestens 20.000 ISO in Full-HD- oder UHD-Auflösung in Verbindung mit hoch lichtstarken Filmobjektiven durchaus interessant. Auch fotometrische Messungen sind mit ihnen möglich, wenn die reale Gammakurve der Kamera ausgemessen wird. Eine Bilddatenkompression spielt eine untergeordnete Rolle, da ein Meteor vor einem Nachthimmel für einen Datenkompressor ein einfach zu bewältigendes Motiv darstellt. Potenzielle Einsatzgebiete



Aufnahme mit Canon C 300 und Zeiss High Speed Cine Distagon 1.2/18 mm, F = 1.2, 20.000 ISO, 25 B/s, MPEG-2 8 Bit 4:2:0 50 Mbit/s

[8] Ausführlich z. B. in Martin, Axel; Kleemann-Bröker, Karolin: „CCD-Astronomie in 5 Schritten“, Oculum Verlag, 2004

sind die Bestimmung des sog. Populationsindex' – das ist die Leuchtkraftverteilung innerhalb eines Meteorstroms – durch die parallele Aufnahme mit mehreren Kameras mit identischem Bildausschnitt aber unterschiedlicher Belichtung sowie Aufnahmen zeitlich hoch aufgelöster Meteorspektren oder Stereo-Aufnahmen mit bildgenau verkoppelten Kameras mit einer Stereobasis im Bereich von 10 bis 100 Kilometer.

Einzelbildakkumulation: Sonnenfinsternis physikalisch

Die Atmosphäre der Sonne besteht aus mehreren nur unterschiedlichen Schichten. Von der Erde aus sehen wir lediglich die Photosphäre. Über ihr befindet sich die wenige hundert Kilometer dicke Chromosphäre, die bei Verwendung extremer Schmalbandfilter auch mit erdgebundenen Teleskopen beobachtet werden kann. Die darüber befindliche Korona erstreckt sich dagegen fünf bis zehn Sonnenradien in den Raum, ihr Gesamtdurchmesser liegt also bei 2,5 bis 5°. [9] Da die Korona aus sehr heißem Plasma besteht, ist ihre Morphologie stark von den Magnetfeldern der Sonne abhängig, die ständigen Schwankungen mit einem elfjährigen Grundrhythmus unterliegen. Schnelle Veränderungen des solaren Magnetfelds können im Bereich von Stunden, z. T. von Minuten, erfolgen.

Für den irdischen Beobachter ist die Korona allerdings normalerweise durch die sehr viel hellere Photosphäre der Sonne überstrahlt. Im sichtbaren Licht wird sie von der Erde aus allein während einer totalen Sonnenfinsternis sichtbar, also jeweils nur für die wenigen Minuten, in denen die Mondscheibe die Photosphäre und die Chromosphäre der Sonne verdeckt. Eine totale Sonnenfinsternis gehört zu den spektakulärsten Naturerscheinungen überhaupt. Allerdings erscheint sie nur auf einem wenige Kilometer breiten Finsternispfad, dessen geografische Lage keinerlei Rücksichten auf die Position irdischer Beobachter nimmt: Sonnenfinsternisse sind mit Reisen verbunden.

Tiefe Aufnahmen der Korona sind auch heute noch wissenschaftlich relevant, da sie besonders detaillierte Rückschlüsse über die aktuelle Sonnenaktivität erlauben. Die totale Sonnenfinsternis am 20. März 2015 war nur entlang eines schmalen Streifens über dem Nordatlantik sichtbar, der lediglich an zwei Stellen festen Boden berührte, den Färöer-Inseln und Spitzbergen. Diese Gegenden sind nicht gerade für ihr gutes März-Wetter bekannt. Da kam mir kam das Angebot eines Bonner Reiseveranstalters gerade recht: Ein Beobachtungsflug mit einer Chartermaschine, in der lediglich ein Drittel der Sitze, rechts am Fenster und rechts in der Mitte, vergeben wurden. Bei einer Reisegeschwindigkeit von 850 km/h dauerte die Totalität an

Bord rund eineinhalb Mal so lang wie auf dem Boden. Die Flughöhe von 11.000 m versprach perfekte Sichtbedingungen, allein getrübt durch das Bordfenster. Die beiden Sitzplätze in einer Reihe waren exakt zur Finsternismitte auf Ansage zu wechseln; dieser Vorgang wurde mehrfach geprobt. Ich hatte allerdings zwei Plätze gebucht.

Aufgrund der Feinheit der Strukturen der Korona und aufgrund ihres großen Kontrastumfangs vom Sonnenrand nach außen hin von bis zu 10.000:1 steht die Fotografie vor besonderen Herausforderungen. Um die feinen Strukturen herauszuarbeiten, werden Schärfefilter mit Rotationsverlauf angewendet, z. B. nach Larsen-Sekanina. Doch diese erfordern sehr rauscharme Ausgangsbilder. Aus dem Flugzeug heraus verboten sich sowohl eine lange Brennweite als auch lange Belichtungszeiten bei geringer ISO-Einstellung. Stattdessen empfahl sich eine digitale Filmkamera mit einem Teleobjektiv, um die Relativbewegungen des Flugzeugs durch Schwenken auszugleichen und Sonne und Mond möglichst in der Bildmitte halten. Bei den Laufbildsequenzen entstehen innerhalb der kostbaren Beobachtungszeit große Mengen an Einzelbildern, die später passgenau aufaddiert werden, wodurch das Bildrauschen reduziert wird. Durch die leichten Relativbewegungen treten auch Kratzer, Schmutz und Eisblumen auf dem Bordfenster weniger bildwirksam in Erscheinung. Diese Aufnahmetechnik kombinierte ich mit der Methode des Tone-Mappings, bei dem mehrere Serien unterschiedlich belichteter Bilder nachträglich überlagert werden. Um die feinsten Strukturen herauszuarbeiten wurden starke Schärfefilter eingesetzt, was ein sehr rauscharmes Bild voraussetzte. Dabei ist das Signal-Rausch-Verhältnis S/N direkt proportional zur Anzahl n der aufaddierten Einzelbilder^[10]:

$$S/N \sim \sqrt{n}$$

Für die Aufnahmen stellte mir die Firma Arri ihr neuestes Modell, die Alexa Mini, zur Verfügung. Gegenüber der großen Alexa ist das Gehäuse der Mini sehr viel kompakter; es besteht aus Carbonfaser und wiegt ohne Objektiv, Sucher und Akku 2,5 kg. Alle Alexas haben denselben 24 x 13,5 mm großen CMOS-Sensor mit einer nativen Auflösung von 2880 x 1620 Pixel. Der übertragbare Szenenkontrast beträgt mehr als 15 Blendenstufen. Aufgezeichnet wird auf C-Fast 2.0 Speicherkarten. Bestückt wurde unsere Alexa Mini mit einem Zeiss Cine Sonnar 2.8/180 mm. Vor dem Objektiv kam ein Linear-Polfilter zum Einsatz – das Licht der Korona ist stark polarisiert – und während der partiellen Phase eine verspiegelte Solarfilterfolie ND 3.8.

Der Airbus A 320 startete um 06:15 MEZ ab Zürich. Die Kernschattenlinie, der sogenannte Totality Run, wurde pünktlich um 09:30 UTC über den Färöer Inseln erreicht. Begleitet wurde ich von Katrin Richthofer und Christoffer Kempel von der Hochschule für Fernsehen und Film, die einen Fernsehbericht über den Beobachtungsflug drehten, der in der Schweizer Tagesschau gesendet wurde. Auf dem Totality Run flogen nicht weniger als 22 Jets zur Sofi-Beobachtung, alle dirigiert von einem speziell engagierten Chefnavigator.



Der Kameraaufbau mit der ARRI Alexa Mini

[9] Reinsch, Klaus e. a. (Hrsg.): „Die Sonne beobachten“, Verlag Sterne und Weltraum, 1999



Aufnahme mit Arri Alexa Mini und Zeiss Standard Prime Cine Sonnar 2.8/180 mm, 25 B/s, ProRes 422 HQ 10 Bit, Komposit aus 13 Sequenzen á 74 bis 311 Einzelbilder, F 2.8 – F 11, ISO 800 bis 3200, t = 1/1800 S bis 1/25 S

Zu Beginn der Totalität startete ich eine Reihe von insgesamt 13 Filmaufnahmen mit einer Belichtungsvarianz über jeweils eine Blendenstufe, die knappste Belichtung erfolgte bei Blende 11, 1/1800 s Belichtungszeit bei 800 ISO (der nativen Kameraempfindlichkeit), die längste bei Blende 2.8 und 1/25 s bei 3200 ISO. Die Szenen belichtete ich bei 25 Bilder/s zuerst über 5–7 Sekunden, später bis 15 s, um genügend Einzelbilder zu erhalten. Innerhalb der 3:44 Min. langen Totalität waren die Mondscheibe, die Protuberanzen und die äußere Korona sehr schön im elektronischen Sucher der Alexa Mini zu sehen. Das Flugzeug lag während der Totalität recht ruhig in der Luft, dennoch musste ich Mond und Sonne ständig durch manuelle Ausgleichsschwenks in der Bildmitte halten.

Die Bildbearbeitung dauerte insgesamt drei Tage. Die Aufzeichnung mit der Alexa Mini war in 2K (2048 x 1152 Pixel) auf ProRes 4444 12 Bit erfolgt. Um das Material mit den in der Astrofotografie üblichen Programmen bearbeiten zu können, wurde es zuerst komplett in Einzelbilddateien im Format 16 Bit RGB TIFF konvertiert; von Hand wurden aus den 13 Sequenzen die 2.596 schärfsten Einzelbilder selektiert.

Diese 2.596 Einzelbilder wurden getrackt und pro Sequenz zu jeweils einem Teilsummenbild aufaddiert. Das Tracken erfolgte in 4K, hierbei ergibt Subpixelgenauigkeit einen echten Auflösungsgewinn. Die 13 4K-Teilsummenbilder wurden im FITS-Format (32 Bit Gleitkomma) abgespeichert, was 110 MB pro Datei ergab. Nach einer Gammakorrektur wurden diese Teilsummenbilder wieder als 16 Bit TIFF abgespeichert. Im nächsten Schritt wurden die 13 4K-TIFF-Teilsummenbilder zu einem Tone-Mapping-Komposit verarbeitet. Hierzu wurde eine 16 Bit Pho-

toshop-Datei mit 14 Ebenen angelegt, in die die Teilsummenbilder mit der am tiefsten belichteten Aufnahme unten und der am knappsten Aufnahme oben eingefügt wurden. Die oberste Ebene bestand aus einem scharfen Einzelbild der Mondscheibe bei der knappsten Belichtung, da dies die größte Schärfe für diese Ebene ergab. Die PSD-Datei umfasste am Ende 750 MB. Das Tone-Mapping erfolgte in Photoshop mit ovalen, weichen Auswahlmasken und mit einer Anpassung des jeweiligen Deckungsgrades. Zuletzt wurde die Struktur der Korona durch eine Schärfenfilterung mit unscharfer Maskierung sowie mit einem radialen Schärfenfilter nach Larsen-Sekanina herausgearbeitet.

Im Ergebnis sind die Strukturen der äußeren Korona der Sonnenfinsternis vom 20. März 2015 noch in einem Abstand von bis zu zehn Sonnenradien erkennbar.

Fazit

Die hohe Entwicklungsdynamik digitaler Filmkameras und Fotokameras mit Filmfunktion eröffnet im Bereich schnell ablaufender astronomischer oder meteorologischer Vorgänge auch der professionellen Wissenschaft neue Möglichkeiten, die bisher noch nicht ausgeschöpft sind. Ein weiterer Technologietransfer erscheint daher durchaus lohnenswert. ◀



Prof. Dr.-Ing. **Peter C. Slansky**

hat seit November 1999 den Lehrstuhl als Geschäftsführender Leiter der Abteilung II Technik der Hochschule für Fernsehen und Film München, ist promoviert in Architektur und beschäftigt sich außerdem mit Astronomie

^[10] Martin, Axel; Koch, Bernd: „Digitale Astrofotografie“, Oculum Verlag, 2009