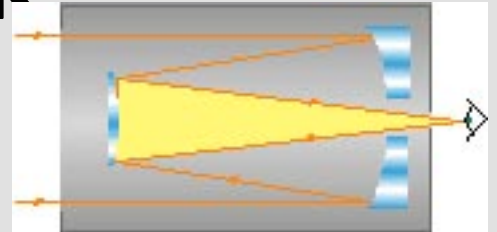


Cassegrain-Teleskope mit scharfem Blick

Alternative Fokussierung mit Hilfe eines Linearaktuators

VON THOMAS EVERSBERG UND KLAUS VOLLMANN



Wie lässt sich ein Cassegrain-Teleskop präzise fokussieren, wenn schwere Zusatzgeräte den Okularauszug belasten? Eine alternative Methode erweist sich als vorteilhaft: Der Okularauszug bleibt unverändert, stattdessen verschiebt man den Sekundärspiegel.

Die Fokussierung eines astronomischen Teleskops wird in der Regel mit Hilfe eines axial beweglichen Okularauszugs durchgeführt. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen auf der Hand: Zum einen bleibt die Geometrie des optischen Systems erhalten und zum anderen ist die Fokussierung ohne großen Aufwand mittels handelsüblicher Okularauszüge durchführbar. Zudem ist dieses Verfahren bei 1 $\frac{1}{4}$ -Zoll-Okularen noch relativ preisgünstig. Möchte man jedoch fortgeschrittene Optiken und Messausrüstungen – wie zum Beispiel schwere Weitwinkelokulare oder einen Spektrographen – verwenden, so kann aus Gründen der Stabilität kaum auf teure 2-Zoll-Okularauszüge verzichtet werden.

Beim Bau eines 12,5-Zoll-Newton-Cassegrain-Teleskops stießen wir recht schnell auf das Problem der Stabilität, denn geplant war die Anwendung schwerer Nagler-Okulare und einer wassergekühlten, fünf Kilogramm schweren MegaTek-CCD-Kamera im Cassegrain-Fokus. Da wir in Bezug auf den Selbstbau von Teleskopen konservativ eingestellt sind und hinsichtlich der Stabilität ungern Kompromisse eingehen, verfolgten wir die Idee, den Okularauszug unbeweglich zu gestalten und stattdessen mittels Axialverschiebung des Cassegrain-Fangspiegels zu fokussieren.

Leider basieren die meisten Fangspiegelfokussierungen auf mechanisch aufwändigen Lösungen mit Zahnrädern und Führungen. Um nun eine einfachere Lösung zur Fangspiegelpositionierung zu finden, müssen wir zunächst die Op-

tik eines Cassegrain genauer betrachten und dabei berücksichtigen, dass sich mit der Verschiebung des Fangspiegels das Gesamtsystem dynamisch ändert.

Dynamische Optik

Für die axiale Positionierung des Cassegrain-Fokus muss das Verhalten der Brennweite in Abhängigkeit von der Position der optischen Elemente bekannt sein. Die Berechnung einer Cassegrain-Optik wird in entsprechenden Büchern behandelt [1, 2]. Dabei ergibt sich der Brennweitenverlängerungsfaktor m für ein klassisches Cassegrain-System mit der Primärbrennweite F und Systembrennweite F' zu

$$m = \frac{F'}{F}.$$

Unter Berücksichtigung der Brennweiten und Optikabstände lassen sich nun alle Systemgrößen und die Systembrennweite bestimmen. Allerdings gilt dies nur für den statischen Fall von fixierten Positionen der optischen Elemente. Im dynamischen Fall, also bei der Bewegung des Fangspiegels, verschiebt sich die Fokusposition bei kleinen Bewegungen des Fangspiegels in axialer Richtung sehr stark. Bei der Systemfokussierung mittels eines beweglichen Fangspiegels muss diese Dynamik berücksichtigt und zunächst bestimmt werden.

Der Fang- oder Sekundärspiegel wirkt wie eine Zerstreuungslinse und streckt die Brennweite des Primärspiegels (Abb. 1). Da die Änderung der Fokusposition des Gesamtsystems, also die Bildweite b , in Abhängigkeit von der Änderung des Abstands zwischen Primärfokus und

Abb. 1: In einem Schmidt-Cassegrain-Teleskop fällt das Licht durch eine Korrektionsplatte auf den Primärspiegel. Dieser reflektiert es zum Sekundärspiegel (Fangspiegel). Von hier aus gelangt es durch eine zentrale Bohrung des Primärspiegels zum Okular.

Fangspiegel, also der Gegenstandsweite g , gesucht wird, muss die Ableitung db/dg bestimmt werden. Nach dem Linsengesetz gilt:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} - \frac{1}{b}.$$

Daraus folgt

$$\frac{db}{dg} = \left(\frac{f}{f-g}\right)^2$$

oder:

$$\Delta b = \left(\frac{f}{f-g}\right)^2 \Delta g. \quad (1)$$

Dabei wird für f die Brennweite f_s des Sekundärspiegels eingesetzt: $f \equiv f_s$. Die Gegenstandsweite g ergibt sich aus der Brennweite des Primärspiegels f_p minus dem Abstand d zwischen beiden Spiegeln, also

$$|g| = f_p - d \quad (2)$$



Abb. 2: In dieser schematischen Darstellung der Fangspiegeloptik wird der hyperbolische Fangspiegel vereinfachend als Streulinse dargestellt.

Die Brennweite des Sekundärspiegels ist in der Regel bekannt oder kann aus den vorhandenen Systemdaten mit Hilfe der Gleichung:

$$f_s = \frac{m g}{m - 1} \quad (3)$$

bestimmt werden. Für unser 12,5-Zoll-System ergibt sich mit Gleichung (2)

$$|g| = 1270 \text{ mm} - 939.8 \text{ mm} = 330.2 \text{ mm}$$

g ist jedoch virtuell und damit negativ, da der Fangspiegel wie eine Zerstreulinse wirkt, also $g = -330.2 \text{ mm}$. Die Brennweite des Fangspiegels ist ebenfalls negativ und ergibt sich zu $f_s = -440.3 \text{ mm}$. Daraus ergibt sich mit (1):

$$\Delta b = \left(\frac{-440.3 \text{ mm}}{-330.2 \text{ mm} - (-440.3 \text{ mm})} \right)^2 \Delta g$$

Hiermit erhält man $\Delta b = 16 \Delta g$. Wird der Fangspiegel also nur um einen Millimeter verschoben, so verschiebt sich der Fokus des Gesamtsystems also um 16 Millimeter. Dabei ist anzumerken, dass dieser Faktor nichtlinear ist, denn aus Gleichung (3) ergibt sich:

$$m = \frac{f_s}{f_s - g}$$

und daraus:

$$\frac{dm}{dg} = \frac{f_s}{(f_s - g)^2}$$

Dieser Zusammenhang lässt sich mit $m = b/g$ auch direkt aus Gleichung (1) ableiten. Wird der Fangspiegel in Richtung Hauptspiegel bei zunehmendem g verschoben, so wird der Brennweitenverlängerungsfaktor also stetig größer und er wird umgekehrt stetig kleiner bei entgegengesetzter Verschiebung. Die lineare Verschiebung des Fangspiegels durch den Schrittmotor bewirkt dabei eine nichtlineare axiale Fokuspositionierung. Im Fall kleiner Verschiebungen ist dies jedoch vernachlässigbar. Dies gilt auch für den Lichtverlust im Primärgesichtsfeld, da dieser praktisch vernachlässigbar klein ist (Abb. 2).

Mechanik

Zur motorisierten Fokussierung bieten sich Schrittmotoren an. Wer sich einmal mit ihnen auseinandergesetzt hat, wird ihre Vorteile nachvollziehen können:

- Sie sind exakt zu positionieren,
- per Computer leicht zu steuern,
- benötigen keinen Encoder und
- nutzen einen großen Geschwindigkeitsbereich.

Der Nachteil eines von der Drehzahl begrenzten Drehmoments wird bei der Steuerung von Teleskopmontierungen durch aufsetzbare Getriebe kompensiert, kann bei der Führung eines relativ leichten Fangspiegelsystems jedoch oft vernachlässigt werden. Es genügt, ein entsprechendes Getriebe zur Umsetzung der Rotations- in eine Axialbewegung zu montieren. Allerdings sind solche Getriebe teuer oder aufwändig zu konstruieren und normalerweise nicht hinter kleineren Fangspiegeleinheiten anzubringen. Es liegt also nahe, im Markt nach Einheiten zu suchen, die diese Umsetzung direkt durchführen und möglichst klein sind.

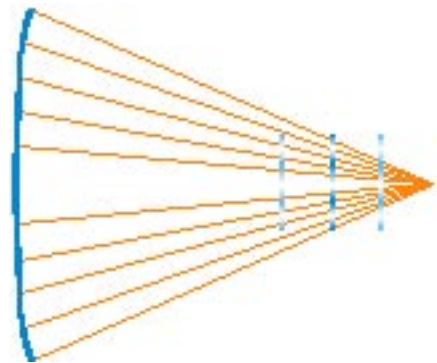
Nach Konsultation von mehreren Fachleuten, insbesondere aus dem Maschinenbauhandel, stießen wir auf Linearaktuatoren. Es handelt sich hierbei um einfache Schrittmotoren, welche die Drehbewegung der Rotorwelle durch eine interne Spindel in die lineare Bewegung einer Schub/Drehachse umwandeln. Ihr wesentlicher Vorteil liegt in der simplen und getriebefreien Axialpositionierung ohne Schnecken- oder Zahnradgetriebe. Darüber hinaus sind Linearaktuatoren kompakt. Die Spindel, welche die Drehbewegung des Schrittmotors in eine axiale Bewegung des Druckstücks und somit des Fangspiegels umsetzt, ersetzt das sonst notwendige Getriebe aus Zahn- oder Schneckenrädern, welches bei kleineren Teleskopen keinen Platz hinter dem Fangspiegel findet.

Obwohl bei der Fokussierung nur ein bis zwei Millimeter lange Wege zurückgelegt werden müssen, ist klar, dass eine möglichst lange Führung der Motorwelle erforderlich ist, um ein radiales Spiel und somit die Kippung der optischen Achse zu minimieren. Nach Durchsicht von Katalogen mehrerer Hersteller nahmen wir, auch wegen des günstigen Preises, Kontakt mit der Firma Microstep in Sömmerda auf (Web: www.microstep-soemmerda.de). Dabei erfuhren wir, dass deren Motor mit der längsten Führung von rund 76 Millimetern (Baureihe LA 72.8000) noch ein radiales Führungsspiel von etwa 50 Mikrometern aufweist. Bei unserem Abstand zwischen Fangspiegel und Fokus von rund 1320 Millimetern würde dies ein radiales Fokusspiel von 0.8 Millimetern bedeuten. Auf unsere Anfrage legte Microstep einen Motor auf, der maximal zehn Mikrometer radiales Spiel besitzt, womit im Fokus unserer Optik ein maximales Radialspiel von 0.16 Millimetern auftritt.

Axiale Positionierung

Der Linearaktor 72.8000 von Microstep wird pro Vollschritt um fünf Mikrometer bewegt. Das bedeutet mit

▼ Abb. 3: Durch die Axialbewegung des Fangspiegels entsteht ein Lichtverlust im Primärgesichtsfeld, da die äußeren Lichtstrahlen den Fangspiegel verfehlen.



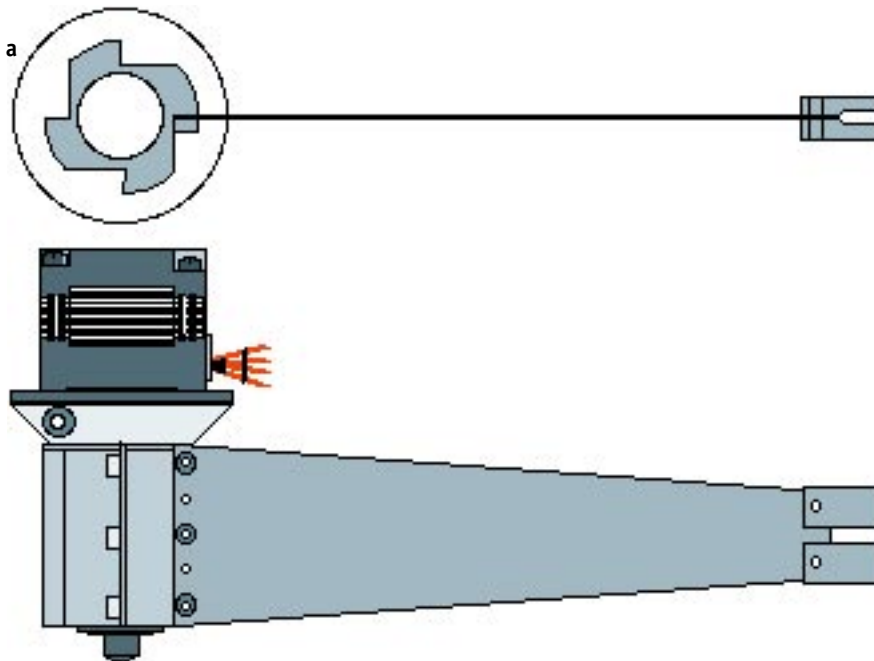
dem Verlängerungsfaktor $m = 16$ eine Axialverschiebung des Fokus um 80 Mikrometer. Die Fokussiergeschwindigkeit sollte nun nicht zu hoch sein, da der Fokus sonst visuell oder via CCD nicht gut gefunden werden kann. Bei der Fokussierung per CCD muss das Verhältnis zwischen Fokussier- und Auslesegeschwindigkeit so ausgelegt werden, dass der CCD genügend Zeit hat, den Fokus zu finden. Des Weiteren sollten die Positionierschritte zur Feinfokussierung möglichst klein sein, da sonst die festen Positionen der einzelnen Schritte zu stark von der eigentlichen Fokusposition abweichen können. Somit ist ein Kompromiss zwischen ausreichender Genauigkeit und praktikabler Geschwindigkeit erforderlich.

Zur Bestimmung der notwendigen Parameter muss zunächst derjenige Bereich bestimmt werden, innerhalb dessen sich der Fokus nur noch minimal ändert. Diese »kritische Fokalzone« (KF) lässt sich durch folgende Faustformel ermitteln [3]:

$$KF = 2.2 f_N^2 \mu\text{m}$$

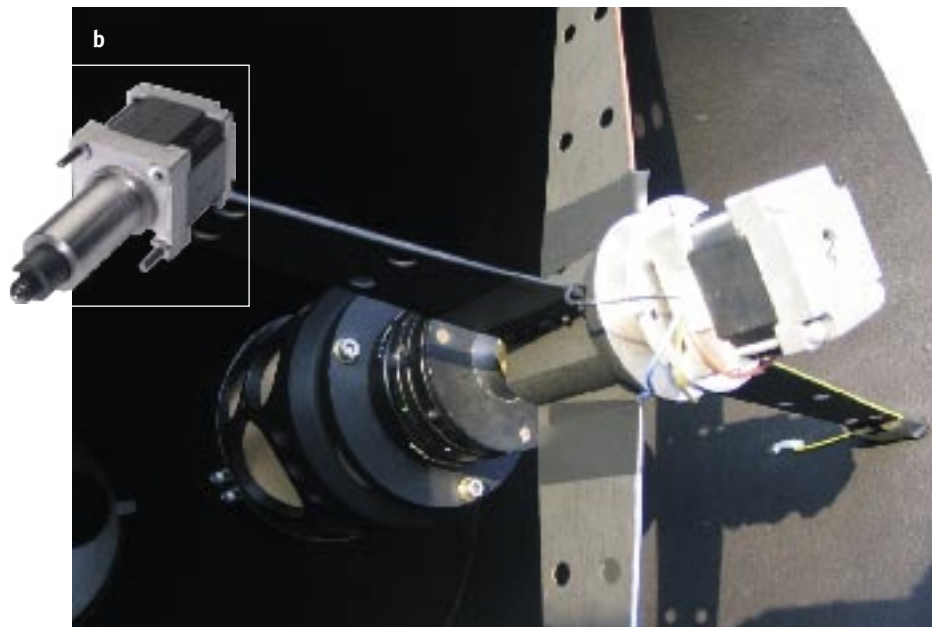
wobei f_N das Verhältnis der Systembrennweite F' zur Öffnung D ist: $f_N = F'/D$. Für unser klassisches Cassegrain-Teleskop mit $D = 317.5 \text{ mm}$ und $F = 4 \times 1270 \text{ mm}$ ergibt sich $f_N = 16$ und damit $KF = 563.2 \mu\text{m}$.

Es ist nun zu beachten, dass die Fokussiereinheit axiale Schritte durchführen kann, die maximal halb so groß sind, wie die kritische Fokalzone. Zur optimalen Fokussierung bei exzellentem Seeing sollten die Schritte sogar nur ein Viertel der KF oder kleiner sein. Im vorliegenden Fall erfüllen wir diese Bedingung deutlich, denn wir können die Fangspiegelzelle im Achtelschritt-Modus mit einer Schrittweite von zehn Mikrometern bewegen, also etwa $1/50$ KF.



◀ Abb. 4a: Anordnung des Linearaktuators als Fangspiegelhalterung in der Spinne.
b: Das Fangspiegelsystem mit dem Linearaktor LA 72.8000 von Microstep (Inset) im eingebauten Zustand. Die vier farbigen Kabelzuführungen sind an den Blechen der Spinne befestigt.

▶ Abb. 5: Die Tastbox ermöglicht ein präzises und bequemes Ansteuern des Linearaktuators.



Zur elektronischen Steuerung des Systems nutzen wir den programmierbaren Schrittmotortreiber PST0802 von Microstep, welcher in einem kleinen Gehäuse untergebracht werden kann. Die entsprechende Beschaltung über Widerstände ist als kleine Zusatzplatine ebenfalls dort untergebracht. Im Ruhezustand liegen die Eingänge der PST0802 über Widerstände auf Masse, und die Ansteuerung erfolgt über Öffner. Die entsprechende Beschaltung über Taster ist dabei insofern ein Problem, da nur wenige Taster im Markt als Öffner ausgelegt sind, während Schließer in verschiedensten Varianten erhältlich sind. Daher haben wir zusätzlich einen Invertier-Chip in das Gehäuse eingebaut, der die TTL-Signale umkehrt. Die verschiedenen Geschwindigkeiten lassen sich über einen Drehschalter einstellen. In Abb. 5 ist das an der Montierung befestigte Steuerungsgehäuse sowie das Gehäuse mit dem Kipptaster für die Bewegungsrichtung und dem Drehschalter für die Motorgeschwindigkeiten zu sehen.

Selbst bei langen Belichtungszeiten treten keinerlei Probleme mit möglichem Spiel im System auf, also auch nicht in der Führung des Sekundärspiegels. In der Praxis ist dieses Spiel nur bei der Richtungsumschaltung sichtbar. Im stationären Betrieb (fixierter Fokus) tritt es nicht in Erscheinung. Mögliche Resteffekte werden von unserem Off-axis-guiden vollständig eliminiert.

Fazit

Die Anwendung eines Linearaktuators zur Fokussierung via Fangspiegelbewegung verringert den Aufwand einer mechanischen Steuerung für Fangspiegel beträchtlich und macht die Fokussierung mittels Fangspiegelverschiebung

Davon ausgehend entschlossen wir uns, den Linearaktor bei fest eingestellter Frequenz von 25 Hertz mit vollen, Halb-, Viertel- und Achtelschritten zu betreiben. Damit wird der Fokus in 1.75, 1.0, 0.5 und 0.25 Sekunden um diese 0.5 Millimeter axial verschoben. Die beiden niedrigen Geschwindigkeiten reichen also aus, um den Fokus optimal einzustellen. Die beiden hohen Geschwindigkeiten nutzen wir im Allgemeinen zur groben Positionierung beim Wechsel zu Okularen mit deutlich abweichender Fokussposition.

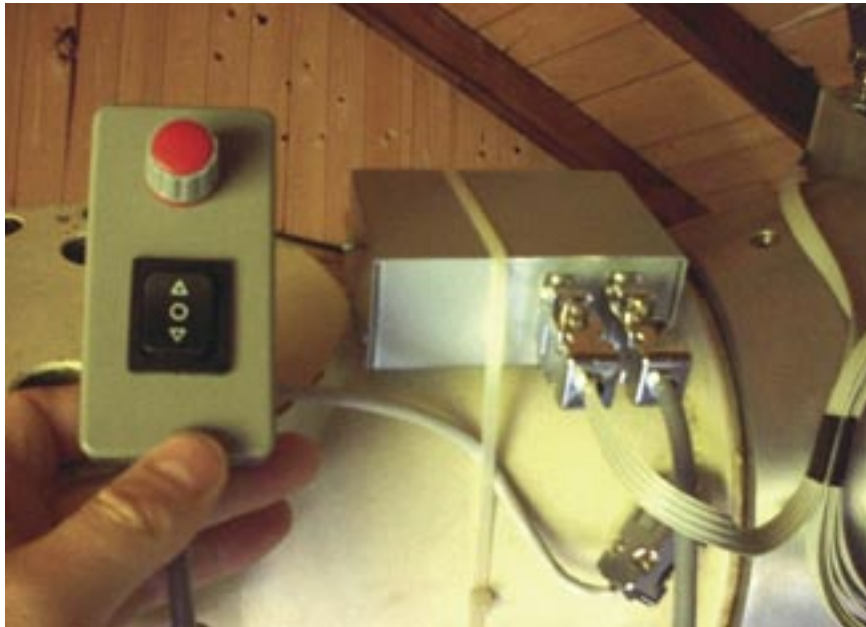
Praktische Ausführung

Der Aktuator wird von einem in der Spinne zentrierten Lagerbock gehalten und mittels Tangentialklemmung fixiert, welche die Motorführung sicher umschließt. Damit ist der Motor einfach einzusetzen und zu entfernen, und eine grobe Axial-

positionierung der Fangspiegelzelle ist möglich.

Abb. 4 zeigt den Linearaktor LA 72.8000 von Microstep, die Konstruktion in Aufsicht ohne Motor und in Seitenansicht mit Motor sowie das gesamte Fangspiegelsystem nach dem Einbau in den Tubus.

Mit Hilfe der Tangentialklemmung ist es möglich, den Motor zu drehen. Das ist wichtig, da wir den Hauptspiegel ebenso als Teil eines Newton-Systems nutzen. Dabei drehen wir einen einsetzbaren Diagonalspiegel via Bajonett in die für den Newton-Fokus korrekte Position. Auf das vom Motor angetriebene und axial bewegte Druckstück wird die Fangspiegelzelle geschraubt. Das Druckstück ist in zwei Versionen lieferbar: aus Kunststoff in einer Messinghülse und aus Messing in Edelhühse. Letzteres ist aus Gründen der Stabilität vorzuziehen.



auch für kleinere Teleskope attraktiv. Auch die elektronische Motorsteuerung stellt nur ein geringes Problem dar, da serienmäßig hergestellte Einheiten im Handel erhältlich sind. Mit einer relativ hohen Führungs- und Positionierungsgenauigkeit werden mehrere bisherige Konstruktionsprobleme umgangen. Die kompakte Bauweise erlaubt ihre Nutzung auch bei Teleskopen mit kleinen Fangspiegeln. Gerade wenn schweres Gerät am Systemfokus zum Einsatz kommt (CCD, Spektrograph, Photometer) hat diese Fokussiertechnik erhebliche Vorteile.

Der Aktuator kostet etwa 150 Euro. Die Steuerung PST0802/63 wurde uns mit rund 200 Euro berechnet, da diese erst erstellt werden musste. Dieser Preis reduziert sich nach Informationen der Firma Microstep durch die bereits erfolgte Entwicklung jedoch auf etwa 50 Euro. Alle anderen notwendigen Teile kosten ebenfalls etwa 50 Euro. Damit erhält man eine Fokussierung, die vielen Ansprüchen gerecht wird und dabei nur eines geringen finanziellen Aufwands bedarf.

Zuletzt ist anzumerken, dass im Lieferumfang einiger CCD-Kameras und ihrer Software eine Schnittstelle zur automatischen Fokussierung enthalten ist. Hiermit lässt sich bei hohen Belichtungszeiten (insbesondere mit schmalbandigen Filtern) eine mögliche Temperaturdrift kompensieren. Es liegt auf der Hand, dass die hier vorgestellte Lösung eine bestechende Alternative zu anderen Fokussiereinheiten darstellt. □

Wir danken Wolfhard Schlosser und Christian Vilter vom Astronomischen Institut der Ruhr-Universität Bochum für hilfreiche Diskussionen zur Optik und der mechanischen Umsetzung.

Literaturhinweise

- [1] **Kurt Wenske:** Spiegeloptik. Verlag Sterne und Weltraum
- [2] **H. Rutten, M. van Venrooij:** Telescope Optics: A Comprehensive Manual for Amateur Astronomers. Willmann-Bell, 4. Auflage 1999
- [3] **Ron Wodaski:** The New CCD Astronomy, New Astronomy Press, 2002



Thomas Eversberg ist Physiker und erforscht in Bochum und Montréal die Winde massereicher Sterne. Heute arbeitet er als Raumfahrtmanager beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und ist Mitglied der VdS-Fachgruppe »Spektroskopie«.



Klaus Vollmann ist Physiker und hat sich in Wuppertal mit dem zeitlichen Verhalten von Infrarotdetektoren und der Modellierung der oberen Erdatmosphäre beschäftigt. Heute arbeitet er als Financial Engineer und Risiko-Controller in der Finanzwirtschaft und ist ebenfalls Mitglied der VdS-Fachgruppe »Spektroskopie«.