

Didaktisches Material zu  
diesem Beitrag:  
[www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de)



Abb. 1: Die tief über dem Horizont stehende Sonne erscheint abgeplattet, weil die von ihrem unteren beziehungsweise oberen Rand ausgehenden Lichtstrahlen auf unterschiedlich stark gekrümmten Wegen durch die Atmosphäre zum Beobachter gelangen. Diese »differenzielle Refraktion« des Lichts hebt horizontnahe Lichtstrahlen stärker an als horizontferne. Unmittelbar am Horizont beträgt die Differenz durchschnittlich ein Fünftel des Sonnendurchmessers.

# Die Atmosphäre als Prisma

## Der Einfluss der Refraktion auf hochaufgelöste Astroatnahmen

VON MARKUS WILDI UND ARTHUR VON KÄNEL

Jede erdgebundene astronomische Beobachtung findet am Grund eines tiefen Luftozeans statt. Beim visuellen Beobachten verrät er sich durch das Flimmern des Sternlichts. Die Qualität hochauflösender Himmelsfotografien beeinträchtigt er zudem durch die als Refraktion bezeichnete Ablenkung des Lichts. Der folgende Beitrag beschreibt, wie sich dieser störende Einfluss durch das korrekte Ausrichten einer zur Fotografie genutzten Teleskopmontierung minimieren lässt.

Die Atmosphäre unseres Planeten beeinflusst erdgebundene astronomische Beobachtungen durch die Luftunruhe, die Lichtbrechung (Refraktion) und die Dispersion des Lichts. Die Luftunruhe verursacht das mit bloßem Auge sichtbare Flimmern des Sternlichts, die Refraktion lenkt es von seiner ursprünglichen Richtung ab und die Dispersion spaltet es in seine Spektralfarben auf.

Visuell ist der Einfluss der Refraktion nur in unmittelbarer Horizontnähe wahrzunehmen, beispielsweise als Abplattung der Sonnenscheibe (Abb. 1). Auf einer Sternfotografie hinterlässt sie jedoch im wörtlichen Sinne ihre Spuren.

Für Fotografien höchster Qualität sind somit nicht nur eine perfekt kollimierte Optik und eine einwandfrei arbeitende Nachführung entscheidend. Wer Winkelauflösungen im Bereich einer Bogensekunde anstrebt, muss auch den Einfluss der Refraktion berücksichtigen.

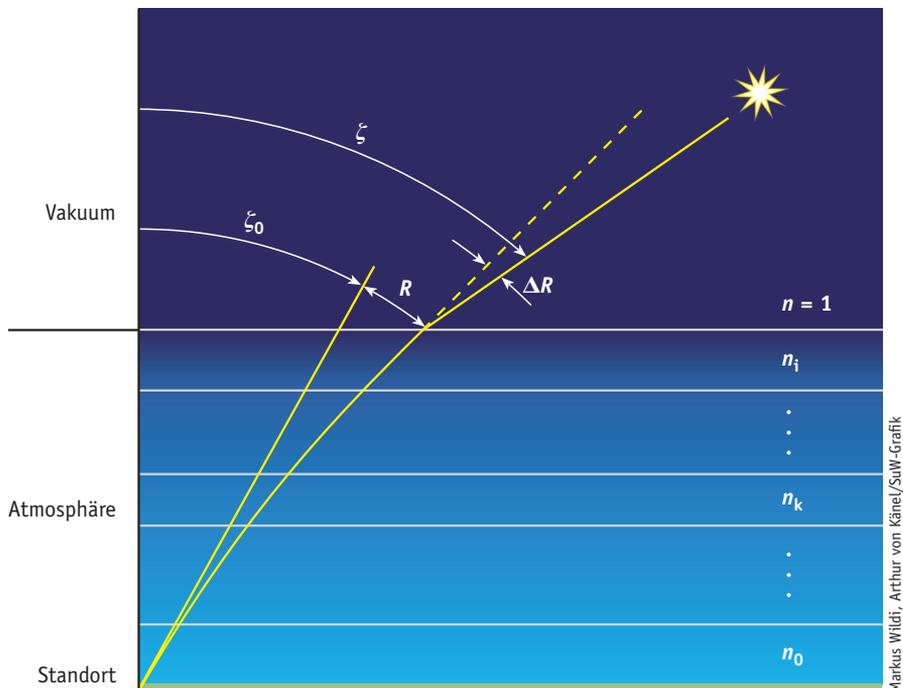
Betrachtet man ein typisches Bildfeld mit einem Durchmesser von einem Grad, dann erscheint ein Stern, der sich am oberen Rand befindet, also näher beim Zenit, weniger angehoben als einer, der sich am unteren Rand befindet. Dieser Differenzeffekt wird als Kompression des Bildfelds bezeichnet.

Zwar belichten Amateurastronomen ihre Himmelsaufnahmen vorzugsweise

bei großen Horizonthöhen, doch auch hier lässt sich der Einfluss der Kompression nachweisen. Bei einer Fotografie mit langer Belichtungszeit ist zu beachten, dass sich die Horizonthöhe der aufgenommenen Himmelsregion und damit die Bildkompression zwischen dem Beginn und dem Ende der Aufnahme ändern. Somit ändern sich infolge der Refraktion auch die relativen Positionen der Sterne auf dem Bild.

Man mag einwenden, dass sich die Berücksichtigung dieses Effekts bei dem vergleichsweise kleinen Bildfeld und den kurzen Belichtungszeiten einer CCD-Kamera nicht lohne. Viele Beobachter belichten Himmelsobjekte jedoch nacheinander durch die Filter R, G und B. Die für eine RGB-Aufnahme erforderliche Zeit kann durchaus eine Stunde betragen. Bei der Überlagerung der einzelnen Farbkanäle kann die in jedem Bild unterschiedlich große Kompression das Auflösungsvermögen mindern. Somit ist der Beobachter dann mit denselben Problemen konfrontiert, wie bei der konventionellen Fotografie mit langen Belichtungszeiten.

► Abb. 2: Ein unter der wahren Zenitdistanz  $\zeta$  einfallender Lichtstrahl trifft auf die Erdatmosphäre und wird dabei aus seiner ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. Deshalb sieht der Beobachter den Strahl unter der scheinbaren Zenitdistanz  $\zeta_0$ . Zur Berechnung des Ablenkungswinkels  $R = \zeta - \zeta_0$  betrachtet man die Atmosphäre als eine Folge flacher Luftschichten mit Brechungsindizes  $n_i$ . Für das Vakuum des Weltalls gilt  $n = 1$ . Mit abnehmender Höhe über dem Erdboden nimmt  $n_i$  zu. Jede Schicht trägt zur Lichtablenkung einen Winkel  $\Delta R$  bei, dessen Größe durch das Snelliussche Brechungsgesetz bestimmt ist. Die am Beobachtungsort wirksame Ablenkung  $R$  ergibt sich aus der Summation der einzelnen Beiträge.



Markus Wildt, Arthur von Känel/SuW-Grafik

Im Unterschied zur unvorhersehbar schwankenden Luftunruhe lassen sich die Einflüsse der Refraktion und der Dispersion berechnen. Zur Berechnung des in der Fokalebene eines Teleskops zu erwartenden Bilds erstellen wir ein Simulationsprogramm, das auf einer Idee des Astronomen P.T. Wallace und Mitarbeiter basiert [1].

Im Folgenden zeigen wir zunächst, wie die Erdatmosphäre das aus dem Weltall kommende Licht beeinflusst und wie ein beugungsbegrenztes Teleskop während einer Fotografie unter realem Himmel punktförmige Quellen abbildet. Anschließend beschreiben wir, wie sich die durch die Refraktion verursachte Verschlechterung der Abbildung durch eine präzise Ausrichtung der Stundenachse der Teleskopmontierung minimieren lässt. Die korrekte Position der Stundenachse trägt, wie die Qualität der Optik und der Montierung, entscheidend zum Gelingen einer Himmelsaufnahme bei, und nur sie erlaubt es, den Einfluss der Refraktion zu einem großen Teil zu kompensieren.

### Einfluss der Refraktion auf die Bildqualität

Die Refraktion des aus dem Weltall kommenden Sternlichts lässt sich in vereinfachter Form durch die Summe der Einflüsse horizontaler Luftschichten beschreiben, deren Dichten und Brechungsindizes mit abnehmender Höhe über dem Erdboden zunehmen (Abb. 2). Zur Beschreibung der Winkeländerung des Sternlichts nutzt man dieses Modell in Verbindung mit dem Gesetz von Snellius (siehe Infokasten »Das Brechungsgesetz von Snellius«). Damit ergibt sich für die

## Das Brechungsgesetz von Snellius

Licht, das sich von einem Medium 1 in ein Medium 2 ausbreitet, wird an der Grenzfläche der beiden Medien aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt (siehe Skizze). Dieses Phänomen bezeichnet man als Lichtbrechung oder Refraktion.

Die Ursache für die Refraktion liegt in den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $c_1$  und  $c_2$  des Lichts innerhalb der Medien. Ihren Zusammenhang mit den Einfallswinkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  beschreibt das nach dem niederländischen Physiker Snell van Rojen (1580 bis 1626) benannte Snelliussche Brechungsgesetz.

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

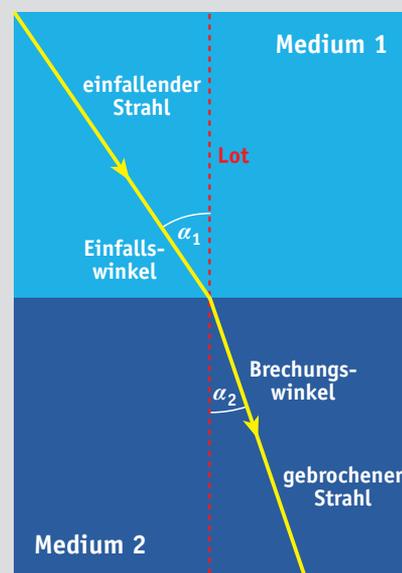
Gebräuchlicher als die Angabe der Lichtgeschwindigkeiten ist die Angabe des jeweiligen Brechungsindex  $n$ . Er ist als das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit  $c_M$  im betrachteten Medium definiert:  $n = c_0/c_M$ . Für das Vakuum gilt somit  $n = 1$ , für ein Medium  $n > 1$ . Damit lässt sich das Gesetz von Snellius auch in der Form

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

beschreiben, wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes der Medien 1 und 2 bezeichnen.

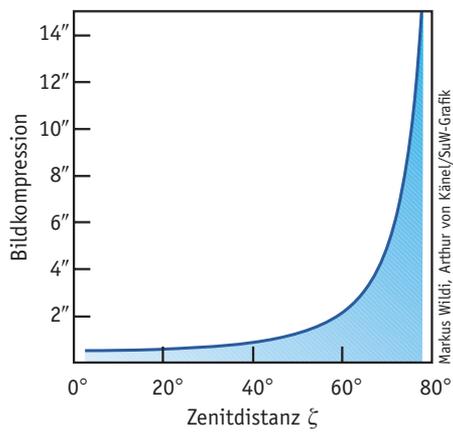
Der Brechungsindex der Erdatmosphäre hängt vom Luftdruck, der Temperatur und in geringem Umfang von der che-

mischen Zusammensetzung der Luft am Boden ab. Zudem hängt die Refraktion von der Wellenlänge des Lichts ab. Ähnlich einem Prisma bricht die Atmosphäre blaues Licht stärker als rotes. Diese Zerlegung eines Lichtstrahls in seine einzelnen Spektralfarben bezeichnet man als Dispersion.

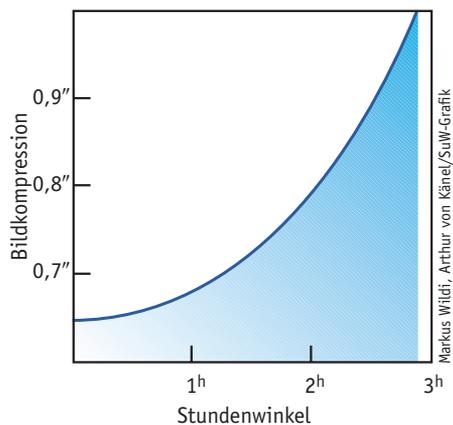


SuW-Grafik

► Ein Lichtstrahl, der sich von einem dünneren Medium 1 in ein dichteres Medium 2 ausbreitet, wird an der Grenzfläche der Medien abgelenkt.  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  bezeichnen den Einfallswinkel beziehungsweise Ausfallswinkel des Strahls bezüglich des Lots der Grenzfläche.



▲ Abb. 3: Dargestellt ist die durch die atmosphärische Refraktion verursachte Kompression eines Bildfelds mit einer Kantlänge von einem Grad in Abhängigkeit von der Zenitdistanz  $\zeta$ . Die Kurve gilt für eine Wellenlänge von 550 Nanometern, eine Lufttemperatur von 283,15 Kelvin, einen Luftdruck von 1013,5 Hektopascal und eine Luftfeuchtigkeit von null Prozent.



▲ Abb. 4: Die Grafik zeigt die Bildfeldkompression für einen Stern mit einer Deklination von zwanzig Grad in Abhängigkeit vom lokalen Stundenwinkel für eine geografische Breite des Beobachtungsorts von 47,5 Grad. Für die Lufttemperatur und -feuchte wurden dieselben Werte wie für die Berechnung der Kurve von Abbildung 3 angenommen.

Winkeländerung  $R$  eines Lichtstrahls die Gleichung

$$R = (n_0(\lambda) - 1) \tan \zeta_0 \quad (1)$$

Darin ist  $n_0(\lambda)$  der von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängige Brechungsindex der Atmosphäre am Boden und  $\zeta_0$  die wahre Zenitdistanz eines beobachteten Gestirns. Die Gültigkeit dieser Gleichung ist auf Zenitdistanzen von null bis 45 Grad begrenzt. Dies ist jedoch kein Nachteil, denn wie wir im Folgenden beschreiben werden, lassen sich hochauflösende Himmelsaufnahmen nur innerhalb dieses Bereichs gewinnen.

Die Gleichung (1) besagt, dass der Betrag der Winkeländerung von der Zenitdistanz des beobachteten Gestirns abhängt. Im Folgenden betrachten wir genauer, in welcher Weise die Kompression die Qualität von Himmelsfotoserien mit langen Belichtungszeiten beeinflusst.

Die Gleichung (1) ermöglicht eine erste Schätzung der Größe der zu erwartenden Effekte. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Grafik zeigt, dass die Kompression das typische Auflösungsvermögen eines Teleskops von rund einer Bogensekunde bei Weitem übersteigt. Schränkt man die Zenitdistanz auf das Intervall von null bis 45 Grad ein, so beträgt sie noch eine halbe Bogensekunde.

Von größerem praktischem Interesse für Astrofotografen ist die Kompression des Bildfelds in Abhängigkeit vom Stundenwinkel. Die Abbildung 4 zeigt diesen Zusammenhang für eine Deklination von zwanzig Grad. Hierbei beträgt die Variation für Stundenwinkel von null bis drei Stunden rund 0,4 Bogensekunden.

Sind der Abbildungsmaßstab und das räumliche Auflösungsvermögen der Kamera auf das Auflösungsvermögen des Teleskopobjektivs abgestimmt, dann ist in beiden Fällen eine Deformation der Sternabbildungen sichtbar.

Die bisherigen rohen Überlegungen werden der Realität einer nachgeführten Himmelsfotografie nur bedingt gerecht. Eine strenge Ableitung stammt von dem britischen Astronomen Herbert Hall Turner (1861 bis 1930), der die scheinbare Bewegung eines Sterns relativ zu seinem

wahren Ort ableitete [2]. Betrachtet man ein Sternfeld, dann sagen Turners Ergebnisse eine komplexe, vom momentanen Nachführzentrum abhängige Deformation der Abbildung vorher, wie sie in der Abbildung 5 zu sehen ist.

In dieser Abbildung sind neun Sterne auf einem Gitter mit der Kantlänge von einem Grad angeordnet. Ein Stern wird durch drei Spuren entsprechend den Wellenlängen von 450, 550 und 650 Nanometern repräsentiert. Diese Aufspaltung des Lichts in ein kleines Spektrum ist die Folge der Dispersion, also der Abhängigkeit des Brechungsindex der Atmosphäre von der Wellenlänge. Da der Betrag der Refraktion bei der Annäherung an den Horizont zunimmt, muss auch die Aufspaltung des Lichts in seine spektralen Komponenten deutlicher hervortreten. Damit die Bewegungen der Sterne relativ zum Nachführzentrum sichtbar werden, stellt die Abbildung sie 240-fach vergrößert dar.

Ein Vergleich der Länge der Sternspuren mit den 2,5 Bogensekunden langen Balken verdeutlicht, dass diese Sterne auf einer Fotografie nicht mehr als punktsymmetrische Objekte erscheinen können. Diese Deformation wird insofern gemildert, da die Lichtmenge dort geringer ausfällt, wo die Relativgeschwindigkeit groß ist. In Abbildung 6 sind die nach Turner berechneten Spuren beim vollen Stundenwinkel markiert.

Durch ein Verkürzen der langen Belichtungszeit von sechs Stunden erreicht man keine entsprechende Verkürzung der Spurlängen über das gesamte Feld. Der Vergleich der Spuren in der unteren linken und in der unteren rechten Ecke der Abbildung 5 zeigt, dass diese bis auf geringfügige Abweichungen symmetrisch zur Mittelsenkrechten sind. Jedoch beginnen die Spuren links unten näher beim Zentrum, während sie im anderen Fall dort enden (Abb. 6). Deshalb würde der Stern rechts unten in einer langbelichteten Fotografie entsprechend der Dispersion entlang der anfänglichen Richtung zum Zenit deformiert erscheinen. Im anderen Fall bewegt sich der Stern merklich relativ zum Zentrum, wie die in Abbildung 6 dargestellte Bewegung während der ersten Stunde verdeutlicht.

Der englische Astronom Arthur Robert Hinks erkannte im Jahr 1898, dass sich diese Deformation des Bildfelds als eine Überlagerung aus einer durch die Refraktion hervorgerufene Rotation der Sternabbildung und einer restlichen Verzerrung des Bildfelds betrachten lässt [3]. Von dieser Voraussetzung ausgehend, formulierte eine Forschergruppe um P. T. Wallace im Jahre 1979 eine Gleichung für diejenige Ausrichtung der Stundenachse

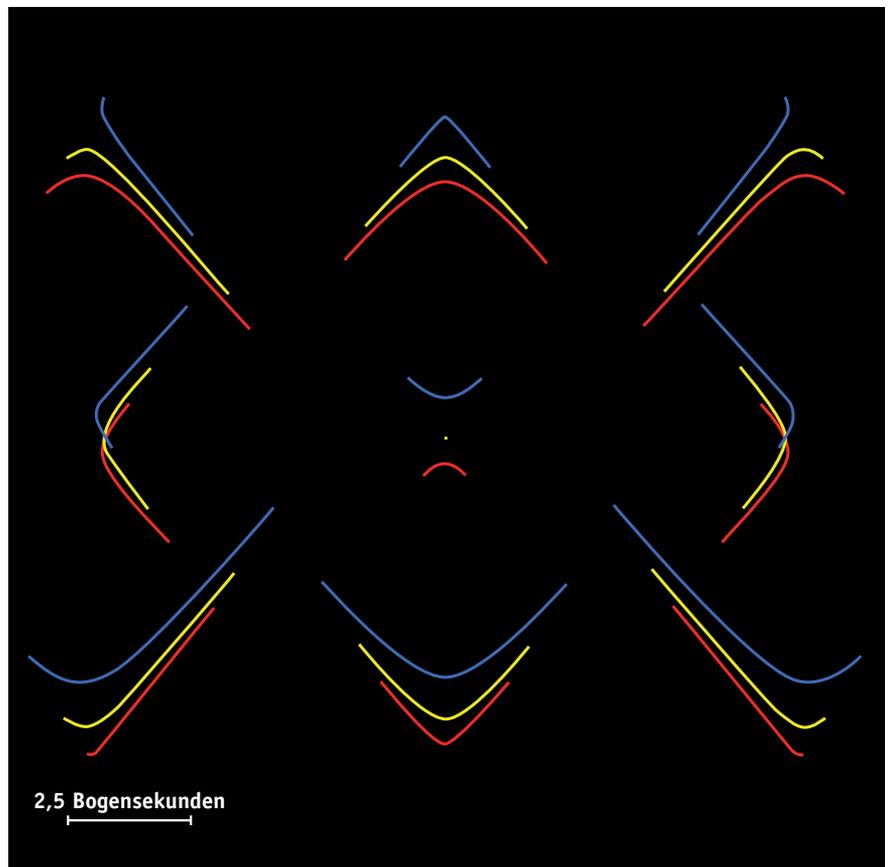
## »Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht



Didaktisches Material zu diesem Beitrag stellen wir im Internet auf der Webseite [www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de) zum Herunterladen bereit. Hier stellen wir ein Stationenlernen zum Thema »Atmosphärische Phänomene« vor, das Schülern der Mittelstufe einen spielerischen

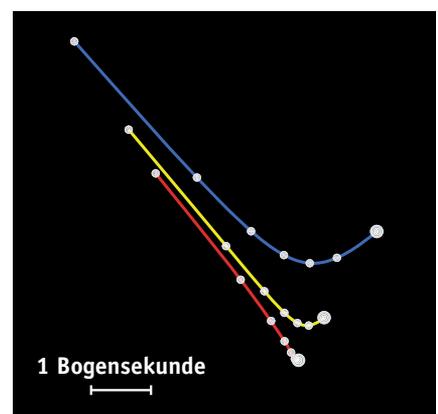
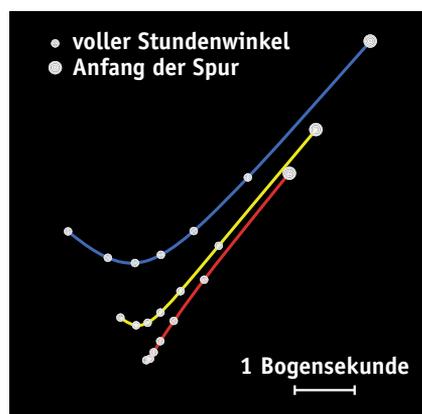
Einstieg in das Thema ermöglicht. Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

▶ Abb. 5: Dargestellt ist 240-fach vergrößert die berechnete Bewegung von Feldsternen relativ zum Nachführzentrum während einer Belichtungszeit von sechs Stunden, für die Wellenlängen 450 Nanometer (blau), 550 Nanometer (gelb) und 650 Nanometer (rot). Die Kantenlänge des Bildfelds beträgt ein Grad. Zur Nachführung diente der im Zentrum punktförmig abgebildete Stern mit einer Deklination von null Grad bei einer Wellenlänge von 550 Nanometern. Die Aufnahme begann drei Stunden vor der Kulmination, die Stundenachse der Teleskopmontierung war auf den wahren Himmelspol ausgerichtet. Die unten links gezeigten Balken mit einer Länge von 2,5 Bogensekunden beziehen sich auf die vergrößert dargestellten Spuren. Norden ist oben, Osten links.



Markus Wüthli, Arthur von Känel/SuW-Grafik

▶ Abb. 6: Die Diagramme zeigen das Ergebnis einer analytischen Berechnung der in der Abbildung 5 unten links beziehungsweise unten rechts dargestellten Spuren nach einem von dem britischen Astronomen Herbert H. Turner entworfenen Verfahren [2]. Die Punkte markieren die volle Stunde des Stundenwinkels, die größeren Punkte den Beginn der jeweiligen Spur.



Markus Wüthli, Arthur von Känel/SuW-Grafik

der Teleskopmontierung, die den Einfluss der Rotation während der Belichtung eines Bildfelds minimiert [1]. Die Gleichung gibt die Distanz  $\Delta$  an, um die der instrumentelle Himmelspol vom wahren Pol abweicht. Der instrumentelle Pol ist dabei der gedachte Durchstoßpunkt der Stundenachse mit der Sphäre. Er liegt auf dem Großkreis, der den wahren Himmelspol mit dem Zenit verbindet.

$$\Delta(\delta) = \pm \arcsin \left( (n_0 - 1) \frac{\cos \varphi \sin \delta}{\cos(\varphi - \delta)} \right). \quad (2)$$

Dabei bezeichnet  $\varphi$  die geografische Breite des Standorts und  $\delta$  die Deklination des zu beobachtenden Feldzentrums.

Während die Gleichung 2 unter der Bedingung abgeleitet wurde, dass die Rotation des Bildfelds minimal ist, zeigte Edward S. King im Jahr 1902, wie die Position der Stundenachse zu wählen ist,

damit die Bewegung eines Sterns in der Deklinationsrichtung Null wird beziehungsweise in einem Intervall um diesen Punkt minimal ist. Ist  $\tau$  der lokale Stundenwinkel des beobachteten Felds und  $\zeta$  seine Zenitdistanz, dann gilt

$$\Delta(\tau, \delta) = (n_0 - 1) \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{\cos^2 \zeta(\tau, \delta)}. \quad (3)$$

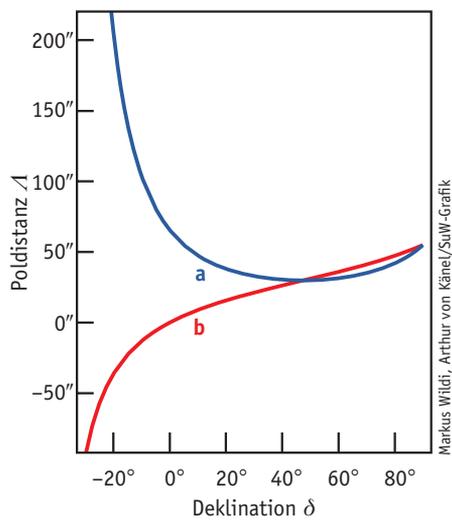
Der darin auftretende Kosinus der Zenitdistanz lässt sich wie folgt berechnen:

$$\cos \zeta(\tau, \delta) = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \tau$$

Aus den Ergebnissen der Astronomen Turner, Hinks und King geht hervor, dass sich die Spurlängen der Feldsterne einzig über die Position der Stundenachse beeinflussen lassen. Oder anders ausgedrückt, die Rotation des Feldes, welche durch die atmosphärische Refrakti-

on hervorgerufen wird, lässt sich durch die Rotation kompensieren, die aus der geschickten Wahl der Position der Stundenachse resultiert.

Aus den Kurven der Abbildung 7 ist ersichtlich, dass sich die in den Gleichungen (2) und (3) angegebenen optimalen Ausrichtungen der Stundenachse gegenseitig ausschließen. Mit Hilfe der Abbildung lässt sich der maximal zulässige Fehler der Ausrichtung schätzen. In der Nähe des Himmelsäquators darf er durchaus mehr als eine Bogenminute betragen, wenn das Bildfeld eine Größe von  $1 \times 1$  Grad aufweist. Eine detaillierte Untersuchung zeigte, dass dieser Fehler bei der Annäherung an den Himmelspol auf weniger als eine Bogensekunde abnehmen muss, bei einer Deklination von siebenzig Grad beträgt er rund dreißig Bogensekunden [17].



Markus Wildi, Arthur von Känel/SuW-Grafik

▲ Abb. 7: Das Diagramm zeigt die Distanz  $\Delta$  des instrumentellen Himmelspols vom wahren Pol in Abhängigkeit von der Deklination  $\delta$  des zu beobachtenden Gestirns. Die Kurven a und b wurden gemäß Gleichung (3) beziehungsweise Gleichung (2) berechnet. Sie beziehen sich auf eine geografische Breite von 47,5 Grad und einen Stundenwinkel von null Stunden. Der instrumentelle Pol liegt auf dem Großkreis, der den wahren Himmelspol mit dem Zenit verbindet.

Damit ist die Anforderung an die Genauigkeit der Ausrichtung der Stundenachse bereits in groben Zügen festgelegt, und es gilt nun eine geeignete Methode zur Ausrichtung auszuwählen, die sich in der Praxis bewährt.

### Die präzise Ausrichtung der Stundenachse

Die Voraussetzung für eine genaue Ausrichtung der Stundenachse ist die Nivellierung des Stativs mit einer Wasserwaage, sonst führen die Korrekturen nur bedingt zum erhofften Ergebnis.

Die meisten heutigen Methoden zur Ausrichtung einer Teleskopmontierung basieren auf einer Methode des deutschen Astronomen Julius Scheiner (1858 bis 1913). Demnach ergibt sich die korrekte Ausrichtung einer Teleskopmontierung, in dem der Beobachter einen äquatornahen Stern im Meridian mit einem Fadenkreuzokular beobachtet. Weicht der Stern im Fadenkreuz nach oben oder unten ab, ist die Azimutrichtung der Montierung solange zu verändern, bis keine Abweichung mehr auftritt. Analog soll die Methode die richtige Polhöheinstellung der Montierung liefern, indem der Beobachter einen Stern über dem West- oder Osthorizont anpeilt.

Der Einfluss der atmosphärischen Refraktion verfälscht das Resultat jedoch erheblich. Hierüber war sich Scheiner

im klaren und bemerkte »... aber die Wirkung der Refraction muss unschädlich gemacht werden« [4]. Man kann dies tun, indem man in der Nähe des Pols bei den lokalen Stundenwinkeln von null beziehungsweise  $\pm 6$  Stunden beobachtet und nicht im Westen oder Osten in der Nähe des Horizonts. In der Nähe des Pols gelingt dies, weil nur der Betrag der Änderung der Refraktion von Belang ist, nicht aber ihr absoluter Wert.

Obwohl die Instruktionen von Scheiners Methode klar und einfach sind, bergen sie praktische und methodische Schwierigkeiten, denn hierbei handelt es sich um eine »Null-Messung«: Je genauer die erreichte Ausrichtung ist, desto schwieriger wird es, die verbleibende Korrektur zu bestimmen. Zudem gibt es einen Spielraum bei der Interpretation, was Null sei, der auch durch die Luftunruhe, aber stärker durch die Krümmung der scheinbaren Bahn des Sterns in der Fokalebene bestimmt wird.

Eliminiert man die Refraktion nicht, dann folgt aus der Gleichung 3, dass man im besten Fall die Stundenachse auf eben diese Poldistanz einstellt. Nur mit Sternen in der unmittelbaren Polregion ist das Erreichen des scheinbaren Pols möglich (Abb. 7). Führt man die Messung weiter weg vom Pol durch, dann ist die Zenitdistanz beim lokalen Stundenwinkel  $\pm 6h$  bei gegebener Deklination größer

## STERNE UND WELTRAUM JAHRGANGS-CD-ROM 2007

Auf der CD-ROM von STERNE UND WELTRAUM finden Sie den kompletten Jahrgang mit sämtlichen Bildern, Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2007 sowie alle Jahresinhaltsverzeichnisse von 1962 bis 2007. Der zum Lesen erforderliche Acrobat Reader ist enthalten. Die SuW-CD-ROM 2007 (ISBN: 978-3-938639-79-5) kostet als Einzelbestellung € 25,- (zzgl. Porto); als Standing Order zur Fortsetzung € 22,50 (inkl. Porto Inland). Alle Preise verstehen sich inkl. Mehrwertsteuer. Erscheinungstermin: April 2008

[www.spektrum.de/lesershop](http://www.spektrum.de/lesershop)

als im Meridian. Im Allgemeinen fotografiert der Beobachter in der Nähe des Meridians, sodass die erreichte Polhöhe der Stundenachse nicht optimal ist.

Die Gleichung (3) ist nichts anderes als die mathematische Fassung der Instruktion, dass mit dem Verstellen der Stundenachse solange fortzufahren sei, bis die Bewegung des beobachteten Sterns in der Deklinationsrichtung null ist. Angenommen, der Beobachter hätte im vorigen Arbeitsschritt die Stundenachse auf die korrekte Position gebracht, dann kann er die Richtigkeit der Ausrichtung nicht dadurch prüfen, dass er denselben Stern nochmals visiert.

Die Gleichung (3) besagt, dass es zu jedem Ort ( $\tau$ ,  $\delta$ ) genau eine Poldistanz  $\lambda$  gibt, mit der sich die Bewegung eines Sterns in der Deklinationsrichtung für kurze Zeit kompensieren lässt. Derselbe Stern wird folglich bei einer späteren Beobachtung immer schneller vom Fadenkreuz abweichen. Vermeiden ließe sich dies, indem man in engen Grenzen der Deklination einen anderen Stern mit demselben lokalen Stundenwinkel wählt und die Messung wiederholt.

Der irische Astronom Arthur Alcock Rambaut (1857 bis 1923) erdachte eine Methode, die frei von solchen Unannehmlichkeiten ist. Er griff Scheiners Idee auf und verallgemeinerte sie so, dass sie sich an allen Himmelspositionen anwenden

## Ausrichtung der Teleskopmontierung unter Berücksichtigung der Refraktion

Die von Arthur A. Rambaut erdachte Methode zur korrekten Ausrichtung der Stundenachse einer Teleskopmontierung basiert auf der Beobachtung eines Sterns und der Auswertung seiner Bewegung in der Rektaszensions- und Deklinationsrichtung. Zu ihrer Messung benötigt der Beobachter eine Stoppuhr und ein Messokular. Am besten eignet sich eine quadratische Einteilung des Messfelds. Zur Auswertung der Messungen stellen die Autoren auf ihrer Webseite unter <http://leq.one-arcsec.org> einen »Ausrichtungsrechner« als elektronisches Rechenformular bereit, ebenso das Programm als Quelltext.

Zunächst nivelliert der Beobachter das Stativ des Teleskops mit einer Wasserwaage und richtet dann die Stundenachse grob zum Beispiel mit einem Polsucher auf den Himmelspol aus.

Das Bildfeld des Messokulars ist äquatorial ausgerichtet, die positive x-Achse zeigt in die negative Rektaszensionsrichtung. Die positive y-Achse zeigt in die negative Deklinationsrichtung. Die Messdauer kann zwischen zehn und 120 Minuten variiert und soll zu Beginn kurz gewählt werden.

Nun zentriert der Beobachter einen Stern im Messfeld des Okulars. Die Deklination und den Stundenwinkel des Sterns darf er beliebig wählen, mit Ausnahme äquatornaher Regionen und des Himmelsäquators selbst. In diesem Fall versagt die Methode. Die besten Ergebnisse erzielt man mit dieser Methode in der Nähe des Himmelspols, also mit dem Stern Polaris.

Nachdem der Stern zentriert ist, notiert man den Startzeitpunkt und lässt das Teleskop ungestört nachführen. Dabei wandert der Stern allmählich vom Zentrum weg. Nach etwa dreißig Minuten, oder bevor der Stern das Messfeld verlässt, liest man die Position des Sterns ab und notiert die Zeitdauer der Messung.

In das elektronische Formular auf der Webseite der Autoren trägt der Beobachter nun die für x und y gemessenen Werte in Einheiten des gewählten Messgitters ein, ebenso die Messzeit in Sekunden und die Längeneinheit des Messgitters in Bogensekunden. Mit Hilfe der daraus berechneten Korrekturen lässt sich die Stundenachse korrekt ausrichten.



## ED-Refraktoren in 80 mm und 102 mm von Astro-Professional!



### 80 mm REFRAKTOR

- handgefertigt, 80 mm F-7 ED Refraktor • 2-linsig, vollvergütet • Objektiv 80 mm Öffnung • 560 mm Brennweite
- Auflösungsvermögen: 1,43" • Vis. Grenzgröße 11,25 mag • Gewicht Tubus ohne Schellen 2,25 kg

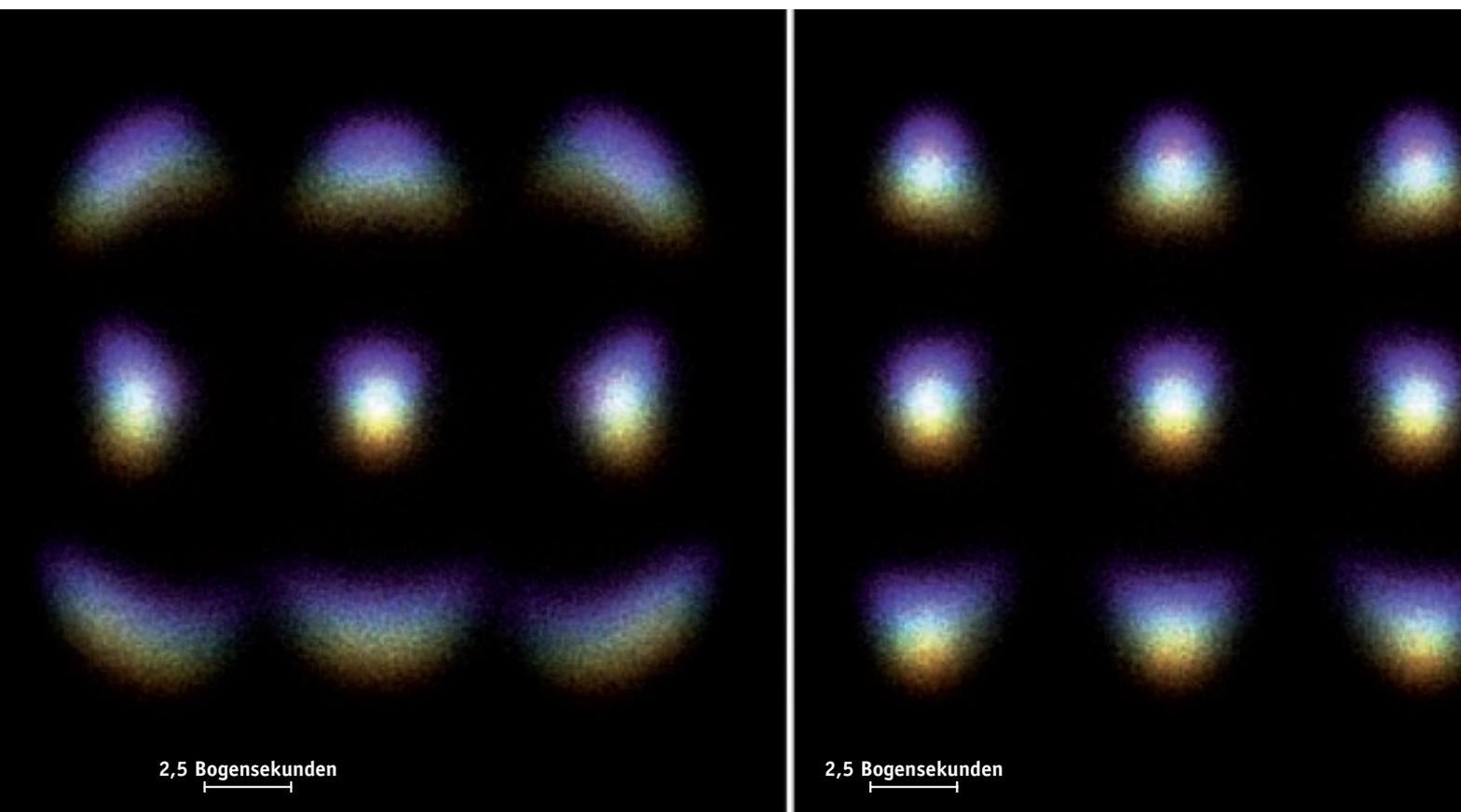
### 102 mm REFRAKTOR

- handgefertigt, 102 mm F-7 ED Refraktor 2-linsig, vollvergütet • Objektiv 102 mm Öffnung • 714 mm Brennweite
- Auflösungsvermögen: 1,12" • Vis. Grenzgröße 11,75 mag • Gewicht Tubus ohne Schellen 3,35 kg

Für beide Produkte:

- 2" Crayford Fokuser mit Reduzierring auf 1,25" • 2 Geschwindigkeiten • besonders gut für Astrophotographie geeignet • Justierbare Linsen • Geschwärzte Linsenränder zur Verringerung von Lichtstreuung • Red Dot Leuchtpunktsucher • hochwertiger Aluminium Tubus • Ausziehbare Tauschutzkappe • Rohrschellen und Prismenplatte
- inkl. hochwertige und gepolsterte Aluminium Transportbox.





▲ Abb. 8: Die drei von den Autoren berechneten Simulationen von sechs Stunden lang belichteten Sternen bei einer Deklination von null Grad dokumentieren von links nach rechts die durch ein genaues Ausrichten der Stundenachse unter Berücksichtigung der Refraktion zu erwartende Verbesserung der Abbildung. Die drei Bilder stellen jeweils neun an unterschiedlichen Stellen des Bildfelds platzierte Sterne des Spektraltyps G vergrößert dar. Die Simulationen entsprechen jeweils einer Aufnahme, die drei Stunden vor der Kulmination beginnt und drei Stunden danach endet. Die Größe des Gesichtsfelds beträgt  $1 \times 1$  Grad. Die Länge der eingezeichneten Balken von 2,5 Bogensekunden bezieht sich auf die vergrößerten Sternabbildungen. Das linke Bild zeigt das Ergebnis für eine Ausrichtung der Stundenachse nach der Scheiner-Methode und ohne Korrektur der Refraktion. Hier weicht die Stundenachse um vier Bogenminuten vom wahren Himmelspol ab. Dem mittleren Bild liegt eine Abweichung von 51,8 Bogensekunden zugrunde, beim rechten Bild wurde die Stundenachse gemäß der Gleichung 2 ausgerichtet.

lässt, mit Ausnahme des Himmelsäquators und seiner näheren Umgebung [5]. Während Scheiner nur die relative Bewegung des Sterns in der Deklinationsrichtung auswertete, bezog Rambaut auch die Bewegung senkrecht dazu ein. Damit ist nur eine Messung nötig, aus der sich die Korrekturen der Position der Stundenachse in Azimut und Elevation ermitteln lassen.

Bei der Anwendung von Rambauts Methode ist der Stern zu Beginn in einem Fadenkreuz zu zentrieren und am Ende seine relative Position zu messen. Aus dieser Messung lässt sich die Ausrichtung der Stundenachse unter Berücksichtigung der Refraktion berechnen. Somit stellt Rambauts Methode einen praktisch begründeten Fortschritt gegenüber der Scheiner-Methode dar.

Verfügt der Beobachter über ein kalibriertes Messokular, dann beschränkt sich der Aufwand auf das Ablesen der Sternposition rund dreißig Minuten nach dem Zentrieren und die Eingabe dieser Werte in ein elektronisches Rechenformular, das wir auf unserer Webseite <http://leq.one-arcsec.org> bereitstellen. Einen ersten Eindruck von der praktischen Durchführung des Verfahrens vermittelt der Infokasten »Ausrichtung der Teleskopmontierung unter Berücksichtigung der Refraktion« auf Seite 89.

Nach erfolgter Korrektur der Position mit der Methode von Rambaut zeigt die Stundenachse innerhalb der Messgenauigkeit auf den wahren Himmelspol. Ein

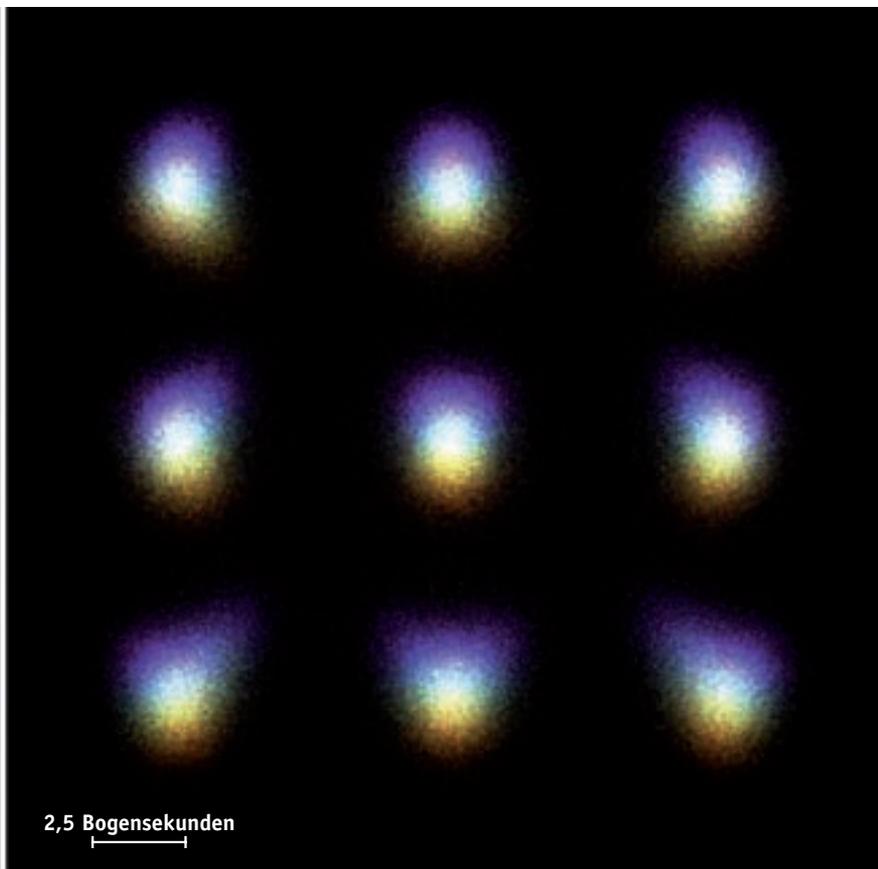
Vorgehen mit Versuch und Irrtum, wie bei der Methode von Scheiner, entfällt hierbei.

### Bewertung der Methoden

Die Auswirkungen einer genaueren Ausrichtung der Stundenachse unter Berücksichtigung der Refraktion stellt die Abbildung 8 für äquatornahe Sterne dar. Die mit einer Belichtungszeit von jeweils sechs Stunden im Zentrum nachgeführten Aufnahmen illustrieren anhand von jeweils neun Sternabbildungen, welche Verbesserung der Abbildung der Beobachter an verschiedenen Positionen des Bildfelds erwarten kann.

Ist die Belichtungszeit kürzer als die hier angenommene, dann sind die entsprechenden Spuren gleich lang oder eventuell kürzer, als die hier gezeigten. Die mittlere und die rechte Aufnahme der Abbildung 8 lassen die atmosphärische Dispersion als bläuliche und gelbliche Verfärbung der gegenüberliegenden Ränder der Sternabbildungen erkennen.

Die Himmelspositionen, auf welche die Stundenachsen bei den drei Aufnahmen in Abbildung 8 ausgerichtet waren, liegen alle in der Meridianebene und entsprechen Werten für  $\lambda$  von vier Bogenminuten, 51,8 Bogensekunden beziehungsweise einer Ausrichtung der Achse gemäß Gleichung (2). Der erste Fall entspricht einer Distanz von rund drei Bogenminuten vom scheinbaren Pol und repräsentiert den geschätzten re-



Markus Wildi, Arthur von Känel

hungsweise bei einer CCD-Kamera zu einem geringeren Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Bei einer Annäherung des Bildfelds an den Pol würden die abgebildeten Spuren kontinuierlich länger, und selbst eine Aufnahme im Zenit könnte bei dieser Einstellung dem Vergleich mit dem Ergebnis einer korrekten Ausrichtung der Stundenachse nicht standhalten.

Erst nach einer präzisen Ausrichtung der Stundenachse kommt die fotografische Qualität eines Teleskops vollständig zum Tragen. Nutzt man zur Ausrichtung der Stundenachse auf den Himmelpol die skizzierte Methode von Arthur A. Rambaut, dann lassen sich auch mit temporär aufgestellten Teleskopen hochaufgelöste Fotografien in der Region zwischen dem Pol und dem Himmelsäquator innerhalb eines lokalen Stundenwinkels von  $\pm 3$  Stunden gewinnen.

Selbst eine mit konventionellem Filmmaterial und einem Zehn-Zentimeter-Teleskop hergestellte LRGB-Aufnahme gelingt in ansprechender Form innerhalb einer Nacht ohne nennenswerte Abstriche bei der Winkelauflösung, und eine rechnerische Entzerrung der einzelnen Farbauszüge im Computer entfällt. □

Interessante Weblinks zum Thema und weitere Literaturhinweise finden Sie online unter [www.suw-online.de/artikel/944472](http://www.suw-online.de/artikel/944472)

**Markus Wildi** promovierte an der Universität Basel als Experimentalphysiker auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung. Seine Interessen sind die Beobachtung von veränderlichen Objekten und die hochauflösende Astrofotografie. Er betreut die Sternwarte in Verres und rüstete diese für den über das Internet ferngesteuerten Betrieb aus. Der Autor ist unter der E-Mail-Adresse [wildi.markus@bluewin.ch](mailto:wildi.markus@bluewin.ch) zu erreichen.



produzierbaren Fehler der Methode von Scheiner ohne Korrektur der Refraktion. Der zweite Fall zeigt ein realistisches Ergebnis für alle temporär aufgestellten Teleskope auf. Der dritte Fall gibt die aufwendigere Minimierung der Bildfeldrotation gemäß der Gleichung 2 wieder.

Der Unterschied zwischen den in der Mitte und rechts von Abbildung 8 dargestellten Ergebnissen der Simulationsrechnung fällt gering aus. Man sieht, dass die Sterne in der oberen und unteren Zeile der mittleren Aufnahme etwas ausgehelter erscheinen als die Sterne an den entsprechenden Positionen des rechten Bilds. Für Bildfelder mit einer Kantenlänge von weniger als  $1 \times 1$  Grad reicht somit eine fixe Ausrichtung der Stundenachse auf den scheinbaren Pol aus, da die Abbildung in der Nähe des Zenits besser und

die Position für Aufnahmen am Pol optimal ist.

Eine detaillierte Untersuchung für alle Deklinationen zeigt, dass die dritte Variante unter den gegebenen Umständen leicht und bei größeren Bildfeldern deutlich besser abschneidet.

Von diesen beiden Aufnahmen lässt sich die linke klar unterscheiden. Einzig die Sternabbildungen in der mittleren Zeile weisen eine gewisse Ähnlichkeit zu denen des mittleren und rechten Bilds auf. Die Sternspuren erscheinen an der Peripherie stark ausgedehnt und ihre Flächenhelligkeiten somit geringer. In diesem Fall ist das Auflösungsvermögen reduziert. Zudem führt die Verschmierung der Sternabbildungen über einen größeren Bereich zu einer geringeren Schwärzung der fotografischen Schicht bezie-

## Literaturhinweise

- [1] **P.T. Wallace, K. P. Tritton:** Alignment, pointing accuracy and field rotation of the UK 1.2-m Schmidt telescope. *MNRAS* **189**, S. 115–122 (1979)
- [2] **H.H. Turner:** Preliminary note on the reduction of measures of photographic plates. *MNRAS* **54**, S. 11–25, (1893)
- [3] **A.R. Hinks:** On some attempts to counteract by instrumental adjustments certain effects of refraction in stellar photography. *MNRAS* **58**, S. 428–440, (1898)
- [4] **J. Scheiner:** Die Photographie der Gestirne. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig 1897
- [5] **A.A. Rambaut:** To adjust the polar axis of an equatorial telescope for photographic purposes. *MNRAS* **54**, S. 85–90 (1893)



**Arthur von Känel** (†) war seit dem Jahr 1977 aktiver Astrofotograf und erbaute in Verres im Schweizer Jura eine Sternwarte. Er nutzte seinen Astro Physics Starfire-180-Refraktor

hauptsächlich für die Deep-Sky-Fotografie in Verbindung mit Kleinbild- und Mittelformatkameras. Beide Autoren arbeiteten in den Jahren 2001 bis 2004 eng zusammen.