

Himmelsteleskope

- etwas geometrische Optik und ein klein wenig über Montierung

In Bezug zum SuW-Beitrag „Wer war Monsieur Coudé? Optische Anordnungen und mechanische Lösungen für Großteleskope“ / Welt der Wissenschaft (SuW 11/2011, S. 42)

Gerhard Herms

Ein Fernrohr vergrößert, wenn man es mit dem richtigen Ende vor das Auge hält. Außerdem verleiht es dem Besitzer umso mehr Prestige, je höher die Lichtstärke ist. So etwa lässt sich das Wissen des modernen Menschen über Fernrohre zusammenfassen. Dabei hat er schon in der Mittelstufe die geometrische Optik vermittelt bekommen. Sie beschränkte sich aber mehr oder weniger auf die Abbildung durch eine einzelne Linse oder einen einzelnen Hohlspiegel. Dem Schüler ist nie klar geworden, dass die geometrische Optik mit ihren wenigen Regeln ein vielseitig einsetzbares Werkzeug bietet, mit dem sich die Verhältnisse in komplexen optischen Systemen durchschaubar und berechenbar machen lassen. Die großen Himmelsfernrohre, die schon durch ihre Abmessungen und den gewaltigen mechanischen Aufwand begeistern, sind ein faszinierendes Studienobjekt für all jene, denen oberflächliches Wissen nicht genügt und die vielmehr das Grundlegende begreifen wollen.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Optik	Geometrische Optik, teleskopische Systeme Vergrößerung
Astronomie	Positionsastronomie Astropraxis	Horizontalkoordinaten, Höhe und Azimut, Äquatorial- koordinaten, Deklination und Rektaszension Galilei-Fernrohr, Kepler-Fernrohr, Cassegrain-, Grego- ry-, Coudé-Teleskop, Montierung
Fächerver- knüpfung	Astronomie - Mathematik	Sphärische Koordinaten

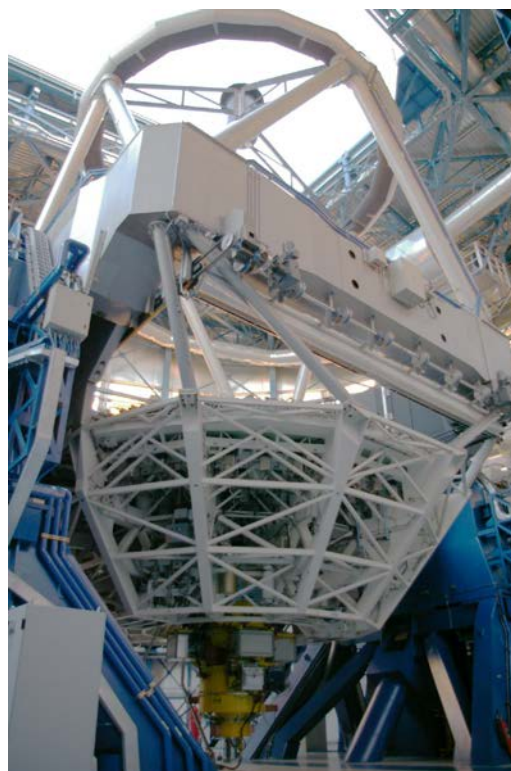


Abbildung 1:

Rechts: Das VLT-Teleskop UT2 des ESO-Observatoriums auf dem Paranal. Das Teleskop wird hier mit dem Cassegrain-Strahlengang betrieben. Hinter dem Loch im Primärspiegel (8,2 m) sitzt das Instrument (gelb). Der Sekundärspiegel (1,12 m) ist ganz oben zu sehen.

©: ESO, https://www.wikiwand.com/it/Very_Large_Telescope.

Oben: Hier blickt man auf den Primärspiegel von UT2. In dieser Ansicht sieht man den in der optischen Achse gehaltenen Tertiärspiegel, der gebraucht wird, wenn das Teleskop im Nasmyth-Strahlengang betrieben wird.

©: ESO, <https://www.wikiwand.com/de/Paranal-Observatorium>.

Jan: Du hattest vorgeschlagen, dass wir uns über den SuW-Beitrag „Wer war Monsieur Coudé?“ unterhalten. Ich habe ihn gründlich gelesen, meine Gedanken geordnet und einige Abbildungen zusammengesucht.

Daniel: Das ist gut! Ich muss nämlich sagen, dass ich bei den Spiegelteleskopen meine Schwierigkeiten habe, die Strahlengänge zu verstehen. Wozu die verschiedenartigen Anordnungen? Wozu Sekundärspiegel? Im Grunde würde es doch reichen, das reelle Bild, das der Primärspiegel (also der konkave Hauptspiegel) erzeugt, schräg von der Seite her mit einer Lupe (dem Okular) zu betrachten.

Jan: Von der Seite her klappt es schon gar nicht.

Daniel: Warum nicht? In unseren Schulbüchern stand, dass das reelle Bild wie ein Gegenstand mit einer Lupe betrachtet werden kann.

Jan: Das darfst du nicht zu wörtlich nehmen. Im Strahlenbüschel, das von einem Punkt eines realen Gegenstandes ausgeht, findest du alle möglichen Richtungen vor. Daher siehst du diesen Punkt von jedem beliebigen Ort aus. Das ist anders bei einem realen Bildpunkt. Der entsteht nämlich im Allgemeinen durch einen recht engen Strahlenkegel und ist nur sichtbar, wenn das Auge sich auf der anderen Seite des Bildpunktes in dem sich wieder erweiternden Strahlenkegel befindet.

Daniel: Das verstehe ich.

Jan: Es gibt allerdings eine Möglichkeit, das reelle Bild für beliebige Blickrichtungen sichtbar zu machen: Streuung! Dazu muss lediglich eine Mattscheibe oder ein weißes Papierblatt in der Ebene des realen Bildes angebracht werden.

Daniel: Wird das nicht bei einfachen Sonnentelaskopen angewendet, um das Sonnenbild einem größeren Personenkreis demonstrieren zu können?

Jan: Ganz recht!

Daniel: Allerdings ist mir klar, dass die Struktur der Streuscheibe oder der Papieroberfläche für die Schärfe des Bildes nicht gerade hilfreich ist und dass man darauf verzichtet, wenn es um Hochleistung geht.

Jan: Klar. Noch ein paar Worte zu deiner vorhin geäußerten Meinung, auch ohne Sekundärspiegel auszukommen! Seitlicher Einblick geht nicht. Lupe und Auge müssen sich unbedingt im austretenden Strahlenkegel des Bildpunktes befinden. Da der Kopf des Beobachters außerhalb des Tubus liegen muss, geht das nur, wenn man den Konkavspiegel etwas schräg stellt, um das reelle Bild am Tubusrand entstehen zu lassen. Dieses Konzept hat Herschel als erster verwirklicht.

Daniel: Leidet darunter nicht die Qualität der Abbildung?

Jan: Durch die Schrägstellung entstehen Astigmatismus und Koma. Diese Abbildungsfehler können aber durch Korrekturplatten kompensiert werden. Insgesamt gesehen kommt diese Lösung deiner Vorstellung recht nahe.

Daniel: Aber auf die habe ich schon keinen Bock mehr. Da man das reelle Bild leider nicht in Strahlrichtung (oder etwas schräg dazu) betrachten kann, sitzt der Beobachter mit dem Rücken zu dem Objekt, das er eigentlich beobachten will. Das erschwert ganz sicher das Ausrichten des Teleskops auf das Ziel.

Jan: Da hast du Recht! Bei Linsenteleskopen (Refraktoren) kennt man dieses Problem nicht. Daher ging das Bestreben im Allgemeinen dahin, mit Hilfe zusätzlicher Spiegel ähnliche Verhältnisse wie bei den Refraktoren zu schaffen. Nur Newton, der erste der großen Teleskopkonstrukteure, hatte sich in dieser Hinsicht wenig Gedanken gemacht. Er hatte den konvergierenden Strahlenkegel einfach mit Hilfe eines kleinen Planspiegels um 90° abgelenkt, so dass das reelle Bild außerhalb des Teleskoprohres zustande kommt und dort mit dem Okular betrachtet werden kann.

Daniel: Was aber den Nachteil hat, dass die Blickrichtung des Beobachters einen rechten Winkel mit der optischen Achse des Teleskops bildet.

Jan: Es kommt noch etwas hinzu: Das reelle Bild befindet sich ja in der Nähe des oberen (offenen) Ende des Teleskoprohres. Wird das Teleskop auf ein anderes Objekt gerichtet, beschreibt das Ende des Rohres unter Umständen recht große Wege. Bei großen Teleskopen muss ein beträchtlicher technischer Aufwand getrieben werden, um dem Beobachter den Einblick in das Okular zu gewährleisten.

Daniel: Das kann ich mir lebhaft vorstellen! Der Astronom muss sich wie in einem Karussell vorkommen und Angst haben runter zu fallen.

Jan: Nun sollten wir uns aber die Strahlengänge in den Teleskopen gründlich klarmachen. Beginnen wir mit einer Sammellinse, die von einem unendlich weit entfernten Punkt auf der optischen Achse der Linse beleuchtet wird. Wo entsteht das Bild dieses Punktes?

Daniel: Die Strahlen des parallelen Bündels, von denen die Linse getroffen wird, werden von ihr im Brennpunkt F vereinigt. Sein Abstand von der Linsenmitte M wird als Brennweite f bezeichnet.

Jan: Wie ist es bei einem Parallelbündel, das schräg zur optischen Achse auf die Linse trifft?

Daniel: Der Bildpunkt B liegt in der Brennebene. Das ist eine Ebene senkrecht zur optischen Achse, die auch den Brennpunkt F enthält (Abb. 2).

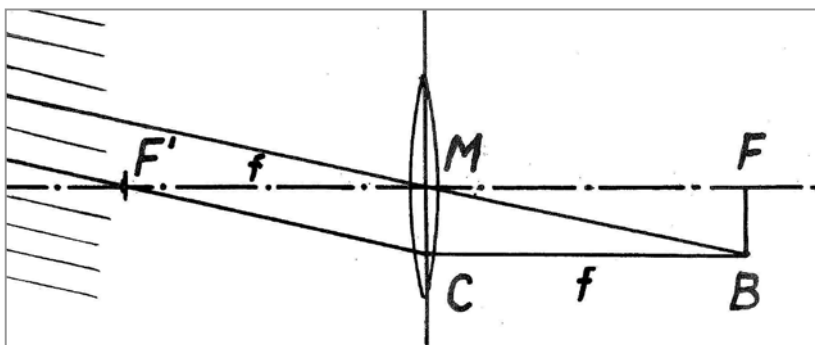


Abbildung 2:
Ein außerhalb der optischen Achse liegender Stern wird in der Brennebene des Objektivs abgebildet.

Jan: Wie findest du den Ort des Bildpunktes?

Daniel: Ich verfolge in dem Parallelbündel jenen Strahl, der durch den Mittelpunkt M der Linse geht. Dieser läuft ungebrochen weiter bis in den Bildpunkt B. Alle anderen Strahlen des Parallelbündels werden von der Linse zu diesem Bildpunkt hingelenkt.

Jan: Könntest du beweisen, dass der Bildpunkt wirklich in der Brennebene und nicht außerhalb von ihr entsteht?

Daniel: Warte mal! – Ja! Ich suche mir in dem Parallelbündel jenen Strahl, der durch den vorderen Brennpunkt F' der Linse geht. Ein Brennpunktstrahl wird zum Parallelstrahl, d. h. der gebrochene Strahl (CB in Abb. 2) verläuft parallel zur optischen Achse. Wir erhalten also ein schiefes Parallelogramm F', M, B, C , und in diesem ist natürlich $F'M$ genau so groß wie CB , nämlich gleich der Brennweite f .

Jan: Sehr gut! Die Linse, von der wir bisher gesprochen haben, sei die Objektivlinse des Teleskops. Nun stellen wir eine zweite Linse als Okularlinse so auf, dass ihr Mittelpunkt auf der optischen Achse der Objektivlinse liegt und ihr vorderer Brennpunkt mit dem hinteren der Objektivlinse zusammenfällt. So etwas nennt man „teleskopisches System“. Die Brennweite f_{ok} der Okularlinse sei kleiner (Abb. 3). Nun wollen wir uns auf das weitere Schicksal des von der Objektivlinse kommenden konvergenten Strahlenkegels konzentrieren.

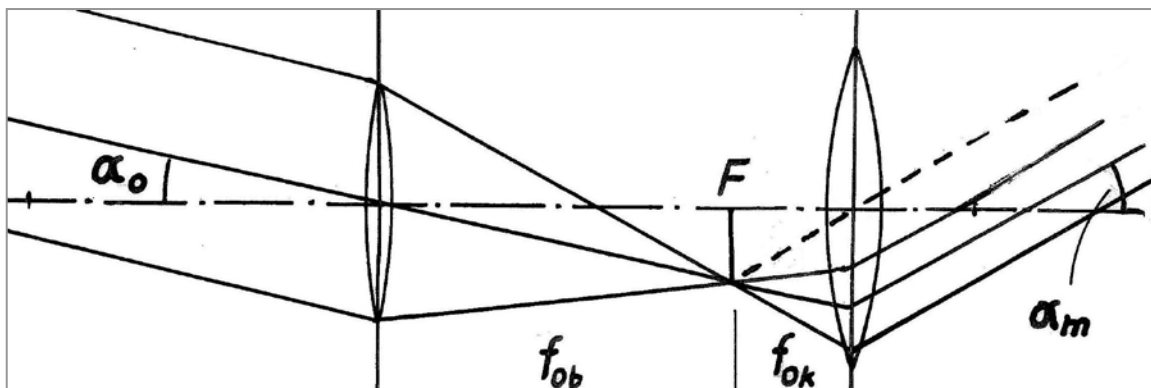


Abbildung 3:
Vergrößerung des Seh winkels α_0 durch ein teleskopisches System.

α_0 sei der Winkel zwischen den Strahlen von einem Stern auf der optischen Achse und einem benachbarten Stern. Das Parallelstrahlbündel des ersteren ist der Übersichtlichkeit halber weggelassen worden.

Daniel: Die Kegelspitze ist der Bildpunkt B in der Brennebene. Rechts vom Bildpunkt laufen die Strahlen wieder auseinander, d. h. wir haben es nun mit einem divergenten Strahlenkegel zu tun. Er trifft auf die Okularlinse und wird von ihr in ein paralleles Strahlenbündel verwandelt. Die Richtung der Strahlen finden wir mit Hilfe des Parallelstrahls, der zum Brennpunktstrahl wird.

Jan: Oder auch mit dem Mittelpunktstrahl, der ja die Okularlinse ohne Richtungsänderung passiert.

Daniel: Das geht ja nicht, weil es diesen Strahl laut Abbildung in dem divergenten Strahlenkegel gar nicht gibt.

Jan: Für die Konstruktion ist das aber nicht relevant. Er würde real existieren, wenn der Objektivdurchmesser groß genug wäre oder eine Mattscheibe als Streuer benutzt würde.

Daniel: Aber ich stelle mit Verblüffung fest, dass unser Linsensystem verkleinert statt vergrößert! In dem nach rechts abgehenden Parallelbündel ist ja alles zusammengedrängt statt ausgedehnt.

Jan: Na, Daniel! Das war wohl nichts Überlegtes. Du hast dich nur vom äußerlichen Eindruck leiten lassen.

Daniel: Wie ist es wirklich?

Jan: Fernrohre vergrößern den Sehwinkel, unter dem ein weit entfernter Gegenstand oder der scheinbare Abstand zweier benachbarter Sterne erscheint. Nehmen wir an, das achsenparallele Strahlenbündel kommt von dem einen und das schräg verlaufende von dem anderen Stern. Ihr Abstand würde dem unbewaffneten Auge unter dem Winkel α_0 erscheinen. Der Zeichnung kannst du

entnehmen, dass $\tan \alpha_0 = \frac{BF}{f_{ob}}$ ist.

Daniel: Ach ja! Ich verstehe schon! Die beiden Parallelstrahlbündel, die aus dem Okular austreten, schließen einen größeren Winkel ein (nämlich α_m), und darauf beruht die vergrößernde Wirkung des Fernrohrs!

Jan: Richtig! Damit hast du die Scharte wieder ausgewetzt! Unter Vergrößerung V versteht man das Verhältnis $V = \frac{\alpha_m}{\alpha_0}$. Könntest du ableiten, wie V von den beiden Brennweiten abhängt?

Daniel: Nein, nicht ohne weiteres.

Jan: Ich gebe eine kleine Hilfe: Zunächst einmal kannst du in der Zeichnung leicht erkennen, dass auch für α_m eine ähnliche Beziehung gilt, nämlich $\tan \alpha_m = \frac{BF}{f_{ok}}$. Da beide Sehwinkel in der Praxis recht klein sind, kann man den Tangens in guter Näherung durch das Bogenmaß ersetzen.

Daniel: Dann ist es ja supereinfach! Es kommt $V = \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$ heraus. Je länger die Brennweite des Objektivs und je kürzer die des Okulars ist, desto höher ist die Vergrößerung des Instruments.

Jan: Ausgezeichnet! Aber noch eine Bemerkung: Aus der Tatsache, dass das Parallelbündel, das die Okularlinse verlässt, enger ist als das in das Objektiv eintretende Parallelbündel, erkennst du eine andere wichtige Wirkung: Das Teleskop erhöht die Lichtstärke. Die Energie, die im Bündelquerschnitt enthalten ist, kann ja (von geringfügigen Verlusten durch Absorption oder Streuung abgesehen) nicht verloren gehen, ist also im weggehenden Parallelbündel auf eine kleinere Fläche konzentriert. Dadurch werden lichtschwache Objekte, die das bloße Auge nicht mehr wahrnehmen kann, sichtbar.

Daniel: Das erscheint mir noch wichtiger als das Vergrößern von Sternabständen.

Jan: Damit hast du völlig Recht. - Nun sollten wir uns aber den Spiegelteleskopen zuwenden. Dabei werden wir uns in den folgenden Darstellungen immer auf das achsenparallele Strahlenbündel beschränken. Bei den Spiegelteleskopen gibt es nichts grundsätzlich Neues. Der Strahlenverlauf am Konkavspiegel lässt sich mit denselben Regeln wie bei der Linse konstruieren. Ein Brennpunktstrahl wird zum Parallelstrahl und ein Parallelstrahl zum Brennpunktstrahl. Einziger Unterschied zur Linse: Ankommender und weggehender Strahl liegen beide vor dem Spiegel.

Daniel: Wie ist es mit dem Mittelpunktstrahl?

Jan: Der Strahl, der dem Mittelpunktstrahl bei der Linse entspricht, der also in den Scheitelpunkt des Hohlspiegels trifft, wird nach dem Gesetz „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“ reflektiert.

Daniel: Klar! Damit könnte ich alles konstruieren.

Jan: Das Ganze lässt sich auch noch anders darstellen: Wenn ich den Strahlenverlauf der Sammellinse (Abb. 2) auf Transparentpapier zeichne und das Blatt längs der Mittelebene der Linse falte, dann habe ich den Strahlenverlauf für den Hohlspiegel gleicher Brennweite.

Daniel: ... und wenn ich die transparente Zeichnung des Keplerfernrohrs (Abb. 4 oben) zweimal falte, und zwar längs der Mittelebenen beider Linsen, dann habe ich den Strahlengang eines Spiegelteleskops (Abb. 4 unten).

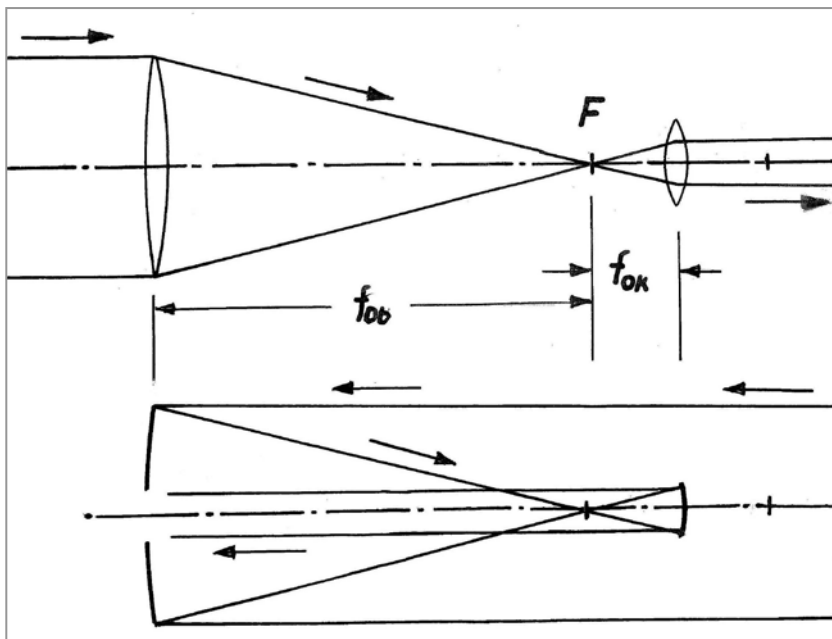


Abbildung 4:
Das Gregory-Teleskop (unten) im Vergleich mit dem Keplerschen Fernrohr bei gleichen Brennweiten

Jan: Bravo! Gut erkannt! Vielleicht ist Gregory durch denselben Gedankengang auf das Prinzip seiner Teleskopkonstruktion gekommen. Er musste nur noch den großen Primärspiegel in der Mitte durchbohren, damit der vom kleinen Spiegel kommende Strahl „ins Freie“ treten konnte, und schon hatte er dieselben Verhältnisse wie bei einem Refraktor.

Daniel: Das war wirklich genial! Wenn ich damals schon gelebt hätte, wäre ich wohl auch darauf gekommen.

Jan: Ganz bestimmt! Dann würde man heute vom Danielspiegel sprechen.

Daniel: Sag mir lieber, was es mit der Cassegrainschen Anordnung auf sich hat. In Kärchers SuW-Artikel wird ein historisches Bild des Gregory-Strahlengangs gezeigt, in dem der Zeichner einen Fehler gemacht hat. Das was herausgekommen ist, entspräche wohl eher dem Cassegrain-Teleskop.

Jan: Ja. Es wäre genau die Cassegrain-Anordnung, wenn der Zeichner den kleinen Sekundärspiegel nicht als Konkavspiegel, sondern vielmehr als Konvexspiegel dargestellt hätte.

Daniel: Moment mal! Heißt das, dass der Cassegrain-Reflektor das Gegenstück zum Galileischen Fernrohr ist?

Jan: Genau! Und hier siehst du den Strahlenverlauf – wieder unter Beschränkung auf Strahlen, parallel zur optischen Achse, für das Galilei-Fernrohr (Abb. 5 oben) und für den Cassegrain-Reflektor (Abb. 5 unten). Wenn du mit der Abb. 4 vergleichst, dann erkennst du, dass die Baulängen jetzt etwas kürzer ausfallen.

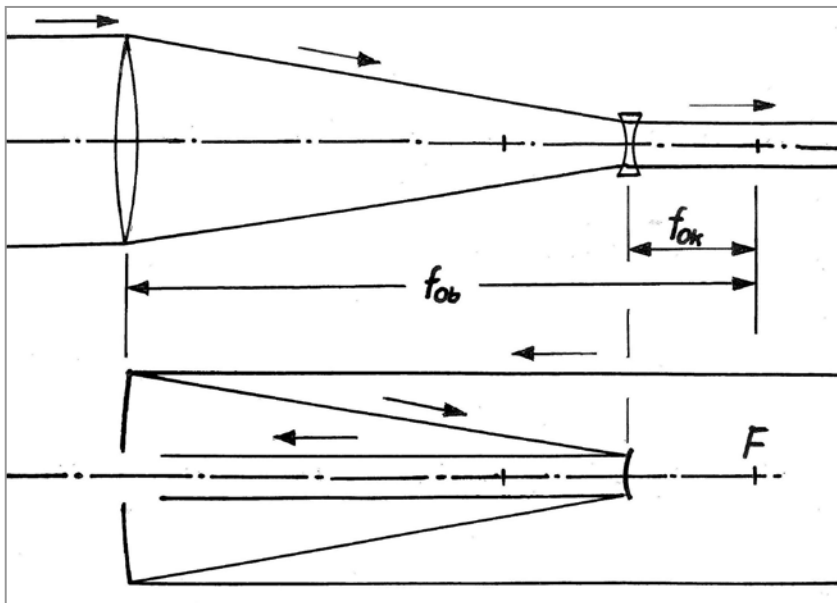


Abbildung 5:
Das Cassegrain-Teleskop (unten, siehe auch Abb. 1) im Vergleich mit dem Galileischen Fernrohr bei gleichen Brennweiten.

Daniel: Ja – um die zweifache Okularbrennweite. Aber etwas anders! Könnten wir nicht näher auf die Konstruktionen eingehen, die der Abbildung 5 zugrunde liegen? Bei Konkavlinse oder Konvexspiegel fühle ich mich unsicher.

Jan: Finde es selbst heraus mit Hilfe des [Arbeitsblattes](#), das ich hier habe! Keine Angst! Sudoku ist 100-mal schwerer.

Daniel: Na gut! Ich versuch es.

Jan: Weiter im Text! Im Grunde genommen könnte man die Sterne beobachten, indem man sein Auge an das Loch im Hauptspiegel bringt. In der Regel wird aber so verfahren, dass der Brennpunkt des Sekundärspiegels nicht genau in den Brennpunkt des Hauptspiegels gelegt wird, sondern so, dass die Strahlen schwach konvergieren und dicht hinter dem Hauptspiegel (also außerhalb des Tubus) ein reelles Bild erzeugen, das mit einem Okular betrachtet werden kann.

Daniel: Ich kann mir denken, warum man so verfährt: Im reellen Bild kann man Skalen zum Ausmessen oder aber Blenden anbringen, mit denen man das Licht interessierender Objekte isolieren kann, um z. B. Spektralanalyse zu betreiben.

Jan: Richtig! Nach so viel Optik sollten wir uns aber kurz der Mechanik zuwenden, ohne die das schönste Teleskoprohr nutzlos wäre. Das Teleskop muss sich auf jedes beliebige Objekt des Sternenhimmels ausrichten lassen und es ohne Wackeln im Gesichtsfeld halten. Damit keine unnötig hohen Kräfte auftreten, muss der Drehpunkt möglichst nahe am Schwerpunkt des schwenkbaren Teleskoprohres liegen, und dieser liegt naturgemäß ganz in der Nähe des großen Hauptspiegels. - Nach dieser Vorrede eine Frage an dich: Wie beurteilst du die „Beobachterfreundlichkeit“ der verschiedenen Systeme? Bei welchem ist der technische Aufwand, einen sicheren und bequemen Einblick in das Okular zu ermöglichen, am kleinsten?

Daniel: Das ist doch wohl klar! Beim Gregory- und beim Cassegrain-Teleskop ist das Okular relativ dicht am Drehpunkt der Montierung. Beim Durchmustern des Sternenhimmels beschreibt es nur relativ kurze Wege. Daher ist der Aufwand recht klein. Dagegen erfolgt der Einblick bei einer Anordnung nach Herschel oder Newton ziemlich dicht am oberen Ende des Rohres, so dass sich Schwenkbewegungen stark auswirken. Ich denke, große bewegliche Plattformen und drehbare Türme, von denen ich gelesen habe, sind dann unvermeidlich.

Jan: Um einen Einblick in gleichbleibender Höhe und mit ständig horizontaler Blickrichtung zu ermöglichen, hat Nasmyth gewissermaßen eine Anleihe bei Newton aufgenommen. Er verzichtete darauf, Cassegrains Hauptspiegel zu durchbohren, und lenkt stattdessen das konvergierende, vom konvexen Spiegel kommende Strahlenbüschel mit einem kleinen ebenen Spiegel rechtwinklig derart um, dass es in der horizontalen Schwenkachse seitlich aus dem Gerät austritt (siehe Abb. 1).

Daniel: Das ist wirklich genial! Ich stelle mir eine horizontale, um die Vertikale drehbare Plattform vor und darauf das Teleskop und einen Stuhl. Auf diesem sitzt der Beobachter. Gleichgültig, wie das Rohr auf oder ab geschwenkt wird, und gleichgültig, wie viel Zeit vergeht, kann er praktisch immer in derselben Haltung in das Okular blicken.

Jan: Völlig richtig! Bei deiner Vorstellung hast du eine alt-azimutale Montierung vorausgesetzt.

Daniel: Ob das alt-azimutal oder neu-azimutal ist, was ich mir dazu vorstelle, weiß ich allerdings nicht.

Jan: Die Bezeichnung hat nichts mit „alt“ oder „neu“ zu tun. Gemeint ist „altitude“ – also das englische Wort für „Höhe“. Die Höhe des interessierenden Sterns wird eingestellt durch Schwenkung des Teleskops um eine horizontal liegende Achse. Diese wiederum ist rechtwinklig an der vertikal aufgestellten Stehachse befestigt, so dass das Azimut des Sternes durch Drehen um die Stehachse eingestellt werden kann.

Daniel: Wenn man einen Stern längere Zeit im Sehfeld halten will, müssen doch wohl Drehungen um beide Achsen vollzogen werden?

Jan: Selbstverständlich – und noch dazu mit sich laufend ändernden Geschwindigkeiten. Noch ein Nachteil: Das Sehfeld dreht sich. Diese Nachteile hat man nicht bei der äquatorialen Montierung.

Daniel: Die kenne ich! Statt der vertikalen Stehachse haben wir hier eine schräg liegende Achse, die zum Polarstern (genauer gesagt zum Himmelsnordpol) zeigt und Rektaszensionsachse genannt wird. Die zweite Achse, die im rechten Winkel zu ihr steht, zeigt ständig auf den Himmelsäquator. Wenn man das Teleskop um sie herumschwenkt, kann man Sterne beliebigen Abstands vom Himmelsäquator anvisieren.

Jan: Ist der Stern erst im Fadenkreuz, kann der Astronom die Hände in den Schoß legen; denn der Abstand vom Himmelsäquator (die Deklination) bleibt ja konstant, und das Auswandern des Sehfeldes durch die Erdrotation kann er durch eine entsprechende Gegendrehung mit Hilfe eines Elektromotors verhindern. Natürlich gibt es auch keine Sehfelddrehung.

Daniel: Das sehe ich ein. Aber warum hast du noch kein einziges Wort zum Coude-Teleskop gesagt?

Jan: Weil wir uns erst die äquatoriale Montierung klarmachen mussten. Jetzt fällt Coudé wie eine reife Frucht vom Baum.

Daniel: Nur gut, dass Coudé kein Mensch ist wie Newton, Gregory, Cassegrain und die anderen!

Jan: Denk an die geniale Anordnung von Nasmyth, bei welcher der schwach konvergierende Strahl seitlich aus dem Tubus gelenkt wird. Der Trick besteht nun darin, dass der Strahl durch die hohle Deklinationsachse und dann mit Hilfe eines zweiten Planspiegels im rechten Winkel dazu durch die hohle Rektaszensionsachse geschickt wird. Da diese auf den Himmelspol weist und sich ihre Lage nicht verändert, ist das entstehende reelle Bild ortsfest, was natürlich ein großer Vorteil ist. An diesem Ort können große, schwere Messgeräte (wie z. B. Spektrographen) aufgestellt werden ...

Daniel: ... und dem glücklichen Astronomen können Bequemlichkeiten geboten werden, um den seine Kollegen ihn beneiden!

Als Zusatzmaterial findet man ein **Arbeitsblatt**.

