

Feodor-Lynen-Gymnasium

Facharbeit aus Physik

Das Newton-Teleskop – Theorie und Praxis

Sara Sotzek

FACHARBEIT

aus dem Fach

Physik

Thema:

Das Newton-Teleskop – Theorie und Praxis

Verfasserin: Sara Sotzek

Leistungskurs: Physik

Kursleiter: Herr Bell

Abgabetermin: 2.2.04

Schriftlicher Teil:

Erzielte Punkte: in Worten:

Mündliche Prüfung (Prüfungstag:2004):

Erzielte Punkte: in Worten:

Gesamtpunktzahl (3:1 gew.): in Worten:

Abgabe im Sekretariat am:

.....

(Unterschrift des Kursleiters)

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1. Prinzip des Newton-Teleskops	4
2. Erklärung der zwei gebauten Teleskope	7
2.1 Pappteleskop	7
2.2 Metallteleskop.....	9
3. Theoretische Betrachtungen zu Spiegelteleskopen	15
3.1 Abbildungsleistung eines Spiegelteleskops	15
3.2 Der Parabolspiegel hat einen Brennpunkt	16
3.3 Der Kugelspiegel hat näherungsweise einen Brennpunkt	19
3.4 Numerischer Vergleich von Parabol- und Kugelspiegel	22
4. Abbildungsfehler von optischen Systemen und deren Verifizierung.....	25
4.1 Astigmatismus	25
4.2 Chromatische Abweichung.....	25
4.3 Sphärische Aberration.....	26
4.3.1 Kissenverzeichnung	27
4.3.2 Tonnenverzeichnung	27
4.4 Beugung	28
4.5 Foucault-Test des Hohlspiegels	28
5. Beobachtungen und Messungen	32
5.1 Foucault-Test Bilder	32
5.2 Bestimmung der Brennweite	38
5.3 Verschwinden des Fangspiegels	39
5.4 Eigene Beobachtungen mit dem Pappteleskop.....	39
5.5 Erfahrungen mit den Teleskopen.....	44
Quellen/ Literatur/ Hilfsmittel.....	48

Einleitung

Seit meiner Kindheit interessiere ich mich für die Sterne, aber auch für den Weltraum – das unendliche Universum.

Schon vor Jahrhunderten machten sich die Menschen - besonders Wissenschaftler - Gedanken darüber. Galileo Galilei (1564-1642) versuchte sich als Erster in astronomischen Himmelsbeobachtungen mit einem einfachen Linsenteleskop, bestehend aus einer Sammel- und Zerstreuungslinse.

Heutzutage werden so gut wie alle Linsenteleskope nach dem Prinzip des Johannes Kepler (1571-1630) gebaut. Dieses beruht auf zwei Sammellinsen, die ein Bild erzeugen, das zwar auf dem Kopf steht, jedoch sehr viel größer und schärfer ist als jegliche zuvor, was für astronomische Beobachtungen sehr wichtig ist.

Trotzdem treten bei Linsen auch gewisse Probleme auf. So verursachen zum einen Linsen Abbildungsfehler, wie sphärische und chromatische Aberration, die man nur aufwendig korrigieren kann. Zum anderen werden Teleskope unentwegt leistungsfähiger, um immer weiter ins Weltall blicken zu können. Somit muss man größere und schwerere Linsen produzieren, was sehr bald an technische Grenzen stößt.

Isaac Newton (1643-1727) war mit dem Linsenproblem vertraut und kam auf die Idee, die Sammellinse durch einen Sammelspiegel zu ersetzen. Dadurch wurde ein Meilenstein gesetzt, weil heutzutage fast alle Großteleskope nach diesem Prinzip gebaut werden (zum Beispiel Hubble Weltraumteleskop oder das Großteleskop der ESA in Chile: VLT).

In der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ fand ich einen Artikel über den Bau eines Teleskops und dessen Spiegelherstellung. Zu dem Münchner Autor bekam ich Kontakt über das Internet und besuchte ihn direkt in der Volksternwarte.

Alles dort beeindruckte mich so sehr, dass ich mich entschloss, auch ein Teleskop zu bauen. Im Folgenden schildere ich darüber meine Erfahrungen.

1. Prinzip des Newton-Teleskops

Das Newton-Teleskop ist das einfachste Spiegelteleskop, bei dem das Licht auf einen konkaven Hauptspiegel, auch Primärspiegel genannt, fällt. Die Oberfläche des Hauptspiegels ist meist parabolisch, da dieser einen Fokus (Brennpunkt) besitzt. Dieser Brennpunkt liegt zwischen Hauptspiegel und Objekt, auf das man sein Teleskop gerichtet hat. Die reflektierten Lichtstrahlen werden in diesem gebündelt. Wenn nun ein Okular in dem Fokus angebracht wird, kann man nur sehr wenig erkennen, da der Beobachter den Strahlengang des einfallenden Lichtes unterbricht. Deshalb befestigt man in der optischen Achse einen Umlenkspiegel, den so genannten Fangspiegel oder auch Sekundärspiegel. Um die Orientierung der beiden Spiegelflächen zueinander beizubehalten, werden sie durch eine Konstruktion (Tubus) verbunden. Der Fangspiegel sollte eine möglichst glatte Oberfläche besitzen und ist um 45° zur Mittelachse geneigt. Er leitet das vom Hauptspiegel zurückreflektierte Licht aus dem Tubus in den Okularauszug. Dort kann mit einem Okular die Abbildung vergrößert betrachtet werden.

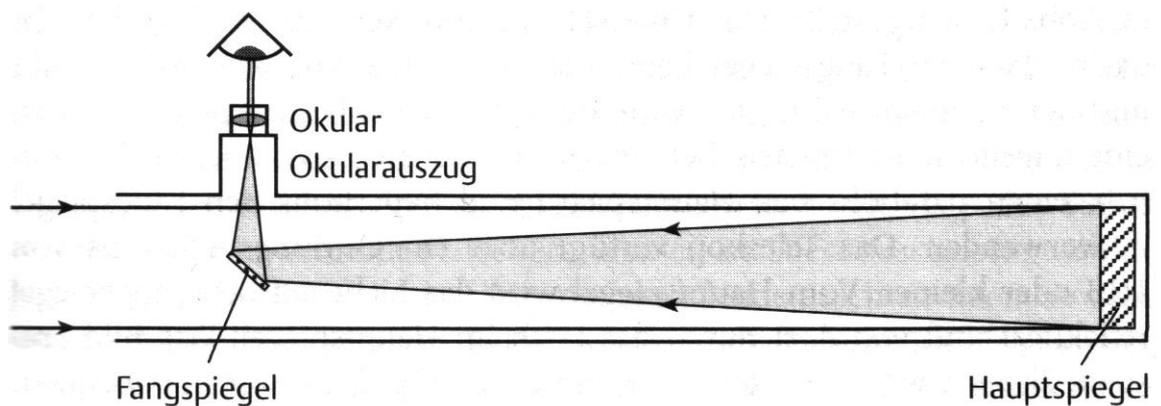


Bild aus Trittelvitz S.9

Da dieses Newtonteleskop nur sehr wenige optische Gegenstände benötigt, wie Hauptspiegel, Fangspiegel und einen Okularauszug mit entsprechendem Okular, wird dieses Prinzip gerne von Hobbyastronomen verwendet, vor allem auch, weil es leicht und sehr einfach zu handhaben ist. So lassen sich bei jedem Newtonteleskop die drei optischen Objekte wieder finden, egal wie aufwendig dieses Teleskop ist.

Zur Verdeutlichung des Prinzips und um die mühsame Prozedur des Spiegelschleifens zu umgehen, besorgte ich mir einen Baussatz, von dem ich die optischen Elemente (Hauptspiegel, Fangspiegel und Okularlinsen) übernahm und dessen Aufbau ich aus Pappe nachbildete (P1). Aufgrund der komplizierten Herstellung eines Parabolspiegels, beinhaltet dieser Bausatz nur einen Spiegel in Hohlkugelform, der aber für ein kleines Teleskop ausreichend ist, da hier die Abweichungen von der Parabelfläche nur minimal sind.



Aus Stabilitätsgründen und weil die Justierung des Pappteleskops nur schwierig durchführbar war, entschloss ich mich ein stabileres Metallteleskop (M1) zu bauen. Das Ausrichten der Spiegel sollte einfacher werden, weshalb ich andere Befestigungsmaßnahmen verwendete. Aber auch hier findet man die drei optischen Objekte wieder, die ich dafür ein zweites Mal erworben habe.

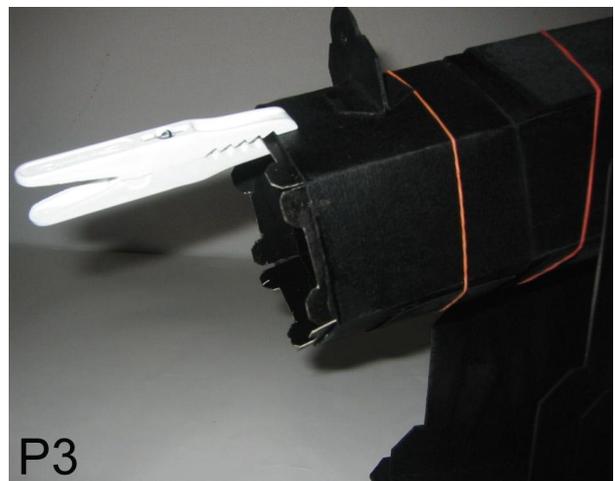
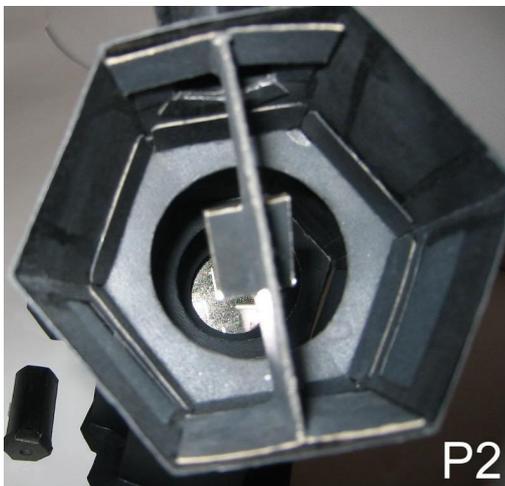


2. Erklärung der zwei gebauten Teleskope

2.1 Pappteleskop

Das Pappteleskop besteht aus 4 sechseckigen Röhren, die zu einer längeren zusammengesteckt sind. Da der Bausatz nur einen sehr dünnen Karton beinhaltete, entschied ich mich, ein dickeres Material zu benutzen, um dem Teleskop mehr Stabilität zu verleihen, hatte aber den Nachteil, alle Bauteile neu zu erstellen und die Maße der geänderten Wandstärke anzupassen. Zur besseren Betrachtung des Zusammenspiels der optischen Elemente, habe ich in den Tubus acht verschließbare Fenster geschnitten.

Weil sich die Pappe manchmal verzieht (z.B. durch Veränderung der Luftfeuchtigkeit), habe ich den Fangspiegel bei meinem Pappteleskop nur in den Tubus gespreizt, um nachjustieren zu können (P2). Dies wäre nicht möglich, wenn der Fangspiegel im Tubus festgeklebt wäre.



Weiterhin sollte auch der Hauptspiegel justierbar sein, weshalb die sechs Laschen hinten aus dem Tubus herausstehen. Eine davon wird mit einer Wäscheklammer fixiert (P3).

Zur Sonnenbeobachtung habe ich einen Vorsatz gebaut, in den ich eine handelsübliche Sonnenfilterfolie geklebt habe. Beim Blick auf die Sonne sollte

man darauf achten, dass ausschließlich mit geeignetem Sonnenschutz – hier die Sonnenfilterfolie (P4) – gearbeitet wird und dieser fehlerfrei und ohne Beschädigungen ist.

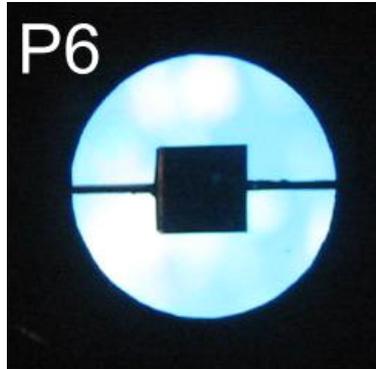


Des Weiteren besprühte ich das Teleskop im Inneren des Tubus mit einem schwarzen Mattlack, um reflektiertes Licht zu vermeiden. Dieses störende Streulicht wird auch durch mehrere ringförmige Blenden in der Röhre (P5) unterbunden.

Der Einbau der optischen Elemente sollte wie folgt geschehen:

Zuerst wird der Fangspiegel auf seiner Halterung mit der ebenen Spiegelfläche voran soweit in den Tubus geschoben, bis er gänzlich durch den Okularstutzen betrachtet werden kann. Daraufhin setzt man den Hauptspiegel am rückwärtigen Tubusende mit der Spiegelfläche nach innen ein und fixiert ihn mit einer Klammer. Der Blick durch den Okularauszug auf den Sekundärspiegel sollte den Primärspiegel als vollkommenen Kreis zeigen, der das ganze Format des Fangspiegels ausnutzt. An den sechs Laschen der Hauptspiegelhalterung kann man die Neigung und die Distanz des primären Spiegels im Tubus ändern. Eine richtige Justierung der Spiegelflächen zueinander ist erreicht, wenn man im Okularstutzen über den Fangspiegel den kompletten Hauptspiegel sehen kann und der Betrachter im Schattenwurf des (hier quadratischen) Sekundärspiegels das Abbild seines eigenen Auges erkennt. P6 zeigt ein Foto durch den

Okularstutzen. Da das Objektiv des Fotoapparates nicht beleuchtet war, ist der Fangspiegel nur als schwarze Fläche sichtbar.



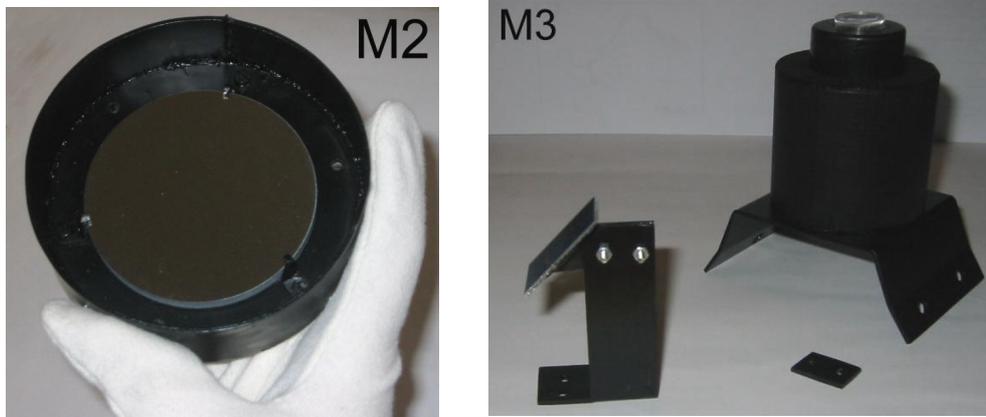
Daraufhin wird ein Okular soweit über den Stutzen geschoben, bis das Bild eines weit entfernten Objektes scharf zu erkennen ist.

Die Grobausrichtung auf einen Gegenstand erfolgt über zwei Visiereinrichtungen an der Außenseite des Tubus. Aufgrund der Bauart des Spiegelteleskops stehen die Gegenstände durch das Okular des Teleskops spiegelverkehrt auf dem Kopf. Dies sollte man bei der Feinjustierung auf einen Gegenstand bedenken.

2.2 Metallteleskop

Der Tubus besteht beim Metallteleskop aus einer stabilen Aluminium-Röhre von 81 mm Innendurchmesser, an der die Fangspiegelhalterung, die Hauptspiegelhalterung und der Okularauszug angebracht sind. Drei Gewindestangen verbinden die Primärspiegelhalterung mit dem Tubus. Zwischen der Spiegelhalterung und der Röhre ist auf jeder Gewindestange eine Schraubenfeder eingelegt, damit die rückwärtige Mutter eine Gegenkraft erfährt. Die Anzahl der Befestigungsstangen wurde bewusst mit drei festgelegt, da drei Punkte eine Ebene eindeutig festlegen. Eine runde Platte wird als Hauptspiegelhalterung verwendet. Drei Schrauben mit jeweils einer Klammer halten den Spiegel darauf fest. Diese Klammern, sowie die drei Auflagepunkte des Spiegels auf seiner Halterung, sind mit Kork unterlegt, damit der Glaskörper des Hauptspiegels schonend befestigt werden kann. Am Rand der

Primärspiegelhalterung (M2) befindet sich eine Schelle, die Lichteintritt von außen in die Röhre weitgehend verhindern soll.



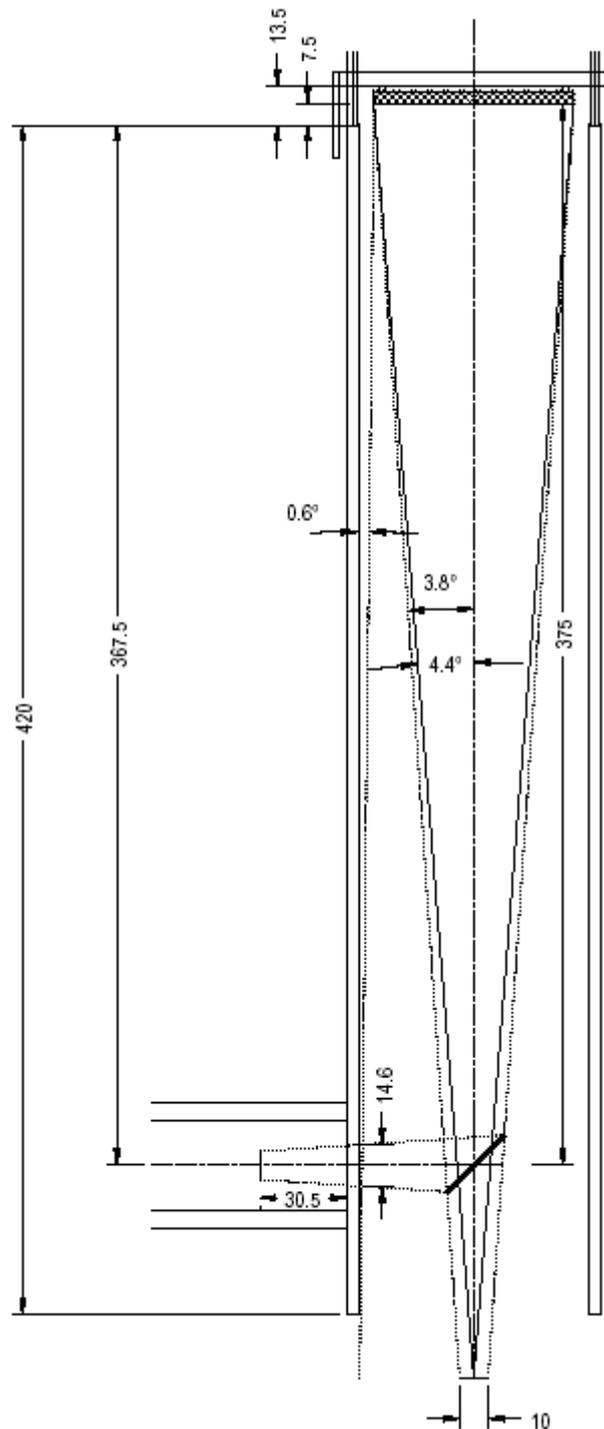
Die Fangspiegelhalterung (M3) besteht aus einem Winkelblech, das einseitig von unten in den Tubus ragt. Sie durchdringt dabei die Röhre, weil nicht genügend Platz darin war, die beabsichtigte Befestigung unterzubringen. Sie wird ebenfalls aus drei Schrauben und hinterlegten Federn hergestellt, um den Fangspiegel – in begrenztem Umfang – verstellen zu können.

Die Okularhalterung (M3) ist aus einem Holzrohr gefertigt, das mittels einer Metallschelle an den Tubus geschraubt wird. Hier sind keine Schraubenfedern vorgesehen. Gegebenenfalls sollen Unterlegscheiben eventuelle Fertigungsungenauigkeiten ausgleichen.

Als Okulare dienen etwas modifizierte Filmdosen mit eingeklebten Okularlinsen. Durch Schieben der Okulare in ihrer Halterung wird das Bild fokussiert.

Die Abmessungen des Metallteleskops wurden zunächst konstruktiv am Computer bestimmt (Programm: Autosketch). Diese entsprechen nicht ganz denen des Pappteleskops, damit das Metallteleskop möglicherweise auch für Fotografie verwendet werden könnte. Beim Pappteleskop war dies wegen der zu knappen Dimensionen des Okularauszugs nicht möglich. Das Kameraobjektiv ließ sich nicht nahe genug an den Fokuspunkt bringen, um scharfe Bilder zu erlangen.

Aus der folgenden Skizze können die Hauptabmessungen entnommen werden:

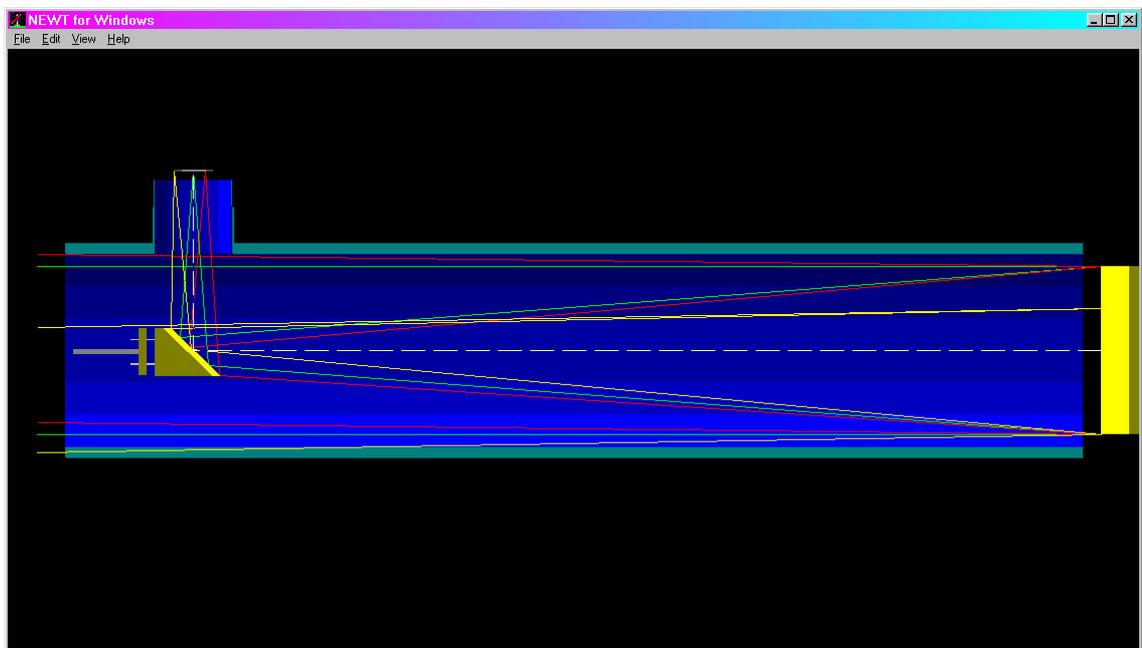


Man sieht, der Fangspiegel ist vom Hohlspiegel 375 mm entfernt. Da die Brennweite des Primärspiegels 450 mm beträgt, ist die Differenz Brennpunkt-Sekundärspiegel $450 - 375 = 75$ mm. Diese 75 mm werden durch den diagonal

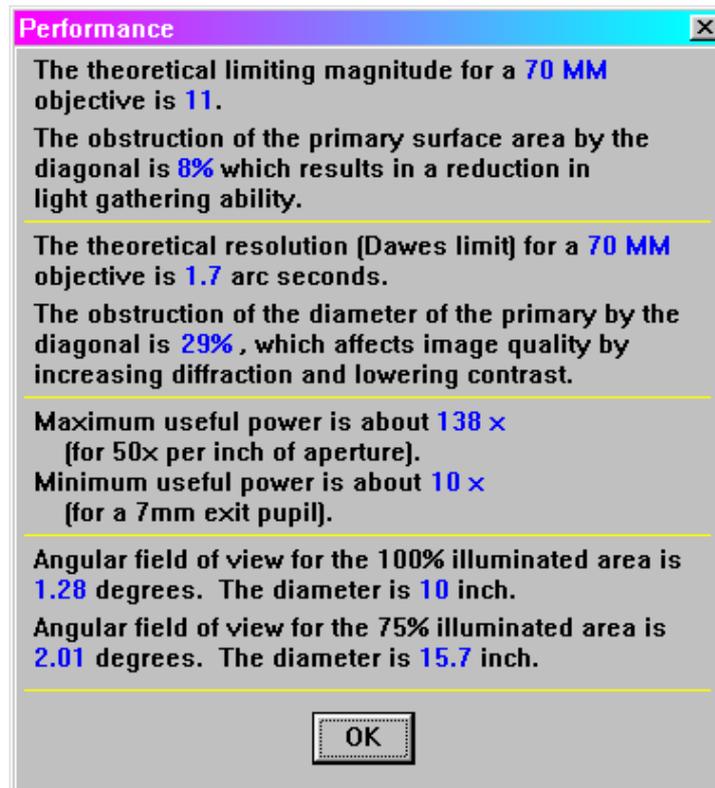
eingebauten Fangspiegel senkrecht aus dem Tubus gelenkt. Ist der Außenradius der Teleskopröhre 44,5 mm, entsteht das Bild des Brennpunktes 30,5 mm über dem Rohr. Um den Strahlengang im Teleskop zeichnerisch zu bestimmen, bin ich von einem 10 mm großen Bild (Durchmesser) im Brennpunkt ausgegangen. Man kann erkennen, dass auch die Randstrahlen dieser Fläche nicht mit dem Innendurchmesser des Teleskops kollidieren. Im Okularstutzen erwarte ich das sichtbare Bild mit mindestens 10 mm Durchmesser. Dieses wird unter der Lupenwirkung der unterschiedlichen Okulare beobachtet.

Später entdeckte ich das Programm NEWT (siehe Literaturverzeichnis) im Internet aufgrund des Hinweises eines Mitarbeiters der Volkssternwarte München, mit dem man die Größen auch numerisch berechnen kann. Es bestätigte weitgehend meine konstruktiv ermittelten Werte.

Folgend ein Bild aus NEWT, das den prinzipiellen Aufbau erklärt:



Das nächste Bild aus NEWT zeigt die Leistungsdaten des Teleskops:



In Übersetzung bedeutet dies:

Bei einem Hauptspiegeldurchmesser von 70mm kann man Sterne bis zur 11. Größenklasse beobachten. Der Fangspiegel macht 8 Prozent der Oberfläche des Hauptspiegels unbrauchbar. Ein Hauptspiegel mit 70mm Durchmesser hat ein Auflösungsvermögen von 1,7 Bogensekunden (siehe: Abbildungsleistung). 29 Prozent des Durchmessers nimmt der Fangspiegel in Bezug auf den Hauptspiegel ein. Mit dem Teleskop ist eine Vergrößerung von 10- bis 138fach sinnvoll. Bei 100% Ausleuchtung im Okular hat der Sichtkegel am Himmel 1,28 Grad und bei 75% Beleuchtung 2,01 Grad.

In den obenstehenden englischen Begriffen sind viele Fachausdrücke verwendet, welche durch die Übersetzung nur teilweise erklärt sind.

Einer sei als Beispiel angezogen: Das Wort „magnitude“ bezeichnet die Größenklasse (Helligkeit) eines Sterns. Das Teleskop kann also - unter günstigsten Umständen - Sterne bis zur 11. Größenklasse zeigen. Zum Vergleich: Ein menschliches Auge erkennt unter besten Bedingungen nur Sterne der

5-6. Größenklasse. In „lichtverseuchten“ Gegenden wie Großstädten sind nachts meist nur Sterne bis zur 3. oder 4. Größenklasse mit bloßem Auge sichtbar. Die Zählung der Größenklassen ist umgekehrt proportional zu ihrer Helligkeit. Ein Stern mit großer Magnitude ist schwieriger zu erkennen, als ein Stern mit kleiner Zahl. Zum Beispiel hat der Polarstern eine Größe von 2, während der Stern „Rigel“ im Sterbild des Orion (rechts unten) die Größe 0,2 hat. Die Skala ist logarithmisch, daher können für sehr helle Objekte auch negative Werte vorkommen, so hat die Sonne eine Helligkeit von -26 und der Jupiter zur Zeit von -2,1.

Folgende Dimensionen berechnet NEWT für mein Teleskop:

Dimensions		
Unit of Measure	mm	Maßeinheit
Primary Mirror Diameter	70.0	Hauptspiegeldurchmesser
Focal Length	450.00	Brennweite
Focal Ratio	6.4286	Brennweite/Hauptspiegeldurchmesser
Tube Inside Diameter	81.0	
Tube Thickness	4.0000	
Focuser Height	30.5	Brennpunktlage außerhalb des Tubuses im Okularauszug
Focuser Inside Diameter	31.75	
Focuser Extra Travel	0.0	
Focuser Camera Travel	0.0	
Diagonal Minor Axis	20.0	Schmale Seite des Fangspiegels
Diagonal Offset	0.7777	Fangspiegel Offset
100% Illumination Diameter	10.000	Größe des Bildes bei 100% Ausleuchtung
75% Illumination Diameter	15.701	Größe des Bildes bei 75% Ausleuchtung
Front Aperture Diameter	84.817	
Mirror Face to Focuser Hole	375.00	Distanz Hauptspiegel-Okularmitte
Focuser to Front End of Tube	52.5	
Mirror Face to Back of Tube	-7.5	Distanz: Hauptspiegel-Tubusende
Tube Length	420.00	Tubuslänge

OK

3. Theoretische Betrachtungen zu Spiegelteleskopen

3.1 Abbildungsleistung eines Spiegelteleskops

Wichtig für einen Besitzer eines Teleskops ist sein Leistungsvermögen. Naheliegender ist als erstes die Vergrößerung. Diese ist gleich dem Verhältnis aus der Hauptspiegelbrennweite F und der Okular-Brennweite f_{Ok} :

$$V = \frac{F}{f_{Ok}}$$

Für folgende Okular-Brennweiten errechnen sich die möglichen Vergrößerungen meiner Teleskope (bei $F = 450$ mm):

f_{Ok} :	15 mm	30 mm	49 mm
V:	30	15	9

Den kleinsten Winkelabstand zweier benachbarter Sterne, die man gerade noch unterscheiden kann, gibt das Auflösungsvermögen eines Teleskops an. Durch Beugung an der Eintrittsöffnung des Instrumentes (Durchmesser D) entsteht aus einem Lichtpunkt als Abbild ein Beugungsscheibchen, das von konzentrischen Helligkeitsringen umgeben ist. Zwei nahe beieinander liegende Punkte können dann noch getrennt aufgelöst werden, wenn das zentrale Maximum der Helligkeit des einen Beugungsscheibchens auf den ersten Dunkelring (Minimum) des anderen trifft. Wie bei Beugung am Einfachspalt, gilt hier für das 1. Minimum:

$$\Delta s = D \cdot \sin \alpha = \lambda$$

Da der Winkel α klein ist, kann man den Sinus durch sein Argument (im Bogenmaß) ersetzen. Ferner ergibt sich für den Fall einer Kreisblende (Tubusöffnung statt Spalt) noch ein Faktor 1,22, sodass die Formel dann lautet:

$$\alpha = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Setzt man darin $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}$ mm (mittlere Wellenlänge des sichtbaren Lichts) und rechnet den Winkel in Bogensekunden um, so ergibt sich:

$$\alpha ["] = 1,22 \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 3600 \cdot \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{D(mm)} = \frac{138}{D(mm)}$$

Im Buch von A. Unsöld (siehe Literaturliste) wird auf Seite 88 ein Hr. Dawes zitiert, der aus Messungen an Doppelsternen folgende Formel abgeleitet hat:

$$\alpha ["] = \frac{114}{D(mm)}$$

Diese Formel wird häufig zur Berechnung des Auflösungsvermögens benutzt. Für das Pappteleoskop ergibt sich $\alpha = 1,9''$, da der wirksame Durchmesser des Spiegels (durch Blenden) auf 60 mm begrenzt wird.

Im Prinzip ließen sich beliebig kleine Teleskope mit enormen Vergrößerungen bauen, kommt es doch nur auf das Brennweitenverhältnis von Spiegel zu Okular an. Die Dawes-Gleichung relativiert das Ganze jedoch. Will man ein detailreiches Bild erhalten, muss man zu großen Spiegeldurchmessern gehen. Bei kleinen Spiegeln und starken Vergrößerungen wird nur das durch Überlagerung von Beugungsscheibchen unscharfe Bild vergrößert dargestellt (sogenannte leere Vergrößerung).

Die Beziehung von Dawes stellt einen Grenzwert dar, der nur bei ungestörter Beobachtungsmöglichkeit erreicht wird. Die Turbulenz der atmosphärischen Luft, die sich zwischen Instrument und Objekt befindet, beeinflusst die Qualität des Bildes. Springt oder wabert das Bild, so spricht der Fachmann von schlechtem „Seeing“. Ab 150 mm Spiegeldurchmesser spielt das Seeing für die Güte der Bilder eine dominierende Rolle. Daher platzieren Astronomen ihre Fernrohre an hoch gelegenen Orten, um einen möglichst großen Anteil der Störungen durch die Atmosphäre auszuschließen (VLT der ESO am Berg Paranal in Chile, Keck Teleskop auf Hawaii oder Hubble Teleskop im Weltraum).

3.2 Der Parabolspiegel hat einen Brennpunkt

Der folgende Abschnitt soll zeigen, dass alle achsenparallelen Strahlen, die einen Parabolspiegel treffen, sich in einem Brennpunkt sammeln.

Dazu sei folgende Situation angenommen:

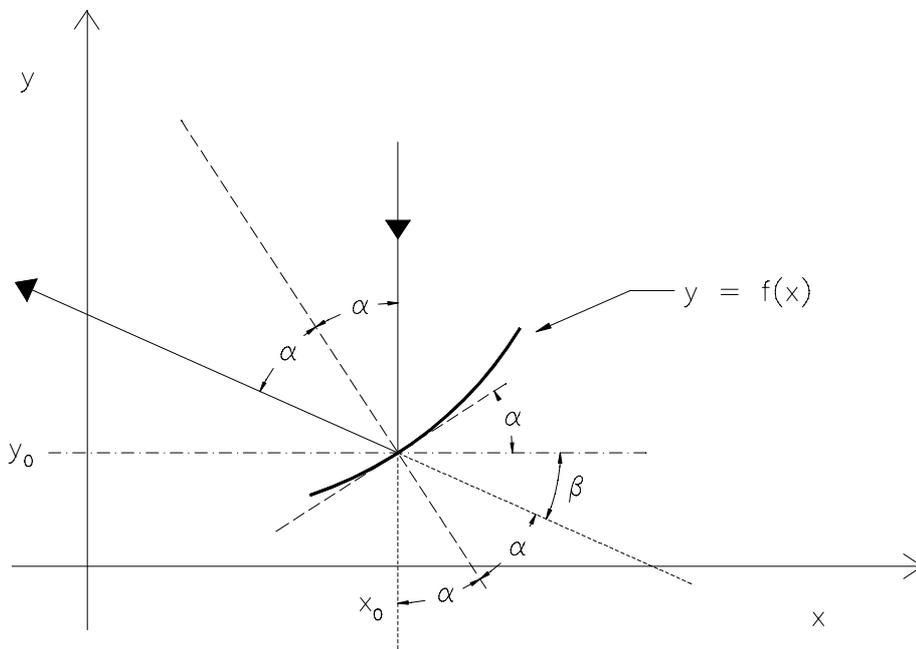
Der Parabolspiegel befindet sich mit seinem Scheitel im Ursprung unseres Koordinatensystems und sei nach oben geöffnet. Mathematisch lässt sich die Oberfläche des Spiegels nun mit folgender Funktion beschreiben - mit dem zunächst unbestimmten Parameter a:

$$y = f(x) = a \cdot x^2$$

Eigentlich ist das Ganze ein dreidimensionales Problem, hier wird nur der zweidimensionale Schnitt betrachtet. In Gedanken lasse man die Funktion um die y-Achse rotieren. Aus Symmetriegründen kann man sich auf Werte für $x > 0$ beschränken.

Achsenparallel einfallende Strahlen sind Parallelen zur y-Achse. Die x-Achse stellt die radiale Ausdehnung des Spiegels dar.

Die folgende Skizze verdeutlicht den Sachverhalt:



$$\tan(\alpha) = y'$$

$m = \arctan(y')$... Steigung Tangente an Spiegel

$$\beta = 90^\circ - 2\alpha$$

$m_1 = \tan(-\beta)$... Steigung reflektierter Strahl

Der einfallende Strahl treffe den Spiegel im Punkt $(x_0; y_0)$. Der Einfallswinkel α zum Einfallslot ist gleich dem Winkel der Tangente an den Spiegel in $(x_0; y_0)$ zur Horizontalen, da beide Schenkel der betrachteten Winkel wechselseitig aufeinander senkrecht stehen.

Der reflektierte Strahl hat nach dem Reflexionsgesetz den gleichen Winkel zum Einfallslot.

Ist nun $y = f(x)$ die Gleichung der Oberfläche des Spiegels, so gilt:

$$\frac{dy}{dx} = y' = \tan \alpha \quad (1)$$

Wobei mit y' die analytische Ableitung der Funktion y nach x gemeint ist.

Im Falle der Parabel ergibt sich:

$$y' = \frac{d}{dx}(ax^2) = 2ax \quad (1')$$

Aus obiger Skizze lässt sich ablesen, dass für die Steigung des reflektierten Strahls (mit einigen trigonometrischen Umformungen) gelten muss:

$$\begin{aligned} m_1 &= \tan(-\beta) = -\tan(90^\circ - 2\alpha) = -\cot(2\alpha) = \\ &= -\frac{1}{\tan(2\alpha)} = \frac{\tan^2 \alpha - 1}{2 \tan \alpha} = \frac{1}{2} \left(\tan \alpha - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

oder mit (1):

$$m_1 = \frac{1}{2} \left(y' - \frac{1}{y'} \right) \quad (2')$$

Setzt man (1') in (2') ein, so erhält man:

$$m_1 = \frac{1}{2} \left(2ax - \frac{1}{2ax} \right) = ax - \frac{1}{4ax} \quad (3)$$

Nun wird eine Geradengleichung für den reflektierten Strahl aufgestellt:

Einerseits ist $(x_0; y_0)$ ein Punkt der Geraden, andererseits hat diese nach (3) die Steigung m_1 an der Stelle x_0 :

$$m_1(x_0) = \frac{y - y_0}{x - x_0} \quad (4)$$

Ferner ist y_0 ein Punkt auf der Parabel:

$$y_0 = ax_0^2 \quad (5)$$

(5) eingesetzt in (4) ergibt mit (3):

$$\begin{aligned} \frac{y - ax_0^2}{x - x_0} &= ax_0 - \frac{1}{4ax_0} \\ \Rightarrow y - ax_0^2 &= \left(ax_0 - \frac{1}{4ax_0}\right) \cdot (x - x_0) \end{aligned}$$

Die rechte Seite für x_0 ausmultipliziert und mit der linken Seite zusammengefasst führt zu:

$$y = \left(ax_0 - \frac{1}{4ax_0}\right) x + \frac{1}{4a} \quad (6)$$

Gleichung (6) ist eine Geradengleichung, die für alle möglichen x_0 (Punkte auf der Spiegeloberfläche) den Punkt $(0; \frac{1}{4a})$ enthält, also ein Geradenbündel mit dem Fixpunkt $(0; \frac{1}{4a})$, dem so genannten Brennpunkt des Spiegels.

Für die Brennweite gilt $f = \frac{1}{4a}$ oder nach a aufgelöst: $a = \frac{1}{4f}$.

Damit ist gezeigt, dass ein Parabolspiegel achsenparallel einfallende Strahlen in einem Brennpunkt sammelt.

3.3 Der Kugelspiegel hat näherungsweise einen Brennpunkt

Für den Kugelspiegel wird von einer analogen Darstellung seiner Oberfläche ausgegangen, wie für den Parabolspiegel. Als Funktion wird hier gewählt:

$$y = b - \sqrt{b^2 - x^2} \quad (7)$$

Diese Form hat den Vorteil, dass sich der Scheitelpunkt im Ursprung befindet, der Hohlspiegel sich nach oben öffnet und gleichzeitig der Parameter b der Krümmungsradius unseres Hohlspiegels ist. Wie beim Parabolspiegel beschränkt man sich aus Symmetriegründen auf positives x , das allerdings nach oben durch

den Wert $x = b$ beschränkt ist: $x \in [0, b]$. Dort hat die Kugelfläche ihre vertikale Tangente und y den Wert b erreicht. Kreisabschnitte für $y > b$ haben keinen physikalischen Sinn.

Um entsprechend zum Parabolspiegel die Steigung des reflektierten Strahls zu berechnen, benötigt man die Ableitung dieser Funktion nach x :

$$y' = \frac{x}{\sqrt{b^2 - x^2}} \quad (8)$$

Für die Steigung des reflektierten Strahls wird die obige Gleichung (2') benutzt, die unabhängig von der genauen Oberflächendarstellung abgeleitet wurde.

(8) in (2') eingesetzt ergibt:

$$m_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{b^2 - x^2}} - \frac{\sqrt{b^2 - x^2}}{x} \right) \quad (9)$$

Die Aufstellung der Geradengleichung für den reflektierten Strahl erfolgt vollkommen analog zum Parabolspiegel:

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = m_2(x_0) \quad \text{mit} \quad y_0 = b - \sqrt{b^2 - x_0^2} \quad (10)$$

Aus (9) und (10) folgt:

$$y - b + \sqrt{b^2 - x_0^2} = \frac{x - x_0}{2} \cdot \left(\frac{x_0}{\sqrt{b^2 - x_0^2}} - \frac{\sqrt{b^2 - x_0^2}}{x_0} \right) \quad (11)$$

Umformung führt zu:

$$\begin{aligned} y &= \frac{x}{2} \cdot \left(\frac{x_0}{\sqrt{b^2 - x_0^2}} - \frac{\sqrt{b^2 - x_0^2}}{x_0} \right) + b - \frac{\sqrt{b^2 - x_0^2}}{2} - \frac{x_0^2}{2 \cdot \sqrt{b^2 - x_0^2}} \\ &= \frac{x}{2} \cdot \left(\frac{x_0}{\sqrt{b^2 - x_0^2}} - \frac{\sqrt{b^2 - x_0^2}}{x_0} \right) + F(b, x_0) \end{aligned} \quad (12)$$

mit:

$$F(b, x_0) = b - \frac{\sqrt{b^2 - x_0^2}}{2} - \frac{x_0^2}{2 \cdot \sqrt{b^2 - x_0^2}} \quad (13)$$

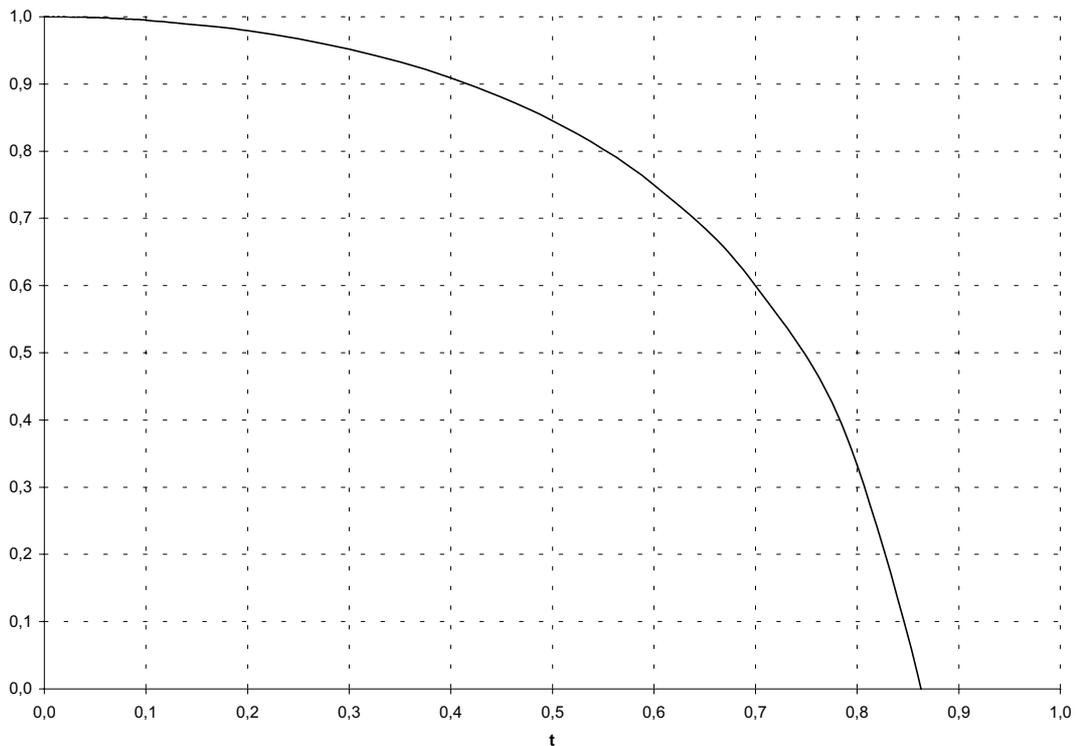
Durch Ausklammern von $\frac{b}{2}$ in (13) und Substitution von $t := \frac{x_0}{b}$ ergibt sich für

$F(b, x_0)$:

$$F(b, x_0) = \frac{b}{2} \cdot \left(2 - \sqrt{1-t^2} - \frac{t^2}{\sqrt{1-t^2}} \right) \quad (14)$$

War ursprünglich $x_0 \in [0, b]$, so ist jetzt $t \in [0, 1]$.

Die Term in der Klammer von (14) ist in folgendem Diagramm dargestellt:



Das bedeutet:

Solange t nahe bei 0 ist, folgt: $F(b, x_0) \approx \frac{b}{2}$. Die Funktion F ist also nahezu unabhängig von x_0 . Der Kugelspiegel hat dann den Brennpunkt $(0; \frac{b}{2})$.

Sobald t (das ist der auf den Krümmungsradius b normierte Abstand von der y -Achse) merklich von Null verschieden ist (Kurve ist kleiner als 1), treffen die entfernten Strahlen nicht mehr den Brennpunkt, sondern kreuzen innerhalb von $\frac{b}{2}$ die y -Achse. Die weiter außen liegenden Bereiche des Kugelspiegels reflektieren die einfallenden achsenparallelen Strahlen in einem zu flachen Winkel, weil die Spiegelfläche an dieser Stelle zu steil ist und haben daher eine kürzere Brennweite (siehe: Abbildungsfehler - sphärische Aberration).

Daraus folgt: Bei einem Kugelspiegel darf das Verhältnis Radius des Spiegels zum Krümmungsradius der Spiegelfläche nicht zu groß werden. In der Praxis

wird oft für t der Wert 0,1 als Maximum genommen oder es wird durch vorgesetzte Korrekturplatten die Neigung der einfallenden Strahlen nach außen korrigiert. So treffen auch die entfernten Strahlen den Brennpunkt (sog. Schmidt-Korrektionsplatte).

3.4 Numerischer Vergleich von Parabol- und Kugelspiegel

In der folgenden Aufstellung wird unter Benützung eines Tabellenkalkulationsprogramms der Unterschied zwischen Kugel- und Parabolspiegel aufgezeigt. Dabei wird jeweils von einer Brennweite von 0,45 m ausgegangen. Die Gleichung für die Kugeloberfläche ist dann $y = 0,9 - \sqrt{0,9^2 - x^2}$.

Die Parabeloberfläche wird mit $y = \frac{x^2}{4 \cdot 0,45}$ berechnet.

x	t	y (Kugel)	y (Parabel)	Diff (µm)	Diff (°)	Tangente						
						Steigung		Grad		Differenz [°]		Ku-Pa
						Kugel	Parabel	Kugel	Parabel	Kugel minus Parabel		
0.00	0.00	0.000000000	0.000000000	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	
0.01	0.01	0.00000556	0.00000556	0.000	0.000	0.00111	0.00111	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	
0.02	0.02	0.00002222	0.00002222	0.000	0.000	0.002222	0.002222	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	
0.03	0.03	0.00005000	0.00005000	0.000	0.000	0.003333	0.003333	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	
0.04	0.04	0.00008889	0.00008889	0.000	0.000	0.004444	0.004444	0.000000	0.000000	0.000000	0.01	
0.05	0.05	0.00013889	0.00013889	0.000	0.000	0.005556	0.005556	0.000000	0.000000	0.000000	0.02	
0.06	0.07	0.00020000	0.00020000	0.000	0.001	0.006667	0.006667	0.000000	0.000000	0.000000	0.03	
0.07	0.08	0.00027223	0.00027222	0.000	0.001	0.007778	0.007778	0.000000	0.000000	0.000000	0.05	
0.08	0.09	0.00035556	0.00035556	0.001	0.001	0.008889	0.008889	0.000000	0.000000	0.000000	0.07	
0.09	0.10	0.00045000	0.00045000	0.001	0.002	0.010000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.10	
0.10	0.11	0.00055557	0.00055556	0.002	0.003	0.011111	0.011111	0.000000	0.000000	0.000000	0.14	
0.11	0.12	0.00067225	0.00067222	0.003	0.005	0.012222	0.012222	0.000000	0.000000	0.000000	0.19	
0.12	0.13	0.00080004	0.00080000	0.004	0.007	0.013333	0.013333	0.000000	0.000000	0.000000	0.24	
0.13	0.14	0.00093894	0.00093889	0.005	0.010	0.014444	0.014444	0.000000	0.000000	0.000000	0.31	
0.14	0.16	0.00108895	0.00108889	0.007	0.013	0.015556	0.015556	0.000000	0.000000	0.000000	0.39	
0.15	0.17	0.00125009	0.00125000	0.009	0.017	0.016667	0.016667	0.000000	0.000000	0.000000	0.48	
0.16	0.18	0.00142233	0.00142222	0.011	0.022	0.017778	0.017778	0.000000	0.000000	0.000000	0.58	
0.17	0.19	0.00160570	0.00160556	0.014	0.029	0.018889	0.018889	0.000000	0.000000	0.000000	0.69	
0.18	0.20	0.00180018	0.00180000	0.018	0.036	0.020000	0.020000	0.000000	0.000000	0.000000	0.82	
0.19	0.21	0.00200578	0.00200556	0.022	0.045	0.021111	0.021111	0.000000	0.000000	0.000000	0.97	
0.20	0.22	0.00222250	0.00222222	0.027	0.055	0.022222	0.022222	0.000000	0.000000	0.000000	1.13	
0.21	0.23	0.00245033	0.00245000	0.033	0.067	0.023333	0.023333	0.000000	0.000000	0.000000	1.31	
0.22	0.24	0.00268929	0.00268889	0.040	0.080	0.024444	0.024444	0.000000	0.000000	0.000000	1.51	
0.23	0.26	0.00293937	0.00293889	0.048	0.096	0.025556	0.025556	0.000000	0.000000	0.000000	1.72	
0.24	0.27	0.00320057	0.00320000	0.057	0.114	0.026668	0.026667	0.000000	0.000000	0.000000	1.96	
0.25	0.28	0.00347289	0.00347222	0.067	0.134	0.027779	0.027778	0.000000	0.000000	0.000000	2.21	
0.26	0.29	0.00375634	0.00375556	0.078	0.157	0.028900	0.028889	0.000000	0.000000	0.000000	2.49	
0.27	0.30	0.00405091	0.00405000	0.091	0.182	0.030000	0.030000	0.000000	0.000000	0.000000	2.78	
0.28	0.31	0.00435661	0.00435556	0.105	0.211	0.031113	0.031111	0.000000	0.000000	0.000000	3.10	
0.29	0.32	0.00467344	0.00467222	0.121	0.243	0.032224	0.032222	0.000000	0.000000	0.000000	3.45	
0.30	0.33	0.00500139	0.00500000	0.139	0.278	0.033335	0.033333	0.000000	0.000000	0.000000	3.82	
0.31	0.34	0.00534047	0.00533889	0.158	0.317	0.034446	0.034444	0.000000	0.000000	0.000000	4.21	
0.32	0.36	0.00568069	0.00568889	0.180	0.360	0.035588	0.035556	0.000000	0.000000	0.000000	4.63	
0.33	0.37	0.00605203	0.00605000	0.203	0.407	0.036669	0.036667	0.000000	0.000000	0.000000	5.08	
0.34	0.38	0.00642452	0.00642222	0.229	0.459	0.037800	0.037778	0.000000	0.000000	0.000000	5.56	
0.35	0.39	0.00680813	0.00680556	0.258	0.515	0.038890	0.038889	0.000000	0.000000	0.000000	6.06	
0.36	0.40	0.00720288	0.00720000	0.288	0.576	0.040003	0.040000	0.000000	0.000000	0.000000	6.60	
0.37	0.41	0.00760877	0.00760556	0.322	0.643	0.041115	0.041111	0.000000	0.000000	0.000000	7.16	
0.38	0.42	0.00802580	0.00802222	0.358	0.716	0.042226	0.042222	0.000000	0.000000	0.000000	7.76	
0.39	0.43	0.00845397	0.00845000	0.397	0.794	0.043337	0.043333	0.000000	0.000000	0.000000	8.39	
0.40	0.44	0.00889328	0.00888889	0.439	0.879	0.044449	0.044444	0.000000	0.000000	0.000000	9.05	
0.41	0.46	0.00934374	0.00933889	0.485	0.970	0.045600	0.045556	0.000000	0.000000	0.000000	9.75	
0.42	0.47	0.00980534	0.00980000	0.534	1.068	0.046720	0.046667	0.000000	0.000000	0.000000	10.48	
0.43	0.48	0.01027809	0.01027222	0.587	1.174	0.047830	0.047778	0.000000	0.000000	0.000000	11.24	
0.44	0.49	0.01076199	0.01075556	0.643	1.287	0.048889	0.048889	0.000000	0.000000	0.000000	12.04	
0.45	0.50	0.01125704	0.01125000	0.704	1.408	0.050006	0.050000	0.000000	0.000000	0.000000	12.88	
0.46	0.51	0.01176324	0.01175556	0.769	1.537	0.051118	0.051111	0.000000	0.000000	0.000000	13.76	
0.47	0.52	0.01228060	0.01227222	0.838	1.676	0.052229	0.052222	0.000000	0.000000	0.000000	14.68	
0.48	0.53	0.01280912	0.01280000	0.912	1.823	0.053341	0.053333	0.000000	0.000000	0.000000	15.63	
0.49	0.54	0.01334879	0.01333889	0.990	1.980	0.054533	0.054544	0.000000	0.000000	0.000000	16.63	
0.50	0.56	0.01389962	0.01388889	1.073	2.147	0.055654	0.055556	0.000000	0.000000	0.000000	17.67	

In der ersten Spalte ist x der radiale Abstand zum Scheitel des Hohlspiegels in Metern dargestellt. Die Zweite zeigt den auf den Krümmungsradius normierten Parameter t ($t = x/b$). Die dritte und vierte Spalte berechnen die Funktionswerte der einzelnen Spiegeloberflächen in Metern. In der fünften und sechsten Spalte wird die Differenz zwischen der Dritten und Vierten gebildet. Wegen der sich ergebenden kleinen Werte, ist die Differenz in μm (10^{-6} m) angeben oder als Vielfache von einer mittleren Wellenlänge des sichtbaren Lichtes ($\lambda = 0,55 \mu\text{m}$). Die siebente und achte Spalte ermitteln die Ableitung (Steigung) der Kugel- bzw. Parabelfunktion an der jeweiligen Stelle. Diese Steigungen werden in der neunten und zehnten Spalte in Grad umgerechnet. In der Elften ist die Differenz zwischen Kugel- und Parabel-Tangente in Grad angegeben. Die letzte Spalte multipliziert die Vorletzte - aufgrund der kleinen Zahlenwerte - mit 3600 und stellt damit die Differenz der Tangentenwinkel in Bogensekunden dar.

Überraschend sind vielleicht die kleinen Werte von y . So liegt bei einem Spiegel von 50 mm Radius (100 mm Durchmesser) und einer Brennweite von 450 mm der äußere Rand nur 1,4 mm höher als der Scheitel.

Tendenzmäßig lässt sich ablesen, dass die Werte für die Kugeloberfläche immer größer sind als die entsprechenden der Parabeloberfläche (ebenso ihre Steigungen). Die jeweiligen Unterschiede vergrößern sich mit zunehmendem x .

Der Radius meines Hauptspiegels beträgt 0,035 m. Bei diesem x -Wert kann man aus der Tabelle folgende Werte für y ablesen: $y_{\text{Kugel}} = 0,000680813$ und $y_{\text{Parabel}} = 0,000680556$. Die Differenz der beiden Zahlenwerte entspricht $0,258 \mu\text{m}$ bzw. ungefähr $\lambda/2$. Die letzte Spalte berechnet die Abweichung der Tangentenwinkel am Spiegelrand mit 6,06 Bogensekunden.

Man sieht, dass die Differenzen insgesamt klein sind. Daher kann mit guter Näherung für diese Abmessungen ein Kugelspiegel anstelle eines Parabolspiegels verwendet werden.

4. Abbildungsfehler von optischen Systemen und deren Verifizierung

4.1 Astigmatismus

Sind Linsen- oder Hohlspiegelflächen nicht in allen radialen Richtungen gleichmäßig gekrümmt, so gibt es normalerweise eine nahe (F_1) und eine etwas weiter entfernte Brennlinie (F_2) anstelle eines Brennpunktes.

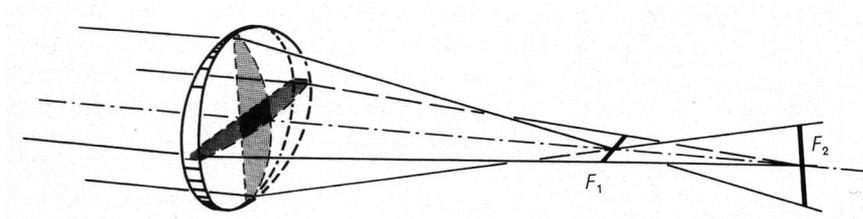


Bild aus Gerthsen S.464

Auch exakt gleichförmig hergestellte Optiken haben Astigmatismus schiefer Bündel. Für Punkte weit außerhalb der optischen Achse ergeben sich als Bild günstigstenfalls zwei Striche, die zueinander senkrecht stehen.

4.2 Chromatische Abweichung

Dieser Effekt tritt nur bei Linsen auf, die die Abbildung aufgrund von Brechung des Lichts an der Linsenoberfläche bewerkstelligen. Sie produzieren Bilder mit farbigen Rändern, weil blaues Licht durch die Glasoberfläche stärker abgelenkt wird als rotes Licht (so genannte Dispersion). Daher hat Blau eine kürzere Brennweite als Rot. Wenn man nun einen Schirm im blauen Brennpunkt anbringt, sieht man einen blauen Punkt mit rotem Saum und im roten Brennpunkt einen roten Punkt mit blauer Umrandung.

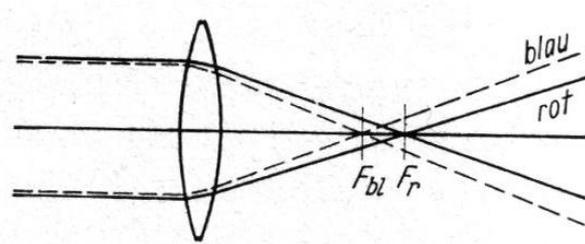


Bild aus Gerthsen S.464

Die chromatische Aberration kann durch Benützung von mehreren Linsen anstelle einer einzigen weitgehend kompensiert werden. Die dabei verwendeten Linsen bestehen aus Glas mit unterschiedlicher Dispersion (z.B. Kronglas und Flintglas).

4.3 Sphärische Aberration

Sie ist bei kugelförmig geschliffenen Linsen und Spiegeln beobachtbar. Die Randzonen dieser Objekte fokussieren das Licht durch ihre Gestalt stärker als die Mittelregion. Daher zeigen sie etwas verzerrte Bilder, weil ihre Randregionen eine kürzere (F_R) und die Mittelregionen eine längere Brennweite (F) besitzen.

Bei Kugelspiegeln kann dieses Phänomen durch Einsetzen von Korrekturplatten beseitigt werden (siehe: Brennpunkte von Hohlspiegeln) - Linsen müssen Blenden verwenden, um den schädlichen äußern Strahlen ihre Wirkung zu nehmen.

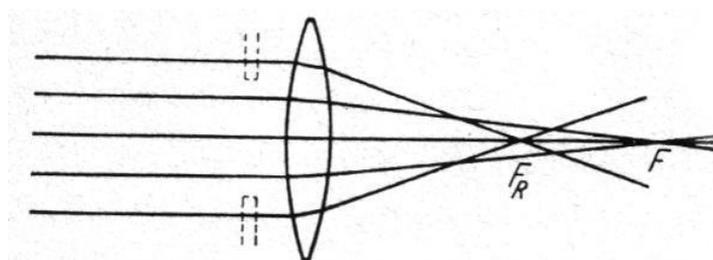
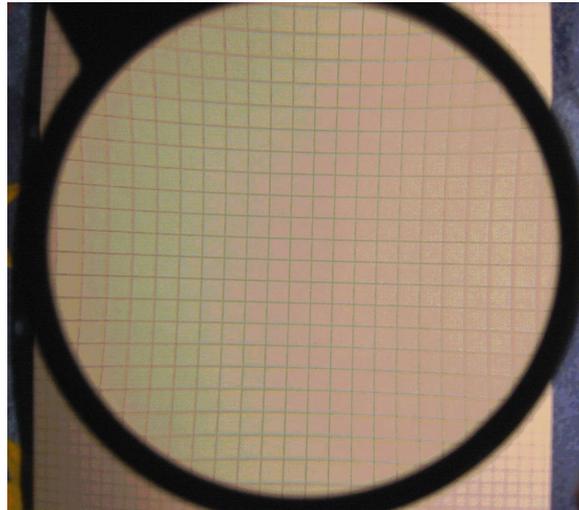


Bild aus Gerthsen S.464

Man unterscheidet zwei Varianten: Kissen- und Tonnenverzeichnung.

4.3.1 Kissenverzeichnung

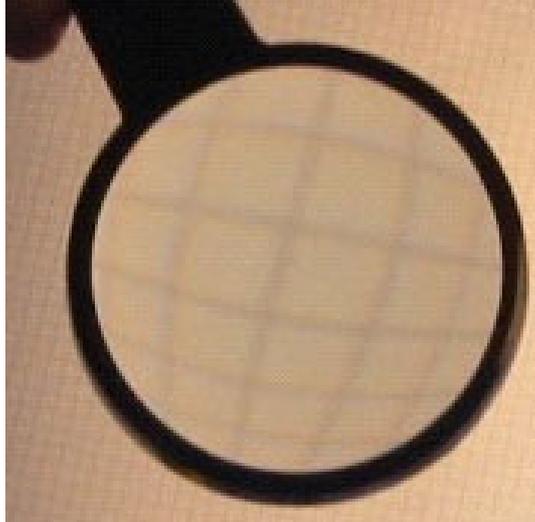
Kissenverzeichnung entsteht, wenn ein Objekt sich innerhalb der Brennweitendistanz befindet (z.B. bei Lupe). Weil die äußeren Regionen der Linse eine kürzere Brennweite als die innen liegenden haben, vergrößern die äußeren Teile das Bild stärker als die inneren Bereiche. Betrachtet man nun ein kariertes Blatt innerhalb der Brennweite einer Linse, ergibt sich folgendes Bild:



4.3.2 Tonnenverzeichnung

Tonnenverzeichnung entsteht in den Fällen, bei denen die Distanz Objekt-Linse größer ist als die Brennweite. Auch hier besitzen die äußeren Regionen einen kürzeren Fokus als die mittlere Zone. Nur bedingen hier die unterschiedlichen Brennweiten, dass am Rand eine relative Verkleinerung des Bildes entsteht.

Folgendes Foto zeigt den Blick durch eine Linse auf ein Papier außerhalb der Brennweite:



4.4 Beugung

Durch die Welleneigenschaft des Lichtes entsteht Beugung an der Fernrohröffnung, beziehungsweise auch am Fangspiegel und seiner Halterung. Dies verhindert die Bündelung des Lichtes in einem ausdehnungslosen Punkt. Das durch Beugung veränderte Beobachtungsbild eines Lichtpunktes wird als „Beugungsscheibchen“ bezeichnet. Solange die durch andere Abbildungsfehler verursachte Streuung größer ist als das Beugungsscheibchen, hat sie nur geringe, akzeptable Auswirkungen auf das Bild.

4.5 Foucault-Test des Hohlspiegels

Léon Foucault hat im Jahr 1859 einen einfachen Test zur Beurteilung der Genauigkeit einer Hohlspiegeloberfläche vorgeschlagen.

Seine Idee war, eine Punktlichtquelle in den Krümmungsmittelpunkt (zweifache Brennweite) des Spiegels zu bringen. Ist die Spiegeloberfläche perfekt sphärisch hergestellt, wird durch die Krümmung des Spiegels diese Lichtquelle komplett auf sich abgebildet. Alle von der Lichtquelle auf den Spiegel treffenden Strahlen

werden in sich selbst reflektiert. Beobachten lässt sich das nur sehr schwer, da das Auge und die Punktlichtquelle nicht gemeinsam im Krümmungsmittelpunkt positioniert werden können. Die Beobachtung gelingt allerdings, wenn das Licht ein wenig zur Seite verschoben wird. Das Bild der Lichtquelle wandert dann auf die entgegengesetzte Seite und man kann hier die Lichtstrahlen mit dem Auge betrachten. Der Spiegel erscheint von dort aus flächendeckend gleichmäßig beleuchtet, etwa wie der Vollmond.

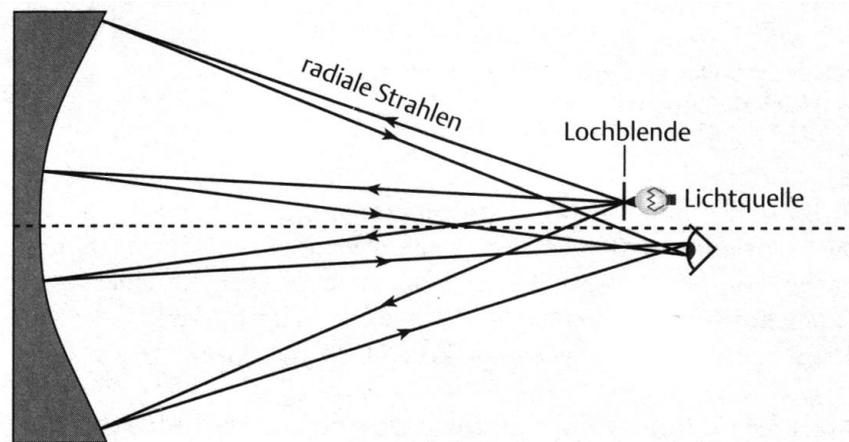


Bild aus Trittelvitz S.92

Falls der Spiegel nicht exakt sphärisch ist, entsteht an den entsprechenden Stellen eine Ablenkung und das Bild erscheint nicht mehr gleichmäßig beleuchtet, sondern zeigt hellere und dunklere Flecken.

Welche dieser Stellen jetzt zu hügel- oder muldenförmigen Abweichungen von der idealen Kugelform gehören, lässt sich daraus so ohne weiteres nicht bestimmen. Foucault führte von der Seite eine scharfe Kante (Messerschneide) in den vom Spiegel kommenden Strahlengang. Aus der Reihenfolge wie die Bereiche des Spiegels nun abgedunkelt werden, gelingt aber die Entscheidung. Bewegt man zwischen dem Bildpunkt und dem Spiegel die Messerschneide in den Strahlengang, so verdunkelt sich der Spiegel von derselben Seite, von der die Messerschneide eintritt. Wird die Bewegung der Messerschneide zwischen dem Kreuzungspunkt der Lichtstrahlen und dem betrachtenden Auge geführt, verdunkelt sich der Spiegel entgegen der Bewegung der Kante, da sich die Lichtstrahlen zuvor gekreuzt haben. Trifft man genau den Kreuzungspunkt mit

der Messerschneide, so geschieht die Verdunkelung schlagartig und man kann nicht entscheiden, ob es von rechts oder links erfolgt ist.

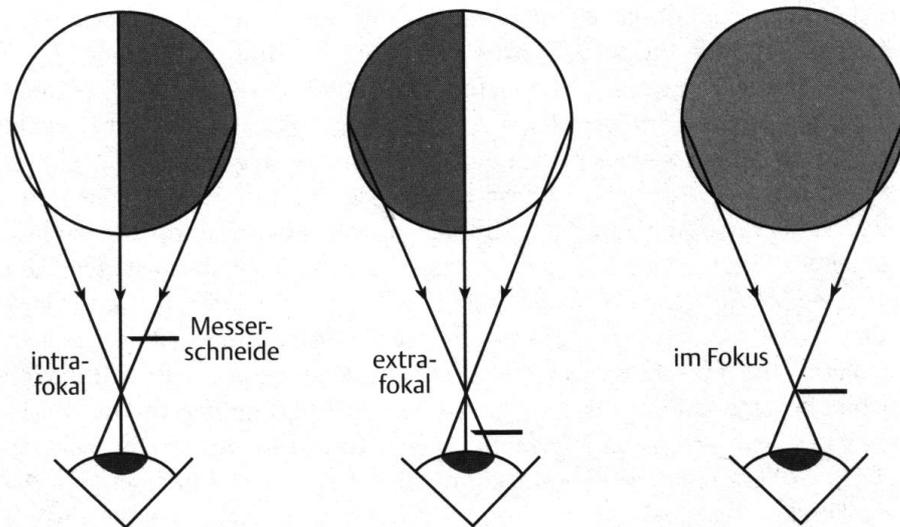


Bild aus Trittelvitz S.68

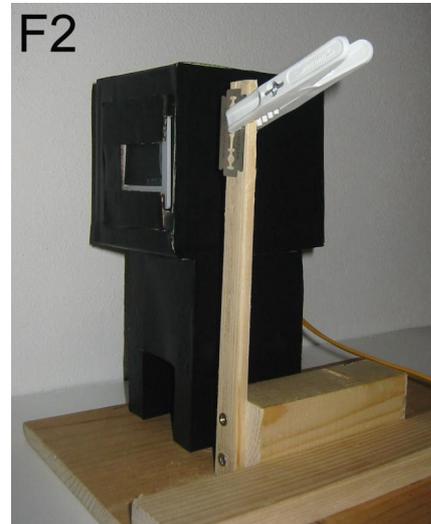
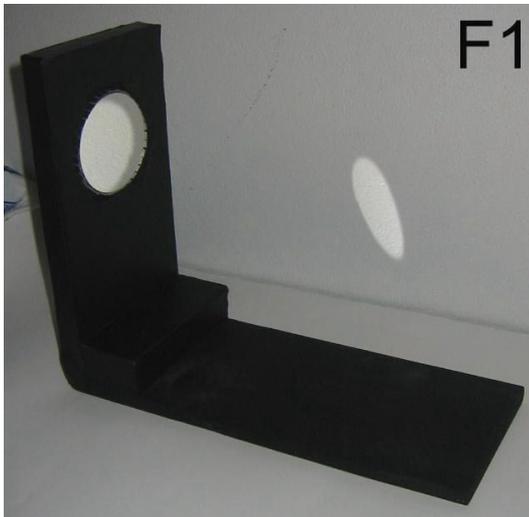
Ist die Oberfläche des Spiegels nicht ideal sphärisch, so sind helle Zonen im Schattenbereich bzw. dunkle Zonen im Lichtbereich des Spiegels zu sehen. Für diese Zonen auf dem Spiegel ist die lokale Neigung der reflektierenden Fläche offenbar abweichend von der Hauptkrümmung des Spiegels. Alle Regionen auf dem Spiegel deren Krümmungsmittelpunkt noch weiter entfernt sind, als der in dem sich die Messerschneide gerade befindet, werden so in Bewegungsrichtung abgedunkelt. Die Zonen dagegen, deren Krümmungsmittelpunkte noch vor der Messerschneide liegen, werden von der gegenüberliegenden Seite abgedunkelt. Nimmt man noch als Hilfsmittel die Richtung der Lichtquelle hinzu, so fällt es nicht besonders schwer, die fehlerhaften Bereiche als von der Lichtquelle seitlich beschienene, erhabene oder vertiefte Gebilde zu interpretieren. Man kann bei der Betrachtung der Spiegeloberfläche die Effekte von Licht und Schattenspielen auf dem Mond anwenden. Ist die Lichtquelle beispielsweise rechts und die Messerkante wird von links in den Strahlengang geschoben, so sind die auf dem Spiegel sichtbaren Zonen denselben „Lichtverhältnissen“ ausgesetzt wie die Berge oder Krater bei zunehmendem Mond (für Bewohner der nördlichen Erdhalbkugel bescheint die Sonne den Mond von rechts). Erhabene Regionen

sind rechts beleuchtet und links dunkel, vertiefte umgekehrt. Die winzigste Abweichung von der Kugelform wird bei dieser Methode gewaltig übertrieben dargestellt. Trittelvitz (siehe Literaturverzeichnis) gibt in seinem Buch auf Seite 73 die Genauigkeit der Oberflächenbestimmung dieser Methode mit 10^{-5} mm an, was ca. $\frac{1}{60}$ der Wellenlänge des sichtbaren Lichts entspricht. Man sieht, diese Methode ist sehr genau.

Mit dieser Schattenprobe kann unter anderem auch ein Parabolspiegel bewertet werden. Dazu möchte ich auf ebendieses Buch von Trittelvitz verweisen (S.98ff).

5. Beobachtungen und Messungen

5.1 Foucault-Test Bilder



Zur Durchführung dieses Tests habe ich eine Halterung für den Hauptspiegel (F1), eine Lichtquelle und einen Ständer für eine Messerschneide (Rasierklinge) gebaut (F2).

Um das Licht des Birnchens (7V, 0,3A) abzuschirmen, wurde es in eine schwarze Kartonschachtel eingesetzt. Ein Steckernetzgerät - mit 3 bis 12 Volt Abgabespannung und 0,5 Ampere maximaler Stromstärke - dient als Stromquelle. Mit dem Spannungsschalter am Netzgerät kann man gut die Helligkeit des Birnchens regeln (max. 7,5V). Vor die Austrittsöffnung der Schachtel ist aus Pappe eine Halterung zur Aufnahme eines Diarähmchens geklebt. In dem Diarahmen befindet sich ein schwarzer Karton, in dessen Mitte mit einer Nadel ein kleines Loch (ca. 0,3 mm) gestochen wurde.

Als Spiegelhalterung benütze ich eine Holzkonstruktion aus zwei rechtwinklig zusammen geschraubten Brettchen. Von diesen besitzt eines eine sechseckige Aussparung zur Aufnahme des Hauptspiegels.

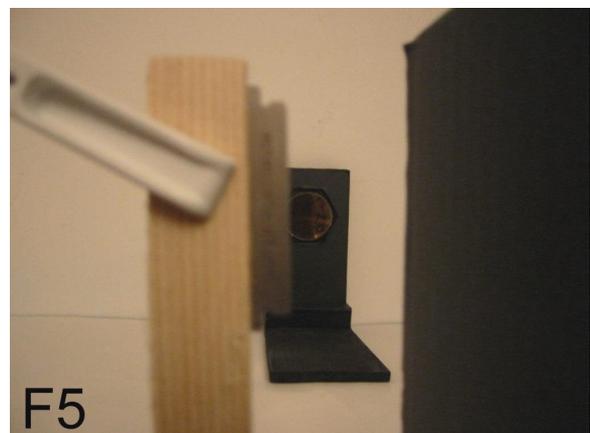
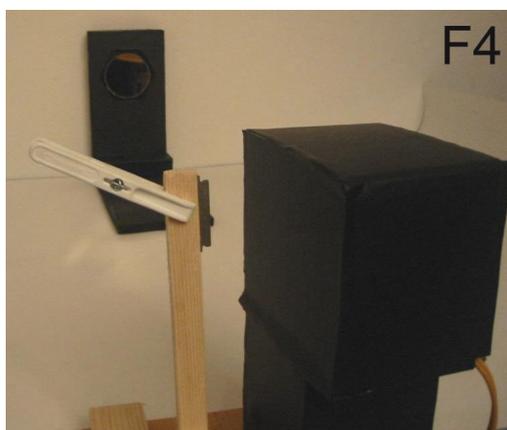
Die Rolle der Messerschneide übernimmt eine Rasierklinge, die mit Hilfe einer Wäscheklammer an einem kleinen Holzstäbchen mit Fuß befestigt ist.

Der Ablauf des Tests geschieht folgendermaßen:



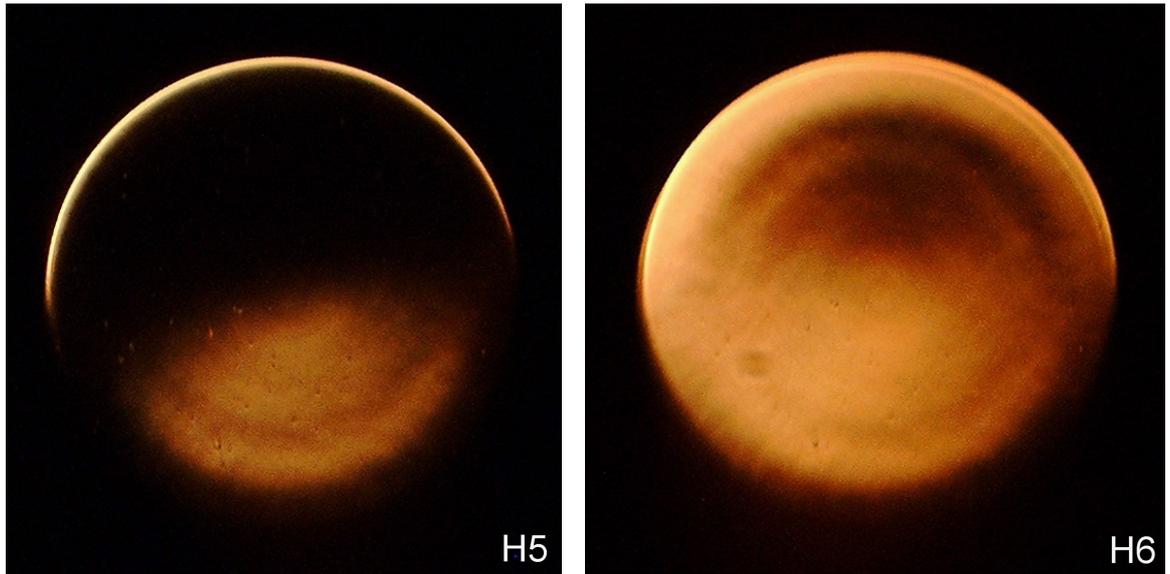
Im abgedunkelten Zimmer wird der Spiegel in seine Halterung gesetzt und in ca. 90 cm Entfernung (doppelte Brennweite) gegenüber der eingeschalteten Lichtquelle positioniert (F3). Mit einem weißen Blatt Papier fahndet man nach dem Reflex des Lichtpunktes in der Umgebung der schwarzen Schachtel. Durch Verschieben der Lichtquelle und der Spiegelhalterung wird der Lichtpunkt seitlich parallel an der Lampe vorbei projiziert, sodass die Entfernung zwischen Diarähmchen und Reflex seitwärts ungefähr fünf bis zehn Zentimeter beträgt. Nun sucht man hinter der Lichtquelle mit dem Auge den Reflex im Spiegel. Dieser Lichtpunkt wird größer, je näher man seinem Abbild kommt. Der Spiegel erscheint dann dem Betrachter als voll beleuchtete Fläche - gegebenenfalls mit Struktur.

Die Rasierklinge schiebt man von der Seite in den Strahlengang, um diese Struktur besser zu deuten (F4, F5).



Mit einer Digitalkamera fotografierte ich folgende Foucault-Bilder vom Spiegel des Pappteleskops. Die Justierung auf den Lichtpunkt muss sehr feinfühlig geschehen und ein scharfes Bild gelingt nur mit großer Geduld, da bereits der Druck auf den Auslöser der Kamera genügt, die gefundene Ausrichtung zu zerstören. Mit steigender Anzahl der Versuche, erreichte die Qualität der Bilder endlich das gewünschte Ergebnis.

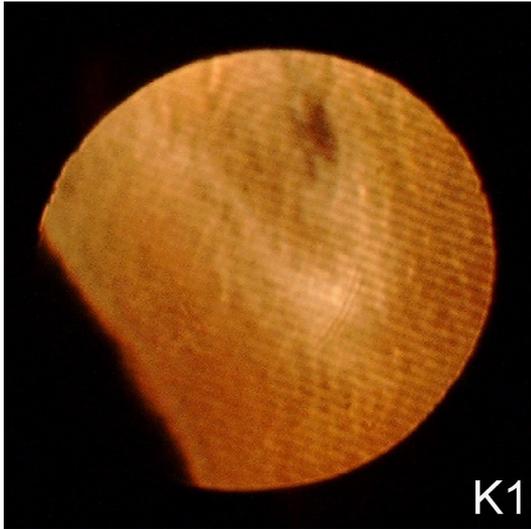




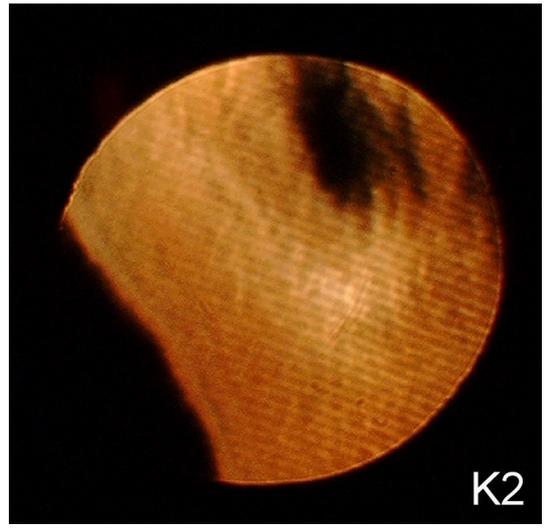
Die Bilder entsprechen verschiedenen Beleuchtungssituationen. Man sieht sowohl großflächig konzentrische Ringstrukturen, als auch kleine Granulatur. Diese kleineren Punkte entstehen durch Staub und Schmutz auf der Oberfläche des Spiegels. Die Ringe stammen von einer nicht ideal ausgebildeten Kugelform der reflektierenden Fläche. Man erkennt auf den Fotos (H1 bis H6) einen Randwall mit hinterlagertem Graben, sowie in der Mitte eine Vertiefung als Abweichung von der Kugelsphäre. Nach Meinung von Sternenfreunden der Volkssternwarte München ist dieser Spiegel jedoch für ein kleines Teleskop vollkommen ausreichend, denn mit dem Foucault-Test werden selbst geringste Abweichungen aufgezeigt.

Der rotationssymmetrische Aufbau zum Zentrum der Bilder lässt keinen Astigmatismus erkennen.

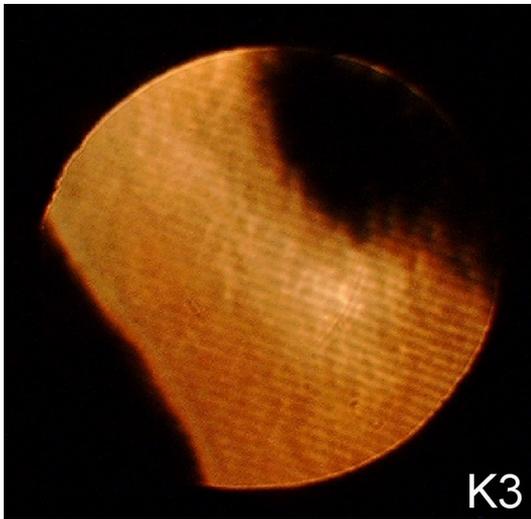
Zur Verdeutlichung der Empfindlichkeit dieser Methode, testete ich noch einen ähnlich gearteten Kosmetikspiegel, welcher im Gegensatz zum Teleskopspiegel als Hinterflächenspiegel ausgebildet ist. Das bedeutet, dass die spiegelnde Fläche auf der Glasrückseite aufgebracht wurde. Bei optischen Spiegeln wird zur Vermeidung von zusätzlichen Reflexen die Vorderseite des Glaskörpers beschichtet. Diese Fläche ist dann sehr empfindlich bezüglich Beschädigung und Verschmutzung.



K1



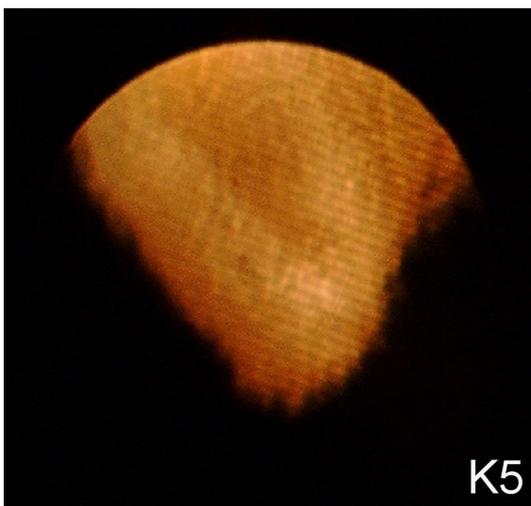
K2



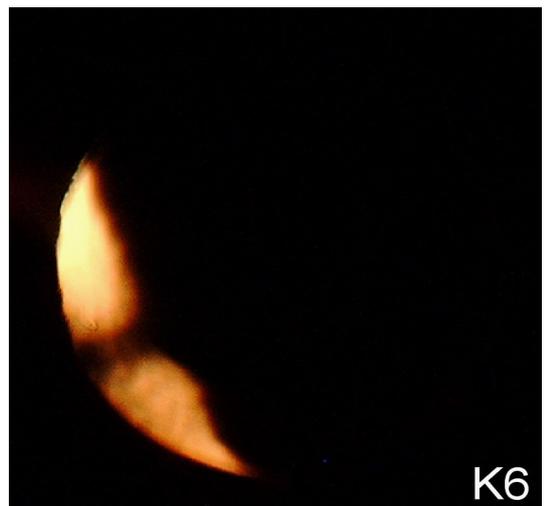
K3



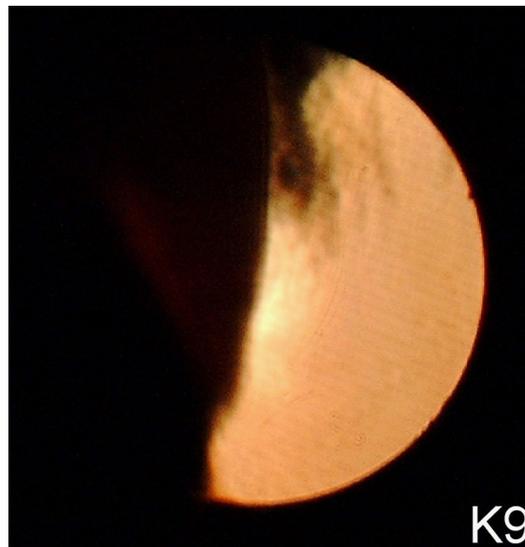
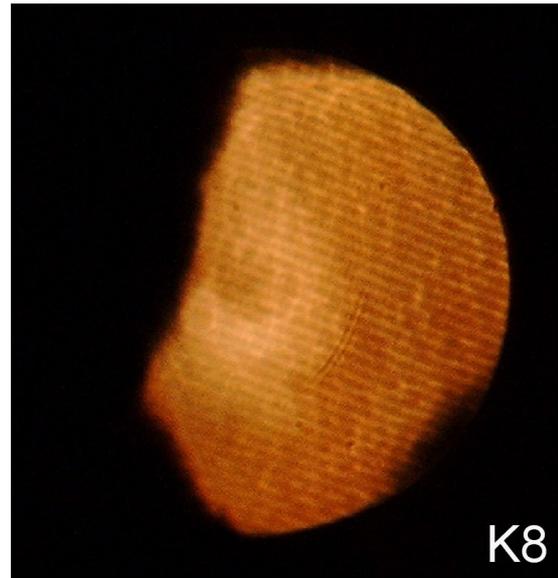
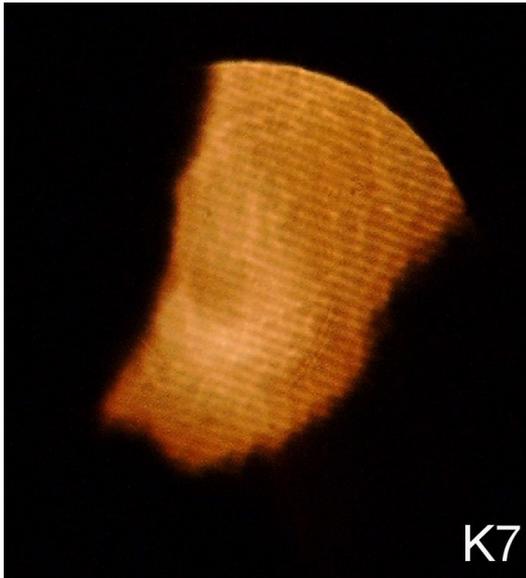
K4



K5



K6



K1 bis K6 sind ohne Verwendung der Rasierklinge, lediglich aus verschiedenen Distanzen zum „Fokuspunkt“ aufgenommen. Die schwarzen Flecken in den Bildern stellen Bereiche dar, in denen die lokale Neigung des Spiegels, die Lichtreflexe außerhalb des Kameraobjektivs schiebt. Von K1 bis K4 nimmt die Fokusdistanz zu. Man kann erkennen, dass der Spiegel hat im NO und SW massive Probleme hat, die korrekte Kugelfläche einzuhalten. K5 zeigt die kurzbrennweitige Zone im NO als „Negativ“ von K4, während K6 die langbrennweitige Ecke im SW darstellt.

Unter Verwendung der Rasierklinge im Strahlengang sind die Bilder K7 bis K9 entstanden. Sie wurde von links zunächst bis ungefähr 1/3 (K7, K8) in den

Strahlengang geschoben, bei K9 war die Hälfte abgedeckt. Man sieht, der linke Rand der beleuchteten Fläche ist keineswegs vertikal, wie die eingebrachte Kante, sondern zeigt einen Verlauf von links unten nach rechts oben. In dieser Richtung verändert sich offenbar auch die Krümmung des Spiegels von langer zu kurzer Brennweite (Spiegel ist in dieser Richtung extrem astigmatisch).

In den Bildern ist eine Sekundärstruktur in den hellen Bereichen zu erkennen. So laufen ideal parallele Linien von links oben nach rechts unten mit cirka 30 Grad Neigung zur Horizontalen. Interferenz schließe ich aus, da erstens keine der beteiligten Größen des Spiegels in der Nähe der Wellenlänge des Lichts ist und andererseits so regelmäßige Strukturen kaum in diesem Gleichmaß herstellbar wären. Die Musterung könnte durch die Fertigung des Kosmetikspiegels entstanden sein.

Solch ein Spiegel eignet sich kaum für optische Experimente. Seine Produktion aus Pressglas bedingt Kompromisse, die für eine optisch einwandfreie Abbildungsleistung nicht akzeptabel sind.

5.2 Bestimmung der Brennweite

Zur Ermittlung der Brennweite meines Hauptspiegels (Pappteleoskop), führte ich ein paar Messungen durch. Die Lichtquelle vom Foucault-Test benützte ich, um damit über den Spiegel einen scharfen Lichtpunkt auf einem Papier zu erzeugen. Ich wählte mir zehn unterschiedliche Strecken g zwischen der Lichtquelle und dem Spiegel. Daraufhin suchte ich mit dem Blatt diejenige Stelle, an der der Lichtpunkt wieder scharf abgebildet wurde. Diese Strecke b maß ich ebenso wie g . Mit beiden Werten kann aus der folgenden Gleichung die Brennweite f berechnet werden.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

bzw. durch Umformung:

$$f = \frac{g \cdot b}{g + b}$$

Durch die zehn verschiedenen Messungen kommt folgende Tabelle zustande:

Bestimmung der Brennweite			
	gemessen		berechnet
Messung	g [cm]	b [cm]	f [cm]
1	81,5	97,8	44,45
2	124,1	69,8	44,67
3	108,7	76,2	44,80
4	67,1	130,1	44,27
5	53,2	278,3	44,66
6	66,6	135,1	44,61
7	76,2	108,8	44,81
8	73,1	115,6	44,78
9	83,2	96,3	44,64
10	90,5	90,2	45,17
		Mittelwert	44,69

Aus den sich ergebenden Brennweiten ermittelte ich dann den Durchschnitt. Dieser kommt der Herstellerangabe von 45 cm sehr nahe.

5.3 Verschwinden des Fangspiegels

Wenn man ohne Linsen durch den Okularauszug in den Tubus blickt, dann sieht man den Fangspiegel. Betrachtet man jedoch ein Objekt durch ein Okular, verschwindet der Sekundärspiegel. Beim Scharfstellen auf einen Gegenstand befindet sich der Umlenkspiegel weit außerhalb der Brennweite des Okulars und wird daher unscharf über das ganze Bild verteilt.

5.4 Eigene Beobachtung mit dem Pappteleskop

07.5.03, Merkurtransit:

Der Merkurtransit zählt auch zu den „Sonnenfinsternissen“. Hierbei überholt der Merkur auf der innersten Bahn unseren Planeten. Von der Erde gesehen, wandert er dabei manchmal als dunkler Fleck über die Sonne. Aufgrund seiner geringen Größe im Vergleich zu jener, kann er nur sehr schwer von einem Sonnenfleck unterschieden werden.

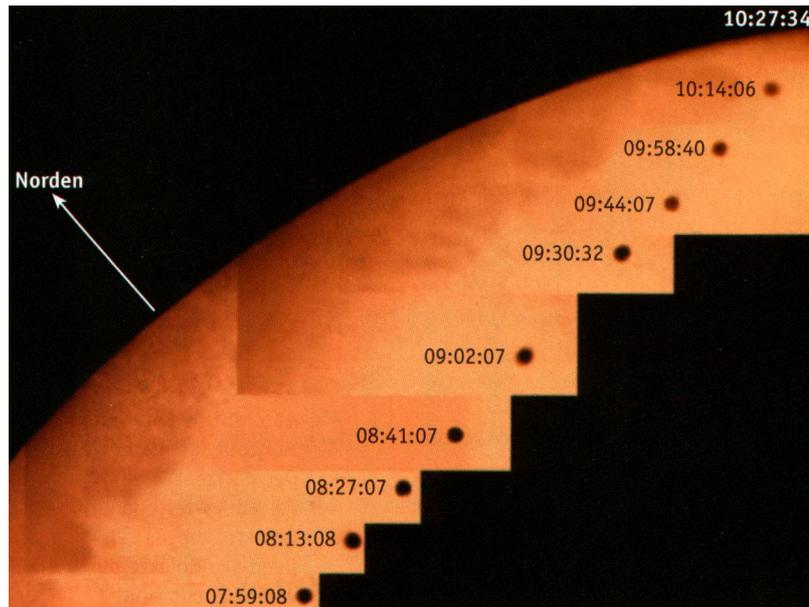


Bild aus Sterne und Weltraum 8/03 S.57

Bei Sonnenaufgang befand sich der Merkur schon seit einer Stunde vor der Sonnenscheibe und verließ sie erst wieder mittags, wie es im Bild dargestellt ist. Diesen Vorgang beobachtete ich in der Schule während den beiden Pausen (Uhrzeitangaben im Bild sind in GMT), wobei der Merkur am Rande der Sichtbarkeitsgrenze des Pappteleskops war. Im Laufe der sechsten Unterrichtsstunde (Physik) konnten wir nur noch die Sonnenflecken betrachten, da der Planet die Sonnenscheibe bereits verlassen hatte.

16.5.03, Mondfinsternis:

Während der totalen Mondfinsternis tritt der Mond zuerst in den Halbschatten und später in den Kernschatten der Erde ein. Die folgenden Bilder zeigen diesen Vorgang mit den jeweiligen Zonen von Halb- und Kernschatten und den dazugehörigen Zeiten.

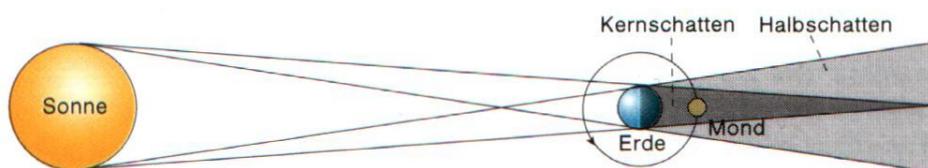


Bild aus Das Wissen unserer Zeit S.11

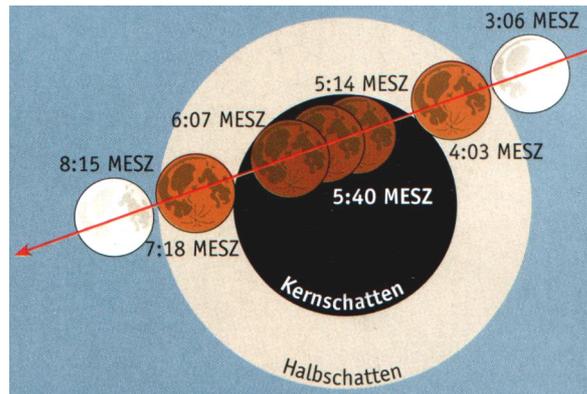


Bild aus Sterne und Weltraum 5/03 S.47

Beim Aufenthalt im Halbschatten bekommt der Mond eine leicht bräunliche Färbung. In der totalen Phase geht diese in eine kupferrote Farbe über. Diese Mondfinsternis war leider nicht in vollkommener Länge zu beobachten, da ihr Ende mit dem Monduntergang und damit auch dem Sonnenaufgang zusammen fiel.



Bild aus Internet (siehe Literaturverzeichnis)

31.5.03, Sonnenfinsternis:

Im Verlauf dieser partiellen Sonnenfinsternis schob sich der Mond vor die Sonne und bedeckte sie innerhalb von zwei Stunden bis zu 85%.

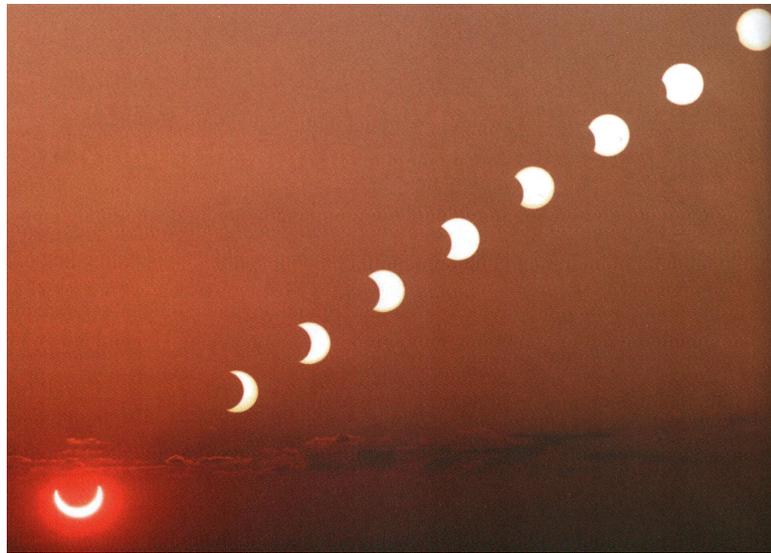


Bild aus Sterne und Weltraum 8/03 S.64

Da das Schauspiel schon vor Sonnenaufgang begann, kam die Sonne schon mit ihrem größten Bedeckungsgrad hinter dem Horizont hervor. Auf Grönland, Island und Schottland war die Sonnenfinsternis nur ringförmig zu sehen.

Um dieses Ereignis gut verfolgen zu können und eine bessere Sicht zum Horizont zu haben, ging ich in den Stadtpark, wo sich schon viele Menschen versammelt hatten. Trotz erhöhtem Standpunkt auf einem Hügel war die Sicht jedoch nicht ganz ungehindert, weil anfangs auch dort Bäume die Sonne verdeckten. Während des Fortganges der Finsternis konnten auf der Sonnenscheibe deutlich drei Sonnenflecken erkannt werden.

Als ich ihn durch mein Teleskop betrachtete, war er deutlich heller als sonst. Die Vergrößerung des Teleskops erlaubte es aber nicht, den Planet als leuchtende Scheibe darzustellen.

09.11.03, Mondfinsternis:



Bilder aus Sterne und Weltraum 2/04 S. 66/67

Zum zweiten Mal im Jahr trat der Mond in den Erdkernschatten ein und bot wieder, nun aber in gänzlicher Länge, eine totale Mondfinsternis. Deshalb konnte man auch sehr gut die rötliche Farbe des Mondes im Kernschatten und seine darauf folgende „Rückverwandlung“ begutachten.

Während der totalen Phase fiel mir auf, dass die Oberflächenstrukturen des Mondes deutlicher als sonst erkennbar waren. Durch das abgedunkelte Licht kamen die Kontraste besser zum Vorschein.

5.5 Erfahrungen mit den Teleskopen

Das Pappteleskop lässt sich mit sehr viel geringerem Aufwand herstellen als das Metallteleskop. Jedoch habe ich mit der Pappe eher schlechte Erfahrungen gemacht, da sie sich durch Feuchtigkeit sehr leicht verzieht, trotz Besprühen mit wasserabweisender Farbe. Ein weiteres Problem ist die Justierung der optischen Elemente, die durch Haftreibung funktioniert. So kann die Feineinstellung nur

durch ruckweises Verschieben erfolgen. Eine präzise Fokussierung wird dabei kaum erreicht.

Als ich dann zum ersten Mal durch das Pappteleoskop blickte, irritierte mich zuerst die spiegelverkehrte Darstellung. Im Laufe der Zeit gewöhnte ich mich daran und gewann die Überzeugung, dass damit das Prinzip eines Newton-Teleskops einfach erklärt werden kann.

Das Metallteleskop stellte eine ganz andere Herausforderung dar. Da war zunächst einmal die Auseinandersetzung mit dem Material Aluminium. Der Werkstoff bearbeitet sich ähnlich wie Hartholz - aber logischerweise mit Geräten für Metall. So kann das Sägen, Feilen, Schleifen und Bohren ohne Zusatzmittel (Öl oder ähnliches) bewältigt werden, solange die Wandstärke der zu bearbeitenden Teile ca. 5 mm nicht überschreitet und man etwas vorsichtig arbeitet.

Von einer Erfahrung sei hier berichtet: Gewinde M3 kann in Aluminium gefertigt werden, indem man mit 2,5 mm vorbohrt und dann mit Eisenschrauben M3 versucht in diesem Loch ein Gewinde zu schneiden. Der Unterschied in der Härte der Materialien (Alu zu Eisen) reicht offensichtlich, das Gewünschte zu erreichen (die Schraube ist in ihrem Gewinde-Ansatz danach allerdings nicht mehr zu gebrauchen).

Aluminium bietet einige Vorteile: Mit ungefähr einem Drittel des Gewichtes von Stahl erzielt es bereits die Hälfte der Festigkeit desselben. Es ist beständig gegen Feuchtigkeit und besitzt eine gute Wärmeleitfähigkeit um lokale Temperaturdifferenzen auszugleichen (Teleskop kommt aus der Wohnung oder dem Auto in die Kälte der Nacht).

Als Nachteil des Materials erwies sich sein Widerstand Klebeverbindungen einzugehen. So sollte die Schelle um die Hauptspiegelhalterung geklebt werden. Sie hatte herstellungsbedingt eine gewisse Eigenspannung und trotz Verwendung von kleinen Schraubzwingen, wollte der benützte Zweikomponentenkleber nicht halten. So riss die Klebung - auch nach mehreren Versuchen mit verschiedenen Aushärtezeiten - immer wieder, sobald die Zwingen abgenommen wurden. Die

Klebefuge konnte durch einfaches Abziehen vom Metall rückstandslos entfernt werden.

Erst der Einsatz eines sogenannten Montageklebers brachte den Erfolg in der Klebetechnik. Der Mangel dieser Verbindung ist jedoch, dass die Fuge nicht mechanisch fest ist, sondern eine gewisse „gummiartige“ Konsistenz aufweist. Da die Schelle lediglich Streulicht von außen abhalten sollte, konnte dieses Resultat akzeptiert werden.

Der verspätete Entschluss, dieses Teleskop in Metall zu bauen, war ein weiteres Manko. So sind zum Ende aus Zeitgründen Kompromisse entstanden, die sonst sicher anders gelöst worden wären.

Daher ist das Metallteleskop ein Objekt zukünftiger Entwicklungen. So fehlt zum Beispiel auch eine Befestigungsmöglichkeit für den Tubus. Gegenwärtig kann man deshalb nur aus der Hand beobachten.

Erste Versuche mit terrestrischen Zielen brachten für die Spiegelhalterungen die erwartete Verbesserung in der Verstellmöglichkeit. Jedoch ist der Einbau der Fangspiegelhalterung ziemlich umständlich. Der Schlitz im Tubus, durch den sie geführt wird, sollte bis zum vorderen Ende des Teleskops verlängert werden. Dann setzt man den Umlenkspiegel - fertig in seiner Halterung montiert - von außen ein.

Die Okularhalterung hat den Nachteil, dass im Moment nur mit Linsen der Brennweite 49 mm und 30 mm gearbeitet werden kann. Das 15 mm Okular lässt sich mit seiner Diafilmdosen-Halterung für ein scharfes Bild nicht im zugehörigen Stutzen feststecken. Es müsste weiter hineingeschoben werden, als zur Zeit machbar. Auch scheitert der Versuch es mit der Linsenseite voran in die Holzröhre zu setzen, da ein optimales Bild dabei schon außerhalb des Okularstutzens erreicht wird. Ein Umbau oder ein Zusatz zu der bisherigen Konstruktion wird hier Abhilfe schaffen, damit auch bei der besten Vergrößerung Beobachtungen gelingen.

Die verwendeten Acrylglaslinsen der Okulare bilden augenscheinlich den Engpass in der optischen Qualität der Bilder. Ihre Herstellung durch Formguss bedingt zusammen mit den Fehlern einer einzelnen Linse (sphärische und chromatische Aberration) die mangelnde optische Güte. Deutliche

Verbesserungen dieses Teleskops werden sich nur bei den Okularen erreichen lassen.

Ich versuchte mit dem Metallteleskop erste Fotos zu erstellen, die jedoch ziemlich unscharf und verwackelt waren. Zum einen besitze ich noch keine geeignete Halterung für die Kamera und zum anderen ist es relativ schwierig das Teleskop (ohne Standfuß) für den Fotoapparat ausreichend scharf zu stellen.

Bei nächster Gelegenheit freue ich mich schon, damit neue Erfahrungen zu sammeln und sie gegebenenfalls auch mit Fotografie zu dokumentieren. Astronomische Beobachtungen mit dem Metallteleskop sind aufgrund der momentan ungünstigen Wetterlage (Jan 2004) nur schlecht durchführbar, werden aber über diese Arbeit hinaus sicher angestellt.

Quellen/ Literatur/ Hilfsmittel

Bücher:

Trittelvitz M., Spiegelfernrohre – selbst gebaut, Heidelberg Berlin, Spektrum Akademischer Verlag, 2001, 1. korrigierter Nachdruck 2002

Barth F., Mühlbauer P., Dr. Nikol F. und Wörle K., Mathematische Formeln und Definitionen, München, J. Lindauer Verlag (Schaefer), 1998, 7. überarbeitete Auflage

Hammer K., Hammer H., Physikalische Formeln und Tabellen, München, J. Lindauer Verlag (Schaefer), 2001, 7. Auflage

Kleiber J., Lehrbuch der Physik, München und Berlin, Verlag R. Oldenburg, 1933, 14. Auflage

Gerthsen, Kneser, Vogel, Physik, Berlin Heidelberg New York Tokyo, Springer Verlag, 1986, 15. Auflage

Unsöld A., Der neue Kosmos, Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag, 1974, 2. Auflage

Bertelsmann Redaktion, Das Wissen unserer Zeit, o.O., Bertelsmann Lexikon Verlag GmbH, 1998

Computerprogramme:

Autosketch V2.1 von Autodesk, 1996

NEWT V2.5, von D. A. Keller, 1997 (Shareware)

Zeitschriften:

Kafalis S., Ein selbst gebautes 24-Zoll->>Minimalist-Dobson<<-
Teleskop, in: Sterne und Weltraum, 2003, Nr.1, S.74-79

Mattig W. und Soltau D., Merkur vor der Sonne, in: Sterne und
Weltraum, 2003, Nr.4, S.66-68

Hoepe G. und Althaus T., Merkurtransit vom 7.Mai 2003, in Sterne
und Weltraum, 2003, Nr. 8. S.57

Neckel T. und Hoepe G., Totale Mondfinsternis am 16. Mai 2003, in:
Sterne und Weltraum, 2003, Nr.5, S.47

Neckel T. und Hoepe G., Die ringförmige Sonnenfinsternis am 31.
Mai 2003, in: Sterne und Weltraum, 2003, Nr.3, S.55

Rieth U. und Gabel A., Dunkle Sonne über Europa, in Sterne und
Weltraum, 2003, Nr.8, S.64

Althaus T. und Neumann M., Der Rote Planet trumps auf! , in: Sterne
und Weltraum, 2003, Nr.6, S.60-67

Redaktion Sterne und Weltraum, Mondfinsternis am 9. November
2003, in: Sterne und Weltraum, 2004, Nr.2, S.66 und 67

Hilfsmittel:

Bausatz (2mal): Newton-Spiegelteleskop von Astro-Media mit
Spiegeln von BAADER Planetarium, 2002

Aluminium-Teile: Blech und Rohr kostenlos überlassen von Firma
Linde, Höllriegelskreuth

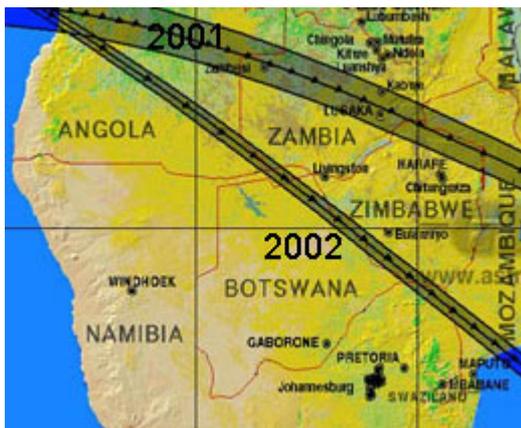
Internet:

<http://eclipse.astronomie.info/2003/index.html> (Aufruf: 14.01.04)

Kommende Finsternisse bis Ende 2003

Nach der zweiten afrikanischen totalen Sonnenfinsternis von diesem Dezember erleben wir ungewöhnlich finsternisreiche Monate in Europa. Von der Sonnenfinsternis in Afrika und Australien am 4. Dezember 2002 ist von Europa aus nichts zu sehen. Im Jahre 2003 erleben wir dann allerdings einiges an kosmischen Schattenspielen: Am 7. Mai läuft Merkur vor der Sonnenscheibe durch, am 16. Mai gibt es eine totale Mondfinsternis, am 31. Mai eine ringförmige Sonnenfinsternis und am 9. November 2003 schliesslich gleich nochmals eine totale Mondfinsternis.

4. Dezember 2002, totale Sonnenfinsternis im südlichen Afrika und Australien



Verlauf der totalen Sonnenfinsternis vom 4. Dezember 2002 über das südliche Afrika. Am oberen Bildrand ist der Pfad der totalen Finsternis vom Juni 2001 eingezeichnet. Graphik von R. Brodbeck.

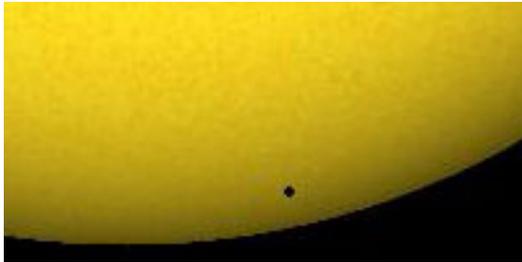
Die noch kurz vor dem Jahreswechsel zum Jahre 2003 stattfindende Finsternis ist die letzte totale Sonnenfinsternis bis 2006, die in mit normalem Aufwand erreichbaren Gebieten stattfindet. Das südliche Afrika erlebt am 4. Dezember bereits die zweite totale Sonnenfinsternis innerhalb 18 Monaten. Allerdings findet diese zweite Finsternis unter bedeutend ungünstigeren Umständen statt als diejenige vom 21. Juni 2001. Der Mond ist etwas weiter von der Erde weg und deshalb ist der Kernschatten des Mondes auf der Erde viel kleiner als im Jahre 2001. Die Dauer der Totalität wird deshalb geringer ausfallen. In Afrika wird

die Sonne nur maximal etwa anderthalb Minuten ganz hinter der Sonne verschwinden. Australien muss sich sogar mit einer halben Minute begnügen. Für Afrika sind auch die Wetteraussichten nicht besonders gut. Im Dezember ist Regenzeit.

Kurz bevor der Kernschatten die Erde wieder verlässt, wird noch die Küste von Australien getroffen. Bei nur noch 8 Grad Höhe (eine Handbreit) über dem Horizont dauert die totale Finsternis nur eine halbe Minute. Wenn keine Wolkenbank die Sonne vorher schluckt, kann auch eine solch kurze totale Sonnenfinsternis ein eindrückliches Erlebnis sein. Dies bestätigen Berichte von Schiffen, die vor der Küste Amerikas die totale Sonnenfinsternis von 1999 beobachteten. Im Nordwestatlantik dauerte damals die Totalität bei geringer Horizonthöhe ebenfalls kaum eine Minute.

Bis zum März 2006 wird dies die letzte totale Sonnenfinsternis sein, die in einigermaßen gut erreichbarem Gebiet stattfindet. Im Jahre 2006 wird die Türkei vom Kernschatten des Mondes überquert.

7. Mai 2003, Merkur vor der Sonnenscheibe



Merkur vor der Sonnenscheibe um 07:30 Uhr Sommerzeit am 7. Mai 2003. Anblick im invertierenden Fernrohr. Simulation von A. Barmettler.

Die beiden innerhalb der Erdbahn kreisenden Planeten Merkur und Venus können als einzige Planeten genau zwischen der Erde und der Sonne stehen. Bei Merkur ist dies alle paar Jahre einmal der Fall. Er zieht dann im für Sonnenbeobachtung ausgerüsteten Fernrohr als kleines dunkles Scheibchen im Laufe von Stunden über die Sonnenscheibe. Für Mitteleuropa wird dies der erste Merkurtransit seit dem 10. November 1973 sein, der in voller Länge beobachtbar ist. Ein gutes Jahr danach, am 8. Juni 2004, wird auch Venus zum ersten Mal seit über hundert Jahren vor der Sonnenscheibe erwartet.

» [Mehr zu diesem Merkurtransit](#) «

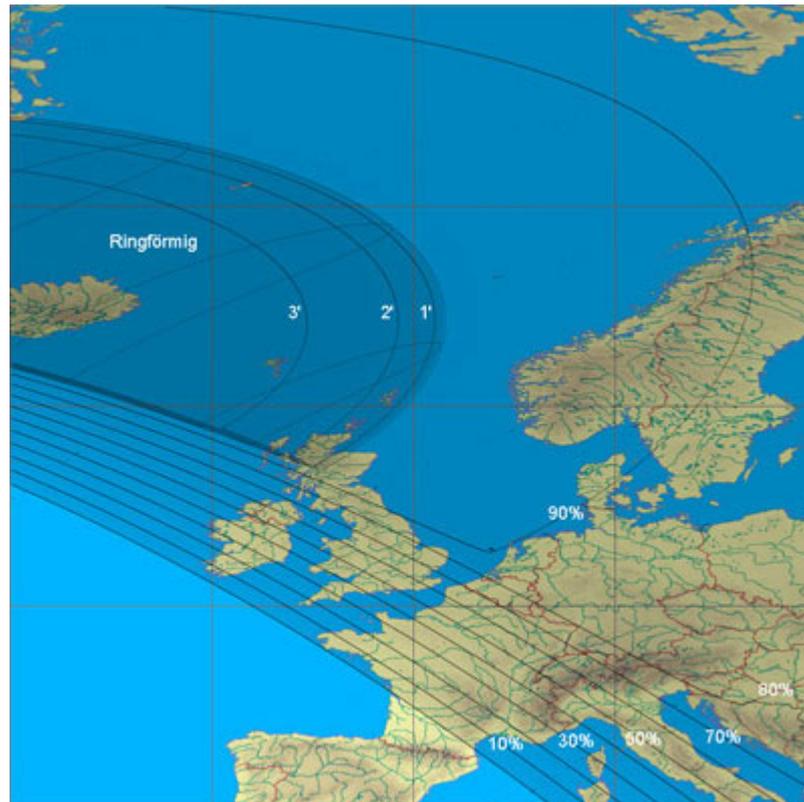
31. Mai 2003, die Sonne geht als Sichel auf



Verlauf der Finsternis für Berlin.

© A. Barmettler, [CalSKY](#)

Am 31. Mai streift die Verbindungslinie Sonne – Mond die Erde bei Island. Der Mond befindet sich jedoch in den erdfernsten Teilen seiner Bahn. Er kann deshalb die Sonne nicht vollständig bedecken. Von Grönland über Island bis an die Küste Schottlands wird man bei sehr tiefem Sonnenstand eine ringförmige Sonnenfinsternis sehen. Am höchsten steht die Sonne an der Ostküste Grönlands. Dort wird die nicht konzentrische ringförmige Finsternis etwa eine Handbreit über dem Horizont zu sehen sein.



Verlauf der ringförmigen Sonnenfinsternis vom 31. Mai 2003 über Westeuropa. Sonnenaufgang für 0 Grad Höhe. Graphik und Berechnungen von R. Brodbeck.

Island wäre touristisch problemlos erreichbar. Dort führt auch die Zentrallinie (der Ort, wo Sonne und Mond genau hintereinander stehen) über festes Land. Die Sonne steht dabei kaum zwei Finger breit über dem Horizont. Bei dem in Island oft nicht unerheblich bewölkten Himmel ist es sehr unwahrscheinlich, die ringförmig verfinsterte Sonne zu sehen. Eine Finsternisreise lohnt unter diesen Umständen wenig.

Der deutsche Sprachraum befindet sich bei Sonnenaufgang sehr tief im Halbschatten des Mondes. Die Sonne geht deshalb als recht dünne Sichel auf, die im Verlauf des Morgens immer dicker wird. Wenn die meisten Leute zur Arbeit gehen, ist die Sonnenfinsternis bereits vorbei sein.

Für Süddeutschland, die Schweiz und Teile Österreichs wird man verschiedene Angaben zur maximalen Bedeckung der Sonne finden, da in diesen Gebieten die maximale Bedeckung (maximale partielle Phase) der Sonne durch den Mond bereits vor Sonnenaufgang stattfindet. Deshalb fallen maximal beobachtbare partielle Finsternis und Sonnenaufgang zusammen. Das Problem liegt darin, dass der Sonnenaufgang nicht immer gleich definiert wird. Bei grossräumigen Finsternisrechnungen wird der Sonnenaufgang gleich einer geometrischen Sonnenhöhe von null Grad gesetzt. Dies ist aber nicht der Beobachtung angepasst. Die Atmosphäre beugt das Licht etwas, so dass wir die Sonne noch sehen können, wenn die geometrische Verbindungslinie Sonne – Beobachter bereits durch festen Boden geht. Der tatsächlich beobachtete Sonnenaufgang findet somit etwas früher und der Untergang etwas später statt. Deshalb wird nach internationaler Übereinkunft der Sonnenaufgang als der Zeitpunkt definiert, zu dem die Sonne geometrisch noch 50 Bogenminuten unter dem Horizont ist.

Für Zürich bedeutet dies beispielsweise, dass die Angaben der maximalen Verfinsterung doch erheblich variieren können. Für viele Teile Deutschlands spielt es jedoch keine Rolle, da die maximale Verfinsterung erst kurz nach Sonnenaufgang erreicht wird, egal wie man rechnet. Die Werte für die maximale Verfinsterung werden beim Vergleich verschiedener Quellen kaum voneinander abweichen.

Die Diskussion ist auch nicht ganz praxisnah. Wer einen hohen Berg Richtung Nordosten vor dem Haus hat, wird die Finsternis verpassen. Andererseits kann man von einnoch weiter unter den Horizont sehen.

	Sonnenaufgang	Maximum	h	Mag	Obsc.	Ende
Zürich	5h33.1m	5h33.1m	-0.8	77.2	69.6	6h20m41.4s
St.Gallen	5h29.6m	5h29.6m	-0.8	89.9	74.0	6h20m21.7s
Bern	5h39.2m	5h39.2m	-0.8	68.3	59.0	6h20m35.3s
Basel	5h36.2m	5h36.2m	-0.8	74.3	66.1	6h21m28.4s
Genf	5h47.2m	5h47.2m	-0.8	55	43.7	6h20m06.8s
Bellinzona	5h35.8m	5h35.8m	-0.8	69.9	60.9	6h18m33.8s
Bregenz	5h27.7m	5h27.7m	-0.8	82.6	76	6h20m17.9s
Innsbruck	5h21.9m	5h21.9m	-0.8	83.8	77.4	6h19m09.0s
Wien	4h58.3m	5h20m22.9s	2.6	82.742	76.195	6h18m38.2s
Stuttgart	5h24.6m	5h24.6m	-0.8	85.6	79.6	6h22m39.3s
Berlin	4h49.7m	5h28m20.0s	4.3	86.9	81.1	6h27m18.1
Frankfurt	5h20.7m	5h27m40.9	0.4	86.9	81.1	6h25m03.6s
Düsseldorf	5h23.0m	5h30m23.8s	0.4	88.3	82.7	6h27m45.4
Hannover	5h06.0m	5h29m59.2	2.4	88.0	82.4	6h28m10.4s
München	5h17.8m	5h23m10.0s	0.2	84.5	78.2	6h20m29.3s
Dresden	4h55.9m	5h25m58.8s	3.4	85.8	79.9	6h24m35.0s
Hamburg	4h57.7m	5h31m43.4s	3.5	88.7	83.2	6h30m20.0s
Sylt	4h56.1m	5h34m38.5s	3.9	89.9	84.6	6h33m20.0s
Reykjavik	3h25.6m	4h04m19.9	1.8	93.9	88.1	5h01m22.0

Tabelle: Verlauf der Finsternis für verschiedene Orte. Mag: Abdeckung des Sonnendurchmessers in Prozent. h = Höhe der Sonne zum Maximum der Finsternis. Obsc = Durch den Mond abgedeckte Fläche der Sonnenscheibe zum Maximum der Finsternis. Berechnungen nach A. Barmettler, calsky.com.

» [Mehr zu dieser Sonnenfinsternis](#) «

23. November 2003, totale Sonnenfinsternis in der Antarktis

Die totale Sonnenfinsternis des Jahres 2003 findet sehr weit südlich statt Der Kernschatten des Mondes überquert den antarktischen Kontinent und südlichsten Teil des Indischen Ozeans. Der Kontinent ist – wenn man nicht Reinhold Messmer ist – nur mit Expeditionen erreichbar. Für reiche Amateurastronomen wäre eine Kreuzfahrt die einzige Möglichkeit, den Pfad der totalen Finsternis zu erreichen. Allerdings ist die See um die Antarktis kein Schönwettergebiet und die Finsternis findet nur höchstens

eine Handbreit über dem Horizont statt.

Mondfinsternisse

Auch für Mondfinsternisse ist das Jahr 2003 ein recht gutes Jahr. Von der ersten totalen Mondfinsternis am Morgen des 16. Mai bekommt man in Europa etwa die Hälfte mit. Während der totalen Phase geht bei uns der Vollmond unter.



Verlauf der Mondfinsternis vom 16. Mai 2003, ca. bis zum Monduntergang in Deutschland.

© A. Barmettler, [CalSKY](http://calsky.com)

Die zweite totale Mondfinsternis am 9. November kann in voller Länge beobachtet werden; allerdings ebenfalls in der zweiten Nachthälfte. Das besondere an der zweiten Mondfinsternis ist, dass sie nur ganz knapp total ist.



Verlauf der Mondfinsternis vom 9. November 2003.

© A. Barmettler, [CalSKY](http://calsky.com)

Alle Ereignisse, die von Europa aus beobachtbar sind, finden nicht gerade „zur Hauptsendezeit“ statt. Für Naturbeobachter, die sich nicht scheuen, die Unannehmlichkeit der zweiten Nachthälfte oder des sehr frühen Morgens in Kauf zu nehmen, wird die Natur reizvolle Schattenspiele bereit halten.

	16. Mai	09. Nov
1. Kontakt	4h02m48s	0h32m29s
2. Kontakt	5h13m45s	2h06m16s
Mitte	5h40m07s	2h18m31s
3. Kontakt	6h06m28s	2h30m45s
4. Kontakt	7h17m25s	4h04m32s

Tabelle: Verlauf der Finsternis für verschiedene Orte. 1. Kontakt: Der Mond berührt den Kernschatten der Erde von aussen.
 2. Kontakt: Der Mond befindet sich ganz im Kernschatten der Erde. Die totale Mondfinsternis beginnt.
 3. Kontakt: Der Mond beginnt den Kernschatten der Erde zu verlassen. Die totale Mondfinsternis endet.
 4. Kontakt: Der Mond ist vollständig aus dem Kernschatten der Erde ausgetreten.
 Berechnungen nach A. Barmettler, calsky.com.

Weitere Informationen

- [Ringförmige Sonnenfinsternis in Island/Grönland, partielle Phase sichtbar in Europa](#)
- [Sonnenfinsternistabellen](#)
- [Interaktive Karten](#)
- [Totale Sonnenfinsternisse im südlichen Afrika](#)
- [Seiten zu Merkur- und Venustransit](#)

CalSKY ist ebenfalls eine Dienstleistung von *astro!info*.

- [Mondfinsternis-Rechner von CalSKY](#)
- [Sonnenfinsternis-Rechner von CalSKY](#)
- [Transit-Rechner von CalSKY](#)

WARNUNG

Mancher Amateurastronom wird die am Ende eines Aufsatzes über Sonnenfinsternisse übliche Warnung als lästig empfinden. Trotzdem ist es notwendig. Auch im Verwandtenkreis des Autors gab es jemanden, der bei der Finsternis 1999 wissentlich die Warnung in den Wind geschlagen hat, mit ungeschütztem Fernglas beobachten wollte und nur durch das schlechte Wetter gerettet wurde.

Die Beobachtung der Sonne (namentlich auch während einer partiellen oder ringförmigen Sonnenfinsternis) benötigt zwingend Vorsichtsmassnahmen, um das Augenlicht vor dem grellen Sonnenlicht zu schützen. Wer von blossem Auge beobachten möchte, betrachtet die Sonne durch eine neuwertige Finsternisbrille. Dies ist eine spezielle Schutzbrille, die ausdrücklich für den Blick in die Sonne zugelassen ist. Eine normale Sonnenbrille auch mit noch so viel UV-Schutzfaktor und Gütesiegeln ist KEINE Finsternisbrille. Die Finsternisbrillen heissen so, weil 99% der Leute nur während einer Sonnenfinsternis auf die Idee kommen, direkt in die Sonne zu blicken. Man muss sie jedoch bei jedem direkten Blick in die Sonne tragen.

Beobachtungen durch ein Fernglas oder Fernrohr benötigen einen vom Hersteller ausdrücklich für die Sonnenbeobachtung zugelassenen Objektivfilter (Objektiv ist „das vordere Ende“ des Fernrohrs, also das Ende, das zur Sonne zeigt). Wir warnen ausdrücklich davor, mit aufgesetzter Finsternisbrille durch ein ungeschütztes Fernglas oder Fernrohr zu beobachten. Die Folie der Finsternisbrille wird in sehr kurzer Zeit durchschmelzen.

Die Verfolgung des Merkurtransits benötigt ein für die Sonnenbeobachtung ausgerüstetes Amateurteleskop. Wer kein solches Teleskop besitzt, wende sich an eine Volkssternwarte in der Umgebung und erkundige sich nach allfälligen Sonderführungen am Morgen des Transits.

DER BLICK ZUR SONNE DURCH EIN UNGESCHUEZTES FERNGLAS ODER FERNROHR FUEHRT ZUR SOFORTIGEN ERBLINDUNG. Verzichten Sie im Zweifelsfalle auf die Beobachtung.



Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit
ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im
Literaturverzeichnis angeführten Quellen und
Hilfsmittel benutzt habe.

Gräfelfing, den 2.2.2004

Unterschrift der Kollegiatin

Danksagung an:

Manfred Sotzek, der mir sämtliche Bücher und Zeitschriften für die Facharbeit zur Verfügung gestellt hat

Firma Linde, die mir freundlicherweise Alurohr und die Bleche kostenlos überlassen haben

die Sternenfreunde Stathis Kafalis und Martin Elsässer (Volkssternwarte München), die mir mit Rat und Tat zur Seite standen