

Den Mond mit Galileos Augen betrachten

Cecilia Scorza de Appl

Galileo Galilei (1564-1642) nutzte als erster Astronom ein Fernrohr für Himmelsbeobachtungen und Messungen. Dies löste eine Revolution in der Erforschung der Himmelskörper aus; eine Revolution, die bis heute anhält.

Vor fast 400 Jahren stellte Galileo fest, dass die Oberfläche des Mondes nicht - wie bis dahin angenommen glatt - sondern uneben und voller Erhebungen und Klüfte ist, und, dass die Planeten - im Gegensatz zu den Fixsternen - als ausgedehnte Scheiben zu sehen sind. Er entdeckte, dass Jupiter von Monden umlaufen wird und merkte, dass Venus - so wie unser Mond - Phasen zeigt.

Die folgenden didaktischen Materialien laden Sie ein, mit einem selbst gebauten Galileischen Fernrohr so zu beobachten, wie es Galileo damals tat. Entdecken Sie (mit ihm) die bizarre Welt des Mondes. Tauchen Sie mit Ihren Schülern in ein Schlüsselkapitel der Geschichte der Astronomie ein, indem Sie mit den Weltbildmodellen auch handgreiflich umgehen.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Astronomie	Astropraxis, Planeten, Kleinkörper	Mondskizzen , Mondoberfläche
Fächer- verknüpfung	Astr-Ph, Astro-Ge, Astro-Phil, Astro- Werken	Galileisches Fernrohr , Gerätebau , Astroknobelei , Ptolemäisches und Kopernikanisches Weltbild , Nutzung von Modellen , Modellbau



Abbildung 1: Links: Das Fernrohr Galileos (Florenz IMSS Museum). Rechts: Schüler blicken mit selbst gebauten Fernrohren in den Nachthimmel.

Mit Galileos Augen in den Nachthimmel blicken

[\(→ zurück zum Anfang\)](#)

Um die Bedeutung der Entdeckungen Galileos in seiner Tiefe zu verstehen, ist es wichtig, sich mit dem Ptolemäischen und dem Kopernikanischen System vertraut zu machen. Der Aufbau von gegenständlichen Modellen kann hier sehr hilfreich sein.

Das alte und das neue Weltbild

Die Sternkundigen der alten Hochkultur Mesopotamiens entwickelten die ersten astronomischen Tafeln, mit deren Hilfe sich die Bewegung der Himmelskörper vorhersagen ließ und die ersten Zeitmessungen möglich wurden. Sie glaubten an eine innige Verbindung zwischen Menschenleben und Sternenhimmel. So waren die Jahreszeiten und insbesondere die Zeiten von Ernte und Aussaat eng mit der Erscheinung bestimmter Sternbilder gekoppelt. Zweitausend Jahre später versuchten die antiken Naturphilosophen diese Kenntnisse in einem *konsistenten* Bild des Universums zusammenzuführen. *Dies war die Geburtsstunde der ersten Theorien über die Welt.* Darauf folgend postulierte Aristoteles im 4. Jahrhundert vor Christus, dass sich die Erde im Zentrum des Universums befindet und alle Himmelskörper sich auf Kreisbahnen um sie bewegen. 450 Jahre später entwickelte der damals bekannteste Astronom, **Ptolemäus**, auf diesem Weltbild basierend die erste Theorie der Planetenbewegung. Danach wird die Erde von Mond, Venus, Merkur, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn und einer Sphäre mit den Fixsternen umkreist. Seine Beobachtungen und Überlegungen schrieb er in seinem Buch „Almagest“ nieder. Obwohl sein Weltbild große Schwächen und unnötige Komplikationen zeigte, hielt es sich dreizehn Jahrhunderte bis in die Neuzeit.

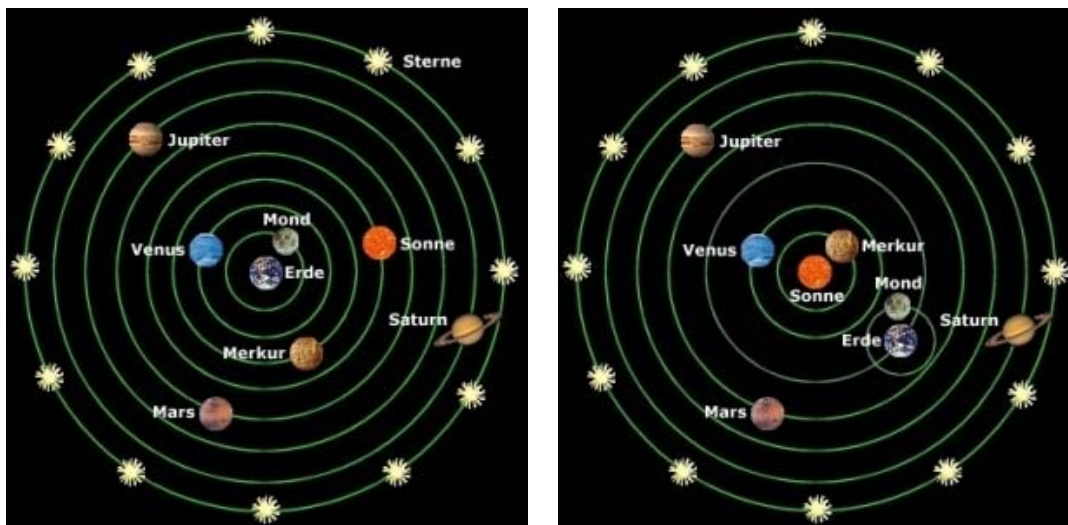


Abbildung 2: Links: Ptolemäisches Weltbild, Rechts: Kopernikanisches Weltbild.

Im Jahr 1500 entdeckte der polnische Astronom Nikolaus **Kopernikus** einen alten Text von Aristarch von Samos (2. Jahrhundert v. Chr.), in dem nicht die Erde, sondern die Sonne als Zentrum des Weltalls angenommen wurde. Kopernikus bemerkte, dass dieses System eine natürlichere und einfachere Erklärung der Planetenbewegungen anbot. In seinem Werk „De Revolutionibus Orbium Coelestium“, welches im Jahr seines Todes erschien, postulierte er, dass sich die Erde um ihre eigene Achse dreht, und wie alle anderen Planeten um die Sonne läuft. Diese Vorstellung brachte die Astronomie in Konflikt mit den kirchlichen Dogmen der damaligen Zeit. Ironischerweise durften die Astronomen das System des Kopernikus benutzen, um die Planetenpositionen zu berechnen, nicht aber als Beschreibung der Wirklichkeit!

Ptolemäisches und Kopernikanisches System im Modell

[\(→ zurück zum Anfang\)](#)

Um beide Systeme und ihr Erklärungspotential zu vergleichen, ist es sinnvoll, ein **anschauliches Modell** zu bauen. Dafür wird ein Streifen blauer Pappe benötigt, auf dem ein Teil des Sternenhimmels, und zwar das Band der Tierkreissternbilder (besser Ekliptiksternbilder), abgebildet wird (siehe Abb. 3). Die 13 Sternbildnamen müssen im Uhrzeigersinn in der folgenden Reihenfolge aufgeklebt werden: Widder, Stier, Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau, Waage, Skorpion, Schlangenträger, Schütze, Steinbock, Wassermann und Fische. Jetzt können wir die Modell-Himmelskörper für Sonne, Mond und Planeten, die aus bemalten Wattekugeln gemacht wurden, von innen nach außen entweder in der Ptolemäischen Reihenfolge (Erde, Mond, Venus, Merkur, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn und der Tierkreis) oder in der Reihenfolge des Kopernikanischen Modells anordnen. Nun können Sie die Himmelskörper mit der Hand bewegen und dabei ihre unterschiedlichen relativen Positionen studieren.



Abbildung 3: Oben: Das Ptolemäische Modell, in dem die Erde von den Planeten, dem Mond und der Sonne (von der Erde aus die erste gelbe Kugel) umkreist wird. Unten: Das Kopernikanische Modell, in dem die Sonne von den Planeten umkreist wird.

Fragen (Übungen am Modell)

[\(→ zurück zum Anfang\)](#)

- 1) Laut Ptolemäus dreht sich die Erde nicht um ihre eigene Achse. Wie lassen sich die Mondphasen mit dem Ptolemäischen Modell erklären?
- 2) Es war schon im Altertum bekannt, dass die Planetenbahnen teilweise in Schleifen vor dem Fixsternhintergrund erscheinen, wobei sich die Planeten anstatt ihrer normalen Bewegung von West nach Ost auch kurzzeitig von Ost nach West bewegen. Lässt sich diese Bewegung mit dem Ptolemäischen System oder mit dem Kopernikanischen System einfacher erklären? Was musste Ptolemäus einführen, um dieses Phänomen zu erklären?

Information mit sehr guten Grafiken und Animationen findet man unter:

http://leifi.physik.unimuenchen.de/web_ph11/geschichte/09epizyken/weltbildaristoteles.htm

<http://de.wikipedia.org/wiki/Mondphase>

Antworten

- 1) Im Ptolemäischen System kreisen alle Himmelsobjekte um die Erde. Die Sonne braucht dafür einen Tag. Der Mond muss etwas schneller sein, da er von Tag zu Tag seine Phase ändert. Im Laufe eines Monats muss er einmal mehr um die Erde gelaufen sein als die Sonne. Dies kann als erste Erklärung genügen.
Um die Abstandsvariation des Mondes zu erklären und dabei vom Grundsatz der Kreisbahnform nicht abzugehen, hat Ptolemäus eine weitere Kreisbewegung (eine sekundäre Kristallkugel, siehe Antwort 2) eingeführt, die der Mond im Laufe eines anomalistischen Monats (Zeit zwischen zwei erdnächsten Positionen) um einen die Erde umkreisenden Punkt durchführt (siehe auch Antwort 2).
- 2) Die rückläufige Schleifenbewegung der Planeten konnte Ptolemäus nur erklären, indem er sekundäre Kristallkugeln einführte, an denen die Planeten befestigt sind und die um einen festen Punkt der primären Kugel kreisen, welche sich ihrerseits mit fester Winkelgeschwindigkeit um die Erde dreht. Auf diese Weise ergaben sich insgesamt 55 Kristallkugeln. Dadurch wurde das Ptolemäische System sehr kompliziert. Kopernikus erkannte, dass es auch ohne die sekundären Kristallkugeln geht, wenn die Sonne im Zentrum steht. Sein Modell erlaubt eine viel einfachere Erklärung der Schleifenbewegung.

Ein Galileisches Fernrohr selbst bauen

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Galileo baute und verbesserte selbst sein eigenes Fernrohr und entdeckte damit Dinge, die sich mit dem Ptolemäischen Weltbild nicht vertrugen.

In den ersten Absätzen seines Werkes „Sidereus Nuncius“ (Nachricht von neuen Sternen, 1610) berichtet Galileo, dass er ein Fernrohr mit einer Vergrößerung zwischen 20fach und 32fach benutzt hat, um seine Entdeckungen zu machen. Er vermerkte weiter, dass die Wunder, die er anschließend beschreiben würde, sich nicht mit einer niedrigeren Vergrößerung beobachten ließen. Obwohl die von ihm verwendeten Linsen nicht genau bekannt sind (Galileo baute eine Reihe von Instrumenten), geben seine Beschreibungen einen Hinweis darauf, wie er sein Fernrohr baute.

Um die Galileischen Entdeckungen nachzuempfinden, müssen wir zunächst ein Galileisches Fernrohr bauen. In AH 4/2007 wird auf S. 41 auf einen Bausatz zum Nachbau eines solchen Fernrohrs von der Firma Astromedia hingewiesen (www.astromedia.de). Dieses Fernrohr, das relativ leicht zusammenzubauen ist, ergibt jedoch nur eine etwa 10fache Vergrößerung. Es lohnt sich trotzdem damit anzufangen.

Um ein Galileisches Fernrohr mit einer 20fachen Vergrößerung zu bauen, brauchen eine lange, positive Brennweite für das Objektiv und eine kurze, negative Brennweite für das Okular. Die Vergrößerung des Fernrohrs wird aus dem Verhältnis der Brennweite des Objektivs (B) zur Brennweite des Okulars (b) bestimmt (siehe auch Abb. 5). Z. B. erhält man bei einem Objektiv mit $B=+1000$ mm zusammen mit einem Okular mit $b=-50$ mm eine



20fache Vergrößerung ($1000/50=20$). Die Linsen werden in einen Tubus (stabiles Papp- oder Plastikrohr) im Abstand von 950 mm eingebaut. (Falls Sie Interesse an solchen Linsen haben, können Sie die Autorin dieses Beitrages unter cscorza@lsw.uni-heidelberg.de kontaktieren).

Abbildung 4: Nachbau eines Galileischen Fernrohrs. Gebraucht werden zwei ineinander verschiebbare Papprohre, zwei Linsen sowie Ringe und Hülsen zur Befestigung dieser.



Galileische Himmelsobjekte in Vergleich

Es ist schwer, das Galileische Fernrohr ohne Montierung und Stativ, d. h. freihändig zum Beobachten zu verwenden. Wir schlagen deshalb hier vor, das selbst gebaute Fernrohr an ein größeres Fernrohr mit Montierung und Stativ zu befestigen. Neben der stabilen Lage des Galileischen Fernrohrs ermöglicht diese Konstruktion einen Vergleich der Bilder beider Fernrohre. Dies ist besonders wichtig, wenn wir in Betracht ziehen, dass das Sehfeld des Galileischen Fernrohrs sehr klein ist.

Wissenswertes über Galileische Fernrohre

Die Objektivlinse in Linsenteleskopen sammelt und bündelt die Lichtstrahlen (rechts in Abb. 6). Die Okularlinse (links im Bild) hat zwei Hauptfunktionen: 1. wandelt sie die konvergierenden Lichtstrahlen, die vom Objektiv erzeugt werden, in parallele Lichtstrahlen, die einfacher vom Auge fokussiert werden können (teleskopische Optik) und 2. vergrößert sie das Bild. Man kann positive oder negative Okularlinsen benutzen. Die konkaven Okularlinsen (negative Brennweite, benutzt von Galileo) lenken die schräg ins Objektiv einlaufenden Lichtstrahlen weit ab. Dies führt dazu, dass man ein gutes Bild nur im Zentralbereich des Okulars zu sehen bekommt und das Auge hin und her bewegen muss.

Galileische Fernrohre erzeugen ein aufrechtes und seitenrichtiges Bild, aber mit einem sehr kleinen Sehfeld. Das Keplersche Teleskop liefert wegen seiner konvexen Okularlinsen ein seitenverkehrtes, auf dem Kopf stehendes Bild, weil die Richtung der Strahlen in der Okularlinse bezüglich der optischen Achse gespiegelt wird (siehe Abb. 5).

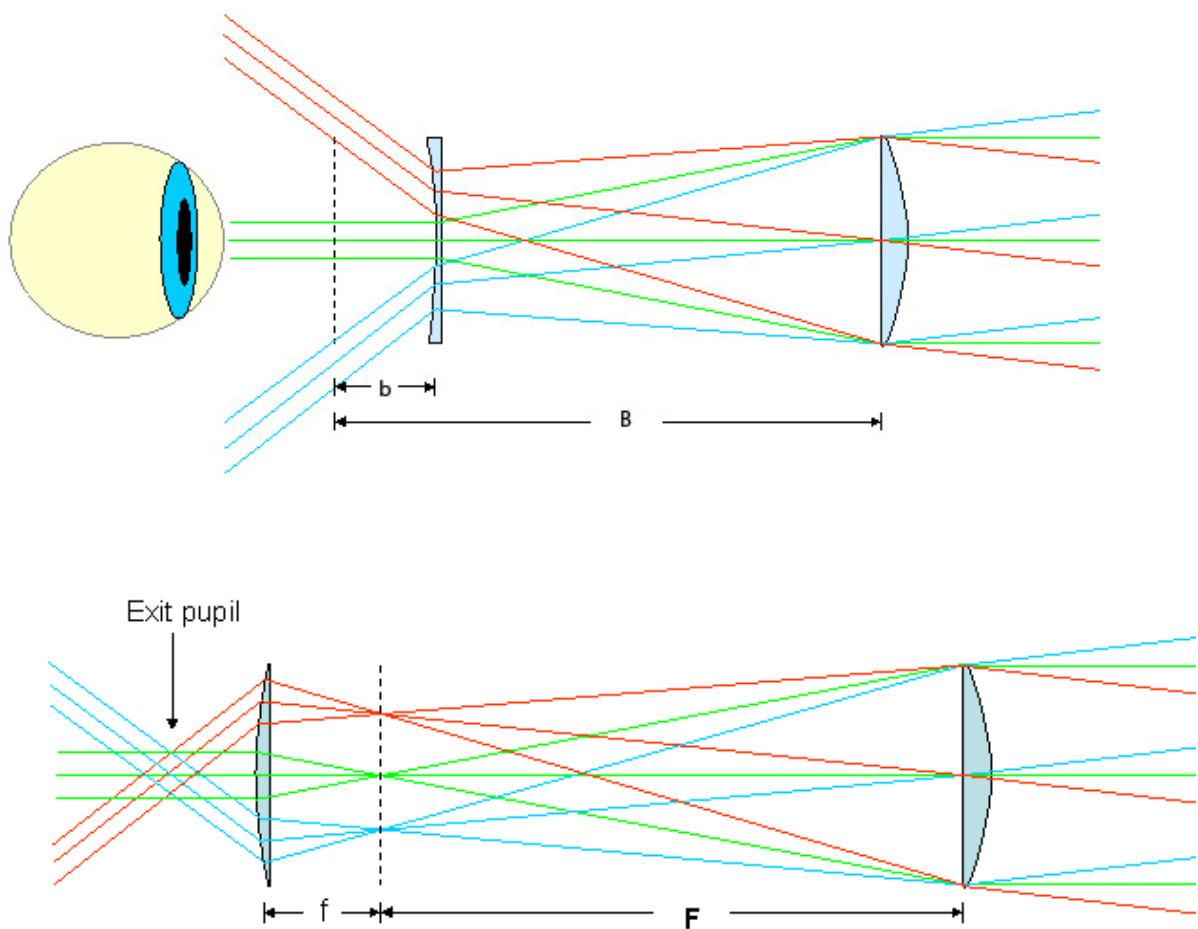


Abbildung 5: Strahlengang in einem Galileischen Fernrohr mit konvexer Objektivlinse (rechts) und konkaver Okularlinse (oben) im Vergleich zu dem in einem Keplerschen Fernrohr, in dem beide Linsen konvex sind.

Die Oberfläche des Mondes als Galileo sie sah und skizzierte [\(→zurück zum Anfang\)](#)

Am Abend der 30. November 1609 hatte Galileo die geniale Idee, sein Fernrohr zum Mond zu richten. Zu seiner großen Überraschung sah er, dass der Mond nicht flach war, wie damals viele dachten, sondern voller Berge und Täler, wie unsere Erde. An diesem Abend begann das alte Weltbild des Ptolemäus zu bröckeln.

Galileo malte die Mondoberfläche in mehreren Phasen in der Nähe des Terminators (Tag-Nacht-Grenze), weil dort die Landschaftsformationen durch die langen Schatten einfacher zu erkennen sind (siehe AH 4/2007, S. 39). Trotz der Tatsache, dass Galileo ein guter Maler war, ist es überraschend festzustellen, dass Galileos Aufzeichnungen der Mondoberfläche nicht sehr gut sind. So erscheinen die Mondmerkmale in falschen Proportionen (siehe Abb. 6). Galileo hat u. a. den Krater Albategnius (siehe Pfeil) zu groß gezeichnet. Warum das?

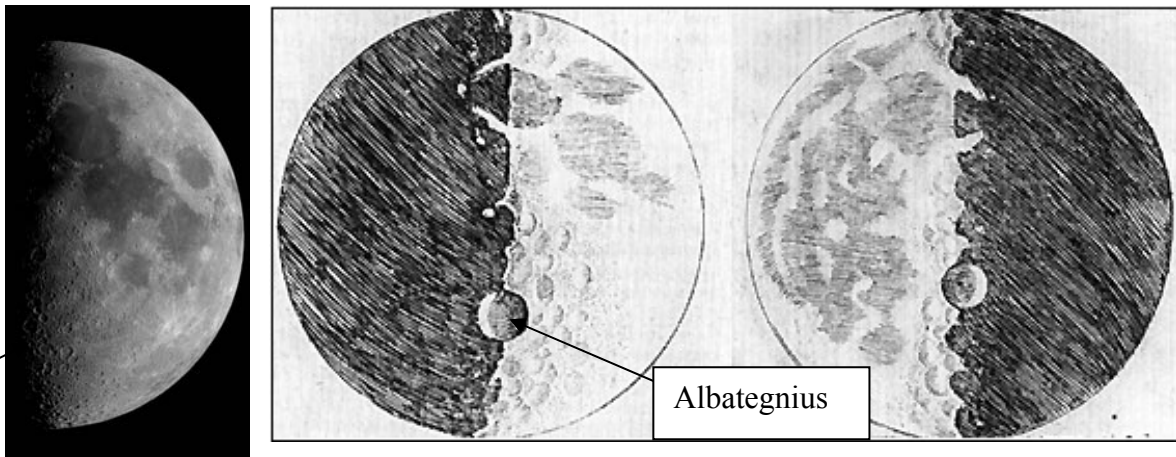


Abbildung 6: Links: Photographie des zunehmenden Mondes. Rechts: Galileos Skizzen des Mondes

Die Antwort liegt darin, dass das Sehfeld von Galileos Fernrohr sehr klein ist (siehe Abb. 7). Galileo musste also eine Art Mosaik der Mondoberfläche erstellen, wobei die Proportionen, für die der direkte Vergleich wichtig ist, falsch wiedergegeben wurden.

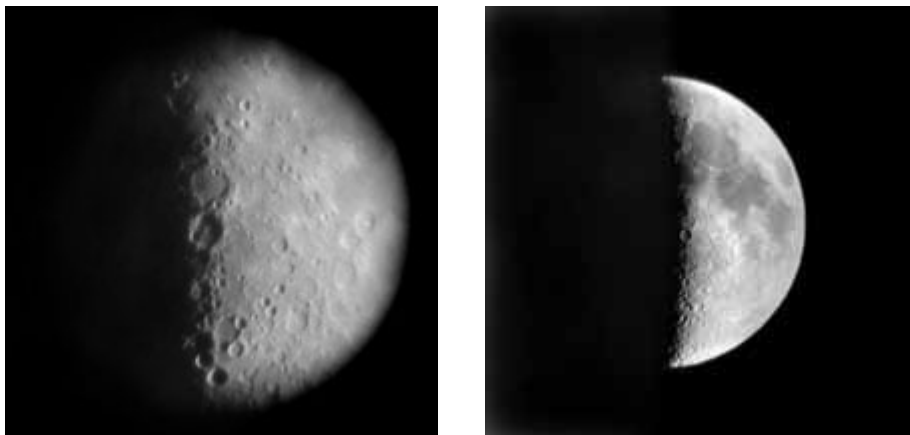


Abbildung 7: Links: Sehfeld eines Galileischen Fernrohres. Nur ein kleines Feld, zentriert auf dem Krater in der Mitte (Albategnius), ist sichtbar. Rechts: Der Mond im Keplerschen Fernrohr (das Bild wurde gespiegelt, um es mit dem linken Bild vergleichen zu können).

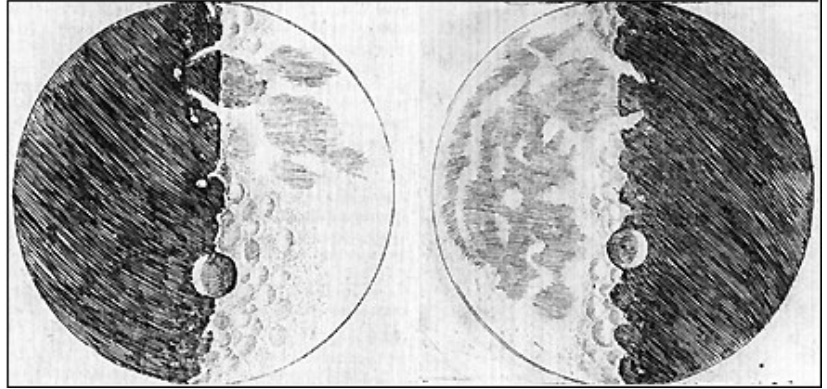
Auf dem folgenden **Arbeitsblatt** „Mondskizzen mit dem Galileischen Fernrohr“ können Sie die Schüler den Mond mit Hilfe des selbst gebauten Fernrohres skizzieren lassen (siehe AH 7-8/2005 für Tipps). Auf dem **Arbeitsblatt** „Mondoberfläche“ können die Namen der Meere und Krater auf einer Mondkarte eingetragen werden.

Arbeitsblatt: Mondskizzen mit einem Galileischen Fernrohr

Name:

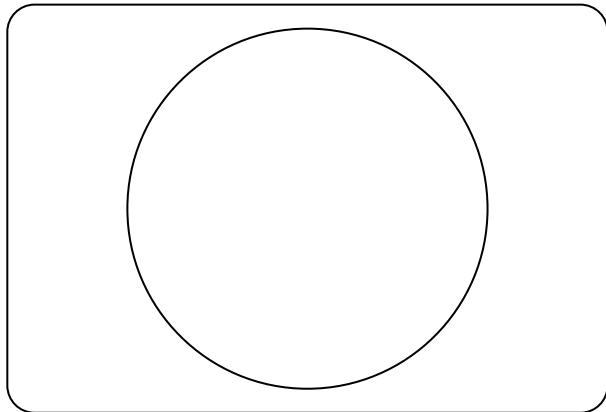
Versuche doch einmal, den Mond zu skizzieren, wie es Galileo vor 400 Jahren tat. Beobachte dazu den Mond bei drei verschiedenen Mondphasen durch dein selbst gebautes Fernrohr und zeichne die von dir beobachteten Strukturen in den jeweiligen Mondumriss.

Da das Galileische Fernrohr nur ein kleines Sehfeld besitzt, musst du das Fernrohr entlang der Mondoberfläche bewegen und die Oberfläche Stück für Stück skizzieren. Vergleiche Deine Zeichnungen mit Galileos Zeichnungen.



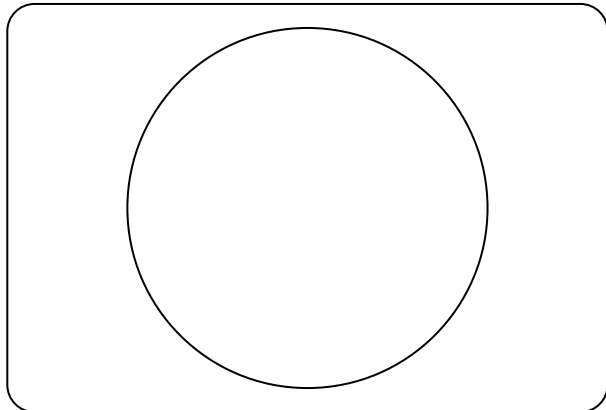
Zunehmender Halbmond (Galileos Bild: oben links)

- ⊙ Datum://1610
- ⊙ Uhrzeit:
- ⊙ Himmelsrichtung:



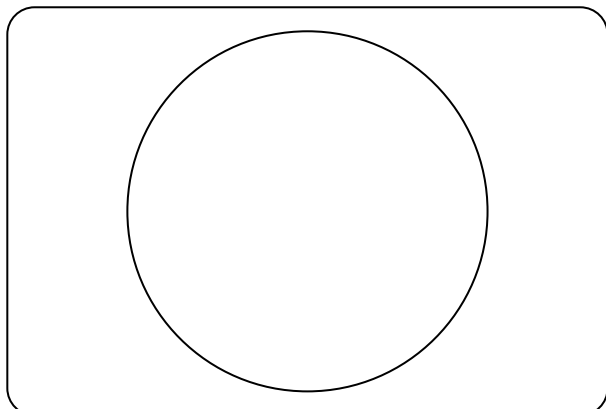
Abnehmender Halbmond (Galileos Bild: oben rechts)

- ⊙ Datum://1610
- ⊙ Uhrzeit:
- ⊙ Himmelsrichtung:



Vollmond

- ⊙ Datum://1610
- ⊙ Uhrzeit:
- ⊙ Himmelsrichtung:



Arbeitsblatt: Mondoberfläche

(Die Namen der Meere und Krater des Mondes)

Einige Jahre nach Galileos Entdeckungen mit dem Fernrohr zeichnete ein anderer italienischer Astronom namens Riccioli eine Karte, auf welcher er den größten „Meeren“ des Mondes Namen gab, die u. a. mit Wetterlagen zu tun haben. So gibt es z. B. das „Meer der Ruhe“, das „Regenmeer“, das „Wolkenmeer“ und den „Ozean der Stürme“. Riccioli glaubte, dass der Mond das Wetter auf der Erde direkt beeinflusst. Je nach Sichtbarkeit der Meere auf dem Mond (zunehmender oder abnehmender Mond) würden dann entsprechend auf der Erde gutes Wetter oder sogar heftige Stürme ausgelöst. Heute wissen wir, dass der Mond ein faszinierender, aber trockener Himmelskörper mit staubbedeckten „Meeren“ ist, die einfach lustige Figuren bilden (so wie den Mann im Mond).

Die Mondmeere und Krater zu erkennen, ist eine spannende Sache. Die ersten Astronauten auf dem Mond (Neil Armstrong, Edwin Aldrin) sind im „Meer der Ruhe“ (lateinisch: Mare Tranquillitatis) gelandet.

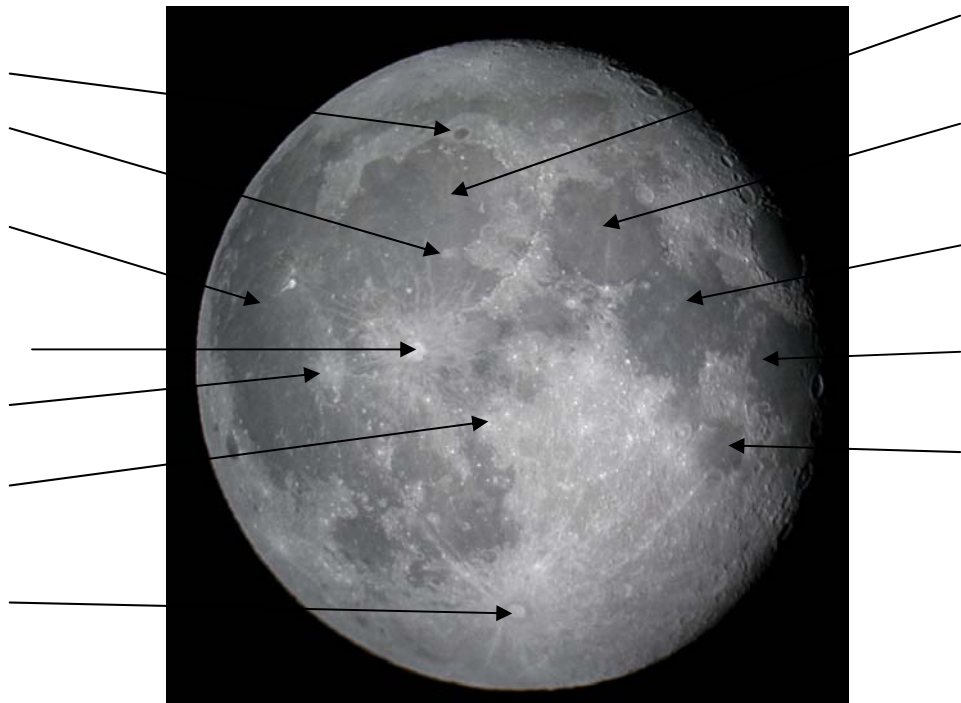
Auf dem unteren Bild kannst Du die Namen der Meere und Krater eintragen.

Eine detaillierte Beschreibung der Mondoberfläche befindet sich unter

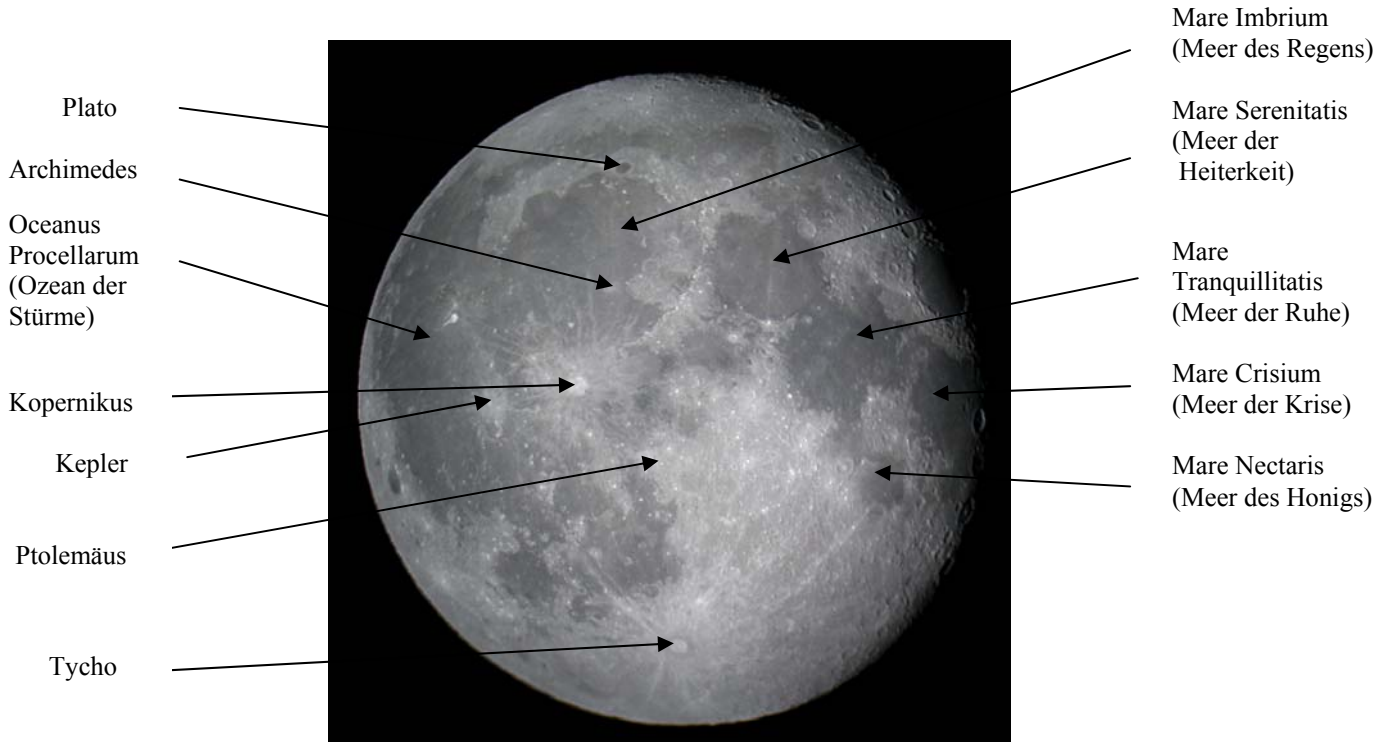
<http://www.mond.de/Mondkarte/mondkartetext.html> und

<http://www.mondatlas.de/strukturen/strukturen.html>.

Die Oberfläche des Mondes



Lösung

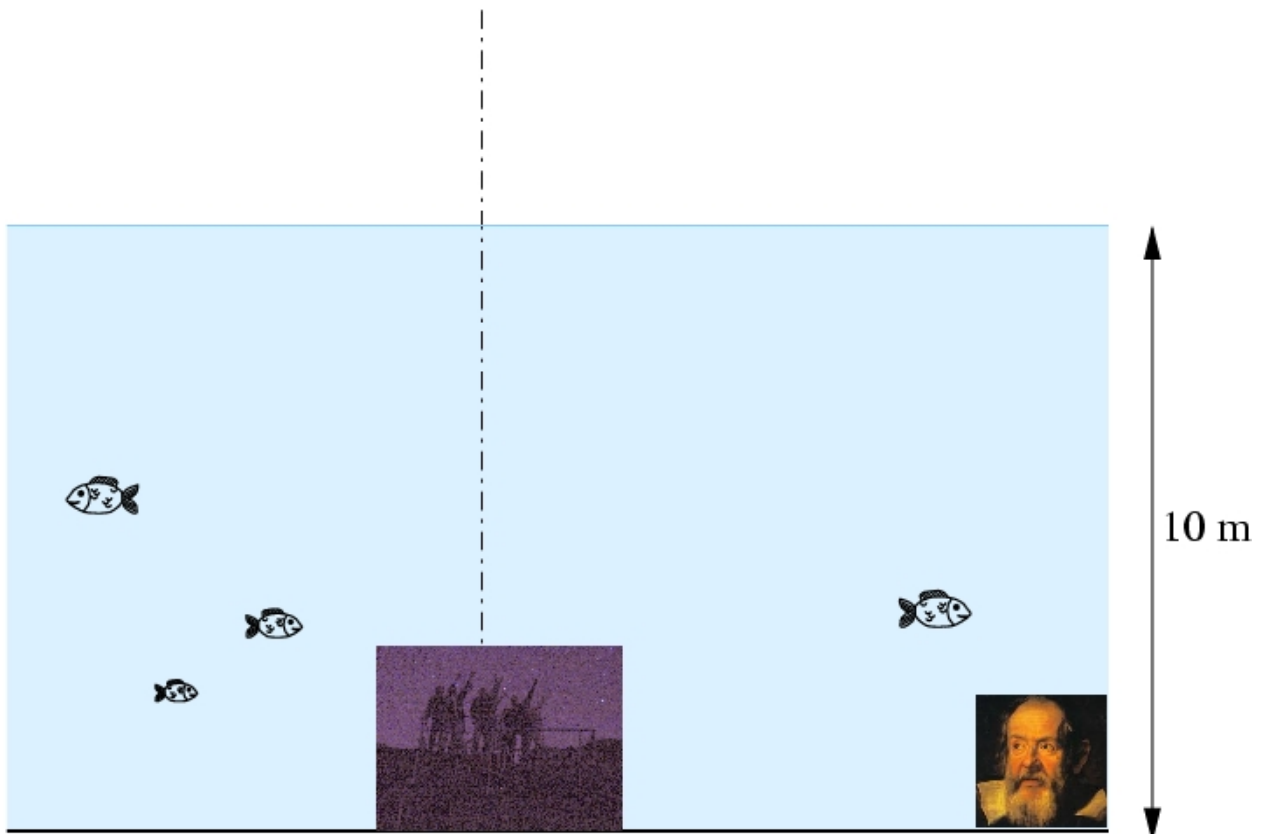


Astroknobelei



Galilei als „Wasserweltler“

Angenommen, die Menschen würden im Wasser leben und (in geringen Wassertiefen) auch den Sternenhimmel beobachten. Wie müsste die Objektivlinse eines Galileischen Fernrohrs beschaffen sein? Wie würde ein „Wasserweltler“ den Sternenhimmel sehen? Wohin müsste Galilei schauen, um die Venus als Morgenstern zu beobachten (siehe Skizze, gesucht sind Höhe und Himmelsrichtung)?





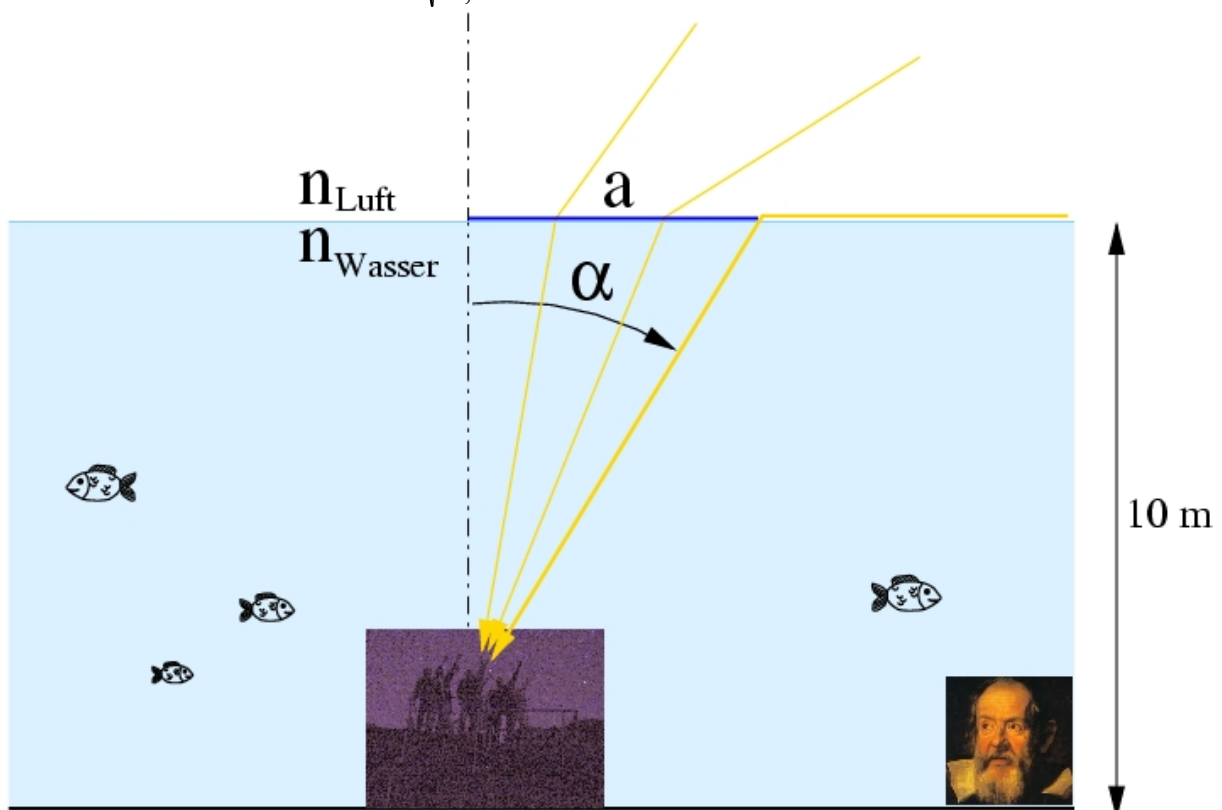
Lösung zur Astroknobelei

Die Objektivlinse des Fernrohrs sammelt das Licht dadurch, dass die in der Regel aus der Luft kommenden Strahlen beim Eintritt ins und dem Austritt aus dem Linsenglas gebrochen werden. Die Stärke der Brechung hängt dabei sowohl von der Krümmung der Linse als auch vom Brechzahlunterschied zwischen Linsenmaterial und umgebenden Medium ab. Damit ein Galileisches Fernrohr unter Wasser (Brechzahl 1,33) genau so funktioniert wie in der Luft (Brechzahl rund 1) müssen also entweder die Linsen stärker gekrümmt sein oder das Linsenmaterial muss aus höher brechendem Material bestehen.

Der Wasserweltler würde den gesamten Sternenhimmel innerhalb eines kreisrunden Fensters mit dem Radius a in der Wasseroberfläche über sich sehen (siehe Bild). Im restlichen Wasserwelthimmel spiegelt sich die Wasserwelt. Die Größe von a wird durch den Strahl festgelegt, der bei streifendem Einfall (Einfallswinkel 90°) noch zum Beobachter gebrochen wird (total reflektierter Strahl rückwärts verfolgt). Mit Hilfe von Brechungsgesetz, Pythagoras und Sinusbeziehung erhält man für $a \approx 11,4$ m.

$$\frac{\sin(90^\circ)}{\sin(\alpha)} = \frac{n_{\text{Wasser}}}{n_{\text{Luft}}} \rightarrow \sin(\alpha) = \frac{1}{1,33}, \quad a = \sqrt{c^2 - b^2} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sin(\alpha)}\right)^2 - (10 \text{ m})^2} = \sqrt{(a \cdot 1,33)^2 - (10 \text{ m})^2}$$

$$a^2 = 1,7689a^2 - 100 \text{ m}^2 \rightarrow a = \sqrt{\frac{100 \text{ m}^2}{0,7689}} \approx \underline{\underline{11,4 \text{ m}}}$$



Venus als Morgenstern würde am Osthorizont (wo die Sonne am Morgen ist) bei einer Höhe von $\alpha = \arcsin(1/1,33) \approx 49^\circ$ (Winkel α kann auch konstruiert und gemessen werden).