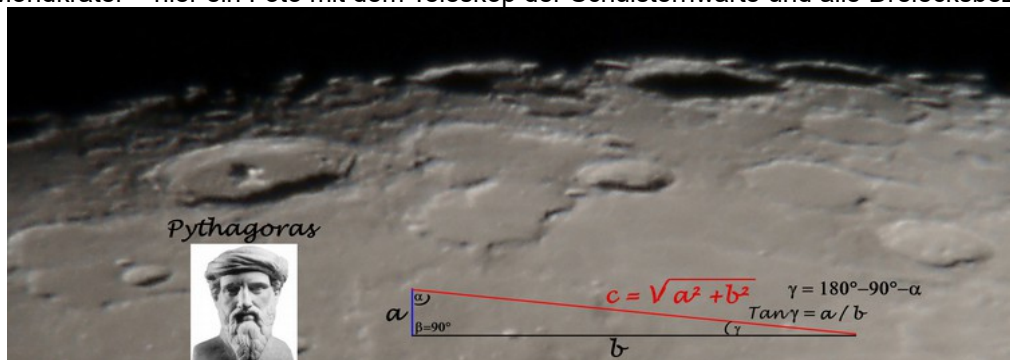


## Was ist wie weit weg im Weltall? – der erste „Augenblick“ der Erkenntnis

Zum Glück haben wir Menschen zwei Augen und was wir in Augenschein nehmen können, glauben wir eher als das schönste Gerücht. Für die Entfernungen im Weltall sollte man die Erkundung auch mit dem Blick auf die eigene Nasenspitze anfangen. Wer diese mit beiden Augen zugleich scharf sehen will, - was nur ganz jungen Menschen gelingt -, stellt schnell fest, dass alles Weitere nicht nur verschwommen, sondern in zwei unscharfen Bildern gegeneinander verschoben erscheint. Nimmt man jetzt einen Finger am Ende des ausgestreckten Arms zu Hilfe, sieht man mit dem rechten und dann mit dem linken Auge den Finger um mehr als eine Fingerbreite hin und herspringen. Schnell stellt man fest, dass der Sprung immer größer wird, wenn der Finger sich den Augen bis zur Nasenspitze nähert. Der schlaue Mensch, der mit dieser Methode zum ersten Mal Entfernungen berechnet hat, muss irgendwo in Griechenland gelebt haben. Dort hatte ein gewisser Herr **Pythagoras** schon ~550 vor Chr. sich Gedanken gemacht, in welcher Beziehung die Seiten eines Dreiecks zueinander stehen, wenn es im Dreieck einen rechten ( $90^\circ$ ) Winkel gibt. Da unsere Augen und ein entfernter (punktförmiger) Gegenstand ein Dreieck bilden – genau genommen zwei rechtwinklige Dreiecke, die auf der Linie von der Nasenwurzel zum Gegenstand verbandelt sind – muss man nur den einen Winkel von der Nasenwurzel über ein Auge zum Gegenstand messen. Dann darf nach Pythagoras gerechnet werden und wir erkennen die Entfernung zum Gegenstand. Zugegeben: Nicht jeder läuft mit einem Geo-Dreieck am Kopf durch die Gegend und der Augenabstand von der Nase eignet sich nur für Berechnungen relativ kurzer Entfernungen, die man schnell mit Handspanweite, Elle oder Fuß abmessen könnte. Aber das Prinzip feiert seitdem Triumphe und der Weltruhm von ein paar Griechen mit komplizierten Namen begann. Aussehen und Leben sind nicht genau bekannt, um so genauer aber der ihm zu Ehren benannte Mondkrater – hier ein Foto mit dem Teleskop der Schulsternwarte und alle Dreiecksbeziehungen:

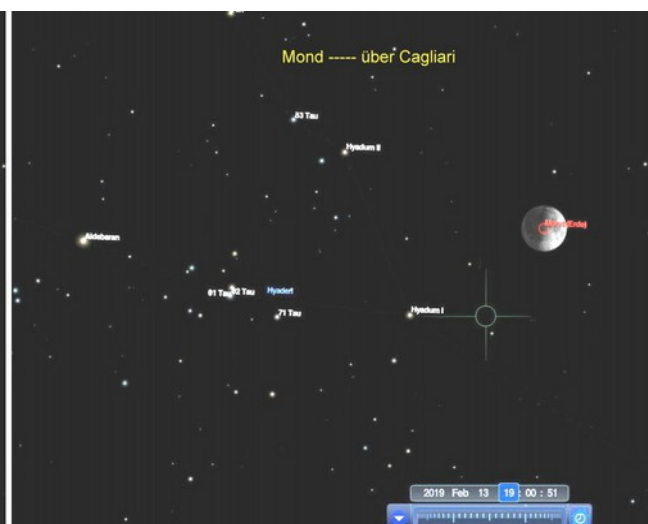


Durchdenken wir das einmal genauer.

In jeder Seefahrtsgeschichte kommt die Stelle vor, wo Abenteuer\*Innen „Sterne schießen“ müssen, um zu wissen, wo sie sind auf dem weiten Ozean. Er oder sie misst den Winkel eines bekannten Sterns über dem Horizont und rechnet nach Pythagoras!

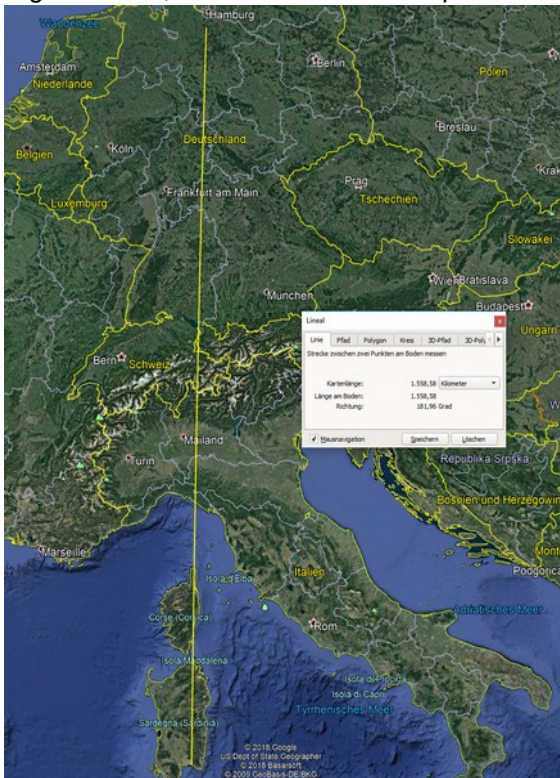
Machen wir es nicht auf einem schaukelnden Schiff, sondern in einer klaren Mondnacht – und zunächst nur wegen der Mondentfernung. Den teuren Sextanten für die Sterne brauchen wir nicht, nur weit entfernte Freunde, die wir per Handy befragen können, wie sie den Mond sehen – vor dem Hintergrund der Sterne. Damit ist klar, dass es kein „Chillen“ ist, Entfernungen zu messen, aber es klappt und die Mühe lohnt sich wegen des Erkenntnisgewinns. Auch soll es etwas großzügiger als in der Mathestunde zugehen.

Hier zunächst der Anblick für uns und Freund\*In, idealerweise zur gleichen Zeit und Zeitzone an Orten mit gehörigem Abstand, denn der Mond ist ja nun nicht gerade zum Greifen nah.



Wie man sieht, ist der Sprung des Mondes nach Norden im rechten Bild leicht zu erkennen, allerdings in der Natur erst bei einer Entfernung von ~1500km. Eine weitere Vorübung ist auch notwendig: die Größe der Mondscheibe muss ermittelt werden, wozu wiederum der (kleine) Finger dient, hinter dem sich die Scheibe verstecken kann. Wie groß am Himmel, zugleich an unserem Horizont, ist ein Finger gemessen in °-Grad? Mit Geduld, für Menschen damals kein Problem, kann man ~360 Finger (gestreckter Arm!) nebeneinander zu einem Vollkreis legen; d.h. eine Fingerbreite ist ~1°, der Monddurchmesser (hinter dem Finger) ~0.5°. In dem Gedankenexperiment, das aber an bestimmten Tagen wirklich funktionieren würde, ist ein Ort gewählt auf der Insel Sardinien, die ziemlich genau im Süden von Buchholz liegt. Ein guter Beobachter der dortigen (deutschen Auslands-) Schule könnte also leicht erkennen, dass der Mond um die Hälfte des Durchmessers höher steht, wenn er an einigen hellen Sternen vorbeizieht. In Wirklichkeit würde man jeweils fotografieren und die Bilder am Computer übereinander legen. Nun kommt die „Pythagoräische Schläue“ ins Spiel:

Die Strecke – Auge-Nasenwurzel (s.o.) - ist lt. GoogleEarth für die beiden Beobachtungsorte auf ~1560km angewachsen; das Ende eines sehr spitzen Winkels ist der „Mondsprung“, eine winzige „Strecke“ von 0.25°.



Die Mond"parallaxe" für die Orte B und C  
 Die Mondscheibe "springt" am Himmel um einen kleinen Winkel nach Norden bzw. Süden, wenn man sie von zwei genügend weit auseinander liegenden Orten (nahe des selben Längengrades) B und C vor einem hellen Hintergrundstern beobachtet.  
 (In der Skizze "springt" zwecks Übersichtlichkeit der Stern (sic)!)  
 Wenn zwei Beobachter sich verabreden, diesen Sprung zur selben Zeit per Augenschein zu "messen" - z.B. in Beziehung zum Durchmesser der Mondscheibe - können sie mit dem Winkel B-Mond-C und der Entfernung B - C mittels Dreiecksberechnungen die Entfernung des Mondes und seinen Durchmesser berechnen. Dies gelingt mit erstaunlicher Genauigkeit und lässt sich mit Selbstbau-Perlinstrumenten weiter steigern.

Vereinfachend darf (bei B) ein rechtwinkliges Dreieck angenommen werden, dessen spitzer Winkel am Mond mit der Entfernung B-C als Tangens-Funktion korreliert.

Für die Orte Buchholz und Cagliari (I) - ~1560km - gilt folgendes Beispiel:  
 Die Parallaxe entspricht einem halben Monddurchmesser = 15 Bogenminuten = 0.25°  
 (s. Bild 1/2) ==>>

$$\text{Entf. (Mond)} = \frac{\text{Entf. B-C}}{\tan 0.25^\circ} = \frac{1560}{0.0043}$$

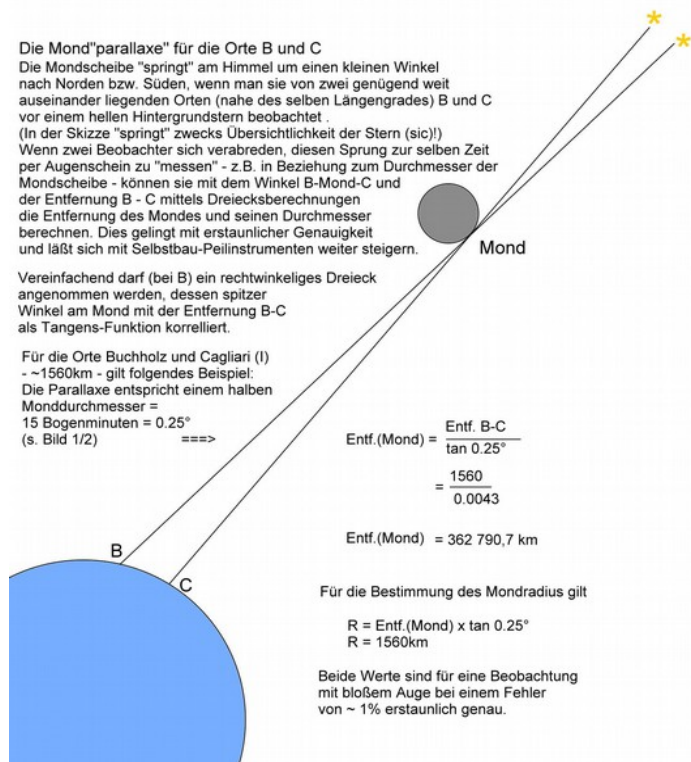
$$\text{Entf. (Mond)} = 362\,790,7 \text{ km}$$

Für die Bestimmung des Mondradius gilt

$$R = \text{Entf. (Mond)} \times \tan 0.25^\circ$$

$$R = 1560 \text{ km}$$

Beide Werte sind für eine Beobachtung mit bloßem Auge bei einem Fehler von ~ 1% erstaunlich genau.



Diese Methode erlaubt die Erkundung des „nahen“ Weltraums, wenn man mit Teleskop und Kamera arbeitet.

Zunächst aber zu einer Heldentat eines anderen Griechen, der auf diese Weise die Entfernung zur Sonne bestimmen wollte. Wir könnten es ebenso schaffen, benötigten aber zumindest einen guten Winkelmesser. **Aristarchos** hatte ~250v.Chr. zum Erschrecken seiner Mitmenschen zumindest errechnet, dass die Sonne mindestens ~20 mal weiter entfernt sein musste als der Mond. Dass die Natur noch einmal ~20mal mehr verlangt, liegt an den Schwierigkeiten, vor ~2270 Jahren exakt den Zeitpunkt des Halbmondes und den Winkel zur Sonne zu bestimmen.

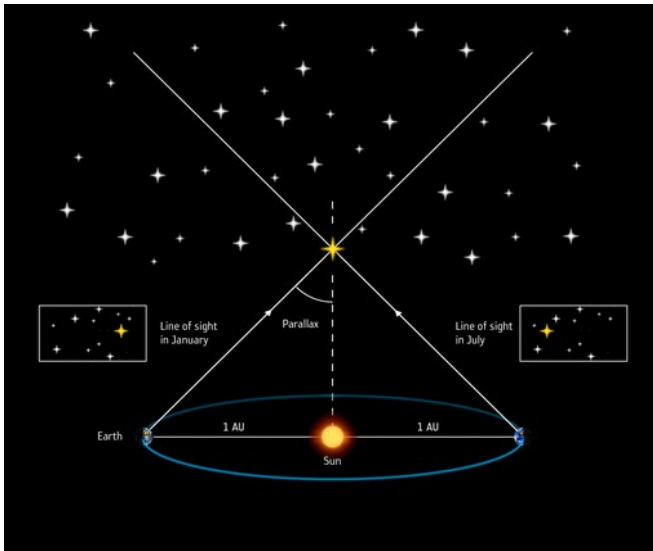


Das schmälert aber die Heldentat nicht; bei einer genaueren Beobachtung hätte sein Schicksal vielleicht in der Verbannung - wegen Irrsinn? - geendet. Späteren Kolleg\*innen erging es bekanntlich noch schlimmer, wenn sie die Wirklichkeit näher untersucht hatten oder wollten.

Aristarchos war ganz schnell klar, dass die Sonne entsprechend riesig sein musste, weil der Mond bei einer Sonnenfinsternis die Sonnenscheibe fast immer bedecken konnte. Bei Mondfinsternissen errechnete er durch die Beobachtung des Schattenwurfs der Erde auf die Bahn des Mondes sogar den Durchmesser der Erde. Folglich war zumindest ihm klar, dass die Gestirne nicht um die Erde kreisen konnten bei diesen Größenverhältnissen. Ein anderer Kollege, **Eratosthenes**, Leiter der Bibliothek von Alexandria (Ägypten), hatte sich etwas später die Mühe gemacht, durch die Beobachtung des Sonnenschattens in Brunnenlöchern! den Erdumfang zu berechnen. Die Brunnen waren ~800km von einander entfernt. Er musste dafür genau die Schritte zählen (lassen) und dabei von der Erde als Kugel überzeugt bleiben. Er schaffte es auf ~4%! genau.

*Bitte mehrmals an Baseball Cap, Mütze oder Kapuze tippen - einen Nobelpreis gab es damals noch nicht!*

Für unsere Weltraumerkundung wird die **Parallaxe** jetzt zur Basis aller großen Entfernungsberechnungen. Was wäre denn, wenn man sich mit einem Teleskop von einem sehr fernen Ort den Lauf der Erde um die Sonne ansehen würde? Anders gefragt: wie weit müsste dieser Ort (von der Sonne) entfernt sein, damit man die „gerade noch sichtbare“ Positionsänderung der Erde zwischen Sommer und Winter bestimmen könnte? Hier eine Zeichnung des „Problems“ aus einer Lerneinheit der Europäischen Weltraum Agentur ESA:



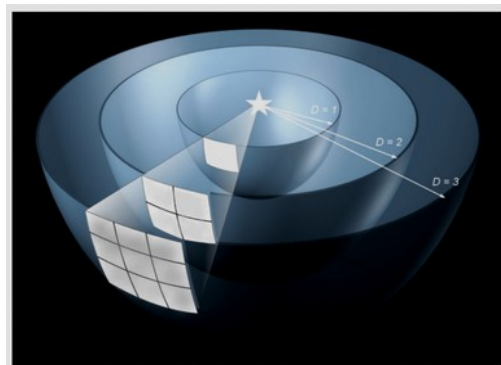
Leider kann man so einen schönen Sprung des Sterns nur auf dem Papier sehen. In Wirklichkeit ist jeder Sommer-Winter-Sprung eines „nahen“ Sterns so winzig, dass die entsprechenden Fotos unter dem Mikroskop ausgewertet werden müssen. Dennoch können große Teleskope mit dieser Methode sogar den „Sprung“ von Millibogensekunden über mehrere 100 Lichtjahre Entfernung vermessen. Der **Gaia-Satellit** schafft es sogar in Mikrobogensekunden. Der 1°-Finger überdeckt dabei 3 600 000 „marcsec“, engl. für Millibogensekunden!

Die **Bogensekunde** ist demnach der 60. Teil einer **Bogenminute**; und diese wiederum der 60. Teil des 1° Grad-Winkels.

Ein Stern muss genau  **$3.08 \times 10^{13} \text{ km}$**  entfernt sein, damit man den **Erde-Sonne-Abstand von 150 000 000 km** ( $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ) „im Teleskop“ als **1 Bogensekunde** erkennen kann.

Schnell ein Vergleich zu unserer Sehleistung (ohne Brille): 30 Krater als Perlenschnur durch den Mond gelegt, können wir uns gut vorstellen. Wir gucken dann auf 1 Bogenminute genau. Mit einem guten Hobbyteleskop würde man eine Fußballarena im Krater als Punkt erkennen – 1 Bogensekunde. Eins der 8-Meter-Teleskope in Chile lässt das Tor erkennen, der Gaia-Satellit den Handschuh des Torwarts!

Nachrechnen oder glauben? - und gleich noch weiter rechnen: Wer die Lichtgeschwindigkeit kennt, kann leicht Entfernungen in Zeitdauer umrechnen und erhält **3.26 Licht-Jahre** für 1 **Parallaxensekunde (parsec)**. Wer den Tangens einer Bogensekunde in einer Tabelle oder auf den Taschenrechner findet, sollte zur Übung wie oben bei Erde-Mond einmal nachrechnen. 1 parsec ist eigentlich erst bzw. noch vor unserer „Haustür“, denn der nächste Nachbar-Stern ist 4.2 LJ entfernt. Aber diese Entfernung – **1 parsec - pc** - ist das Maß – die Elle - der Profi-Astronomen und wird multipliziert mit 10 bis  $10^9$  immer wieder auftauchen.



Nun wird es aber doch noch kompliziert, denn was kann man machen, wenn Sterne/Objekte nicht mehr „springen“? Dann müssen in mathematisch-logischen Vergleichsverfahren große Mengen von Daten bedacht werden, um zu einem Entfernungsergebnis zu kommen. Seit etwa 1890 hat die Forschung sie angehäuft, u.a. „Fixsternparameter“, traditionell so benannt, obwohl man heute weiß, dass sie nie „fixiert“ waren. Grundlage aller Überlegungen muss dabei das **Gesetz der Lichtausbreitung** sein, wie hier gezeigt. (S.auch das PDF „Sternenlicht“ in der Astro-Box.) Bei Sternhaufen und Galaxien hilft wieder der Winkelmesser, sofern es ein Gebilde ist, das mit einem gleichartigen „nahen“ System verglichen werden könnte.



Die Helligkeit eines Sterns nimmt mit wachsender Entfernungseinheit „quadratisch“ ab. Unsere gleißend helle Sonne wäre damit in der sog. Standardentfernung der Astronomen 10pc = 32.6 Lichtjahren kaum noch erkennbar. Im Umkehrschluss gilt, dass ein schwacher Stern aus dem Milchstraßengewimmel in der Standardentfernung zum hellsten Prachtstück werden könnte. Diese Standard-Helligkeit wird „**absolute Magnitude**“ = **Mag** genannt, die zurückgeht auf die „visuelle Magnitude“ (**mag**) eines alten Griechen, na klar, namens **Hipparchos**. Er unterschied damals alle sichtbaren Sterne in 6 Größenklassen. Ob er von einem Teleskop träumte, ist unbekannt. Aber die Magnituden-Geschichte wäre eine neues Thema!

Noch ist dieses hier aber nicht zu Ende, denn zwischen der Nasenspitze, Mond und Sonne gibt es ja noch die Planeten und deren Laufbahnen um die Sonne. Ursprünglich nannte man sie „Wandelsterne“ und damit war jedem Beobachter ihre Besonderheit klar. Sie bewegten sich augenscheinlich so kompliziert, dass die Erklärung ihrer Bahnen und Entfernungen mindestens zwei andere Griechen den Weltruhm kosteten, - weil sie sich irrten. Erst ein Trio aus dem Norden kam den am Himmel wandernden Planeten auf die Schliche: der Pole **Kopernikus**, der Däne **Brahe** und der Deutsche **Kepler** – in damals üblicher Zusammenarbeit über Bücherschreiben. Für Kopernikus war es ein „heißes“ Thema, er fürchtete um sein Leben und ließ sein Buch erst zwei Monate vor seinem Tod **1543** verbreiten - mit dem revolutionären Bild von der **Sonne im Zentrum** der Welt. Brahe zeigte um **1600**, nach einem Umzug nach Prag, dem 30-jährigen Kepler seine präzise Datensammlung zu den Bahnen der Planeten und dieser formte nach jahrelanger Kopfarbeit ohne Computer die drei fundamentalen **Kepler-Gesetze**, die sogar für ganze Sternsysteme gelten. Keine Frage – ein neues Thema, zumal in diesen Gesetzen auch die Glanzleistung von **Newtons** Erklärung des „irdischen Apfelfalls“ schlummert, wonach die Massen der Objekte gegenseitig die Bahnen bestimmen. Grundlage aller Bahnen ist die Entfernung der Objekt-Mittelpunkte. Als Musterfall (s.o. Sommer-Winter-Distanz der Erde) und erste größere Einheit gilt:

die  **Hälfte des Erdbahndurchmessers** = 1 **Astronomische Einheit** (engl. AU für „unit“) = **149 597 900 km**.

Die Bahn des „Nicht-mehr-Planeten“ **Pluto** hat als fernsten Bahnpunkt z.B. **49 AE**.

Der Forschungs-Satellit Voyager1, gestartet im September 1977, ist im Januar 2021 bei ~185 AE auf dem Weg zu den Sternen in der Nachbarschaft unseres Sonnensystems. In rund 40 000 Jahren wird Voyager 1 vermutlich einem bestimmten roten Zwergstern begegnen – dann ~3.8 Lj von der Erde entfernt – wenn nichts dazwischen kommt.

**"Berühmte" Entfernungen: Lj = Lichtjahr / pc = Parsec**

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Nächster Stern: "Proxima Centauri"     | - 4.2 Lj = 1.3 pc            |
| Herkules-Kugelsternhaufen M13          | - 25 000 Lj = 7.7 K*pc       |
| Zentrum der Milchstraße                | - 26 700 Lj = 8.2 K*pc       |
| Andromeda-Galaxie M31                  | - 2 500 000 Lj = 7.6 M*pc    |
| Schwarzes (Mega)Loch M86               | - ~ 52 500 000 Lj = ~16 M*pc |
| Entfernteste Lichtquelle 2020 - Quasar | ~ 9 G*pc                     |

\* Kilo / Mega / Giga = x 1 000 / 1 000 000 / 1000 000 000

