

Archenhold Gymnasium

Besondere Lern-Leistung (BLL)

5. Prüfungskomponente Abitur

Fachbereich Physik (Bezf.: Geschichte)

Grenzen und Möglichkeiten der Untersuchung von Sternhelligkeiten mit photometrischen Messmethoden im Astronomie-Unterricht

Pablo Grimm

betreut durch
Herrn Carsten STOETER

12. Dezember 2016

Inhaltsverzeichnis

1 Fragestellung & Präambel	2
2 Vorbetrachtungen	3
2.1 Scheinbare Helligkeit eines Sterns	3
2.2 Einheit der scheinbaren Helligkeit	4
2.3 Zusammenhang mit der Strahlungsintensität	5
2.4 Extinktion	7
2.5 Kamerasysteme	9
3 Geschichte der Sternenbeobachtung	11
4 Beobachtung	13
5 Auswertung	14
5.1 SalsaJ	15
5.2 GIMP	16
5.3 Beurteilung	19
6 Literaturverzeichnis & Einzelnachweise	21

Zusammenfassung

Eine Machbarkeitsstudie zur photometrischen Helligkeitsanalyse von Sternen mit einfacher digitalerameratechnik.

1 Fragestellung & Präambel

*Himmlicher, als jene blitzenden Sterne, dünken uns die unendlichen
Augen, die die Nacht in uns geöffnet.*

- NOVALIS, Hymnen an die Nacht ^[11]

Fragestellung: Inwiefern ist die Beobachtung eines Sterns mithilfe von einfachen photometrischen Messmethoden betreffend seiner Helligkeit möglich?

Die Sternbeobachtung ist nicht nur eine Beschäftigung, die sich wortwörtlich sehen lassen kann, sondern durchaus auch ein komplexes Gebiet der Astrophysik. Als solches wird es im Schulunterricht Astronomie auch behandelt. Jedoch wird hier oft noch auf das bloße Schätzen von Helligkeiten und Sternfärbungen zurückgegriffen – was angesichts der immer weiter verbreiteten, hochauflösenden und hoch lichtempfindlichen Kamertechnik als nicht mehr zeitgemäß erscheint.

Mittlerweile ist es auch Schülern möglich, ohne großartige Verwendung von Teleskopen, sondern lediglich mit einer Kamera, Sterne nicht nur in Echtzeit am Himmel zu beobachten, sondern auch im Nachhinein mit technischen Mitteln gemachte Aufnahmen zu analysieren und daraus Rückschlüsse auf die Kenngrößen des betreffenden Sterns zu ziehen.

Die folgende Arbeit hat das Ziel, eben diese Möglichkeiten aufzuzeigen, ebenso, wie die derzeitigen Grenzen zu formulieren, mit einem Blick auf die Geschichte der Sternbeobachtung.

2 Vorbetrachtungen

2.1 Scheinbare Helligkeit eines Sterns

*Der Stern scheint hell,
doch ist's wie's scheint?
Vielleicht ist's ja doch
ein Gott, der weint.*

Sterne, die ihre abgestrahlte Energie aus Kernfusion gewinnen, strahlen mit einer bestimmten Leistung elektromagnetische Strahlung der verschiedensten Wellenlängenbereiche ab. Darunter findet sich auch die sogenannte *VIS-Strahlung* (vom englischen *visible*, sichtbar), welche als einziger Bestandteil des abgestrahlten Spektrums für das menschliche Auge sichtbar ist.

Die Helligkeit eines Sterns bezieht sich auf diese *VIS-Strahlung*. Bei der Helligkeitseinteilung wird zwischen absoluter und scheinbarer Helligkeit unterschieden. Während die scheinbare Helligkeit m von der Erde aus gemessen wird, handelt es sich bei der absoluten Helligkeit M um eine objektiv besser geeignete Größe zum Vergleichen von Sternen. Sie ist ein repräsentativeres Maß für die Helligkeit eines Sterns. Hierzu wird rechnerisch die scheinbare Helligkeit des Sterns in 10 Parsec ($3,086 \cdot 10^{14}$ km) Entfernung bestimmt. Die Beziehung der Größen m und M eines Sterns mit dem Abstand r zur Erde lässt sich wie folgt fassen:

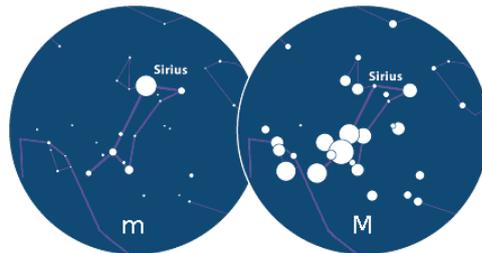


Abbildung 1: Vergleich zwischen scheinbarer und absoluter Helligkeit im Sternbild *Großer Hund*

$$m - M = -2,5 \cdot \lg \left(\frac{10 \text{ pc}}{r} \right)^2 \quad (1)$$

Dieser *Entfernungsmodul* genannte Zusammenhang ergibt sich aus dem WEBER-FECHNER-Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen physikalischen Größen und den Sinneswahrnehmungen dieser beschreibt. Die absolute Helligkeit M lässt sich also aus (1) wie folgt berechnen:

$$M = 5 \cdot \lg \left(\frac{10 \text{ pc}}{r} \right) + m \quad (2)$$

Die scheinbare Helligkeit wurde in der Antike erstmals durch HIPPARCH in Größenklassen unterteilt, die entsprechend ihrer Wertgröße dem menschlichen Auge nach linear eingeteilt sind. Je dunkler der Stern, desto größer der

numerische Wert seiner sogenannten Größenklasse. Der Polarstern entspricht so der Größenklasse 2,1. Mit der Zeit und den sich immer weiter verbessernden Beobachtungsmöglichkeiten wurde der ursprüngliche Rahmen von sechs Größenklassen aufgeweitet. Die Sonne war zum Beispiel nicht berücksichtigt, ihre scheinbare Helligkeit liegt nach dieser Einteilung bei rund -27. Auch immer dunklere Objekte konnten durch neue technische Möglichkeiten, wie größere Teleskope oder die Langzeitbelichtung einer Sternenaufnahme, entdeckt werden. Solch ein dunkles Objekt ist zum Beispiel der Zwergplanet Pluto, der mit seiner Größenklasse von knapp 14 aufgrund dieser niedrigen Helligkeit mit bloßem Auge nicht mehr erkennbar ist.^[1]

Die scheinbare Helligkeit eines Sterns oder anderen Himmelskörpers ist dabei von einigen Faktoren abhängig, wie der abgestrahlten Leistung eines Sterns und seinem Abstand zum Beobachter, wie in Abschnitt 2.3 erläutert wird. Auch die Erdatmosphäre am Beobachtungsort spielt eine erhebliche Rolle, da sie die Qualität der Beobachtungen massiv beeinflussen kann, worauf in Abschnitt 2.4 eingegangen wird.

2.2 Einheit der scheinbaren Helligkeit

*Ein Himmel voller Tränen,
so klein und doch so groß,
so nah und doch so fern,
ihre Zahl scheint endlos.*

Als Einheit der scheinbaren Helligkeit wurde von der Internationalen Astronomischen Union (*International Astronomical Union*) die Magnitude definiert. Sie gehört nicht zu den SI-Einheiten, da diese Größeneinteilung wie bereits erwähnt willkürlich gewählt und logarithmisch ist, was ganz allgemein den Umgang mit standardmäßig linearen photometrischen Messwerten erschwert. Durch den aus der menschlichen Wahrnehmung resultierenden Logarithmus im WEBER-FECHNER-Gesetz handelt es sich um eine dimensionslose Größe.

Nach Empfehlung der Internationalen Astronomischen Union sollte die Einheit mit *mag* abgekürzt werden, in der Anwendung für den Polarstern ergibt sich diese Form:

$$m_{\text{Polaris}} = 2,1 \text{ mag}$$

Von der Verwendung eines einfachen *m* wird abgeraten, um Vermischungen mit den Einheiten *Meter* oder gar *Minute* zu vermeiden, außerdem sollte auch auf die hochgestellte Schreibweise (über dem Komma) aus typographischen Gründen verzichtet werden. Diese sähe wie folgt aus:

$$m_{\text{Wega}} = 0,0^m = 0^m0$$

Nachdem festgestellt wurde, dass die Helligkeit des Polarsterns leicht um den Wert von 2,1 mag herum variiert, wurde der Stern Wega als Nullpunkt in der Einteilung der Magnitude gewählt. ^{[1],[2]}

2.3 Zusammenhang mit der Strahlungsintensität

*Quadratisch das Licht
vom Runden nimmt ab
so entfernt ist's so grell,
so schwach rinnt's hinab.*

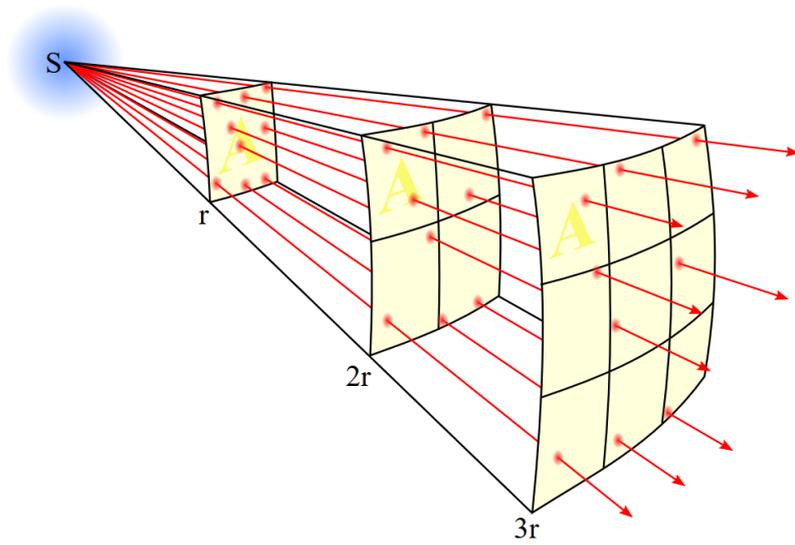
Strahlung jeder Art, die sich nicht in eine ausgezeichnete Richtung, sondern nach allen Seiten gleichmäßig ausbreitet, hat einige logische Charakteristika betreffend ihrer Intensitätsabnahme, so auch die Emissionen eines Sterns. Die Strahlungsintensität, ungeachtet der Wellenlänge der Strahlung, nimmt mit dem Quadrat des Abstandes zur Quelle ab, siehe Abbildung 2.

Dies liegt an der gleichmäßigen Verteilung der Strahlung in alle Richtungen, die gleiche Lichtmenge wird auf immer größer werdende Flächen verteilt. Bei der Strahlung eines Sterns geschieht dies kugelförmig. In der Formel für die Berechnung der Oberfläche einer Kugel lässt sich dieser Zusammenhang erkennen:

$$A_K = 4\pi r^2$$

Wird der Kugelradius, also hier der Abstand zum Stern linear vergrößert, so wächst die Oberfläche mit der zweiten Potenz des Abstands. Die Strahlung muss sich auf eine quadratisch wachsende Fläche verteilen, ihre Intensität nimmt daher mit der zweiten Wurzel (quadratisch) ab.

Wenn Sterne also untereinander verglichen werden sollen, ist die scheinbare Helligkeit eines Sterns von der Erde aus gesehen denkbar ungeeignet, da sich die sichtbaren Sterne betreffend ihres Abstands zur Erde massiv unterscheiden können und daher Sterne, die eigentlich heller sind, als dunkler erscheinen als lichtschwächere. Beispielsweise Zöllner (siehe Kapitel 3) kam bei dem Vergleich des Sterns Capella mit unserer Sonne zu dem Schluss, dass sich diese beiden in ihrer Größe und Helligkeit unterscheiden müssten, da sie in gleichem Abstand nicht gleich hell erschienen (Capellas Entfernung war durch die Parallaxe bekannt). ^{[1],[3]}



(a) schematische Visualisierung



(b) Beispiel mit einer Lampe an der Wand

Abbildung 2: Visualisierung der quadratischen Abnahme der Strahlungsleistung proportional zum Abstand

2.4 Extinktion

*Ach, wie viele Tränen
dörren aus im Flusse,
ihre Lichter erlöschen,
unsichtbar zum Schlusse.*

Innerhalb der Erdatmosphäre kommt es zu mehreren Vorgängen, die von Sternen ankommendes Licht auf seinem Weg zur Erdoberfläche und damit zum Beobachter beeinflussen. Diese atmosphärisch bedingten Beobachtungsbeeinträchtigungen werden allgemein als Extinktion, vom lateinischen *extinctio*, Auslöschung, bezeichnet.

Zu den grundlegenden, die Extinktion verursachenden Effekten gehören molekulare Absorption, die RAYLEIGH-Streuung und die Streuung an Aerosolen. Während die molekulare Absorption im sichtbaren Spektrum nur einen relativ geringen Teil der Extinktion ausmacht, so beeinflusst Streuung die Beobachtungsqualität doch erheblich.

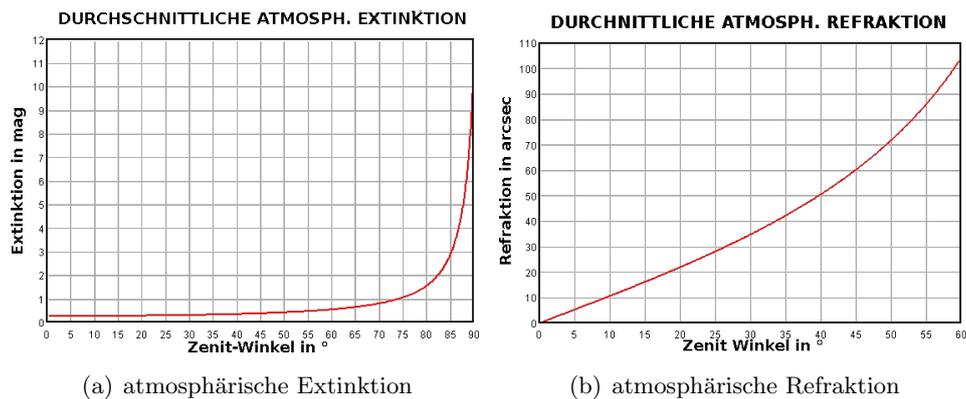


Abbildung 3: Extinktion und Refraktion in Abhängigkeit vom Zenit-Winkel

Umso näher ein beobachtetes Objekt dem Horizont ist, desto länger ist die Strecke, die sein Licht durch die Atmosphäre zurücklegen muss. Mit sinkender Objekthöhe über dem Horizont (größer werdendem Zenitwinkel) nimmt also die Streuung und damit die Extinktion zu. Zusätzlich zu einer entstehenden Diffusität werden hierbei kurzwellige Strahlungsbereiche anders gestreut als langwellige, sodass es in Horizontnähe zu Farbverschiebungen zugunsten längerer Wellenlängen kommt, was zu einer Rotfärbung in Horizontnähe und einem eher bläulichen Effekt führt.

Extinktion hängt auch mit der Zusammensetzung der Atmosphäre zusammen. Umso mehr Wassermoleküle sich in ihr befinden (Luftfeuchte), desto stärker ist die Streuung, Beobachtungen in den Wintermonaten sind also durchaus sinnig, da in dieser Zeit weniger Wasser über Verdunstung

in die Atmosphäre gelangt. Umso näher der Beobachtungsort an der Meereshöhe liegt, desto mehr Extinktion tritt auf, dies ist vergleichbar mit der zusätzlichen Wegstrecke durch die Atmosphäre, die durch den Zenitwinkel bestimmt wird, allerdings kann mit einer gewissen Höhe diesem Effekt entgegengewirkt werden, daher werden größere Teleskope oft in den Bergen errichtet. In Zenitnähe ist von Berlin-Brandenburg aus mit einer Extinktion von etwa 0,3mag zu rechnen. ^[4]

In den Kunstwissenschaften wird vor allem der durch RAYLEIGH-Streuung an Wassermolekülen hervorgerufene diffuse, farbstreuende Effekt als *Luftperspektive* bezeichnet. ^[5]

Die Luftfeuchte führt auch zu einem anderen Effekt, der eine Beobachtung beeinflussen kann, nämlich zu atmosphärischer Refraktion. Dieser Effekt hat jedoch nur geringe Auswirkungen auf die Beobachtung von Sternen, da diese als Punkte kaum verzerrt oder vergrößert werden können, wohingegen atmosphärische Refraktion bei der Kugelform des Mondes oder der Sonne beim Unter- oder Aufgang zutage tritt. ^[4]

Zusätzlich wird die Beobachtung in urbanen Ballungsräumen durch die sogenannte *Lichtverschmutzung* erschwert. Von Städten abgestrahltes Licht (Straßenbeleuchtungen, Wohnungen, Automobile, ...) wird an Aerosolen und Wassermolekülen reflektiert und lässt den Himmel heller erscheinen, sodass schwächere Sterne nicht mehr erkennbar sind. Daher ist es sinnvoll, um qualitativ hochwertigere Ergebnisse zu erzielen, die Beobachtungen außerhalb einer Stadt und deren Agglomeration durchzuführen.

2.5 Kamerasysteme

*Schon mannigfaltig Augen,
manch Mensch sowie Getier,
sah'n den funkelnd' Reigen,
suchten ihre Träume hier.*

Die Beobachtung von Sternen kann mit dem bloßen Auge erfolgen – jedoch wird dies unpraktisch, wenn es an die möglichst genaue Einteilung von Helligkeiten und Färbungen geht.

Den modernen photometrischen Messmethoden grundlegend ist die Verwendung von Bildsensoren, die Lichtimpulse in elektrisch verarbeitbare Signale umwandeln. Je nachdem, welcher Spektralbereich aufgezeichnet werden soll, werden unterschiedliche Sensortypen und -materialien verwendet. Für die Aufnahme von VIS-Strahlung, also Licht innerhalb des menschlichen Wahrnehmungsbereiches, wird in der Regel ein Silizium-Chip als Sensor verwendet. Umso größer die Strahlungsmenge ist, die auf den Sensor trifft, desto größer ist auch die entstehende Spannung am Sensor, also das Signal kräftiger. Dies geschieht annähernd linear. Dadurch ist ein wesentlicher Unterschied zum menschlichen Auge vorhanden, denn dieses nimmt Helligkeitsunterschiede ja logarithmisch wahr, wie in Abschnitt 2.1 erläutert.

Im Zuge dieser Arbeit soll es um die Heimumsetzung einer Beobachtung gehen, also soll hier nur über handelsübliche Digitalkameras gesprochen werden, die sich unter Umständen in einem Haushalt befinden können und nicht über spezifische Kameras für die Astronomie. Die von einer Kamera aufgenommenen Helligkeiten sind von mehreren Einstellungen abhängig, zu diesen zählen die Belichtungszeit, die Blende, der Weißabgleich und der Fokus. Die Belichtungszeit ist hier besonders wichtig für die Helligkeitsanalyse. Wird sie länger gewählt, so kann das Flackern eines Sterns besser kompensiert und in erster Linie auch ein lichtschwächerer Stern besser erfasst werden. Die Blende sollte so weit wie möglich geöffnet sein, um möglichst viel Licht auf den Sensor treffen zu lassen. Ein Weißabgleich ist zur realistischen Farbdarstellung von Sternen wichtig, hier sollte die Einstellung für Glühlampen-Licht gewählt werden, da dieses spektral dem Licht einer Sonne (also eines Sterns) recht nahe kommt. Der Fokus sollte im unendlichen liegen, um die Sterne scharf abzubilden. Eventuell kann der Fokus auch kurz davor gesetzt werden, sodass die Sterne unscharf erscheinen, die Pixel-Fläche des Sterns auf der Aufnahme lässt sich so vergrößern.

Ebenfalls wichtig ist die *ISO*-Einstellung, welche über die schlussendliche Empfindlichkeit des Sensors entscheidet und für Rauschen wesentlich mit verantwortlich ist.

Auch die Sensorgröße und das Objektiv beeinflussen die Messung, umso größer der Sensor ist, desto lichtempfindlicher ist er auch. Des Weiteren gibt es *lichtstarke* und *lichtschwache* Objektive, die durch ihren Aufbau Farbtreue, Kontrast und Lichtempfindlichkeit beeinflussen können. Ist das Objektiv wechselbar, so ist hierbei auf die Wahl eines geeigneten Objektivs zu achten.

Allgemein empfiehlt sich aufgrund ihrer naturgemäß hohen Lichtempfindlichkeit die Nutzung einer Spiegelreflexkamera mit einem CCD-Sensor, da diese in der Regel empfindlicher sind. Allerdings sind auch handelsübliche CMOS-Spiegelreflexkameras geeignet, da diese Sensoren in den letzten Jahren bezüglich ihrer Lichtempfindlichkeit verbessert wurden. ^[6]

Werden also die linearen Helligkeitswerte aus einer Kamera mit den logarithmisch eingeteilten scheinbaren Helligkeiten von Sternen in einem Diagramm dargestellt, so ist zu erwarten, dass sich in einem kartesischen Standard-Koordinatensystem mit linearen Achseneinteilungen eine logarithmische Kurve ergibt.

3 Geschichte der Sternenbeobachtung

*Seit Äonen die Menschen
blicken zu den Sternen,
dennoch sie konnten aus
den Tränen nichts lernen.*

Als der Homo sapiens begann, sich in größer werdenden Gruppen zu organisieren, Ackerbau und Viehzucht zu betreiben, begann er auch, auf natürliche Gesetzmäßigkeiten seiner Umgebung zu achten, auf alljährliche Regenzyklen, Tag- und Nachtrhythmen, die Jahreszeiten und die damit verbundenen Zeitpunkte für die Saat und die Ernte.

Schon aus dem alten Babylon ist bekannt, dass zum Zwecke der Einteilung eines Jahres und der Festlegung eben dieser Zeitpunkte Sternkalender angelegt wurden, ebenso wie Mondkalender. Auch von den alten Ägyptern ist Sternbeobachtung überliefert. Für sie war die Sonne eine Gottheit, die Sterne wiedergeborene *Dekane* und in Sternbildern verankerten sie ihre Mythologie. Ägyptische Astronomen waren der Forschung nach zumeist Priester. Von ihnen sind bereits sehr genaue und vielfältige Beobachtungen überliefert, sodass auch heutzutage die Sternbilder und Sternnamen der Ägypter in Verbindung zu ihrer Mythologie bekannt sind. Auch sind ihre Erkenntnisse für ihre Zeit bemerkenswert, so erkannten sie etwa, dass ein Jahr eine Länge von 365 Tagen und 6 Stunden habe, und Merkur und Venus sich um die Sonne drehten, während sich diese um die Erde drehe (etwa 400 vor unserer Zeitrechnung). [7]



Abbildung 4: ägyptische Astronomen

Wie bereits unter 2.2 erwähnt, geht die uns bis heute erhaltene Helligkeitseinteilung von Sternen und anderen stellaren Objekten auf HIPPARCH, einen griechischen Astronomen, der etwa von 190 bis 120 vor unserer Zeit lebte, zurück. Diese Einteilung in sechs *Größenklassen*, mit steigendem numerischen Wert kleiner werdend, wurde von Ptolomäus um 140 vor unserer Zeitrechnung noch um eine Fallunterscheidung zwischen kleinen und großen Sternen einer Größenklasse erweitert. Diese Einteilung blieb fast 1500 Jahre erhalten, bis zu Zeiten GALILEOS die ersten Fernrohre in den Himmel gerichtet wurden und durch diese lichtsammelnden Optiken Sterne entdeckt werden konnten, die mit bloßem Auge nicht erkennbar waren und somit über

die bisherige Einteilung in sechs Größenklassen hinausgingen. Das Hubble-Teleskop ist mittlerweile sogar in der Lage, Sterne der Größenklasse 31 aufzunehmen. [8]

Mitte des 19. Jahrhunderts¹ wurde es zunehmend dringender, eine tatsächliche mathematische Untergliederung für diese Größenklassen der Sternhelligkeit zu finden. Der Astronom Norman R. PROGSON von der Oxford-Universität kam 1856 zu dem Schluss, dass ein Stern einer Größenklasse rund 2,514-fach heller als ein Stern der numerisch nächst größeren Größenklasse sein muss (genau $10^{0,4}$ -fach). [9] Dieser als PROGSON-Verhältnis bezeichnete Faktor findet sich gerundet auch im bereits im Abschnitt 2.1 erwähnten *Entfernungsmodul*:

$$m - M = -2,5 \cdot \lg \left(\frac{10 \text{ pc}}{r} \right)^2 \quad (1)$$

Jedoch ist neben der mathematischen Beschreibung auch die praktische Umsetzung der Messung der Sternhelligkeit wichtig. Hierzu kann zum Beispiel die wegweisende Arbeit des deutschen Astronomen Karl Friedrich ZÖLLNER (1834 - 1882) herangezogen werden. Er kann als einer der Gründungsväter der Astrophysik betrachtet werden und ist dennoch, ungeachtet seiner wissenschaftlich beachtlichen Leistungen, kaum bekannt, was unter anderem seiner schwierigen Persönlichkeit anzurechnen ist.

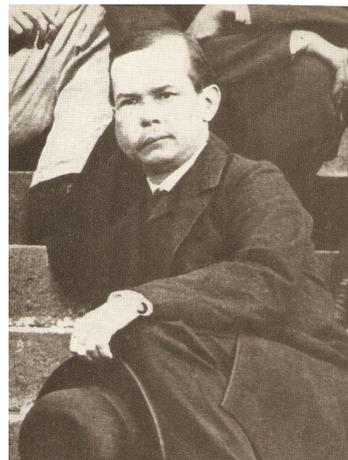


Abbildung 5: Karl Friedrich Zöllner, 1868

Als Pionier der Photometrie war er sich der Bedeutsamkeit seiner Arbeit durchaus bewusst, die er bereits in seiner Jugendzeit der Helligkeitsbeobachtung widmete.

Anlässlich einer Preisfrage der Wiener Akademie der Wissenschaften von 1857 entwickelte er das *Zöllnersche Astrophotometer*, welches bald weltweite Aufmerksamkeit errang. Im Jahre 1865 erschien ZÖLLNERS erweiterte Leipziger Habilitationsschrift mit dem Titel „*Photometrische Untersuchungen mit besonderer Rücksicht auf die physische Beschaffenheit der Himmelskörper*“, in der er Möglichkeiten aufzeigt, mithilfe spektroskopischer und photometrischer Messungen von Him-

¹Hinweis: Dieser historische Überblick gibt lediglich ein Bild der visuellen Beobachtung wieder, auf theoretische Arbeiten (z.B. KEPLERS Planetenbahnen) oder auch radiometrische Messungen wird hier keine Rücksicht genommen.

melskörpern Rückschlüsse auf ihre Beschaffenheit zu ziehen. Diese Arbeit kann als Beginn der modernen Photometrie gewertet werden. [3]

Es entwickelten sich immer genauere Messmethoden, die systematisch zwar eine hohe Genauigkeit boten, wie zum Beispiel das Fettfleck-Photometer nach Robert Wilhelm BUNSEN, aber dennoch nach wie vor vom menschlichen Auge abhingen. Erst im vergangenen Jahrhundert kam es zur Entwicklung der unter Abschnitt 2.5, Kamerasysteme erwähnten Messmethoden, die zuerst in größeren Observatorien angewandt wurden und somit erstmals eine lineare und wirklich objektive Messung ermöglichten. Die digitale Messtechnik ermöglicht bis heute einen direkten Zugriff auf erhobene Messdaten und so eine schnelle und vielfältige Analyse.

4 Beobachtung

*Sind's tatsächlich Tränen,
oder doch gefallene Seelen?
Ach welch lautes Querelen,
doch man kann's nicht sehen.*

Als Beobachtungsort wurde nach einem Gespräch mit Astrophotographen Kienbaum bei Grünheide östlich von Berlin ausgewählt. Die Beobachtung wurde am 27. November 2016 zwischen 21 und 22 Uhr auf einem anliegenden Feld bei den folgenden Koordinaten durchgeführt:

$52^{\circ}57'25,11''$ N, $13^{\circ}57'25,11''$ E

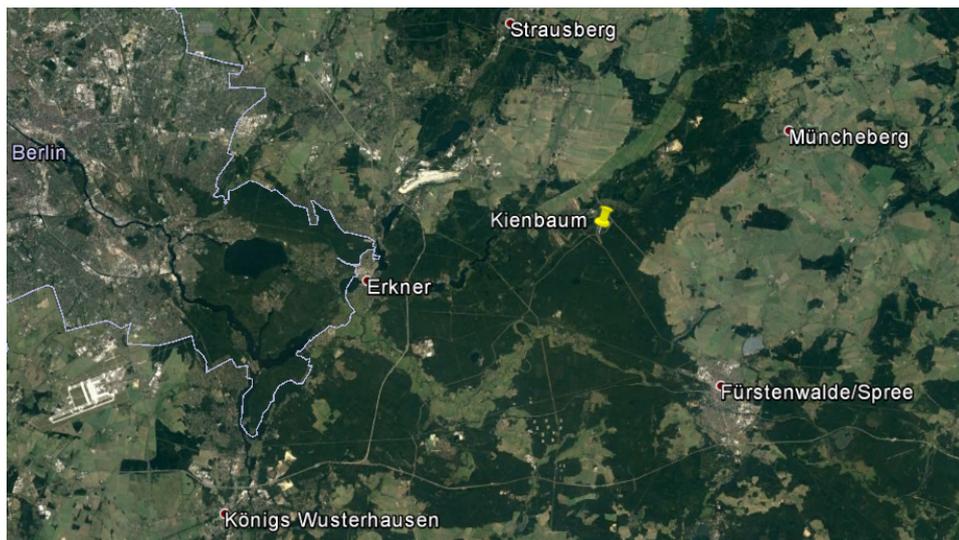


Abbildung 6: Beobachtungsort Kienbaum auf Karte

Die Bilder wurden mit einer *Panasonic* DMC-FZ18 (1/2,5-Zoll-Sensor) mit einer Brennweite von 5mm, einer Blende von 2,8, einer festen *ISO* von 1600 und einer Belichtungszeit von 6 Sekunden aufgenommen. Innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums wurden mehrere Sternbilder aufgenommen, die sich mehrheitlich innerhalb eines Zenitwinkels von 50 Grad befanden (Höhe über dem Horizont von $> 40^\circ$). Zu diesen gehören: Cepheus, Kassiopeia, Eidechse, Perseus, Dreieck, Giraffe, Stier, Fische und Pegasus.

Eine nahezu identische Beobachtung wurde zeitgleich der Kompaktkamera *Olympus* SZ-31MR durchgeführt, die Belichtungszeit betrug hier 4 Sekunden mit *ISO* 640 bei kleinstmöglicher Blende 3 (Sensorgröße 1/2,3 Zoll). Testweise wurde auch mit mehreren *Smartphones* versucht, Bilder aufzunehmen, dies scheiterte jedoch sowohl mit einem Huawei Ascend P8 lite, als auch mit einem Wiko U FEEL daran, dass die Sterne schlicht zu dunkel waren, um von dem kleinen Sensor entsprechender Optik erfasst zu werden.

5 Auswertung

*Durch Yggdrasils Krone herab
strahlt Asgards zahlreich' Licht,
keine Tränen sondern Welten
in Midgard weiß man's nicht.*

Vor, beziehungsweise während der Analyse der Sternhelligkeiten ist es wichtig zu wissen, welchen Himmelsausschnitt man betrachtet und welche Sterne in ihm zu sehen sind. Sollen die fotografierten Sterne ihren Namen und tatsächlichen Helligkeiten zugewiesen werden, so reicht eine Sternenkarte nicht mehr aus und eine Vergleichs-Datenbank wird notwendig. Hierzu wird im Folgenden das Programm *Stellarium* verwendet, da es den Sternenhimmel zu einem definierten Datum mit gegebener Uhrzeit rekonstruieren kann und so die Identifikation der Sterne erleichtert, die beobachtet wurden. Desweiteren sind zu jedem Stern umfassende Daten abrufbar, die für die Analyse und Fehlerrechnung der bestimmten Helligkeiten notwendig sind. Die Identifikation des Sterns ist immer parallel zur Helligkeitsbestimmung durchzuführen.

5.1 SalsaJ

Die für das EUHOU-Programm entwickelte Software wurde dafür ausgelegt, eine plattformunabhängige, mehrsprachige Erfahrung für Bild-Bearbeitung und Analyse im Klassenraum zu sein. [10]

Mithilfe der Java-Anwendung *SalsaJ* sollen im Folgenden die Helligkeiten der aufgenommenen Sterne analysiert werden. Dieses Programm wurde nach einem Hinweis aus dem Astronomie-Fachbereich gewählt. Bereits beim Importieren des aufgenommenen Bildes kommt es aber zum ersten Problem: Das Rauschen nimmt stark zu, wie in Abbildung 7 erkennbar ist.



(a) Original-Bild

(b) Bild nach Import in SalsaJ

Abbildung 7: Vergleich zwischen originaler und importierter Aufnahme

Eine Ursache für diesen Effekt war nicht aufzufinden, er tritt bei farbigen Bildern (RGB) genauso auf, wie bei Schwarz-Weiß-Bildern (bw). Eventuell liegt dies an einem ungeeigneten Eingabeformat (JPG). Um eine Verfälschung in der weiteren Verarbeitung zu vermeiden, lässt sich mit den in SalsaJ integrierten rudimentären Bild-Bearbeitungs-Funktionen der Kontrast und die Helligkeit so regeln, dass das Rauschen kompensiert wird. Dies wirkt sich allerdings auch auf alle anderen Helligkeitsinformationen im Bild aus und verzerrt so ein realistisches Bild der Messung.

Im einfach gehaltenen Benutzermenü lässt sich unter *Analyse* und dem Unterpunkt *Photometrie* die Funktion zur Helligkeitsanalyse von Sternen oder anderen fotografierten Objekten am Himmel finden. Mit einem Klick auf den Mittelpunkt eines Sterns erscheint im automatischen Modus eine kreisförmige Auswahl um den definierten Mittelpunkt. SalsaJ interpretiert diesen ausgewählten Helligkeitsbereich, indem es die Helligkeiten aller ausgewählten Pixel aufaddiert. Tabellarisch ausgegeben werden dann in einem gesonderten Fenster die Daten zu den ausgewählten Stellen im Bild:

- Objektnummer (programmintern)
- Name des Bildes

- Koordinaten der Auswahl im Bild (x, y)
- Sternintensität I_S
- Sternradius r_S
- Himmelsintensität I_H
- Himmelsradius r_H

Hier als Beispiel die bestimmten Daten zum Stern *Caph*:

Sternname	I_S	r_S	I_H	r_H	m
<i>Caph</i>	14833	22	25	33	2,26

Ich habe viel Zeit darauf verwendet, in diesen und den anderen Werten irgendeinen einheitlichen mathematischen Zusammenhang zu finden, eine Abhängigkeit zwischen Radius, sich daraus ergebenden Fläche und der Intensität, oder eine Proportionalität zwischen der vom Programm bestimmten Intensität und der tatsächlichen scheinbaren Helligkeit. Dies ist mir nicht gelungen.

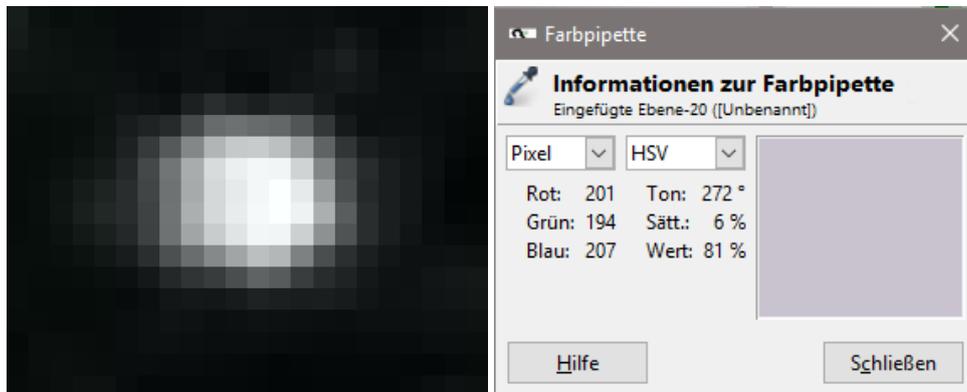
In Ermangelung einer adäquaten Dokumentation des Programms und nur mit dem Benutzerhandbuch ist es mir ebenfalls nicht gelungen, eine Lösung für dieses Problem zu finden.

5.2 GIMP

GIMP, kurz für *GNU Image Manipulation Program*, ist an sich ein rein auf die Bildbearbeitung ausgelegtes Programm. Als solches ist es in der Lage, auch Bilder im Format JPG problemlos zu importieren, sodass eine Korrektur der Helligkeit, beziehungsweise des Kontrastes, nicht notwendig ist und so keine Verfälschung des aufgenommenen Bildes erfolgt.

Im Gegensatz zu SalsaJ müssen hier Pixel manuell ausgewählt und ihre Farbwerte ebenfalls manuell übernommen werden. Während SalsaJ durch die Addition aller hellen Pixel, die das Bild des Sterns ergeben, versucht, die atmosphärische RAYLEIGH-Streuung „zurück zu rechnen“, beschränken wir uns auf den hellsten Pixel, der in den den Stern darstellenden Pixeln zu finden ist. Schließlich wird auch nur der Maximalwert der Helligkeit wahrgenommen. Für die Auswahl des hellsten Pixels wird das Werkzeug „Farbpipette“ verwendet. Wird die Umschalt-Taste während der Auswahl des Pixels gedrückt, so wird das in Abbildung 8b dargestellte Fenster geöffnet. Um zu bestimmen, welcher Pixel nun der hellste ist, wird die zweite Angabe zur Helligkeit per Drop-Down-Menü auf das Farbsystem *HSV* umgeschaltet, die mit „Wert“ beschriftete Angabe stellt grob die Helligkeit des Pixels dar, umso größer dieser Wert ist, desto heller der zugehörige Pixel.

Nachdem der hellste Pixel aufgefunden worden ist, sind nun die einzelnen



(a) herangezoomter Stern in seinen Pixeln (b) Pipetteninformationsfenster von GIMP mit RGB-Aufschlüsselung der ausgewählten Farbe

Abbildung 8: Eindrücke aus dem Analyseprozess mit GIMP

Farbwerte R (rot), G (grün) und B (blau) interessant, die die jeweilige Helligkeit dieses Farbteils auf einer Skala von 0 bis 255 angeben. Aus diesen drei Helligkeitswerten wird nun die durchschnittliche Helligkeit \bar{H} errechnet (die sich von der Helligkeit der *HSV*-Skalierung unterscheidet):

$$\bar{H} = \frac{H_R + H_G + H_B}{3} \quad (3)$$

Diese Helligkeit auf der 255er-Skala wird nun mit x , dem gesuchten absoluten Helligkeitsanteil von 100% ins Verhältnis gesetzt, welches dem Verhältnis von 100 Prozent und 255 entsprechen muss:

$$\frac{x}{\bar{H}} = \frac{100\%}{255} \quad (4)$$

$$x = \frac{\bar{H} \cdot 100\%}{255} \quad (5)$$

$$3 \Rightarrow x = \frac{(H_R + H_G + H_B) \cdot 100\%}{3 \cdot 255} \quad (6)$$

Für den Stern *Atik* im Sternbild *Perseus* bedeutet dies folgenden Wert x :

$$x = \frac{(198 + 204 + 202) \cdot 100\%}{3 \cdot 255}$$

$$x = 78,95\%$$

Werden jetzt entsprechend die x für viele Sterne errechnet, kann über die Darstellung in einem Diagramm, siehe Abbildung 9, mit der tatsächlichen zugehörigen scheinbaren Helligkeit m die für die Kamera spezifische logarithmische Funktionsgleichung $f_m(x)$ durch systematisches Ausprobieren bestimmt werden. So ergibt sich für $f_m(x)$ der Panasonic:

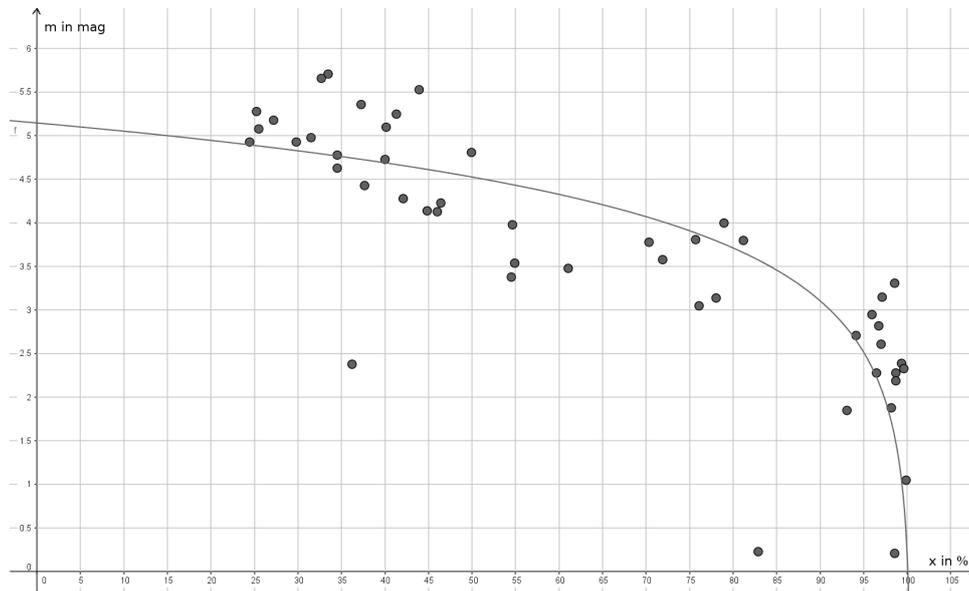


Abbildung 9: Pixelhelligkeits-Helligkeits-Diagramm

$$f_m(x) = 0,9 \ln(-(x - 25) + 75,4) + 1 \quad (7)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung lassen sich nun aus den Pixelhelligkeiten x die scheinbaren Helligkeiten m_R errechnen, hier wieder am Beispiel von *Atik*:

$$\begin{aligned} m_R &= f_m(x) = 0,9 \ln(-(78,95 - 25) + 75,4) + 1 \\ m_R &= 3,76 \text{mag} \end{aligned}$$

Der absolute Fehler dieses errechneten Wertes lässt sich durch Differenzbildung bestimmen. Es wird hierzu die scheinbare Helligkeit unter Berücksichtigung der Extinktion aus der Stellarium-Datenbank als Bezug gewählt. Für *Atik* liegt der absolute Fehler somit bei 0,24 mag. Die absolute Fehlerverteilung ist in Abbildung 10 als Boxplot-Diagramm dargestellt.

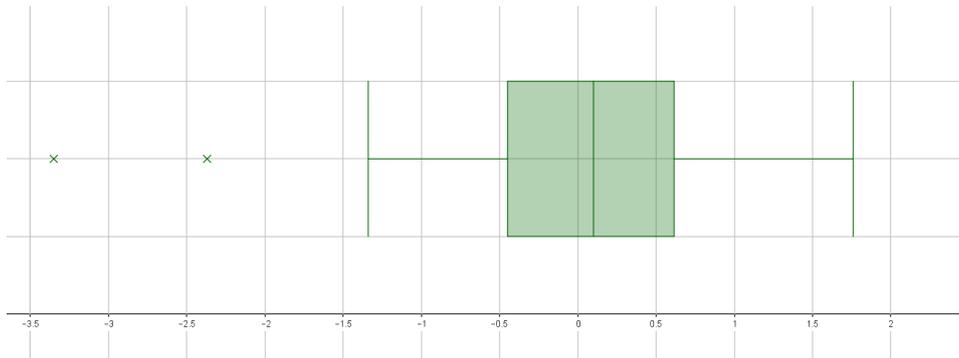


Abbildung 10: absoluter Fehler der errechneten scheinbaren Helligkeit

Genauso lässt sich die Funktion $f_m(x)$ für die Olympus-Kamera aufstellen:

$$m_R = f_m(x) = 0,9 \ln(-(x - 25) + 70) \quad (8)$$

Die Funktion für diese andere Kamera musste also nur leicht modifiziert werden, um wieder Ergebnisse in einem Fehlerbereich von durchschnittlich 0,5 mag zu erhalten. Aufgrund dessen, dass die Olympus-Kamera ein nahezu identisches Verhalten bei niedrigerer Lichtempfindlichkeit zeigt, soll hier auf Rechnungen bezüglich dieser Messwerte verzichtet werden. Im Anhang finden sich beispielhafte Messwerte aus der Auswertung mit SalsaJ und GIMP.

5.3 Beurteilung

Inwiefern ist die Beobachtung eines Sterns mit Hilfe von einfachen photometrischen Messmethoden betreffend seiner Helligkeit also möglich? Nun, moderne Digitalkameras vermögen es, ein qualitativ relativ gutes Ergebnis zu liefern. Ist erst einmal die Funktion $f_m(x)$ der Kamera bestimmt, lassen sich reproduzierbare Ergebnisse mit einer ziemlich hohen Genauigkeit erzielen. Mit den in Mobiltelefonen verbauten Kameras ist es derzeit noch nicht möglich, mit deren Aufnahmen eine sinnvolle Helligkeitsauswertung durchzuführen. Ob sich dies in Zukunft ändern wird ist angesichts der hohen Kompaktheit der Kamerasysteme in *Smartphones* anzuzweifeln.

Jedoch kann eine bessere Kompaktkamera schon einen guten Beitrag leisten. Tatsächlich fällt das Sensorrauschen bei der *Olympus* geringer aus, als bei der *Panasonic*. Trotz der geringeren ISO-Empfindlichkeit (in der analogen Fotografie früher die *Körnung*) der Olympus lassen sich mit der *Panasonic* vergleichbare Ergebnisse erzielen, da der Sensor um einiges empfindlicher ist. Die Verwendung einer kostenintensiven Spiegelreflexkamera ist also nicht zwingend notwendig, wenngleich hier auch keine Aussage getroffen werden kann, ob und wie sehr sich die Messresultate unterscheiden würden.

Ein verbliebenes Problem ist das starke Rauschen im Hintergrund, vor allem bei der Panasonic. Hierzu gibt es mögliche Lösungen, zum Beispiel das sogenannte *Stacken* von Bildern, bei dem zufälliges Rauschen entfernt wird, indem mehrere Bilder miteinander auf Kontinuitäten verglichen werden. Ich habe damit kurz experimentiert und SalsaJ beinhaltet auch eine Stacking-Funktion, habe mich aber dagegen entschieden, diesen Arbeitsschritt mit aufzunehmen, da er

für den Anwendungsbereich Schule keine fundamentalen Verbesserungen des vorliegenden Materials liefert. Sterne bis zu einer Größenklasse von 5 mag sind problemlos zu erkennen. Im näheren Bereich um die 0 mag kommt es teilweise zu einer Überbelichtung, wodurch Sterne als zu hell eingestuft werden. Bei diesen Präzedenzfällen und „Ausreißern“ lohnt sich eine Überprüfung an einem anderen Bild des gleichen Ausschnitts.

Auch zur Farbe eines Sterns kann, sofern gewünscht, eine Aussage getroffen werden, hierzu ist es allerdings unbedingt notwendig, die richtige Weißabgleich-Einstellung aktiviert zu haben, da es sonst zu einer farblichen Verschiebung kommen kann.

Was die Analyse der Sternhelligkeit angeht, so erscheint trotz eines gewissen Aufwandes die Verwendung von GIMP – oder einem anderen geeigneten Bildbearbeitungsprogramm – am praktischsten und auch intuitivsten. Von der Verwendung von SalsaJ ist zumindest hierfür abzusehen, denn obwohl die Idee hinter dem Programm gut ist, scheint es so, als ob es nie wirklich über die Projektphase hinaus gekommen sei.

Die vorangehend beschriebene Herangehensweise an die Aufgabe der Sternhelligkeitsbeobachtung ist dennoch zeitintensiv und mit einer gewissen thematischen Affinität verbunden, sodass sie sich unter Umständen nicht für den regulären Astronomie-Unterricht eignet, jedoch im Rahmen einer längerfristigen Hausaufgabe durchaus denkbar wäre. Möglich ist die grundlegende photometrische Helligkeitsanalyse jedoch allenfalls – sofern die oben genannten Kriterien für das Gelingen einer Aufnahme in einem ausreichenden Maße erfüllt sind (Vermeidung von Extinktion, bzw. Lichtverschmutzung, Belichtung, ISO-Wert, Blende, etc.). Somit kann die Leitfrage dieser Arbeit schlussendlich bejaht werden - es ist möglich.

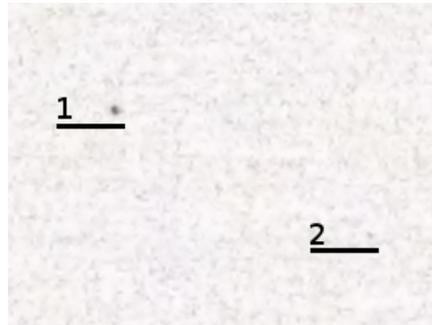


Abbildung 11: Rauschen mit zwei Sternen

6 Literaturverzeichnis & Einzelnachweise

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Besondere Lern-Leistung eigenständig, ohne fremde Hilfe angefertigt, sowie keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und Passagen der Facharbeit, die im Wortlaut oder sinngemäß anderen Werken entnommen wurden, mit einer Quellenangabe am Ende des betreffenden Absatzes kenntlich gemacht habe.

Pablo Grimm,
Berlin, den 12.12.2016

Literatur

- [1] „*Metzler Physik 12 Astrophysik*“, Ausgabe Bayern, 2012 Druck A¹, hrsgg. von Joachim Grehn und Joachim Krause, Bildungshaus Schulbuchverlage, Seite 84 ff.
- [2] Website der Internationalen Astronomischen Union, https://www.iau.org/publications/proceedings_rules/units/, 22.11.2016, 22:14 MEZ
- [3] „*Karl Friedrich Zöllner als Astrophysiker*“ von Dieter B. Herrmann, Berlin-Treptow 1976, hrsgg. von der Archenhold-Sternwarte Berlin-Treptow
- [4] <http://www.asterism.org/tutorials/tut28-1.htm>, 23.11.2016, 21:15 MEZ
- [5] <http://bib.gfz-potsdam.de/pub/wegezurkunst/momper/mompray1.htm>, 01.12.2016, 14:39 MEZ
- [6] Spektrum der Wissenschaft, <http://www.spektrum.de/pdf/aheu-04-12-s066-pdf/834706?file>, 10.12.2016, 14:18 MEZ
- [7] „*Lehrbuch der Astronomie*“, Abel Burja, Erster Band, Berlin 1794, Schoene Verlag, Seite 9
- [8] Sky & Telescope magazine, <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/the-stellar-magnitude-system/>, 03.12.2016, 13:02 MEZ

- [9] Wolfram MathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/PogsonsRatio.html>, 09.12.2016, 19:45 MEZ
- [10] Manual for SalsaJ, <http://www.euhou.net/docupload/files/software/manuel/SalsaJ.pdf>, Seite 3, 11.12.2016, 13:49 MEZ
- [11] Novalis, „*Hymnen an die Nacht*“, 1. Hymne, <http://www.zeno.org/Literatur/M/Novalis/Gedichte/Hymnen+an+die+Nacht/1.+%5BWelcher+Lebendige,+Sinnbegabte%5D>, 24.11.2016, 16:25 MEZ

GIMP: <https://www.gimp.org/>

Stellarium: <http://www.stellarium.org/de/>

SalsaJ: <http://www.euhou.net/index.php/salsaj-software-mainmenu-9>

GeoGebra: <https://www.geogebra.org/>

Abbildungen:

Abb. 1 von http://www.skyandtelescope.com/wp-content/uploads/Sirius_Mags_m.gif, bearbeitet, 03.12.2016, 12:55 MEZ

Abb. 2a von https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Inverse_square_law.svg, 05.12.2016, 18:33 MEZ

Abb. 2b von [http://www.ledmarkt24.de/mediafiles/Bilder/gu-10-unterschiedliche-abstrahlwinkel\(1\).jpg](http://www.ledmarkt24.de/mediafiles/Bilder/gu-10-unterschiedliche-abstrahlwinkel(1).jpg), bearbeitet, 24.11.2016, 16:58 MEZ

Abb. 3a und b von <http://www.asterism.org/tutorials/tut28-1.htm>, bearbeitet, 23.11.2016, 21:15 MEZ

Abb. 4 aus Littrow: Die Wunder des Himmels, Berlin 1910, bzw. <http://www.astronomische-vereinigung-augsburg.de/uploads/pics/aegypt1.jpg> 03.12.2016, 13:06 MEZ

Abb. 5 aus „*Karl Friedrich Zöllner als Astrophysiker*“ von Dieter B. Herrmann, Berlin-Treptow 1976, hrsgg. von der Archenhold-Sternwarte Berlin-Treptow

Abb. 6 aus Google Earth, © 2009 GeoBasis-DE/BKG, © 2016 DigitalGlobe

Abb. 7 a und b, 8a, 9, 10 und 11 wurden selbst aufgenommen oder erstellt (Diagramme mit GeoGebra).

Abb. 8b ist Teil der Benutzeroberfläche von GIMP 2.8