

Monitoring der diffusen Himmelshelligkeit bei Nacht

Jugend  forscht 2018



Moritz Wolf
Klasse 11
Gymnasium Balingen

Antonio Schmusch
Klasse 12
Technisches Gymnasium Balingen

Betreut von der Astronomie-AG des Progymnasiums Rosenfeld.

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract.....	1
2. Motivation der Erforschung.....	1
3. Durchführung.....	3
3.1 Aufnahmetechnik.....	3
4. Helligkeitskalibration.....	4
4.1 Fehlerabschätzung.....	7
5. Helligkeitsverläufe.....	7
6. Interpretation der Helligkeitsverläufe.....	10
6.1 Vergleich mit anderen Arbeiten.....	13
7. Ausblick.....	13
Literaturverzeichnis.....	14
Danksagung.....	15

Titelbild

Das Titelbild ist eine All-Sky Aufnahme, welche mit der Kamera Sony alpha 6000 und einem 190° Fisheye-Objektiv von Meike (6.5 mm f/2.0) am 14.08.2017 um 23:28 Uhr MESZ aufgenommen wurde. Die Belichtungszeit betrug 25 s bei ISO 3200. Diese Aufnahmetechnik wurde ebenfalls in dieser Forschungsarbeit verwendet. Das Bild zeigt den klaren Sternenhimmel, in welchem man deutlich die Milchstraße erkennen kann. Aufgenommen wurde es auf dem Schachen bei Münsingen. Der Himmel dieser Region gilt in Deutschland als verhältnismäßig dunkel. Der Himmel wird wenig von umliegendem Kunstlicht erhellt. Dennoch sind am Horizont die Lichtglocken der entfernten Städte als Aufhellung zu erkennen. Das Licht rechts oben stammt dabei aus den ca. 30 km entfernten Städten Tübingen und Reutlingen. Rechts unten ist das Licht der ca. 40 km entfernten Städte Albstadt und Balingen zu sehen. Die Aufhellung des linken Horizonts wurde durch den aufgehenden Mond verursacht. In der selben Richtung liegt jedoch auch die Stadt Ulm.

1. Abstract

Woher kommt die Helligkeit des Nachthimmels?

Neben natürlichen Faktoren wie den Gestirnen, dem Airglow und dem Zodiakallicht beeinflussen vor allem künstliche Faktoren wie Straßen- und Gewerbebeleuchtung die nächtliche Himmelshelligkeit. Diese sogenannte „Lichtverschmutzung“ gerät aufgrund ihrer Ausdehnung in den letzten Jahren und ihrer Schädlichkeit für Mensch und Tier weiter in den Fokus der Forschungen.

In dieser Arbeit wird die Himmelshelligkeit und deren Verlauf über verschiedene Zeiträume hinweg mit einer Kamerastation, welche auf einem Hausdach im Zollernalbkreis installiert wurde, dokumentiert. Das automatisierte Kamerasystem nimmt jede Nacht in Intervallen All-Sky Aufnahmen des Himmels auf, aus welchen sich nach einer Helligkeitskalibration mit einem Sky-Quality-Meter die Himmelshelligkeiten in mag/arcsec² berechnen lassen.

Durch zeitliche Korrelation der Helligkeitskurve mit sichtbaren Lichtquellen auf den Fotos lässt sich der Einfluss einiger Quellen bestimmen. Beispielsweise hat das Einschalten einer naheliegenden Flutlichtanlage eine Aufhellung des Himmels von 45 % zur Folge. Unter optimalen Bedingungen ist der Himmel über Dotternhausen zweimal so hell wie die natürliche Himmelshelligkeit, abends sogar um den Faktor zehn.

2. Motivation der Erforschung

Der nächtliche Himmel weist auch komplett ohne Kunstlicht eine gewisse Helligkeit auf. Verantwortlich hierfür sind natürliche Quellen wie hauptsächlich der Mond, die Sterne und die Milchstraße. Aber auch ohne die Gestirne ist der Nachthimmel, abgesehen von künstlicher Beleuchtung, nicht komplett dunkel. Das sogenannte Airglow (engl., Nachthimmelsleuchten), was das Leuchten höherer Atmosphärenschichten bezeichnet, hellt den Nachthimmel ebenfalls auf. Bei Betrachtung von außerhalb der Erdatmosphäre erscheint das Airglow als leuchtende Ringe in der Ionosphäre auf einer Höhe zwischen 90 – 500 km über dem Erdboden. Eine weitere Quelle ist das Zodiakallicht, welches als eine diffuse, schwach leuchtende permanente Erscheinung längs der Ekliptik wahrgenommen werden kann. Es entsteht durch Reflexion und Streuung von Sonnenlicht an Partikeln der interplanetaren Staub- und Gaswolke, welche als dünne Scheibe in der Planetenebene die Sonne umgibt. In Mitteleuropa ist der bedeutendste Faktor für die Himmelshelligkeit bei Nacht aber das von Menschen verursachte Kunstlicht, was den Nachthimmel erheblich erhellt. Diese Aufhellung des Nachthimmels durch künstliche Lichtquellen wird als „Lichtverschmutzung“ oder auch „Lichtsmog“ bezeichnet. Dabei wird das Licht in der Atmosphäre durch die Luftteilchen gestreut. In einer klaren Nacht weist der Himmel mit den Sternen und dem natürlichen Himmelsleuchten eine Helligkeit von etwa 0,001 Lux auf, was Menschen als Dunkelheit wahrnehmen. Durch starke Straßenbeleuchtungen jedoch steigt die Beleuchtungsstärke um das 100000 fache auf 100 Lux, wobei bei Vollmond die Helligkeit ohne Kunstlicht etwa 1 Lux beträgt¹. In den letzten Jahren nimmt dieser Lichtsmog immer weiter zu, weshalb die Lichtverschmutzung immer weiter in den Fokus der Forschung gerät. So nahm sowohl die Intensität der künstlichen Aufhellung als auch die Ausdehnung der beleuchteten Fläche seit 2012 weltweit um ca. 2 % pro Jahr zu². Auch der neue Lichtverschmutzungsatlas 2016 zeigt, dass mehr als 99% der Bevölkerung Europas unter lichtverschmutztem Himmel lebt und 60 % die Milchstraße am Nachthimmel nicht mehr sehen können³. Auf der Weltkarte des Atlas lassen sich vor allem dicht bevölkerte und industriell weit entwickelte Teile der

1 Dr. Ebel, M., Erdmann, A., Erdmann, U., Dr. Müller, O., Dr. Reichl, J. (Hrsg.): Ökologie, Braunschweig 2013, S. 144f

2 Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J., Guanter, L.: Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent, Science Advances 2017; Bd. 3, Nr. 11

3 Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., Furgoni, R.: The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances 2016; Bd. 2, Nr. 6

Welt wie Nordamerika, Europa und Gebiete im Süden Asiens mit hoher Lichtverschmutzung erkennen. Neben der Himmelsbeobachtung der Astronomie sind aber auch Menschen und Tiere und deren Gesundheit von der Aufhellung der Nacht durch Kunstlicht betroffen. So ist durch die Lichtverschmutzung beispielsweise die Bestäubung der Pflanzen durch nachtaktive Insekten bedroht, da diese durch künstliches Licht beeinträchtigt werden. Blüten unter künstlicher Beleuchtung werden um rund zwei Drittel weniger häufig von Insekten, die diese bestäuben, besucht, als in Dunkelheit liegende Blüten. Als Folge dessen reduziert sich die Samenbildung der Pflanzen und somit deren Fortpflanzung⁴. Desweiteren führen solche künstliche Beleuchtungen zur Desorientierung bei Insekten und wirken dabei wie Insektenfallen, da sich die Tiere an heißen Oberflächen der Lampen verbrennen oder desorientiert um die Lampe schwärmen und dabei vor Erschöpfung sterben. Von der Lichtverschmutzung betroffen sind beispielsweise auch die Zugvögel, von welchen zwei Drittel bei Nacht fliegen. Bei ihrem Flug orientieren sie sich am Sternenhimmel. Bei klarer Sicht fliegen sie relativ hoch und werden kaum vom Kunstlicht beeinträchtigt. Bei schlechter Sicht hingegen beenden die Vögel ihren Flug und suchen geschützte Orte am Boden auf. Dabei werden sie vom Kunstlicht angezogen und kollidieren mit Glasfassaden oder fliegen bis zur Erschöpfung umher. Generell haben künstliche Lichtquellen einen negativen Einfluss auf die natürliche circadiane Rhythmik. Durch die leistungsstarken Straßenlaternen, welche Licht von über 100 Lux erzeugen und damit für Lebewesen fast genauso intensiv wie Sonnenauf- und untergang sind, verlängern sich die Hellphasen. Dies hat einen negativen Einfluss auf die Ruhe- und Aktivitätsphasen sowie auf die Zeitmuster von Fortpflanzungs- und Nahrungsverhalten bei Tieren¹. Für die Menschen können sich gesundheitliche Probleme aufgrund von künstlichen Lichtquellen ergeben. Der maßgebende Tag-Nacht-Rhythmus, welcher das tägliche Leben taktet, wird beeinträchtigt. Beispielsweise wird das Ruheshormon Melatonin nur bei Dunkelheit produziert, was zur Folge hat, dass viele Menschen aufgrund der künstlichen Beleuchtung nicht mehr in die nächtlichen Ruhephasen kommen. Desweiteren führt zu viel Kunstlicht bei den Menschen zu Schlafstörungen, Stress und Aggressivität, einem erhöhten Krebs- und Herzinfarktrisiko, sowie psychischen Erkrankungen⁵.

Zur Messung und Dokumentation der Himmelshelligkeit gibt es bereits einige Stationen in Deutschland. Oft messen hierbei Sensoren wie ein Sky Quality Meter die Helligkeit des Himmels. Die Sternwarte Sankt Andreasberg führt zum Beispiel vergleichende Messungen an zwei Orten aus, welche etwa 15 km Luftlinie auseinander liegen. Die Himmelshelligkeit wird hierbei mit Sensoren in einer Messstation in Lux gemessen und anschließend mit den Werten des anderen Standortes in einem Diagramm verglichen.⁶

In dieser Arbeit wird ebenfalls die Himmelshelligkeit im Verlauf einiger Nächte dokumentiert. Hierfür nimmt eine Systemkamera jede Nacht in Intervallen All-Sky Aufnahmen auf. Aus den medianen 16 Bit Zählwerten im Vergleich zu den parallel gemessenen SQM-Werten lässt sich dann eine Funktion aufstellen, mit welcher man aus den Kamerazählwerten die Himmelshelligkeit berechnen kann. Somit muss die Helligkeit mit dem SQM nur einmal aufgenommen werden, um das Verhältnis zwischen Himmelshelligkeit und Zählwerten der Kamera zu ermitteln. Die Messung der Himmelshelligkeit anhand der Kameraaufnahmen hat den Vorteil, dass zu den Helligkeitswerten auch eine All-Sky Aufnahme vorhanden ist. Dadurch lässt sich beispielsweise eine Abschaltung von Beleuchtungen durch die sich ändernden Helligkeitswerte erkennen und dazu auf den parallelen All-Sky Aufnahmen nachweisen. Somit lassen sich auch andere Einflüsse auf die Helligkeit des Nachthimmels bestimmen, u.a. Wolken. Ein weiterer Vorteil ist die Gliederung der Kamerawerte in Rot, Grün und Blau. So lässt

4 Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, Ch., Hörler, M., Fontaine C.: Artificial light at night as a new threat to pollination. Nature 2017; 548: S. 206-209

5 <https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/lichtverschmutzung/mensch-und-natur.html>: 13.01.2018, o.V., Folgen der zunehmenden Lichtverschmutzung

6 <http://www.astro-electronic.de/lightmeter.htm>: 11.01.2018, Koch, M., Vergleichende Messung der Himmelshelligkeit in Herzberg am Harz und St. Andreasberg

sich der Farbverlauf des Himmels im Laufe einer Nacht dokumentieren und bestimmen, welchen Einfluss verschiedene Lichtquellen sowie Witterungsverhältnisse darauf haben. Außerdem können mit der Kamerastation Wetterverlauf, helle Meteore, Flugzeuge und Satellitenspuren aufgenommen werden, was mit reinen Helligkeitssensoren nicht möglich wäre.

3. Durchführung

3.1 Aufnahmetechnik

Eine Kamerastation soll jede Nacht den Himmel aufzeichnen und auf besondere Ereignisse, wie beispielsweise Meteore überwachen. Die Aufnahmen sollen außerdem von der Station automatisch auf die diffuse Helligkeit des Himmels ausgewertet werden. Damit die Kamerastation jede Nacht Bilder von dem aktuellem Himmel machen kann, müssen die Instrumente in der Station entsprechend vor Witterungen und starken Temperaturschwankungen geschützt werden. Nach vielen Tests einzelner Komponenten wurde ein erster Prototyp gebaut (s. Abb.1).



Abb. 1 Erster Prototyp der Kamerastation auf einem Hausdach in Dotternhausen im Zollernalbkreis

In einer Plastikbox mit aktiver Belüftung wurde die Systemkamera Sony alpha 6000 installiert. Ein All-Sky Objektiv schaut dabei durch eine Acrylglasshalbkugel mit dem Durchmesser von 10 cm, welche mit Epoxidharz in den Deckel der Box eingelassen wurde. Ein Laptop mit dem Betriebssystem Windows 10 ist über USB mit der Kamera verbunden und kann diese darüber ansteuern. Über LAN kann der Computer mit der Software Teamviewer aus der Ferne angesteuert werden. Die Station wird mit ~230V Strom versorgt. Während einer einmonatigen Testphase auf einem Hausdach in Dotternhausen wurden Mängel der Station dokumentiert und Verbesserungen geplant. Ein großes Problem stellte die Ansteuerung der Kamera und die anschließende automatische Auswertung dar. Unter Windows ließ sich das Interagieren verschiedener Programme nur schwer oder nicht realisieren. Ein weiteres Problem stellte die Acrylglasshalbkugel dar, da diese bei

entsprechender Witterung beschlug und somit keine qualitativen Aufnahmen der Kamera mehr möglich waren. Dieses Problem würde man auch im Winter bei Schneefall erwarten, da dieser auf der Acrylglasshalbkugel liegen bleiben würde.



Abb. 2 Zweiter Prototyp in Aluminium-Box

Bei dem Umbau der Station zu einem zweiten Prototyp (s. Abb. 2) wurden Lösungen für diese Probleme ausgearbeitet und umgesetzt.

Die Plastikbox wurde durch eine Aluminiumkiste ersetzt. Ein Heizdraht beheizt die Acrylglasshalbkugel mit einer Leistung von etwa zwei Watt. Das Computersystem wurde von Windows auf Ubuntu/Linux 16.04 LTS umgestellt, da bei Linux eine zeilenbasierende Kommunikation zwischen den einzelnen Programmen möglich ist und diese auch autonom ausgeführt werden können. Ein USB-Thermometer misst alle fünf Sekunden die Temperatur bei der Kamera in der Station und speichert diese Werte ab. Dies dient einerseits zur Überwachung der Innentemperatur der Station,

andererseits ist es möglich, mit diesen Daten die Aufnahmebedingungen zu rekonstruieren und eventuell das thermische Rauschen der Kamera einzuschätzen. Mit SSH ist eine Fernsteuerung über IPv6 als auch eine graphische Steuerung mit dem Programm X2Go Client möglich. Es wurde ein Pythonskript geschrieben, welches die aktuelle Sonnenuntergangszeit für den entsprechenden Ort berechnet und die Aufnahmeserie für die folgende Nacht automatisch startet. Die Kamera nimmt alle 60 s ein Bild auf und belichtet dabei mit ISO 1250, 25 s lang. Anschließend speichert sie das Bild im Raw-Format der Kamera mit einer Farbtiefe von 16 Bit auf dem Computer ab. Die Einstellungen der Kamera werden nicht verstellt, da dies eine unberechenbare Änderung der Daten bedeuten würde. So ist es momentan noch nicht möglich während der Vollmondzeit zu beobachten, da die Bilder bei entsprechendem Wetter überbelichtet wären. Bashskript wertet nach der Aufnahme eines Bildes diese automatisch aus. Es koordiniert über das Terminal die einzelnen Verarbeitungsschritte der Bilder. Es benennt die Bilder nach YYYY-MM-DD_hh-mm-ss der Aufnahmezeit um. Anschließend konvertiert es mit UFRaw die RAW-Bilder der Kamera in das für andere Programme lesbare TIFF-Format um. Da die Bilder von der Kamera willkürlich gedreht abgespeichert werden, analysiert das Skript mit ImageMagick die Bilder entlang von Hotpixeln im Bild und dreht es anschließend einheitlich. Um den Speicherplatz zu verringern, setzt das Skript den nicht benutzten Teil des Bildes auf 0 (Schwarz). Durch eine verlustfreie Komprimierung wird somit die Speichergröße eines Bildes von 120 MB auf 67 MB reduziert. Für einen runden Bereich von 20° werden die 16 Bit Zählwerte der Pixel für Rot, Grün und Blau bestimmt. Daraus ergibt sich für jeden Farbbereich ein Grasstufenwert zwischen 0 und 65535. Aus diesen Zählwerten wird der Medianschnitt errechnet. Dies verhindert, dass Sterne, Hotpixel oder andere Objekte mit in die Messungen einfließen und diese dadurch verfälschen. Die Ergebnisse werden anschließend mit Datum und Uhrzeit in eine Textdatei geschrieben. Mit einem Sky Quality Meter (SQM) wurde in mehreren Nächten parallel zu den Aufnahmen der Station die Helligkeit des Himmels im Zenit gemessen. Das SQM misst die Helligkeit in einem Kegel mit einer Halbwertsbreite der Empfindlichkeit (FWHM) von 20° in mag/arcsec² (Magnituden pro Quadratbogensekunde). Mit diesen Daten kann somit der Zählwert der Kamera in diese Einheit umgerechnet werden (s. Auswertung). Der zweite Prototyp läuft seit dem 10.12.2017 zuverlässig. In Planung befindet sich der Bau einer weiteren Station, welche an einem anderen Ort aufgestellt werden soll. Dies ermöglicht, es die Daten der zwei Stationen zu vergleichen oder, im Falle einer besonderen Sichtung am Himmel, das Objekt zu triangulieren und somit genauere Informationen über die Flugbahn des Objekts zu erhalten. Ein weiteres Skript stellt das aktuellste Bild auf eine Webseite, auf der es öffentlich angeschaut werden kann.⁷

4. Helligkeitskalibration

Um die Helligkeitsmessung der Kamera wissenschaftlich vergleichbar zu machen, muss die Helligkeit in einer eindeutigen Einheit angegeben werden. Die Einheit des Sky Quality Meters (mag/arcsec²) eignet sich dafür. Um die Zählwerte der Kamera in diese umrechnen zu können, benötigt man die Kalibrierungsmessungen, welche in mehreren Nächten zu unterschiedlichen Witterungen gemacht wurden. Das Ergebnis besteht aus 81 Messungen mit dem SQM, welche parallel zu den Aufnahmen der Kamera in Richtung Zenit gemacht wurden. Trägt man nun die Zählwerte von Rot, Grün und Blau gegenüber den Ergebnissen des SQMs auf, so ergibt sich folgendes Diagramm (s. Abb.3).

7 <http://www.allthesky.com/allsky>: 14.01.2018, Credner, T., All-Sky

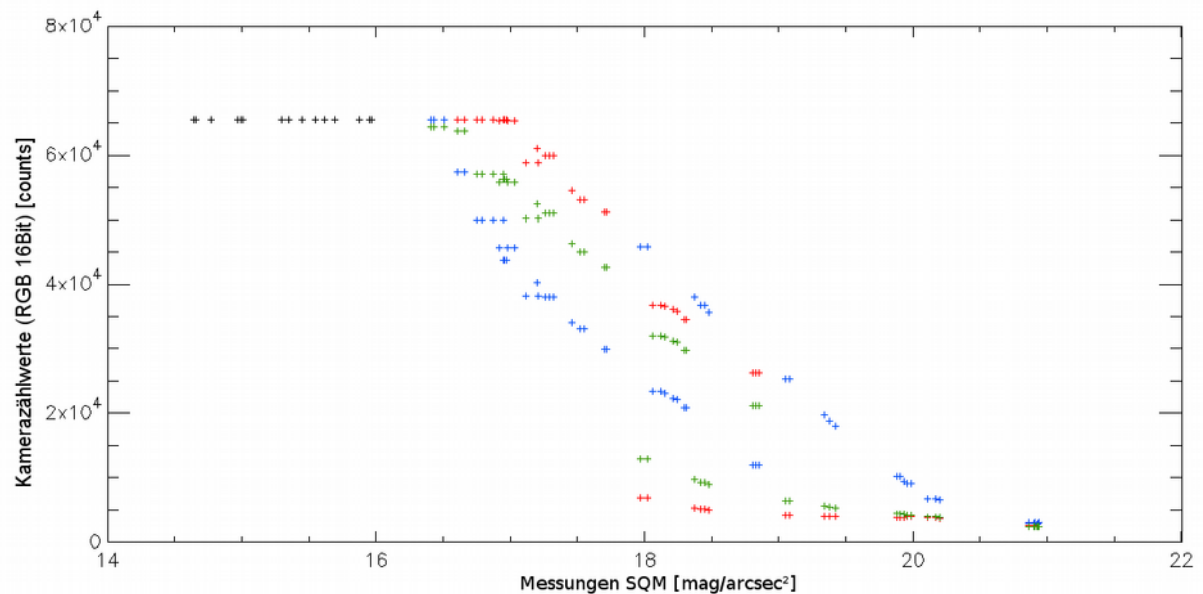


Abb. 3: Das Diagramm zeigt den Wert des SQMs gegenüber der Kamerazählwerte Rot, Grün und Blau. Eine klare Funktion ist nicht zu erkennen. Die Punkte bei dem Zählwert 65535 stellen den überbelichteten Bereich dar.

Da das SQM die visuelle Helligkeit misst (Grün und Blau durch einen Cyan-farbenen Filter)⁸, die Kamera jedoch zusätzlich noch Rot, ergeben sich im Diagramm diese starken Abweichungen bei den roten Kamerawerten. Aufgrund dessen werden für die weitere Vorgehensweise nur die grünen und blauen Zählwerte betrachtet. Um nun eine Funktion für die Berechnung der Himmelshelligkeit anhand der grünen und blauen Kamerazählwerte zu bestimmen, sollen die blauen und grünen Datenpunkte möglichst auf eine gemeinsame Kurve gebracht werden. Um dies zu erreichen, werden die Werte mit unterschiedlichen Gewichtungen zusammengezählt. Bei der Gewichtung der Grün-Werte mit 0,55 und entsprechend der Blau-Werte mit 0,45 ergibt sich die schmalste gemeinsame Kurve der Datenpunkte (s. Abb.4).

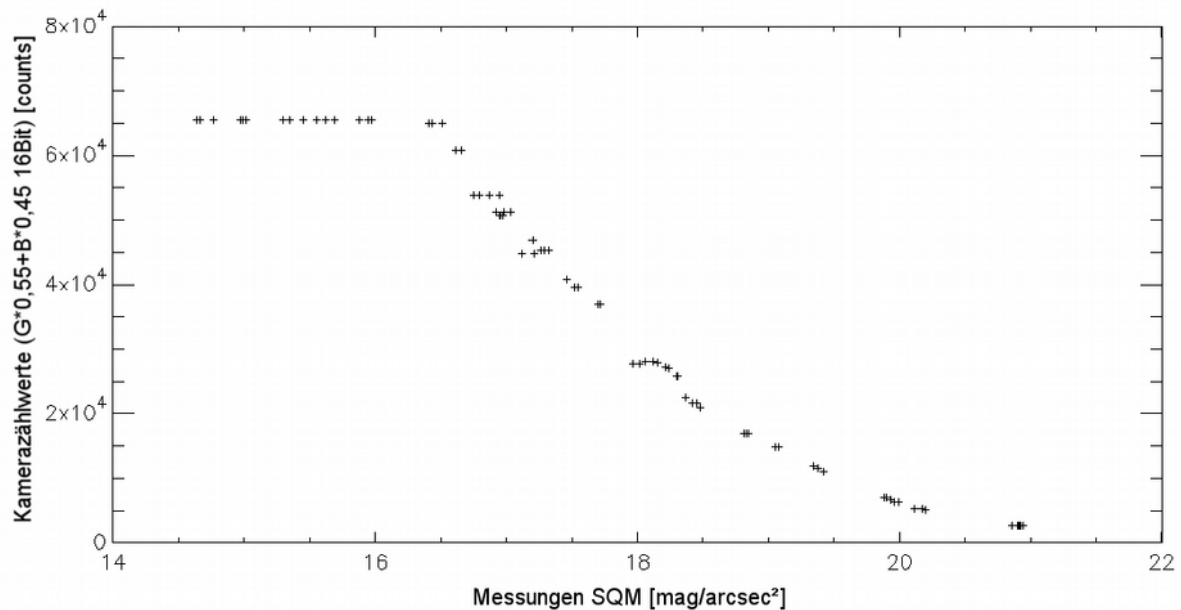


Abb. 4: Das Diagramm zeigt die Messungen des SQMs gegenüber der Gewichtung des grünen Kamerazählwertes von 0,55 und dem blauen mit 0,45. Es ergibt sich eine gleichmäßigere Kurve als in Abb. 3

Im nächsten Schritt wird der Gesamtwert k aus $\text{Grün} \cdot 0,55$ und $\text{Blau} \cdot 0,45$ zur Basis zehn logarithmiert, um zu überprüfen, ob der Graph mit einem Polynom beschrieben werden kann. Durch das Logarithmieren sollte sich dann eine Gerade ergeben. Um bei der Regressionsgeraden keine Verfälschung zu erhalten, werden die Kamerazählwerte der überbelichteten Aufnahme aussortiert. Im Schaubild wurden alle Werte über 60000 gewählt bzw. in der logarithmischen Darstellung alle über $\log_{10}(60000) = 4,778$. Nachdem die logarithmischen Kamerazählwerte bis $\log_{10}(60000)$ gegen die jeweiligen SQM-Werte aufgetragen wurden, lässt sich der Graph in zwei Bereiche teilen: Bei den Kamerawerten $\log_{10}(13000)$ hat der Graph offensichtlich eine andere Steigung als bei den Werten von $\log_{10}(13000)$ bis $\log_{10}(60000)$. Deshalb werden zwei lineare Funktionen für die spätere Berechnung der SQM-Werte aus den Kamerazählwerten durch lineare Regression aufgestellt. Hierfür werden in die Geradengleichung der Form $k = m \cdot x + b$ (k = Kamerazählwert aus $G \cdot 0,55 + B \cdot 0,45$; m = Steigung; x = SQM-Wert; b = y-Achsenabschnitt) die entsprechenden Werte eingesetzt, welche sich aus der Berechnung aus den Datenpunkten des Graphens ergaben. Somit erhält man die Funktionen

$$k_1(x) = -0,414229 \cdot x + 12,080188 \quad x = (\log_{10}(k) - 12,080188) / -0,414229$$

$$k_2(x) = -0,250650 \cdot x + 8,971015 \quad x = (\log_{10}(k) - 8,971015) / -0,250650$$

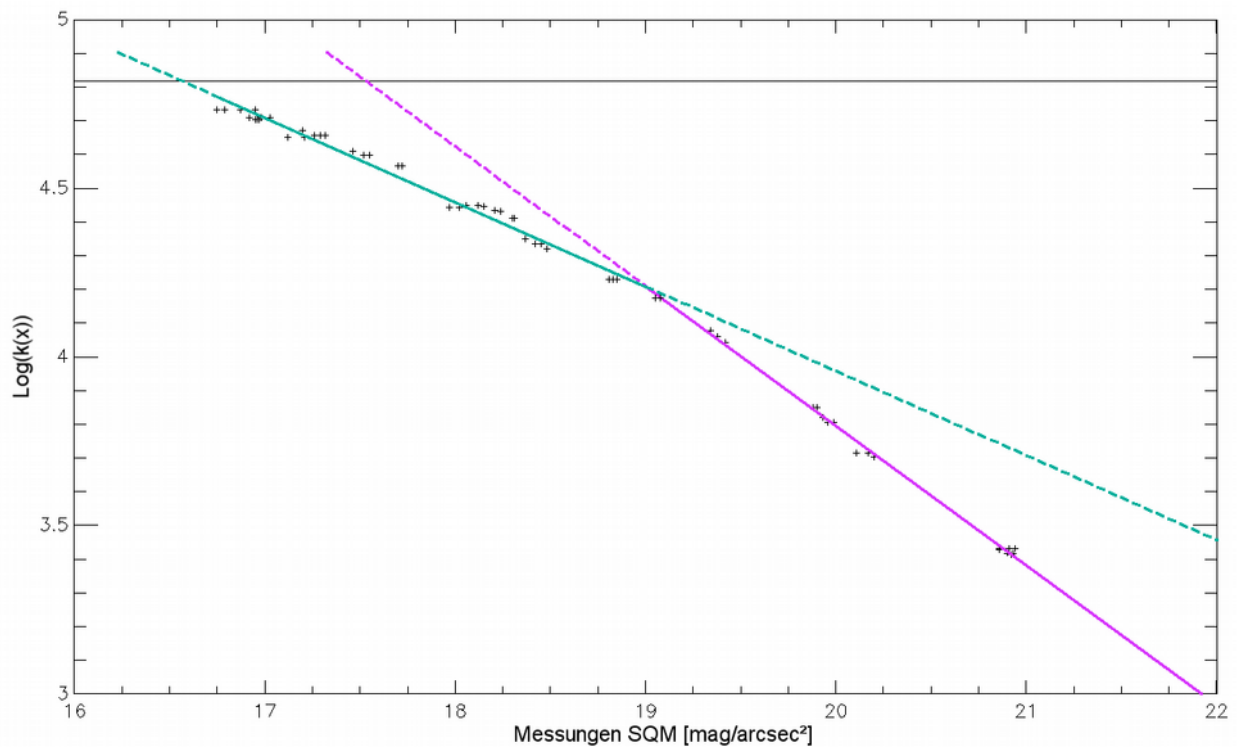


Abb. 5 Die violette Funktion stellt $k_1(x)$ dar. Die türkise Funktion $k_2(x)$. Die schwarzen Punkte sind die logarithmierten Kamerazählwerte mit der Gewichtung der Farbbereiche Grün*0,55+Blau*0,45. Es ist deutlich zu erkennen, welche Punkte zu der entsprechenden Funktion k_1 oder k_2 zuzuordnen sind.

x ist hierbei der SQM-Wert, während $k(x)$ bzw. k den Kamerazählwert aus $G*0,55 + B*0,45$ beschreibt. Berechnet man nun den Schnittpunkt dieser Geraden, so erhält man $x = 19,007$ (SQM-Wert) und $k(x) = 16101$ (Kamerazählwert). Dies bedeutet nun, dass man für Kamerazählwerte aus $G*0,55 + B*0,45$ kleiner als 16101 die Funktion $k_1(x)$ und für Kamerawerte größer als 16101 die Funktion $k_2(x)$ verwenden muss. Für den Wert 16101 können beide Funktionen verwendet werden, da dieser - wie oben beschrieben - der Schnittpunkt der Geraden ist und somit in beiden Funktionen den identischen Wert annimmt.

4.1 Fehlerabschätzung

Wie in Abb. 5 zu erkennen ist, haben die Datenpunkte eine leichte Abweichung von der Regressionsgeraden der Funktionen $k_1(x)$ und $k_2(x)$. Die Standardabweichung bei den logarithmischen Kamerazählwerten beträgt bei der Funktion $k_1(x) \pm 0,013 \text{ mag/arcsec}^2$ und die mittlere Abweichung bei den SQM-Werten beträgt $\pm 0,037 \text{ mag/arcsec}^2$. Bei der Funktion $k_2(x)$ beträgt die Standardabweichung bei den logarithmischen Kamerazählwerten $\pm 0,023 \text{ mag/arcsec}^2$ während die mittlere Abweichung $\pm 0,101 \text{ mag/arcsec}^2$ bei den SQM-Werten beträgt.

Ein weiterer Punkt ist die Zuordnung der medianen Kamerazählwerte zu den parallel dazu gemessenen SQM-Werten. Die Belichtungszeit der Kamera beträgt 25 s, mit dem SQM wurden jedoch etwa drei Messungen pro Minute gemacht. Somit werden einem Kamerawert mehrere Werte des Sky Quality Meters zugeordnet. Das führt später zu minimalen Abweichungen bei den Regressionsgeraden. Bei der Funktion $k_2(x)$ ist dieser Effekt deutlicher, was man in Abb. 5 erkennen kann: Bei manchen Kamerazählwerten sind mehrere Datenpunkte bei dem gleichen Kamerazählwert und unterschiedlichen SQM-Werten. Der Effekt ist bei der Funktion $k_2(x)$ höher, da die Himmelselligkeit in der Dämmerung, wo sich die Helligkeit am schnellsten ändert, generell am höchsten ist und die Funktion $k_2(x)$ für die höheren Werte verwendet wird.

5. Helligkeitsverläufe

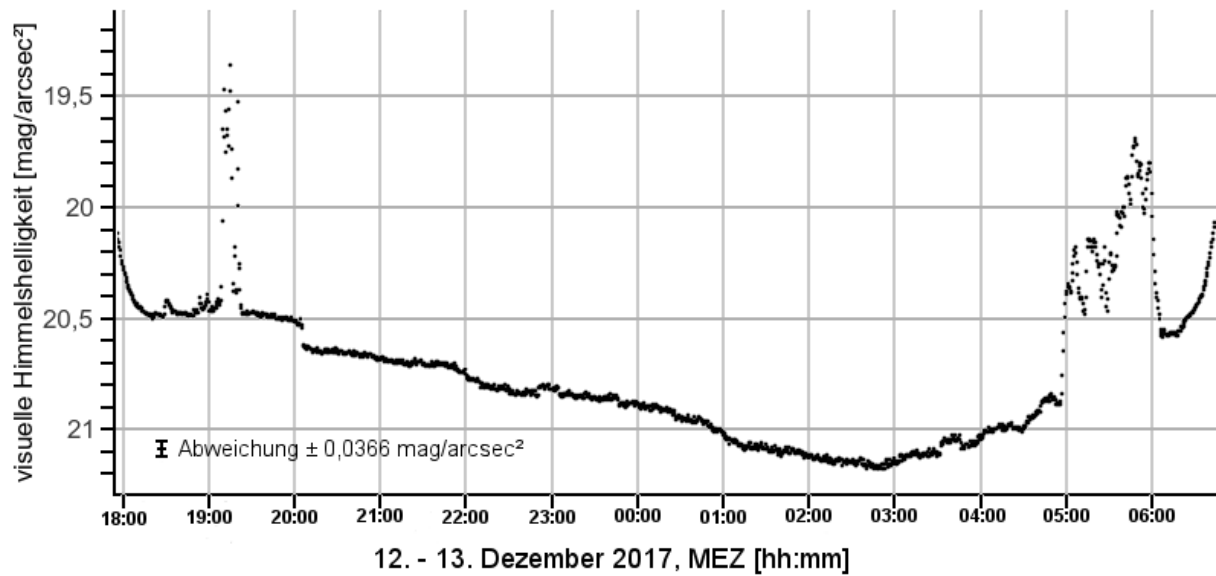


Abb. 6

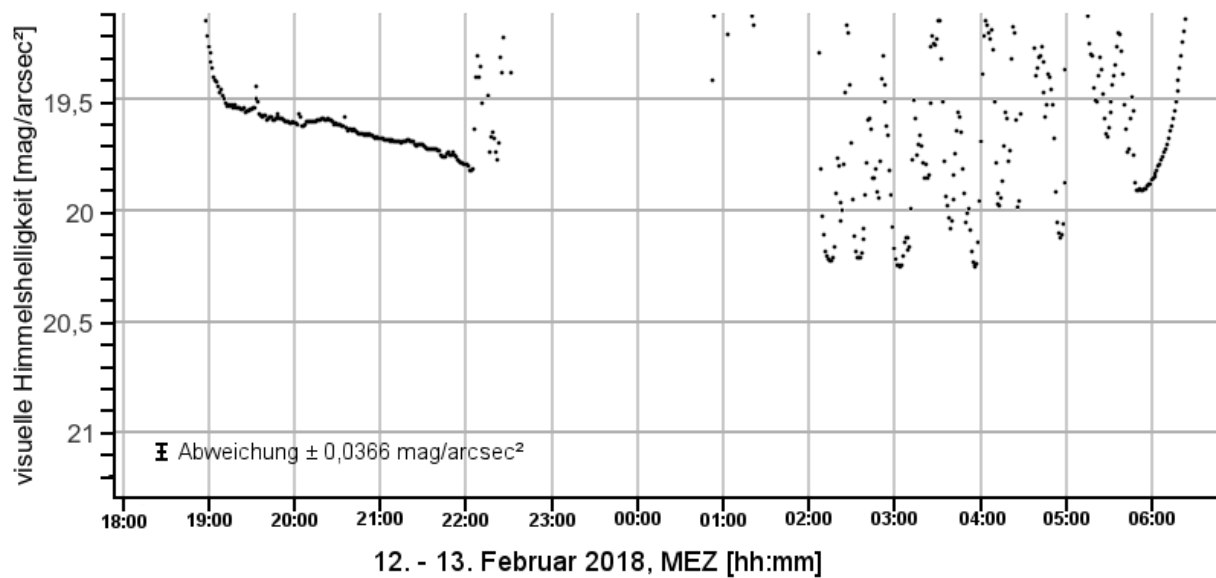


Abb. 7

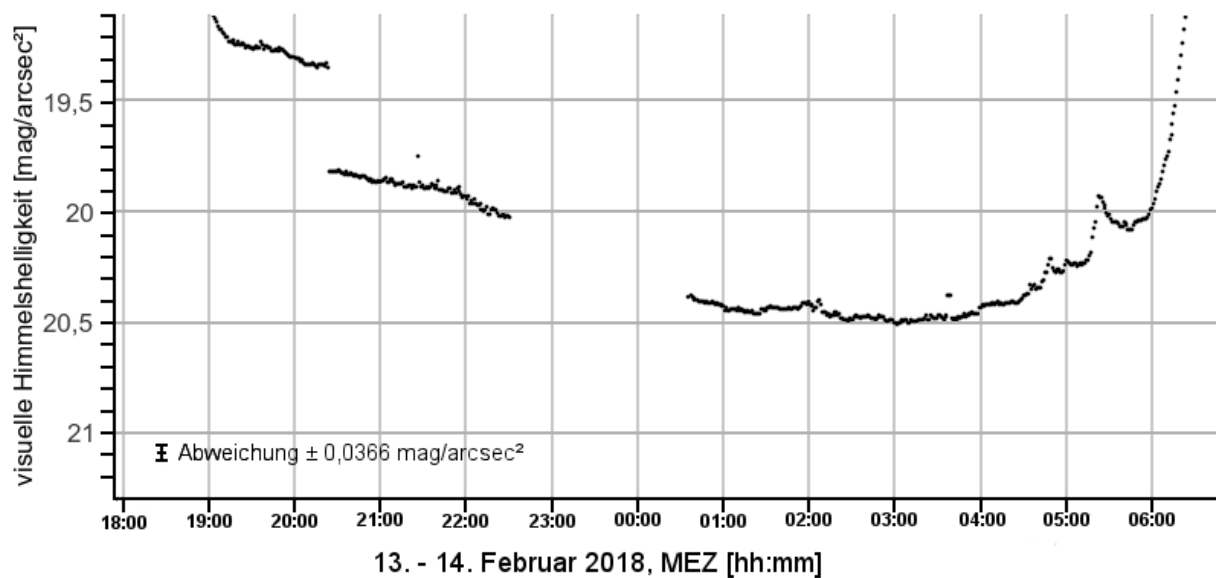


Abb. 8 Zwischen 22:30 Uhr und 00:30 Uhr trat ein Fehler in der Kamerastation auf, weshalb Datenpunkte in diesem Zeitraum fehlen.



Abb. 9: Das Bild zeigt die eingeschalteten Flutlichter des Sportplatzes (unten). Ein Beleuchtungskörper aus der Nachbarschaft strahlt ebenfalls messbar in den Himmel. Das Bild wurde um 12,77 (12.12.2017 18:33:17 Uhr) aufgenommen.



Abb. 10: Das Bild wurde kurz nach der Abschaltung des Flutlichtes um 12,84 (12.12.2017 20:06:17 Uhr) aufgenommen.

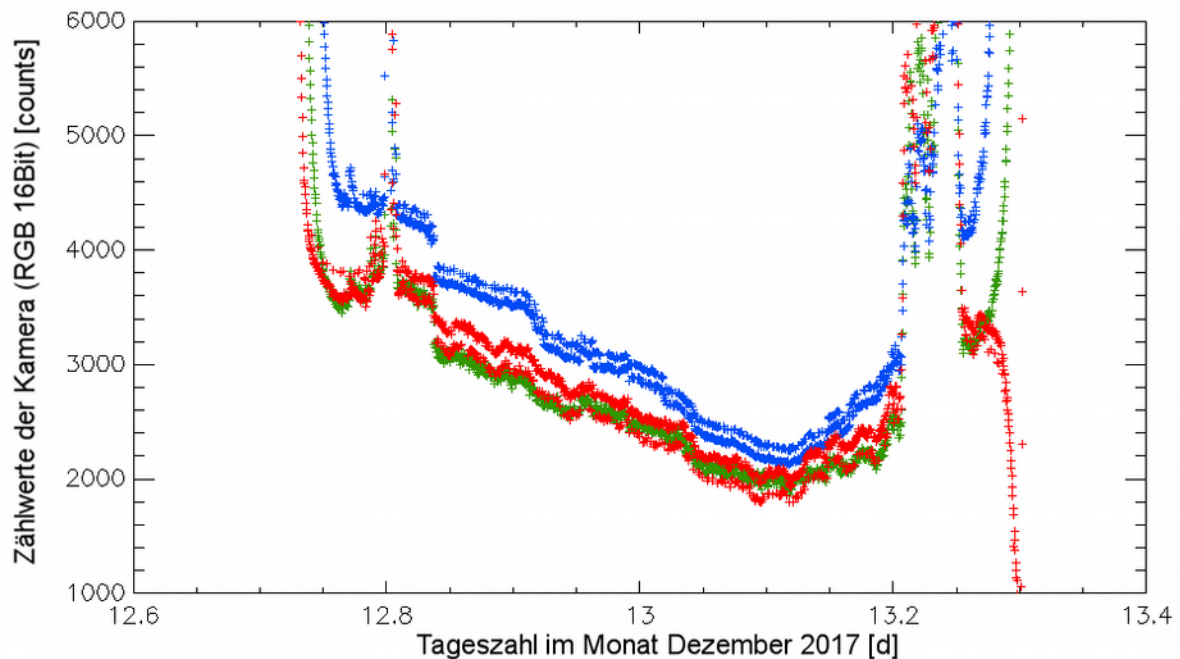


Abb. 11 Diese Abbildung zeigt den Farbverlauf von Rot, Grün und Blau, in der Nacht vom 12. auf den 13.12. 2017.

In Abb. 11 verlaufen die blaue und rote Farbkurven doppelspurig. Dies ist ein nicht gewollter Effekt. Ein Test, in dem der unbelichtete Bereich der Bilder untersucht wurde, bestätigte, dass der Fehler durch die kamerainterne Verarbeitung zustande gekommen ist. Diese Dopplung trat ausschließlich in dieser Nacht auf. Vermutet wird ein Zusammenhang mit dem Intervall, da dieses in der Nacht vom 12. -13.12.2017 auf 30 s

gestellt wurde. In Abb. 11 ist ein weiterer Fehler in der Morgendämmerung bei der roten Kurve zu erkennen. Die Helligkeit sinkt erst gegen null und steigt anschließend schnell wieder an. Dieser Effekt ist bisweilen jedoch nur in der Morgendämmerung aufgetreten. Verantwortlich ist auch hier eine unbekannte kamerainterne Verarbeitung. In der Abenddämmerung verläuft die rote Kurve erwartungsgemäß.

6. Interpretation der Helligkeitsverläufe

Vergleicht man die Helligkeitsverläufe der einzelnen Nächte (s. S. 8) mit den Bildern der Kamera, so haben Wolken einen starken Einfluss auf die Himmelshelligkeit. Deutlich wird dies in der Nacht vom 12. - auf den 13. Februar (Abb. 7). Dort ziehen ab 22:00 Uhr Wolken auf und die Helligkeit nimmt um bis zu $-2,7 \text{ mag/arcsec}^2$ zu. Nach dem Ende der Astronomischen Dämmerung, in Abb. 6 um 18:38 Uhr und in Abb. 7, 8 um 19:27 Uhr, nimmt die Helligkeit bei klarem Himmel relativ gleichmäßig ab. Diese kontinuierliche Verdunklung ist größtenteils durch Beleuchtungsabschaltungen zu erklären. Um diese genauer zuordnen zu können, wurden in der Nacht vom 12. auf den 13. und vom 13. auf den 14. Februar Intervallaufnahmen vom Plettenberg auf die umliegenden Gemeinden gemacht. Wie auf den Vergleichsaufnahmen in Abb. 12 zu sehen ist, werden zwischen 21:10 Uhr MEZ und 03:00 Uhr viele Beleuchtungsabschaltungen von Gemeinden, Firmen und auch Privathäusern getätigt. Durch die Zeitrafferaufnahmen mit der GoPro-Kamera konnten diese Abschaltungen zeitlich genau zugeordnet werden:



Abb. 12: Diese Bilder wurden vom Plettenberg mit einer GoPro HERO4 Kamera aufgenommen. Das obere Bild wurde am 12.02 um 21:10 MEZ aufgenommen. Das untere mit einem zeitlichen Versatz von sechs Stunden (13.02 um 03:00). Die Bilder wurden mit ISO 800 20 s belichtet.

Gemeinde Dotternhausen:

- 21:30 Uhr MEZ Abschaltungen im Gewerbegebiet ($+0,01 \text{ mag/arcsec}^2$).
- 22:10 Uhr MEZ Abschaltungen von Firmenbeleuchtung. (nicht messbar)
- 23:53 Uhr MEZ Abdimmung der Straßenbeleuchtung im Neubaugebiet. (am 12.12.2017 $+0,03 \text{ mag/arcsec}^2$.)
- 05:18 Uhr MEZ Hochdimmung der Straßenbeleuchtung im Neubaugebiet. (nicht messbar)
- Bei dem großen Zementwerk Holcim (links in Abb. 12) konnten keine sichtbaren Abschaltungen festgestellt werden.

Gemeinde Dormettingen (Entfernung zur Kamerastation ca. 2 km):

21:53 Uhr MEZ Teilabschaltung heller Firmenbeleuchtung „Weckenmann Anlagentechnik“ (nicht messbar).

22:00 Uhr MEZ Teilabschaltung Firmenbeleuchtung „Weckenmann Anlagentechnik“ (+0,02 mag/arcsec²).

23:00 Uhr MEZ Abschaltungen von Firmenbeleuchtung. (nicht messbar)

Keine Abschaltungen der Straßenbeleuchtung.

Stadt Rosenfeld Entfernung zur Kamerastation ca. 8,5 km)

00:12 Uhr MEZ Teilabschaltung der Straßenbeleuchtung.

00:30 Uhr MEZ Gesamtabeschaltung der Straßenbeleuchtung. (In diesem Zeitraum stärkerer Abfall der Helligkeit (s. Abb. 6))

Erzingen bei Balingen (Entfernung zur Kamerastation ca. 4 km)

20:06 Uhr MEZ Einschaltung des Sportplatzflutlichtes. (-0,02 mag/arcsec²)

21:41 Uhr MEZ Abschaltung des Sportplatzflutlichtes. (+0,03 mag/arcsec²)

Der bisherige dunkelste gemessene Zeitpunkt war am 13. Dezember 2017 um 02:50 Uhr MEZ mit 21,17 mag/arcsec² (s. Abb. 6). Weitere dunkle Zeitpunkte waren am 22. Dezember 2017 um 01:21 Uhr MEZ mit 21,07 mag/arcsec² und am 23. Januar um 03:25 Uhr MEZ mit 20,92 mag/arcsec². Der Großteil der dunkelsten Zeitpunkte der jeweiligen Nächte lag zwischen 03:00 – 04:00 Uhr MEZ. In einigen Nächten gibt es aber aufgrund von Bewölkung oder Aufgang des Mondes Abweichungen zu dieser Zeitspanne.

Ein weiterer Punkt der Analyse war die Bestimmung des prozentualen Einflusses bestimmter Lichtquellen. Die Veränderung der Himmelshelligkeit um fünf Magnituden bedeutet eine Änderung um den Faktor 100 des Lichtflusses. Da die Skalierung der Magnituden logarithmisch erfolgt, hat eine Änderung um eine Magnitude eine Erhöhung oder Reduzierung um den Faktor 2,512 zur Folge. Mit einer entsprechenden Formel lässt sich nun anhand der Differenz der Helligkeitswerte bestimmen, um wie viel Prozent der Himmel durch die Lichtquelle heller ist:

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{\frac{m_1 - m_2}{2,5}}$$

Setzt man für m_1 den gemessenen Wert bei angeschaltetem Flutlicht = 19,33 mag/arcsec² ein und für m_2 den Helligkeitswert bei ausgeschaltetem Flutlicht = 19,81 mag/arcsec², so erhält man als Differenz 0,48 mag/arcsec². Nach dem Einsetzen dieser Werte erhält man das Ergebnis 1,55. Dies bedeutet nun, dass der Himmel durch das Flutlicht um ca. 55 % heller ist als ohne das Flutlicht. Bei Betrachten der entsprechenden Bilder aus dem parallel von dem Plettenberg aus aufgenommenen Zeitraffer ist eine leichte Nebelbildung zu erkennen. Streuung an den Nebelteilchen verstärkt den Einfluss der Lichtverschmutzung. Bei klaren Wetterbedingungen ist der Einfluss mit 13 % deutlich geringer.

Des weiteren lässt sich vergleichen, um wie viel Prozent die künstliche Beleuchtung den Nachthimmel gegenüber der natürlichen Himmelshelligkeit erhellt. Geht man von dem dunkelsten gemessenen Wert bei klaren Wetterbedingungen von 21,17 mag/arcsec² aus und vergleicht diesen mit dem Wert 22 mag/arcsec², welcher ausschließlich durch natürliche Faktoren zustande kommt¹⁰, so erhellen die künstlichen Lichtquellen den Nachthimmel zu seinem dunkelsten Zeitpunkt um mehr als den Faktor zwei. Vergleicht man den Helligkeitswert kurz nach der Astronomischen Dämmerung ebenfalls bei klaren Wetterbedingungen, so hat das Kunstlicht eine Erhöhung der Himmelshelligkeit um den Faktor 9,5 zur Folge.

9 Gondolatsch, F., Steinacker, S., Zimmermann, O.: Astronomie Grundkurs, Stuttgart 1999, S. 133f

10 Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., Furgoni, R.: The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances 2016; Bd. 2, Nr. 6

Ist das naheliegende Flutlicht eingeschaltet, so erhellen die Kunstlichtquellen den Himmel nach der Astronomischen Dämmerung um den Faktor 12,4. Flutlichter von Sportanlagen haben einen dominierenden Einfluss auf die Himmelshelligkeit¹¹.

Außerdem spielen die Entfernungen der Lichtquellen eine große Rolle, da je nach Luftlinie die Lichtquelle einen anderen Einfluss auf die Himmelshelligkeit hat. Beispielsweise erhöht sich die Himmelshelligkeit nach dem Abschalten der 334 m Luftlinie entfernten Flutlichtanlage um + 0,13 mag/arcsec², während das Abschalten des 4 km entfernten Flutlichtes eine geringere Erhöhung von + 0,03 mag/arcsec² zur Folge hat.

Betrachtet man den Verlauf der Farben in einer Nacht, so bemerkt man starke Unterschiede zwischen den roten und blauen Farbkanälen. Ist der Himmel klar, wie es in der Nacht vom 12.12 auf den 13.12.17 war, so dominiert über die Nacht das blaue Licht. Dies ist deutlich in Abb. 11 zu erkennen, da dort der Zählwert des blauen Spektrums immer über dem des roten liegt. Betrachtet man jedoch eine Nacht, in welcher sich Wolken und klarer Himmel ablösen, so erkennt man, dass bei bedecktem Himmel der rote Anteil höher ist (s. Abb. 13). Dies kann durch die Reflektion und Streuung des Kunstlichtes an und in den Wolken erklärt werden. Zudem ist zu erkennen, dass sich die Dominanz des blauen Lichtes im Laufe der Nacht bis zum Helligkeitsminimum verringert. Der Himmel ist gegen 3 Uhr also nicht so blau wie abends.

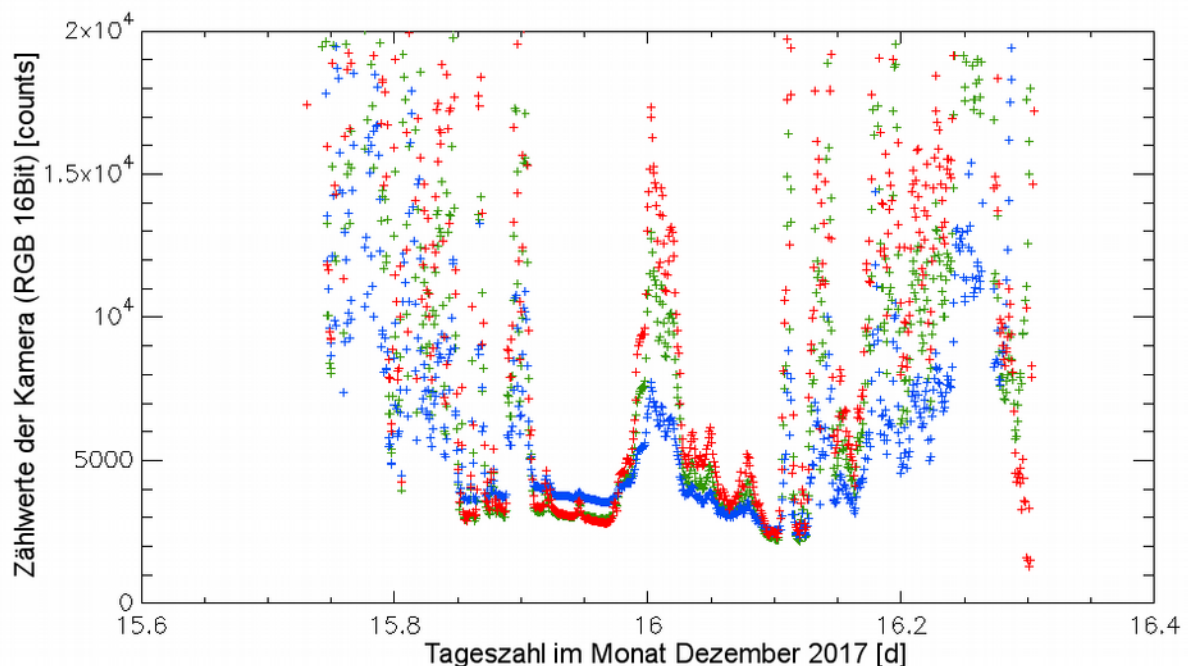


Abb. 13: Dieses Diagramm zeigt den Farbverlauf in der Nacht vom 15.12.2017 auf den 16.02.2017. In den klaren und dunklen Abschnitten dominiert der blaue Anteil und in den bewölkten Abschnitten deutlich das rote Licht. Deutlich wird dies um 00:00 Uhr (16).

11 Hänel, A., Engel, M.: Energiesparende und umweltgerechte Beleuchtung, Stuttgart 2017, S. 12

6.1 Vergleich mit anderen Arbeiten

Der dunkelste Punkt bei Nacht lag hier bei 21,17 mag/arcsec². Vergleichende Helligkeitsmessungen bei Nacht wurden auch an anderen Orten auf der Erde gemacht. So wurde im Biosphärengebiet Schwäbische Alb ein Helligkeitsminimum von 21,4 mag/arcsec² gemessen. Im australischen Outback wurden Werte von bis zu 21,9 mag/arcsec² erreicht, während in Malaysia eine Himmelshelligkeit von 21,45 mag/arcsec² gemessen wurde¹². Als einer der dunkelsten Orte Deutschlands zählt der Sternenpark Westhavelland in Brandenburg. Dort werden Werte zwischen 21,5 mag/arcsec² und 21,7 mag/arcsec² gemessen¹³. Die natürliche Himmelshelligkeit beträgt 22 mag/arcsec², weshalb dieser Wert in der Regel auch ohne Kunstlicht nicht überschritten werden kann. Der Einfluss der künstlichen Beleuchtung auf die Himmelshelligkeit wird von Falchi et al. in seinem Weltatlas der Lichtverschmutzung in dieser Region auf den Faktor 1,28 bis 2,56 beziffert¹⁴. Dort wird jedoch keine Zeitabhängigkeit untersucht. Die Werte decken sich mit den Werten in dieser Arbeit in den späteren Stunden.

Den hohen Einfluss der Bewölkung sowie den Mondphasen lässt sich auch bei anderen Messungen der Himmelshelligkeit feststellen¹⁵

7. Ausblick

Um auch bei Vollmond All-Sky Aufnahmen aufnehmen und daraus die Himmelshelligkeit berechnen zu können, muss noch eine Funktion für andere Kameraeinstellungen aufgestellt werden. Würde man mit den aktuellen Kameraeinstellungen den Himmel bei Vollmond aufnehmen, so wären die Aufnahmen überbelichtet bzw. die Kamerazählwerte zu hoch.

Der Aufbau und Betrieb einer zweiten Kamerastation würde das Vergleichen der Helligkeitsdaten zwischen den Beobachtungsorten ermöglichen. Des Weiteren wäre es dann durch vergleichen der Aufnahmen von den beiden Standorten möglich, Himmelsobjekte wie beispielsweise Meteore und Satelliten zu triangulieren und somit ihre Flugbahn zu bestimmen.

Eine öffentliche Internetseite ist im Aufbau mit einem aktuellen All-Sky-Bild und den letzten SQM-Werten im Diagramm¹⁶.

12 Redzuan Tahar, M., Kamarudin, F., Umar, R., Khairul Amri Kamarudin, M., Sabri, N. H., Ahmad, K., Rahim, S. A., Sharul Aikal Baharim, M.: Spatial Model of Sky Brightness Magnitude in Langkawi Island, Malaysia. Research in Astronomy and Astrophysics 2017; Bd. 17, Nr. 4

13 Jechow, A., Hölker, F., Kolláth, Z., Gessner, M. O., Kyba, C. C. M.: Evaluating the summer night sky brightness at a research field site on Lake Stechlin in northeastern Germany. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2016; Bd. 18, S. 24-32

14 Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., Furgoni, R.: The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances 2016; Bd. 2, Nr. 6

15 Puschnig, J., Schwöpe, A., Posch, T., Schwarz, R.: The night sky brightness at Potsdam-Babelsberg including overcast and moonlit conditions. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2014; Bd. 139, S. 76-81

16 <http://www.allthesky.com/allsky>: 14.01.2018, Credner, T., All-Sky

Literaturverzeichnis

- [7] [16] <http://www.allthesky.com/allsky/>: 14.01.2018, Credner, T., All-Sky
- [1] Dr. Ebel, M., Erdmann, A., Erdmann, U., Dr. Müller, O., Dr. Reichl, J. (Hrsg.): Ökologie, Braunschweig 2013, S. 144f
- [3] [10] [14] Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., Furgoni, R.: The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances 2016; Bd. 2, Nr. 6
- [9] Gondolatsch, F., Steinacker, S., Zimmermann, O.: Astronomie Grundkurs, Stuttgart 1999
- [11] Hänel, A., Engel, M.: Energiesparende und umweltgerechte Beleuchtung, Stuttgart 2017
- [13] Jechow, A., Hölker, F., Kolláth, Z., Gessner, M. O., Kyba, C. C. M.: Evaluating the summer night sky brightness at a research field site on Lake Stechlin in northeastern Germany. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2016; Bd. 18
- [4] Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, Ch., Hörler, M., Fontaine C.: Artificial light at night as a new threat to pollination. Nature 2017; 548: S. 206-209
- [2] Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J. Guanter, L.: Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent, Science Advances 2017; Bd. 3, Nr. 11
- [6] <http://www.astro-electronic.de/lightmeter.htm>: 11.01.2018, Koch, M., Vergleichende Messung der Himmelselligkeit in Herzberg am Harz und St. Andreasberg
- [12] Redzuan Tahar, M., Kamarudin, F., Umar, R., Khairul Amri Kamarudin, M., Sabri, N. H., Ahmad, K., Rahim, S. A., Sharul Aikal Baharim, M.: Spatial Model of Sky Brightness Magnitude in Langkawi Island, Malaysia. Research in Astronomy and Astrophysics 2017; Bd. 17, Nr. 4
- [8] <http://www.unihedron.com/projects/darksky/>: 12.01.2018, Tekatch, A., Sky Quality Meter
- [5] <https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/lichtverschmutzung/mensch-und-natur.html>: 13.01.2018, o.V., Folgen der zunehmenden Lichtverschmutzung
- [15] Puschnig, J., Schwöpe, A., Posch, T., Schwarz, R.: The night sky brightness at Potsdam-Babelsberg including overcast and moonlit conditions. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2014; Bd. 139

Alle Abbildungen und Diagramme wurden von Antonio Schmusch und Moritz Wolf selbst erstellt. Für die Diagramme wurde folgende Software benutzt:

- Schellens, M.: GDL - GNU Data Language, Version 0.9.6, 2017
- Benkert, T., Franke, K., Pozitron, D., Standish, R.: SciDAVis, Version 1.D009, 2015

Danksagung

Credner, T., Dipl.-Phys., Progymnasium Rosenfeld; Art der Unterstützung: Einführung in lineare Regression; Durchsicht des schriftlichen Teils, damit dieser den Standards einer wissenschaftlichen Arbeit entspricht.

Progymnasium Rosenfeld; Art der Unterstützung: Entstehungsort des Projektes

Projekt Sternenpark Schwäbische Alb; Art der Unterstützung: Bereitstellung des Sky Quality Meters

Wissenswerkstatt Balingen; Art der Unterstützung: Übernahme der Kosten

