

All Sky View

Netzwerk von Kamerastationen zur
Vermessung der Lichtverschmutzung

Jugend  forscht 2021



Antonio Schmusch

Betreut von: Moritz Wolf und Dipl.-Phys. Till Credner

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation der Erforschung	1
2	Technik	2
3	Helligkeitskalibrierung	4
3.1	Magnituden-Skala	4
3.2	Kalibrierung	4
3.3	Fehlerabschätzung	7
3.4	Fehlerfortpflanzung	7
4	Helligkeitsverläufe und Diskussion	8
4.1	Verlauf von Dotternhausen, Schachen und Heilbronn mit deren Vergleich	8
4.2	Einfluss des Mondes auf die Himmelshelligkeit	10
4.3	Einfluss von Wolken auf die Himmelshelligkeit	11
4.4	Jahreszeitlicher Verlauf der Mitternachtshelligkeit	12
4.5	Langfristiger Verlauf der Mitternachtshelligkeit	12
5	Gesamtdiskussion und Literaturvergleich	13
6	Ausblick	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. 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. 25 bzw. 50 km entfernten Städten Reutlingen und Stuttgart. 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 derselben Richtung liegt jedoch auch die Stadt Ulm.

Abstract

In Baden-Württemberg gerät mit dem neuen Naturschutzgesetz vom Juli 2020 zur Stärkung der biologischen Vielfalt nun auch der Einfluss von künstlicher Beleuchtung auf die Insektenfauna in den Fokus der Diskussionen¹. In § 21 werden konkrete Regelungen bezüglich Beleuchtungsanlagen dargelegt. Im Aktionsprogramm „Insektenschutz“ der Bundesregierung aus dem Jahr 2018 wird erstmals die Reduktion der Lichtverschmutzung als eine Maßnahme zum Schutz von Insekten aufgeführt².

In dieser Arbeit wird die Himmelshelligkeit und deren Verlauf in einer Nacht bis hin zu drei Jahren dokumentiert. Die Helligkeit im Zenit ist ein weltweit gebräuchlicher Standard, um das Ausmaß der Lichtverschmutzung zu messen. Hierfür wurden drei Kamerastationen entwickelt, welche zu jeder Zeit automatisiert All-Sky-Aufnahmen des Himmels machen und die nächtlichen Aufnahmen bezüglich der Himmelshelligkeit auswerten. Nachdem die Kameras, es handelt sich hierbei um handelsübliche Systemkameras, mit einem sogenannten Sky-Quality-Meter kalibriert wurden, können aus den Bildern die Himmelshelligkeiten berechnet werden. Die Kamera in Dotternhausen, eine Kleinstadt mit Industrie, läuft seit über drei Jahren. Im August 2018 wurde eine zweite Station auf dem Schachen im Biosphärengebiet Schwäbische Alb installiert, eine Gegend, die als lichtverschmutzungsarm gilt. Seit September 2020 ist eine dritte Station innerstädtisch in Heilbronn in Betrieb. Die aktuellen Bilder aus den Stationen können unter www.allskyview.de eingesehen werden.

Der Himmel über dem Schachen ist im Vergleich zu einem rein natürlichen Himmel mindestens um den Faktor 1,1 heller, der über Dotternhausen um den Faktor 2,1. Der Himmel über der Großstadt Heilbronn ist mind. um den Faktor 13,8 heller als er natürlicherweise wäre, bei Bewölkung nochmal zusätzlich um den Faktor 16. Bei Wolken kann der Himmel über Dotternhausen nochmal zusätzlich um den Faktor zehn heller werden. Auf dem Schachen hingegen kann der Himmel durch abendliche Bewölkung zusätzlich um den Faktor 2,3 aufgehellt werden. Außerdem ist der Einfluss von natürlichen Lichtquellen wie z.B. des Mondes und der Milchstraße auf dem Schachen höher als in Dotternhausen und in Heilbronn fast nicht mehr messbar. Vor allem in Heilbronn, aber auch in Dotternhausen, dominiert das künstliche Himmelsleuchten durch Straßen- und Industriebeleuchtung gegenüber den natürlichen Helligkeitsquellen. Bei den Standorten wurde eine Änderungsrate der Himmelshelligkeit von typischerweise $0,1 \text{ mag/arcsec}^2$ pro Stunde in der ersten Nachthälfte gemessen. Langfristig sollen mithilfe der Daten aus den Kamerastationen die Auswirkungen des Gesetzes zur Stärkung der Biodiversität auf die Lichtverschmutzung quantitativ überprüft werden. Hierfür wurde die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) angeschrieben.

¹ *Naturschutzgesetz Baden-Württemberg*. Gesetz. §21. 23. Juli 2020.

² Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Aktionsprogramm Insektenschutz*. <https://www.bmu.de/publikation/aktionsprogramm-insektenschutz/>. Broschüre. 1. Sep. 2019.

1 Motivation der Erforschung

Mit der Änderung des Naturschutzgesetzes zum 31.07.2020 zur Stärkung der biologischen Vielfalt in Baden-Württemberg, angestoßen durch die Initiative des Volksbegehrens „Artenschutz proBiene“, gerät neben den Einflüssen von z.B. der Landwirtschaft und des Klimawandels nun auch der Einfluss von künstlicher Beleuchtung in den Fokus³. In § 21 wird u.a. darauf hingewiesen, Eingriffe in die Insektenfauna durch Kunstlicht im Außenbereich zu vermeiden und bei Beleuchtungsanlagen vor allem die negativen Einflüsse auf die Insektenfauna zu berücksichtigen. Außerdem ist es laut dem neuen Gesetz verboten, im Zeitraum vom 1. April bis zum 30. September „die Fassaden baulicher Anlagen der öffentlichen Hand zu beleuchten, soweit das nicht aus Gründen der öffentlichen Sicherheit erforderlich oder durch oder auf Grund Rechtsvorschrift vorgeschrieben ist“. Seit diesem Jahr sind "neu errichtete Beleuchtungsanlagen an öffentlichen Straßen, Wegen und Plätzen [...] mit einer den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechenden insektenfreundlichen Beleuchtung auszustatten [...]". Im Aktionsprogramm „Insektenschutz“ der Bundesregierung aus dem Jahr 2018 wird ebenfalls die Reduktion der Lichtverschmutzung als eine Maßnahme zum Schutz von Insekten aufgeführt⁴.

Besonders negativ wirkt sich die so genannte Lichtverschmutzung oder auch Lichtsmog auf Insekten, Vögel, Flughunde, Fledermäuse sowie andere nachtaktive Tiere aus. Künstliche Beleuchtungen führen 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. So ist der Rückgang der Biomasse fliegender Insekten um mehr als 75 Prozent in den letzten 27 Jahren unter anderem auch auf die vermehrte künstliche Beleuchtung zurückzuführen⁵. Aber auch die Flora ist betroffen: Durch die Lichtverschmutzung wird 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 Fortpflanzung⁶. Auch betroffen sind 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 umher⁷. 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 Tieren⁸. Neben den Tieren und Pflanzen sind aber auch Menschen von der Aufhellung der Nacht durch Kunstlicht betroffen. 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. Des Weiteren führt zu viel Kunstlicht bei den Menschen zu Schlafstörungen, Stress und Aggressivität, einem erhöhten Krebs- und Herzinfarktrisiko, sowie psychischen Erkrankungen⁹.

In Mitteleuropa ist der bedeutendste Faktor für die Himmelselligkeit bei Nacht das von Menschen verursachte Kunstlicht, was den Nachthimmel erheblich erhellt. Dabei wird das Licht in der Atmosphäre durch die Luftteilchen gestreut. In einer klaren Nacht erhöht der Vollmond die Beleuchtungsstärke am Boden um das 1000-fache, starke Straßenbeleuchtungen gar um den Faktor 100.000¹⁰. In den letzten Jahren nimmt dieser Lichtsmog immer weiter zu, weshalb die Lichtverschmutzung immer weiter in den Fokus

³ Naturschutzgesetz Baden-Württemberg, s. Anm. 1.

⁴ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, s. Anm. 2.

⁵ M. Grubisic et al. „Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter?“ In: *Annals of Applied Biology* 173.2 (11. Juni 2018), S. 180.

⁶ E. Knop et al. „Artificial light at night as a new threat to pollination“. In: *Nature* 548 (2017), S. 206–209.

⁷ L. D. Schuler. „Dark-Sky Switzerland für einleuchtende Dunkelheit“. In: *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich* 158(1/2) (2013), S. 1–10.

⁸ M. Ebel et al. *Ökologie*. Braunschweig, 2013.

⁹ Folgen der zunehmenden Lichtverschmutzung. 9. Jan. 2021. URL: <https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/lichtverschmutzung/mensch-und-natur.html>.

¹⁰ Ebel et al. S. Anm. 8.

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 zu¹¹. Auch der Lichtverschmutzungsatlas 2016 zeigt, dass mehr als 99 % der Bevölkerung Europas unter lichtverschmutztem Himmel lebt und 60 % die Milchstraße am Nachthimmel nicht mehr sehen können¹². Die Aufhellung des Nachthimmels erschwert zunehmend auch die astronomische Forschung.

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 führte zum Beispiel von 2010 bis 2014 vergleichende Messungen an zwei Orten aus, welche etwa 15 km Luftlinie auseinander liegen. Die Himmelshelligkeit wurde hierbei mit Sensoren in einer Messstation in Lux gemessen und anschließend mit den Werten des anderen Standortes in einem Diagramm verglichen¹³. In der vorliegenden Arbeit wird ebenfalls die Himmelshelligkeit über bis zu drei Jahre an drei unterschiedlichen Orten in Baden-Württemberg dokumentiert. Hierfür nehmen selbst entwickelte Kamerastationen zu jeder Zeit in Intervallen All-Sky-Aufnahmen auf. Aus den medianen 16 Bit Zählwerten im Vergleich zu den parallel gemessenen SQM-Werten lässt sich dann für jede Kameraeinstellung eine Funktion aufstellen, mit welcher aus den Kamerazählwerten die Himmelshelligkeit berechnet werden kann. Somit muss die Helligkeit mit dem SQM nur einmal aufgenommen werden, um das Verhältnis zwischen Himmelshelligkeit und Zählwerten der Kamera zu ermitteln. Das SQM ist insbesondere für die Langzeitmessung wenig geeignet, da eine langfristige Verdunklung des Sensorschutzglases durch die UV-Strahlung oder Wärmeeinwirkung der Sonne festgestellt wurde. 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 und Airglow. Generell lässt sich der zeitabhängige Verlauf der Himmelshelligkeit z.B. in einer Nacht darstellen. Diese Zeitabhängigkeit wird im Weltatlas der Lichtverschmutzung von 2016 nicht untersucht. Ein weiterer Vorteil ist die Langzeituntersuchung, welche durch die Stationen möglich wird. Dadurch lassen sich auch langfristige Veränderungen der Himmelshelligkeit erkennen. So kann mit den Helligkeitswerten aus den Stationen die Umsetzung des Naturschutzgesetzes in Baden-Württemberg quantitativ überprüft werden.

Außerdem gibt es noch weitere Nutzungsmöglichkeiten der Kamerastationen:

- Stereoskopie und dadurch räumliche Ausmessung von Meteoren, Airglow, Satelliten, hohen Wolken, Polarlicht usw.
- Wetterkamera
- Touristische Anwendung
- Analyse der Farben des Himmels
- Übertragung in Planetarien, Kuppelprojektion
- Überwachung von hellen Sternen

2 Technik

Der Grundaufbau der Kamerastationen entspricht weiterhin den Beschreibungen aus der Jugend forscht Arbeit 2020. Folgend werden Weiterentwicklungen und Veränderungen beschrieben. Im September 2020 wurde die dritte Kamerastation auf dem Dach der experimenta in Heilbronn installiert. Durch den Betrieb der anderen Stationen seit nun mehr als drei Jahren, zeigen sich immer wieder technische und softwareseitige Probleme. Daher galt es bei Planung und Bau der neuen Station für Heilbronn entsprechende Lösungen zu entwickeln. Deutlich war, dass die bisherige Software unflexibel und schwer zu bedienen ist. Bestehende Funktionen, welche in der Jugend forscht Arbeit von 2020 beschrieben werden, wurden daher in einer grundlegend neuen Software implementiert und erweitert. So können nun

¹¹C. C. M. Kyba et al. „Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent“. In: *Science Advances* 3.11 (22. Nov. 2017).

¹²F. Falchi et al. „The new world atlas of artificial night sky brightness“. In: *Science Advances* 2.6 (10. Juni 2016).

¹³M. Koch. *Vergleichende Messung der Himmelshelligkeit in Herzberg am Harz und St. Andreasberg*. 9. Jan. 2021. URL: <http://www.astro-electronic.de/lightmeter.htm>.



ABB. 1: Station auf der experimenta in Heilbronn

Datenbank können inzwischen auch interaktiv auf einer Webseite durchsucht werden. Hierfür kommt die plattformübergreifende Open-Source-Anwendung „Grafana“ zum Einsatz, welche auf dem Hauptserver betrieben wird. NutzerInnen können alle Daten der Stationen über eine Webseite live mitverfolgen oder auch gezielt Daten exportieren und herunterladen: <https://allskyview.nsupdate.info/>. Der Zugriff auf alte Bilddaten steht noch aus. Wenn diese Arbeiten abgeschlossen sind, soll die Grafana-Seite mit der bisherigen Webseite allskyview.de verknüpft werden. Dort können derweil die Helligkeitsverläufe sowie Zeitraffer der einzelnen Nächte angesehen werden.

beispielsweise alle Einstellungen in einer JSON-Datei angegeben werden, welche das System anschließend anwendet. Wesentlich erweitert wurde die Kommunikation der Station mit dem Hauptserver in Dotternhausen. Die Stationen stellen automatisch einen Reverse SSH Tunnel zum Server her. Dies ermöglicht es auch, mit einer Station aus dem Mobilfunknetz oder hinter einer Firewall zu kommunizieren. Ein solcher Tunnel wird ebenfalls für eine MYSQL-Master-Slave Synchronisierung der Datenbanken verwendet. So gelangen alle Daten der Station in Echtzeit auf den Hauptserver und ein reibungsloser Betrieb bei Netzausfällen kann dennoch gewährleistet werden. Der Hauptserver wurde weiter ausgebaut und umfasst nun über 60 TB an HDD-Speicher, 120 GB RAM, und zwei Intel Xeon CPUs. Alle Datensätze der

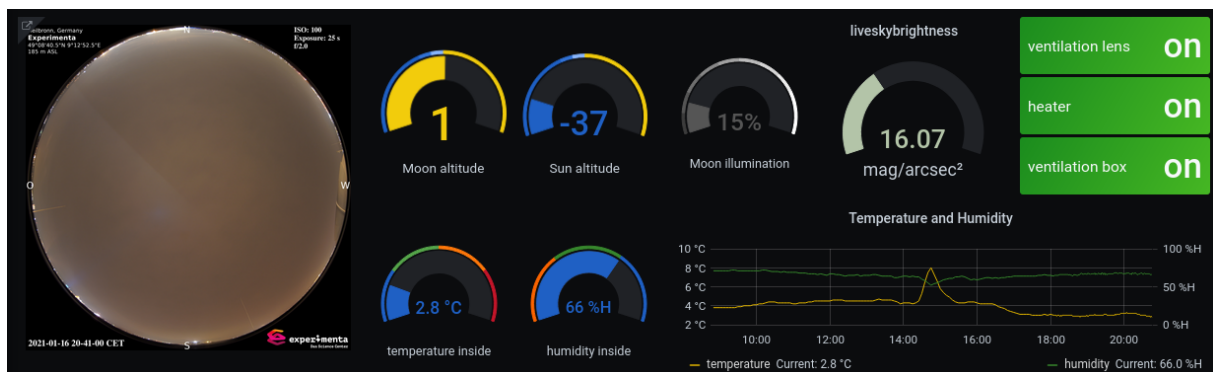


ABB. 2: Screenshot der Live-Daten-Anzeige für die Kamerastation Heilbronn

Ein weiterer Nachteil der Stationen war auch der aufwendige und zeitintensive Wechsel der Acrylglaskuppel im Falle von Kratzern. Hinzu kam außerdem, dass die Kuppel in vielen Nächten trotz der installierten Kuppelheizung beschlug. Um dies zu verhindern wurde ein Montagering für Kuppel und Heizung konstruiert und mit dem 3D-Drucker angefertigt. In den Ring wurde ein Belüftungssystem integriert, über welches ein Radiallüfter Luft an dem Heizdraht vorbei direkt in die Kuppel bläst. Kontermuttern, welche in den Ring eingedruckt wurden, ermöglichen es nun, die Kuppel von oben durch Lösen von sechs Schrauben einfach auszutauschen. Außerdem kann die Station somit auch vor eindringendem Wasser mit einem Dichtungsring einfacher geschützt werden. Der Ring selber ist nur 8 mm dick und spart dadurch Platz zwischen Kamera, Objektiv und Blendensteuerung. Bei der Kamera ist es wichtig, dass diese auch nach Wartungsarbeiten bzw. Demontage wieder exakt an dieselbe Position geführt werden kann, damit die Daten vergleichbar bleiben und es keine Verschiebungen im Bild gibt. Dies ermöglicht nun eine Montierung aus Nut-Aluminiumprofilen. Auch der Schrittmotor mit der Blendensteuerung ist mit dieser Methode montiert. Um die Station genau in den Zenit justieren zu können, steht die Station auf einem dreibeinigen Aluminiumgestell mit verstellbaren Gewindefüßen. Links und rechts neben der Station befindet sich eine Ablagefläche für Gewichte, welche die Station beschweren. Dadurch muss bei der Montage auf einem Dach keine Verankerung geschraubt oder gebohrt werden.

Bei der Station auf dem Schachen wurde im Frühjahr 2020 eine unterbrechungsfreie Stromversorgung installiert, damit diese Station insbesondere auch bei Stromausfall vielversprechende Daten aufnehmen kann. Im Falle eines großräumigeren Stromausfalls könnte man direkt den Einfluss der ausgefallenen Beleuchtung auf die Lichtverschmutzung quantitativ beziffern. Dies ist für die anderen Stationen ebenfalls in Planung. Außerdem stehen in den nächsten Wochen bei den Stationen Schachen und Dotternhausen umfassende Wartungsarbeiten an, bei welchen die oben beschriebenen Probleme gelöst werden sollen.

3 Helligkeitskalibrierung

3.1 Magnituden-Skala

Himmeshelligkeiten werden in der logarithmischen Magnituden-Skala gemessen, da dies dem subjektiven Helligkeitseindruck des menschlichen Auges nahekommt. Eine Veränderung der Himmeshelligkeit 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 des Lichtflusses um den Faktor $\sqrt[5]{100} \approx 2,512$ zur Folge¹⁴. Die Einheit des Sky Quality Meters (mag/arcsec²) eignet sich somit für die wissenschaftlich vergleichbare Helligkeitsmessung der Kameras. Mit folgender Formel lässt sich anhand der Differenz zwischen zwei Helligkeitswerten m_1 und m_2 bestimmen, um welchen Faktor f der Himmel heller bzw. dunkler ist.

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

3.2 Kalibrierung

In dieser Arbeit wird die entwickelte Helligkeitskalibrierung aus der vorherigen Jugend forscht Arbeit weiter angewandt. Im Folgenden wird diese nochmals kurz erläutert. Um die Zählwerte der Kamera in mag/arcsec² umrechnen zu können, benötigt man Kalibrierungsmessungen, welche in mehreren Nächten zu unterschiedlichen Witterungen gemacht wurden. Diese müssen außerdem für jede ISO-Empfindlichkeit der Kamera gemacht werden. Bei Helligkeitswerten, welche bei Mondschein gemessen wurden, fiel auf, dass die Werte des SQMs systematisch zu hell waren. Obwohl der Mond nicht hoch genug stand, um direkt im Messfeld des SQMs am Himmel zu sein, blendete Mondlicht von der Seite ins SQM und erhöhte so den gemessenen Helligkeitswert – während die Kamerastation die eigentliche Himmeshelligkeit korrekt berechnete. Je höher der Mond am Himmel stand, desto stärker blendete dieser ins SQM, wodurch die Differenz zwischen SQM-Wert und berechneter Helligkeit größer wurde. Dieser Einfluss von seitlichem Einfall von Mondlicht in das SQM konnte per Handexperiment bestätigt werden. Ein Vollmond hellt die Angabe des SQMs um fast 0,4 mag auf, obwohl er weit außerhalb der angegebenen Halbwertsbreite des Messfeldes vom SQM liegt. Deshalb wurden Wertepaare, bei welchen der Mond mind. 20° über dem Horizont stand, für die weitere Kalibrierung aussortiert. Diese Grenze wurde durch eigene Erfahrungswerte festgelegt. Anschließend wurden für jede ISO-Einstellung und Standort Werte entfernt, die weit im Helligkeitsbereich von einer anderen ISO-Einstellung lagen. Außerdem wurden offensichtliche Messfehler entfernt.

Das SQM, mit welchem die Himmeshelligkeiten gemessen wurden, wurde mit zwei anderen SQMs untereinander kalibriert. So wurden in einer Nacht mit drei SQMs parallel am selben Ort die Himmeshelligkeiten gemessen und schließlich aus den drei Messwerten ein Mittelwert gebildet. Auf Basis der durchschnittlichen Abweichung des SQMs vom Mittelwert wurde für jedes SQM ein Korrekturwert festgelegt. Bei dem hier verwendeten SQM betrug der Korrekturwert +0,06 mag/arcsec². Dieser Wert wurde vor der Helligkeitskalibrierung der Stationen zu den gemessenen Himmeshelligkeiten addiert.

¹⁴A. Unsöld und B. Baschek. *Der neue Kosmos*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1988, S. 129.

Trägt man nun exemplarisch die Zählwerte des roten, grünen und blauen Kanals für die ISO-Einstellung 1600 gegenüber den korrigierten Helligkeiten des SQMs auf, so ergibt sich folgendes Diagramm (Abb. 3). Überbelichtete Zählwerte >45.000 wurden aussortiert. Diese Grenze wurde nach Betrachtung der Aufnahmen mit hohen Zählwerten festgelegt. Man erkennt, dass die Farben des klaren Himmels, also bei großen SQM-Werten, immer dieselben sind, wodurch sich für jeden Farbkanal eine gleichmäßige Kurve ergibt. Helligkeitswerte $>20 \text{ mag/arcsec}^2$ werden nämlich nur bei klarem Himmel erreicht.

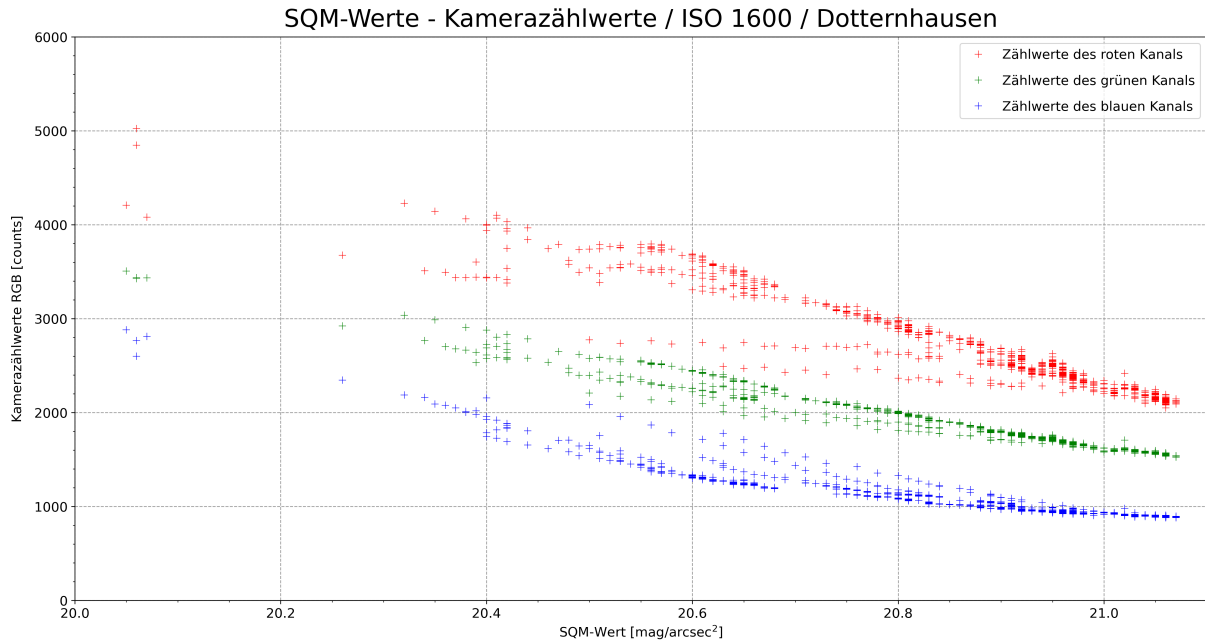


ABB. 3: SQM-Werte gegen Kamerazählwerte für ISO 1600 in Dotternhausen

Das SQM misst die visuelle Helligkeit durch einen cyan-farbenen Filter. Deshalb wurden für die weitere Kalibrierung die Zählwerte des roten Kanals nicht berücksichtigt. Es wurde nun jeweils ein Faktor für den blauen und grünen Kanal gesucht, damit die Summe der beiden Kanäle eine möglichst gemeinsame Kurve ergibt. Durch systematische Annäherung ergibt sich der Faktor 0,57 für die grünen und entsprechend $1 - 0,57 = 0,43$ für die blauen Zählwerte. So ergibt sich nach der Addition der beiden faktorisierten Werte die schmalste gemeinsame Kurve von Grün und Blau. Im nächsten Schritt wird der gewichtete Gesamtwert k aus $\text{Grün} \cdot 0,57$ und $\text{Blau} \cdot 0,43$ zur Basis zehn logarithmiert, um zu überprüfen, ob der Graph mit einer Geraden modelliert werden kann.

Durch lineare Regression lässt sich nun eine Geradengleichung der Form $y = m \cdot x + b$ (y = logarithmierter Kamerazählwert aus $\text{Grün} \cdot 0,57 + \text{Blau} \cdot 0,43$; x = gemessener SQM-Wert [mag/arcsec^2]) bestimmen, mit welcher sich der Zusammenhang zwischen logarithmierten Kamerazählwerten und den SQM-Werten beschreiben lässt. Nachdem diese Schritte für jede ISO-Einstellung durchgeführt wurden, lassen sich diese Regressionsgeraden für die Berechnung des Helligkeitswertes in mag/arcsec^2 aus dem gewichteten Gesamtwert k darstellen (Abb. 4).

Für die Stationen in Dotternhausen und auf dem Schachen ist vor allem die ISO-Einstellung 1600 interessant. Dunkle Helligkeiten $> 20 \text{ mag/arcsec}^2$, wie sie an den beiden Orten erreicht werden, werden fast ausschließlich mit ISO 1600 aufgenommen. Die Messwerte für diese ISO-Einstellung liegen relativ gut auf einer Geraden und haben eine relativ geringe Abweichung zur Regressionsgeraden. Außerdem liegen für diesen ISO-Wert auch die meisten Kalibrierungsdaten vor. In Heilbronn hingegen wurden Helligkeitswerte dunkler als $19,15 \text{ mag/arcsec}^2$ in dieser Arbeit nicht gemessen. Die Station wurde deshalb nur für die ISO-Einstellungen 100 und 200 kalibriert.

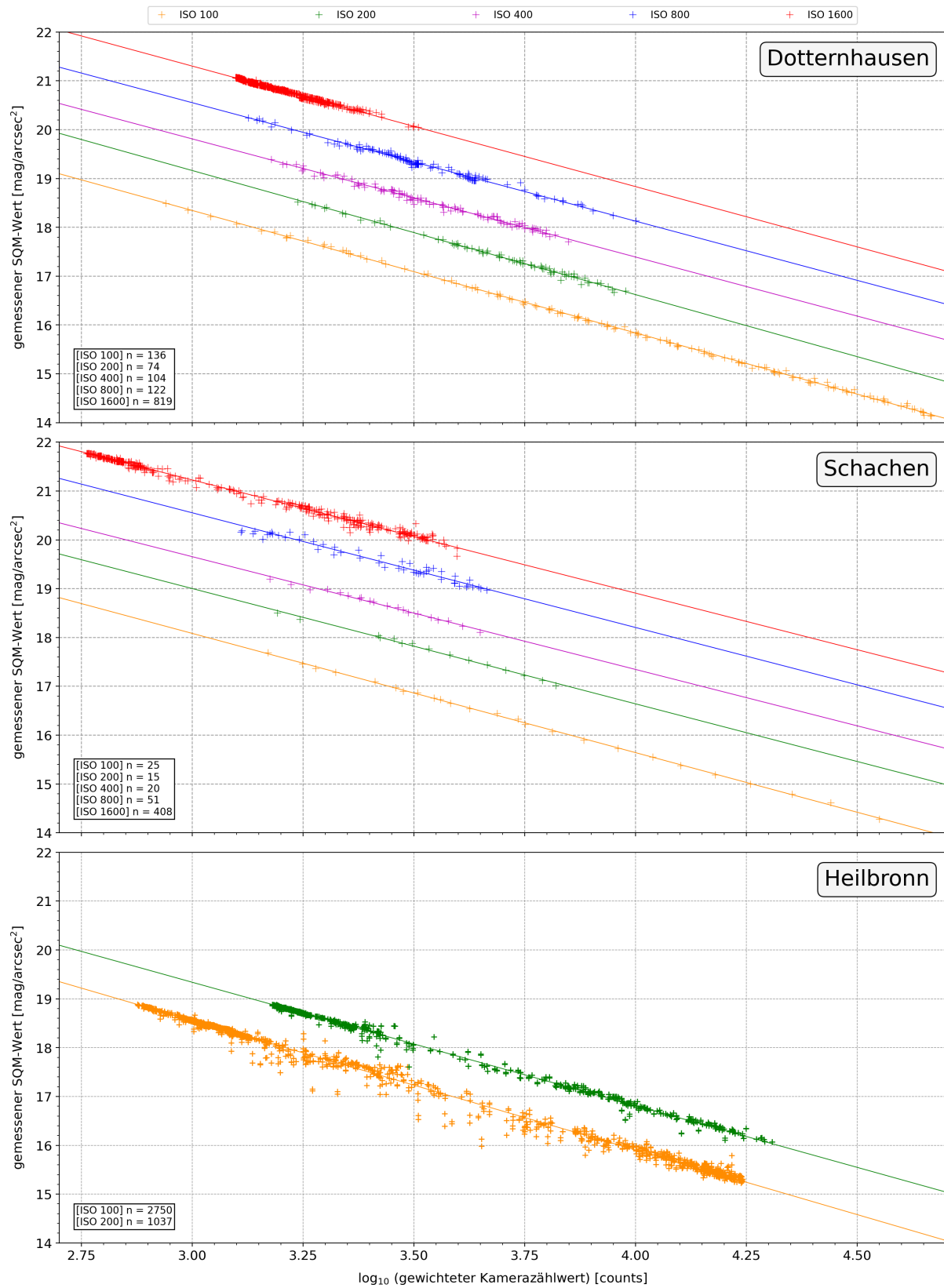


ABB. 4: Übersicht der Kalibrierung für jeden Standort

3.3 Fehlerabschätzung

Wie in Abb. 4 zu erkennen ist, haben die Datenpunkte eine gewisse Abweichung von der Regressionsgeraden. Es wurde für jede ISO-Einstellung und für jeden Standort eine Standardabweichung σ berechnet (Tab. 1). Da die Standardabweichungen zu klein sind, um sie in den folgenden Helligkeitsdiagrammen sichtbar für jeden Datenpunkt anzuzeigen, werden diese in Tab. 1 aufgeführt und gelten für alle angegebenen Helligkeitswerte, die von den Stationen berechnet werden.

TAB. 1: *Standardabweichung von der jeweiligen Regressionsgeraden in [mag/arcsec²]*

Standort	ISO				
	100	200	400	800	1600
Dotternhausen	$\pm 0,029$	$\pm 0,034$	$\pm 0,044$	$\pm 0,041$	$\pm 0,017$
Schachen	$\pm 0,024$	$\pm 0,032$	$\pm 0,031$	$\pm 0,079$	$\pm 0,049$
Heilbronn	$\pm 0,038$	$\pm 0,030$			

3.4 Fehlerfortpflanzung

Die Standardabweichung in Tab. 1 gibt den Fehler durch die Helligkeitskalibrierung an. Bedingt durch diese Standardabweichung ergeben sich bei weiterführenden Berechnungen mit diesen Helligkeitswerten weitere Fehler. Diese Fehler können durch die Fehlerfortpflanzung genau beziffert werden. Im Folgenden wird anhand der Fehlerfortpflanzung der Fehler für den Helligkeitsfaktor f resultierend aus den Standardabweichungen exemplarisch berechnet. Der Helligkeitsfaktor f gibt das Verhältnis von zwei Lichtflüssen bei gegebener Magnitudendifferenz an, also in diesem Fall um wie viel der Himmel über dem einen Ort heller als über dem anderen ist (s. S. 4). Angenommen wird eine Helligkeitsdifferenz $d = m_1 - m_2 = 0,8 \text{ mag/arcsec}^2$ mit Standardabweichungen für ISO 1600 in Dotternhausen von $\Delta m_1 = 0,017 \text{ mag/arcsec}^2$ und $\Delta m_2 = 0,049 \text{ mag/arcsec}^2$.

Fehler für den Helligkeitsfaktor f :

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial m_1} \cdot \Delta m_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial m_2} \cdot \Delta m_2\right)^2}$$

$$\Delta f = \sqrt{\left(0,4 \cdot \ln(10) \cdot 10^{\frac{0,8}{2,5}} \cdot 0,017\right)^2 + \left(0,4 \cdot \ln(10) \cdot 10^{\frac{0,8}{2,5}} \cdot 0,049\right)^2}$$

$$\Delta f \approx 0,0943 \approx 0,09$$

Der Fehler für den Helligkeitsfaktor f beträgt somit $\pm 0,09$. Bei einer Helligkeitsdifferenz von $0,8 \text{ mag/arcsec}^2$ kann der Helligkeitsfaktor aufgrund des Fehlers in der Kalibrierung auch $2,09 + 0,09 = 2,18$ oder $2,09 - 0,09 = 2,00$ betragen.

4 Helligkeitsverläufe und Diskussion

4.1 Verlauf von Dotternhausen, Schachen und Heilbronn mit deren Vergleich

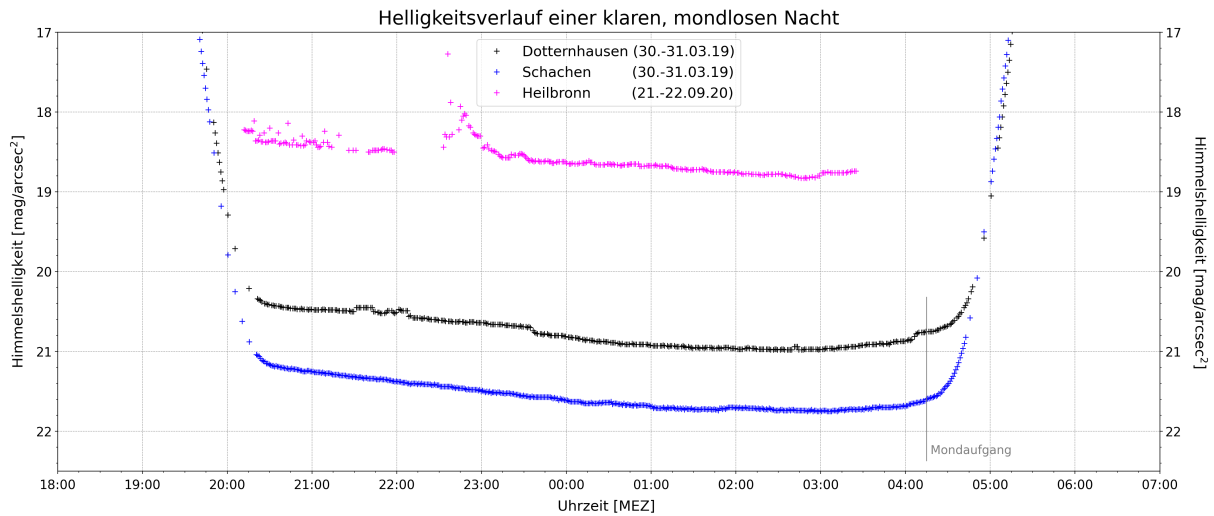


ABB. 5: Typischer Helligkeitsverlauf einer klaren, mondlosen Nacht. Bei allen drei Standorten waren die Bedingungen ähnlich: Datum um die Tagundnachtgleiche, kein Mondschein und keine Wolken

Der Helligkeitsverlauf in Heilbronn stammt aus der ersten Nacht der Kamerastation auf der experimenta. Da bis Mitternacht an der Station gearbeitet wurde und noch Wolken vorbeizogen, reißen in der ersten Hälfte einige Helligkeitswerte aus. Nach der Abenddämmerung nimmt die Helligkeit bis 2:45 Uhr im Schnitt um $0,09 \text{ mag/arcsec}^2$ pro Stunde ab. Sie erreicht dort mit $18,83 \text{ mag/arcsec}^2$ ihr Minimum. Nach der Abenddämmerung war der Himmel 1,7 mal heller als zum Minimum. Im Verlauf der Nacht sind einige, oft kleine, Stufen zu erkennen. Auf den Bildern lässt sich zum Beispiel die Abschaltung eines bläulichen Strahlers und eines gebündelten Lichtstrahls erkennen.

In Dotternhausen sinkt die Himmelshelligkeit nach Ende der Abenddämmerung bis 2:30 Uhr ebenfalls mit einer stündlichen Änderungsrate von $0,1 \text{ mag/arcsec}^2$. Dort erreicht sie das Minimum von 21 mag/arcsec^2 . Zu diesem Zeitpunkt ist der Himmel 1,6 mal heller als kurz nach der Dämmerung. Vor allem in der ersten Nachthälfte sind mehrere Stufen und Sprünge zu erkennen. Diese kommen beispielsweise durch das Ein- bzw. Ausschalten eines Flutlichtes oder Hoflichtes als auch durch das Dimmen der Straßenbeleuchtung zustande, wie auf den Kamerabildern zu erkennen ist. Ab 3 Uhr nimmt die Helligkeit durch den Mondaufgang und später durch den Sonnenaufgang wieder zu.

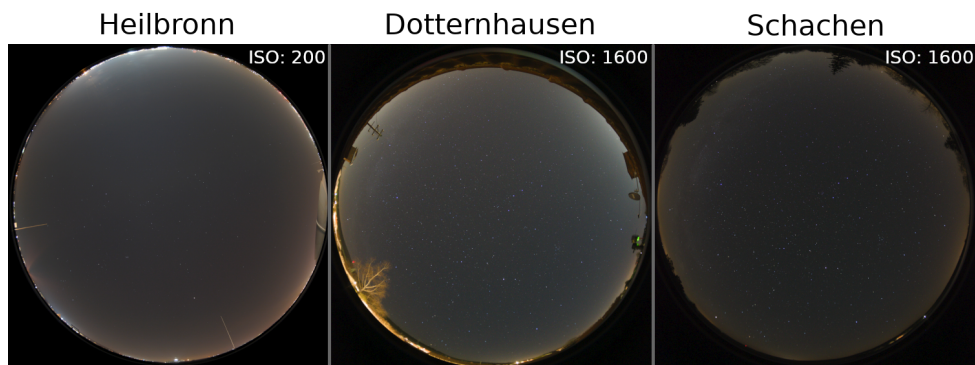


ABB. 6: Aufnahmen der drei Kamerastationen zum dunkelsten Zeitpunkt der jeweiligen Nacht. Zu beachten ist: gleich hohe Empfindlichkeit bei Dotternhausen und dem Schachen, Heilbronn wäre bei dieser Empfindlichkeit grob acht mal so hell.

Nach der Abenddämmerung nimmt die Helligkeit auf dem Schachen gleichmäßig mit einer mittleren Änderungsrate von $0,10 \text{ mag/arcsec}^2$ pro Stunde bis 1:30 Uhr ab. In diesem Intervall sind keine Stufen oder Sprünge zu erkennen, welche sich direkt auf Abschaltungen von Beleuchtungen zurückführen lassen. Dies liegt vermutlich an der Tatsache, dass in der direkten Umgebung des Schachens nur wenige Beleuchtungen vorhanden sind und das Kunstlicht viel mehr von den Lichtglocken der weiter entfernten Städte wie Münsingen, Reutlingen, Stuttgart und Ulm kommt. Zwischen 1:30 – 3:15 Uhr war die Helligkeit mit etwa $21,75 \text{ mag/arcsec}^2$ am geringsten. Nach der Dämmerung war der Himmel also 1,6 mal heller als zum dunkelsten Zeitpunkt. Ab 03:15 Uhr steigt die Helligkeit durch den aufgehenden Mond wieder an.

Im Zeitraum 21:00 Uhr bis 1:30 Uhr ergibt sich eine Änderung von $0,47 \text{ mag/arcsec}^2$ in Dotternhausen und auf dem Schachen, während sich die Helligkeit in Heilbronn um $0,34 \text{ mag/arcsec}^2$ ändert. In Heilbronn entspricht das einer stündlichen Änderungsrate von $0,08 \text{ mag/arcsec}^2$, an den beiden anderen Orten einer Veränderung von $0,10 \text{ mag/arcsec}^2$ pro Stunde. Um 21 Uhr beträgt die Differenz zwischen Heilbronn und dem Schachen $2,87 \text{ mag/arcsec}^2$, um 1:30 Uhr sogar $3,01 \text{ mag/arcsec}^2$. Das heißt, der Heilbronner Himmel ist nach der Abenddämmerung etwa 14 mal heller als der über dem Schachen, mitten in der Nacht sogar 16 mal so hell. Die Differenz zwischen den beiden Orten erhöht also sich im Laufe der Nacht. Dies gilt auch für die Differenz zwischen Dotternhausen und Heilbronn. Zum dunkelsten Zeitpunkt in der vorliegenden Nacht ist der Himmel über der Großstadt Heilbronn um den Faktor 15 heller als der Himmel über dem ländlichen Schachen zum Minimum in der Frühlingsnacht. Im Vergleich zur Kleinstadt Dotternhausen ist der Himmel über Heilbronn sieben mal so hell. Die drei Orten unterscheiden sich ebenfalls im zeitlichen Verlauf des Minimums einer Nacht. Auf dem Schachen kann das nächtliche Minimum nicht auf einen Zeitpunkt festgelegt. Es gibt dort viel mehr einen Zeitraum über ca. zwei Stunden, in welchem sich die Helligkeit nicht oder nur sehr geringfügig verändert. In Dotternhausen und Heilbronn hingegen lässt sich die minimalste Helligkeit ziemlich genau auf einen Zeitpunkt festlegen, in Heilbronn sogar noch deutlicher. Dies kann mit dem Einfluss des Kunstlichtes zusammenhängen, da dieses in Dotternhausen und vor allem in Heilbronn die ganze Nacht über Einfluss auf die Helligkeit hat. Die Helligkeit kann also in Heilbronn nie unter ungefähr 19 mag/arcsec^2 sinken, in Dotternhausen nie unter ca. 21 mag/arcsec^2 . Es gibt an den beiden Standorten eben lediglich einen Zeitpunkt in der Nacht, in welcher der Einfluss von Kunstlicht am geringsten ist, da beispielsweise die Straßenbeleuchtung gedimmt oder ganz abgeschaltet ist. Auch der Schachen scheint jedoch nicht komplett ohne Lichtverschmutzung zu sein, da es zwischen dem Ende der Abenddämmerung und dem Beginn der dunkelsten Phase ebenfalls einen Helligkeitsabfall gibt – höchstwahrscheinlich durch eine Abnahme des Kunstlichtes, da die natürlichen Helligkeitseinflüsse in einer Nacht relativ konstant bleiben. Ein ausführlicher Vergleich der Verläufe vom Schachen und Dotternhausen kann in der Jugend forscht Arbeit von 2020 nachgelesen werden.

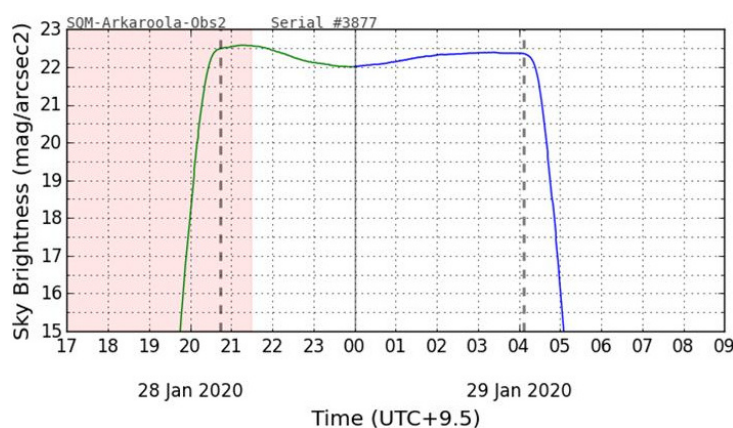


ABB. 7: Helligkeitsverlauf von Arkaroola, Australien. (Quelle: Andrew Cool)

Andrew Cool führt in Arkaroola, einem Naturschutzgebiet im australischen Outback ca. 800 km nördlich von Adelaide, ebenfalls Messungen der Helligkeit durch¹⁵. Dort wird der dunkelste Zeitpunkt nämlich ca. 30 min nach dem Ende der Abenddämmerung erreicht (s. Abb 7). Es gibt also im Gegensatz zu den in dieser Arbeit untersuchten Orten keinen längeren, kontinuierlichen Helligkeitsabfall nach der Abenddämmerung gegen 20:40 Uhr Ortszeit. Anschließend wandert die Milchstraße durch das Messfeld, was zu einer maximalen Aufhellung von ca. $0,6 \text{ mag/arcsec}^2$ zu Mitternacht führt.

¹⁵A. Cool. private Korrespondenz. 2018.

4.2 Einfluss des Mondes auf die Himmelselligkeit

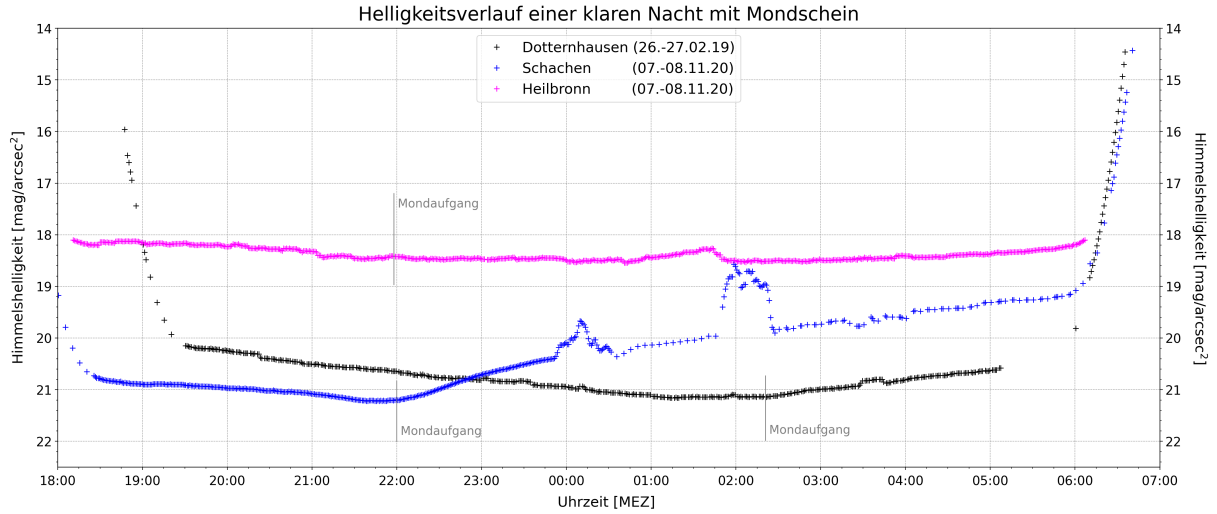


ABB. 8: Verlauf der Himmelselligkeit in einer Nacht mit aufgehendem Mond

Eine Stunde vor dem Aufgang des Halbmondes in der Novembernacht um 22 Uhr beträgt die Differenz zwischen Heilbronn und dem Schachen $2,76 \text{ mag/arcsec}^2$. Als dann der Mond aufgeht, steigt die Kurve vom Schachen stark an, während die Himmelselligkeit über Heilbronn konstant bleibt. So beträgt der Helligkeitsunterschied eine Stunde nach dem Mondaufgang noch $2,23 \text{ mag/arcsec}^2$. Die Helligkeit über dem Schachen steigt anschließend weiter mit zunehmender Höhe des Mondes an. In Heilbronn hingegen bleibt die Helligkeit bis auf eine Ausnahme zwischen 1-2 Uhr aufgrund von Wolkenfeldern unverändert.

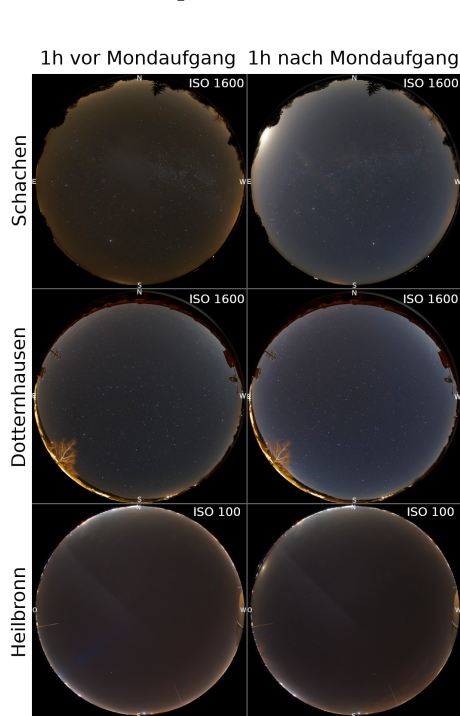


ABB. 9: Aufnahmen aus den Kamera- stationen eine Stunde vor und eine Stunde nach Mondaufgang.

In Dotternhausen hat der Halbmondaufgang einen Anstieg der Himmelselligkeit zur Folge. Eine Stunde vor dem Aufgang beträgt die Helligkeit $21,14 \text{ mag/arcsec}^2$, eine Stunde danach $20,93 \text{ mag/arcsec}^2$. Die Differenz zwischen einer Stunde vor und nach dem Mondaufgang beträgt $0,21 \text{ mag/arcsec}^2$ in Dotternhausen und $0,38 \text{ mag/arcsec}^2$ auf dem Schachen. Am größten ist der Einfluss des Mondlichtes auf die Helligkeit also auf dem Schachen. In Dotternhausen ist dieser Einfluss geringer, während in Heilbronn zumindest keine Aufhellung des Himmels durch den Halbmond gemessen werden konnte. Je dunkler der Standort, desto höher scheint der Einfluss des Mondscheins auf die Himmelselligkeit zu sein.

Diese Beobachtung wurde von Wuchterl und Reithofer bestätigt. In ihrer Arbeit „Licht über Wien V“ aus dem Jahr 2017 kamen sie zu dem Ergebnis, dass es für die Helligkeit des Himmels über Wien kaum eine Rolle spiele, ob der Vollmond am Himmel steht, da die Aufhellung des Himmels durch Kunstlicht auf „einem derart hohen Niveau“ sei¹⁶. Der Himmel über Wien ist selbstverständlich aufgehellter, als der Himmel über Heilbronn, jedoch lässt sich eine Tendenz erkennen. In Heilbronn, einer Großstadt, hat der Mond aufgrund der starken Aufhellung des Himmels durch Kunstlicht einen sehr geringen Einfluss auf die Himmelselligkeit. Auch in Dotternhausen, einer Kleinstadt mit Industrie und Gewerbe, hat der Mond einen geringeren Einfluss als auf dem Schachen, einer Gegend, die als lichtverschmutzungsarm gilt.

¹⁶G. Wuchterl und M. Reithofer. *Licht über Wien V - Entwicklung der künstlichen Nachthimmels-Aufhellung über Wien in den Jahren 2011 bis 2017*. Report. 2017.

4.3 Einfluss von Wolken auf die Himmelhelligkeit

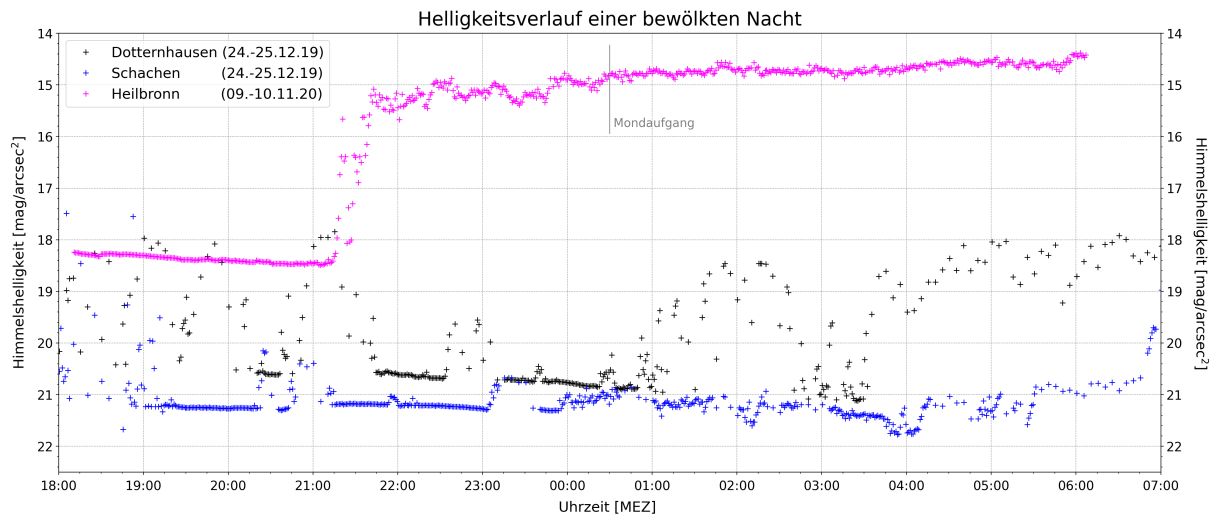


ABB. 10: Verlauf der Himmelhelligkeit in einer teilweise bewölkten Nacht

Der Helligkeitsverlauf für den Schachen und Dotternhausen zeigt eine zwischen Wolken und klarem Himmel abwechselnde mondlose Nacht. Für Heilbronn wurde eine Nacht ausgewählt, welche ab ca. 21:30 Uhr durchgehend bewölkt ist und in welcher nach Mitternacht der Mond aufgeht. Starke Helligkeitsschwankungen bei bewölktem Himmel unter dem Einfluss von künstlichem Licht sind dabei üblich. Durch Wolken wird das nach oben gestrahlte Licht gestreut und verstärkt somit den Effekt der Lichtverschmutzung.

In Regionen ohne künstliche Aufhellung ist dieser Effekt meist umgekehrt, da die Wolken natürliche Lichtquellen verdunkeln. Die abgebildeten Helligkeitsverläufe zeigen dies. Ab etwa 1:00 Uhr ist der Himmel auf dem Schachen wie auch in Dotternhausen überwiegend bewölkt. Dennoch wurden auf dem Schachen Helligkeitswerte ähnlich denen von klaren Verhältnissen gemessen. In Dotternhausen ist der Himmel jedoch bei Bewölkung etwa um $2,5 \text{ mag/arcsec}^2$ heller als bei klaren Bedingungen, das entspricht dem Faktor 10. Am größten ist der Aufhellungseffekt von Wolken natürlich in Heilbronn, dem Standort mit der meisten Lichtverschmutzung. Dort führt die Bewölkung zu einer Aufhellung des Himmel um ungefähr 3 mag/arcsec^2 , was einem Faktor von 16 entspricht.

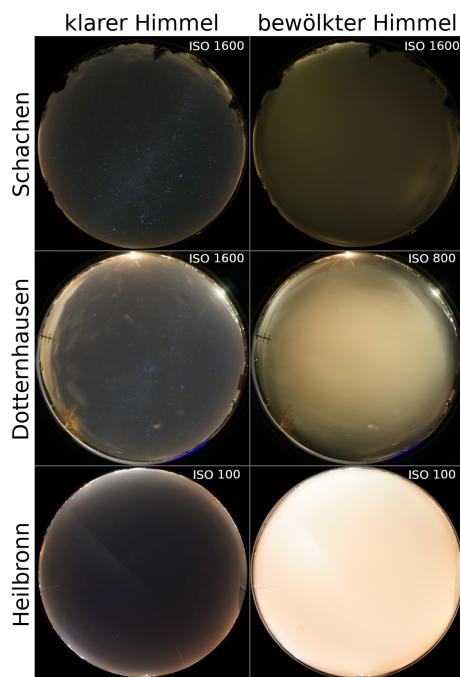


ABB. 11: Aufnahmen aus den drei Kamerastation mit wolkenlosem Zenit und bedecktem Himmel.

4.4 Jahreszeitlicher Verlauf der Mitternachtshelligkeit

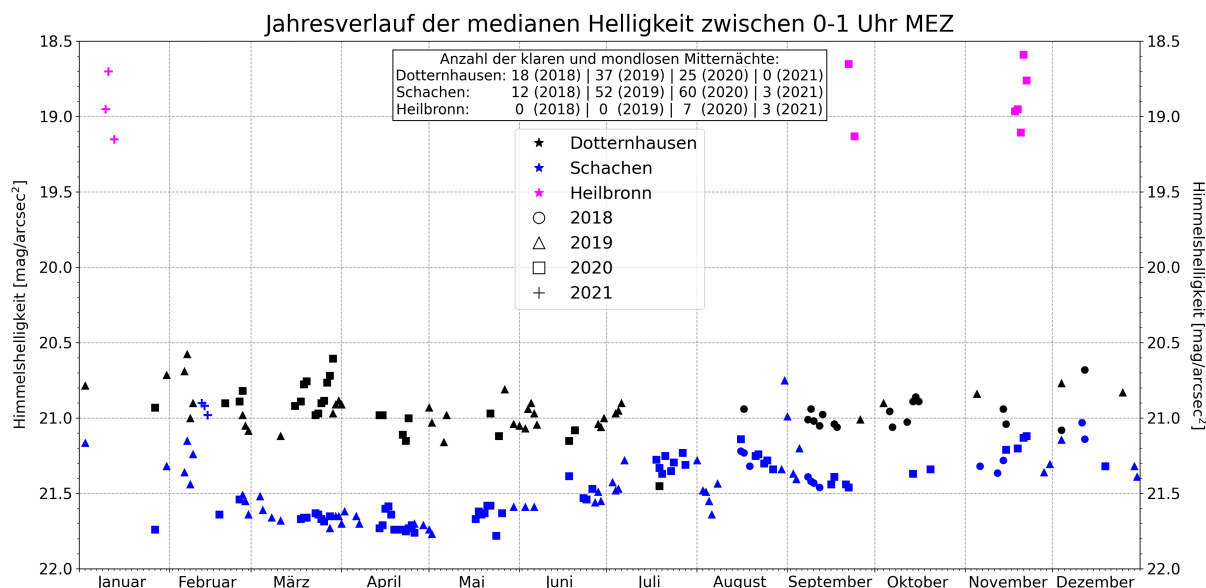


ABB. 12: Verlauf der Mitternachtshelligkeit beider Standorte von Januar 2018 bis Februar 2021 bei möglichst gleichen Himmelsverhältnissen (s.u.)

Das Diagramm zeigt die Helligkeiten bei lokaler Mitternacht (ca. 00:30 Uhr MEZ) im Jahresverlauf. Zwischen 00:00 und 01:00 Uhr MEZ wurden zur Glättung möglichst alle Bilder aus diesem Zeitraum genommen, welche folgende Auswahlkriterien erfüllten: klarer Himmel im Messbereich, Sonne mind. 18 Grad unter dem Horizont, Mond mind. 12 Grad unter dem Horizont und keine kurzzeitig sichtbare Einstrahlung von Kunstlicht. Für jede Nacht, welche diese Bedingungen erfüllt, wurde der Medianschnitt der Helligkeitswerte zwischen 00:00 und 01:00 Uhr MEZ berechnet, um evtl. verbleibende Schwankungen zu minimieren. Aufgrund technischer Probleme liegen von der Kamerastation in Dotternhausen für die zweite Jahreshälfte 2020 keine Daten vor.

Deutlich wird in dem Diagramm der systematische Helligkeitsunterschied zwischen den Stationen Schachen und Dotternhausen. So ist es zu Mitternacht in Dotternhausen im Schnitt um $0,6 \text{ mag/arcsec}^2$ heller als auf dem Schachen. Die systematische jahreszeitliche Schwankung der Mitternachtshelligkeit kommt durch den Einfluss der Milchstraße. Ein heller Teil der Milchstraße befindet sich zwischen Juli und September im Zenit. Erst im Januar verschwinden auch die schwächeren Regionen der Milchstraße aus dem Messbereich. In den Monaten Februar bis Mai steht die Milchstraße hingegen nicht oder tiefer am Himmel. Dies lässt sich an dem Verlauf vom Schachen nachvollziehen. Durch den 1,74 mal so hellen Himmel in Dotternhausen lässt sich der Einfluss der Milchstraße dort nicht erkennen. Dort dominieren künstliche Lichtquellen die Helligkeit des Himmels. Dasselbe wird für den Jahresverlauf von Heilbronn erwartet, da der Himmel dort grob um den Faktor zehn heller ist als auf dem Schachen. Vergleicht man die Monate August, November und Dezember mit März bis Mai, so kann der Einfluss der Milchstraße auf die Himmelschelligkeit am Schachen auf etwa $0,3$ bis $0,4 \text{ mag/arcsec}^2$ angegeben werden. Die kurzzeitigen Helligkeitsschwankungen lassen sich vor allem durch unterschiedliche Wetterbedingungen erklären. Auch bei einem klaren Himmel schwankt die Durchsicht mit der Anzahl der Aerosole in der Luft. Diesiger Himmel streut viel Kunstlicht und hellt somit den Sternenhimmel auf. Insbesondere an den hellen Standorten führt dies zu einer größeren Datenstreuung, während am Schachen die Daten recht konsistent sind.

4.5 Langfristiger Verlauf der Mitternachtshelligkeit

Ein langfristiger Trend der Himmelschelligkeit über den erfassten Zeitraum hinweg lässt sich nicht erkennen. Betrachtet man auf dem Schachen und in Dotternhausen die Monate August und September in den drei Jahren, so liegen die Helligkeitswerte auf einer gemeinsamen Linie. Das heißt, die Mitternachtshelligkeit im Spätsommer an den beiden Orten hat sich die letzten drei Jahre nicht verändert.

5 Gesamtdiskussion und Literaturvergleich

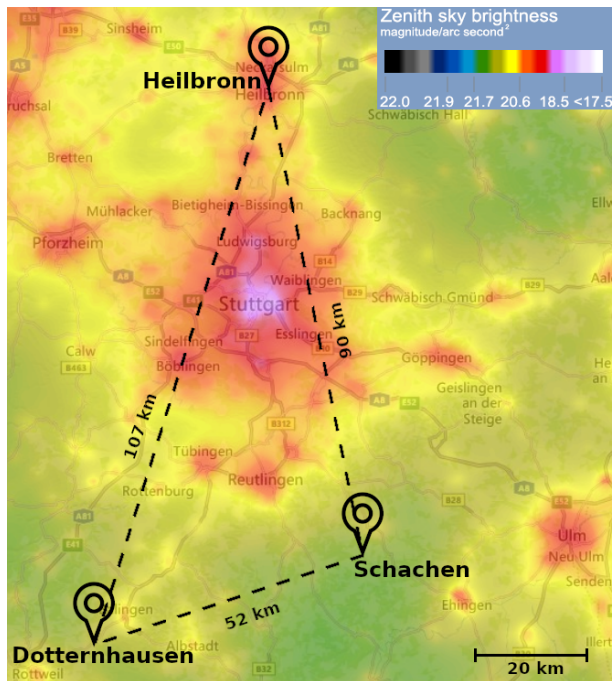


ABB. 13: Ausschnitt aus dem Weltatlas der Lichtverschmutzung von 2015 von Falchi et al. (Quelle: <https://www.lightpollutionmap.info/>).

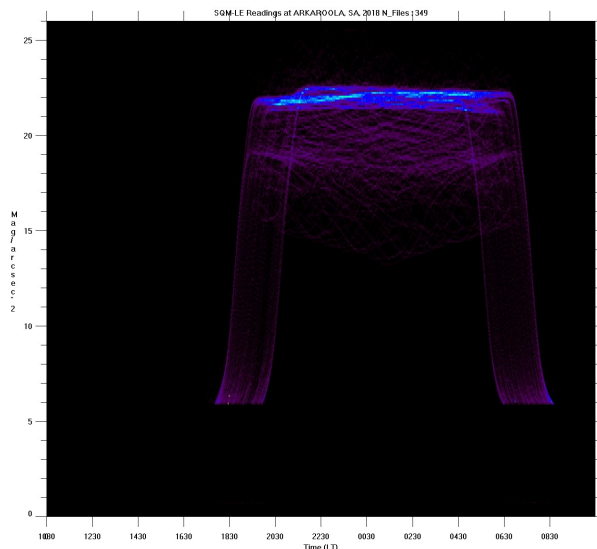


ABB. 14: SQM-Messungen aus dem Jahr 2018 in Arkaroola, Australien (Quelle: Andrew Cool)

Für Dotternhausen wurde eine minimale Himmelshelligkeit von $21,2 \text{ mag/arcsec}^2$ gemessen, das entspricht einem Faktor von 2,1 im Vergleich zu einem natürlichen Himmel. Auf dem Schachen wurde eine minimale Himmelshelligkeit von $21,85 \text{ mag/arcsec}^2$ gemessen, das entspricht einem Faktor von 1,1 im Vergleich zu einem rein natürlichen Himmel. Die Station innerstädtisch in Heilbronn hat als minimale Helligkeit $19,15 \text{ mag/arcsec}^2$ gemessen, was einem Faktor von 14 entspricht. Falchi et al. geben im Weltatlas der Lichtverschmutzung aus dem Jahr 2015 einen Helligkeitswert von $21,28 \text{ mag/arcsec}^2$ für Dotternhausen, $21,51 \text{ mag/arcsec}^2$ für den Schachen und $19,69 \text{ mag/arcsec}^2$ für Heilbronn an (s. Abb. 13). Für Dotternhausen deckt sich dieser Wert etwa mit dem in dieser Arbeit gemessenen. Für den Schachen wurden jedoch bis zu $0,3 \text{ mag/arcsec}^2$ dunklere Werte gemessen, in Heilbronn waren die Werte mind. $0,54 \text{ mag/arcsec}^2$ heller. Von Falchi et al. wird jedoch keine zeitliche Abhängigkeit untersucht. Von Januar 2018 bis Februar 2021 sind noch keine langfristigen Änderungen der Lichtverschmutzung erkennbar (s. Abb 12).

Messungen von Andrew Cool im australischen Outback Arkaroola zeigen die typische Himmelshelligkeit ganz ohne Lichtverschmutzung. Über das gesamte Jahr 2018 hinweg werden dort Helligkeitswerte von ca. 22 mag/arcsec^2 am häufigsten erreicht (s. Abb. 14). Je häufiger ein Helligkeitswert erreicht wird, desto heller ist dessen Farbe im Diagramm. Dieses Diagramm belegt den Wert von ca. 22 mag/arcsec^2 als natürliche Nachthimmelshelligkeit.

In der näheren Umgebung der Kamerastation in Dotternhausen gibt es einige Quellen von Kunstlicht (s. Abb. 15). Insbesondere bei Bewölkung führt dies zu einer Aufhellung um den Faktor 10 im Vergleich zu einem klaren Himmel. Für die vergangene Jugend forscht Arbeit „Monitoring der diffusen Himmelshelligkeit bei Nacht“ wurden nächtliche Aufnahmen der Umgebung gemacht, um den Einfluss einiger Lichtquellen genau beziffern zu können¹⁷. Die Bilder konnten hierfür mit den parallel gemessenen Helligkeitswerten der Station verglichen werden. So hat beispielsweise die Abschaltung des Sportplatzflutlichtes in Erzingen,

¹⁷ A. Schmusch und M. Wolf. *Monitoring der diffusen Himmelshelligkeit bei Nacht*. 2018. URL: https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/images/pdf/Monitoring_der_diffusen_Himmelshelligkeit-Jufo18.pdf.

der hellsten Lichtquelle im Ort, eine Abdunklung des Himmels von $0,03 \text{ mag/arcsec}^2$ zur Folge. Generell lassen sich in den Aufnahmen die Beleuchtungsabschaltungen von Gemeinden, Firmen und Privathäusern erkennen. Dies führt wie beschrieben zu einer kontinuierlichen Abnahme der Himmelselligkeit im Laufe einer Nacht. Der Anteil der Straßenbeleuchtung an den gesamten sichtbaren Lichtemissionen der Stadt Tucson in Arizona beziffern Kyba et al. auf 16-21%¹⁸.



ABB. 15: Aufnahmen vom 1000 m hohen Plettenberg bei Dotternhausen im August 2018. Das untere Bild wurde sechs Stunden später aufgenommen. Die Aufnahmen wurden für die Jugend forscht Arbeit „Monitoring der diffusen Himmelselligkeit bei Nacht“ im Jahr 2018 gemacht.

Großstädte wie Heilbronn sind beinahe entkoppelt vom Zyklus der natürlichen nächtlichen Lichtquellen. Bei einem mind. um den Faktor 14 helleren Himmel als der natürliche hat der Mond einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Himmelselligkeit, die Milchstraße gar keinen mehr. Aber auch auf dem scheinbar abgelegenen Schachen ist der Himmel mind. um einen Faktor 1,1 aufgehell, bei hoher abendlicher Bewölkung zeitweise sogar bis 2,3. Städte wie z.B. Stuttgart (Entfernung ca. 50 km), Reutlingen (ca. 25 km) und Ulm (ca. 40 km) haben trotz ihrer Entfernung Einfluss auf die Himmelselligkeit über dem Schachen. Vor allem bei hohen Wolken wird deren Licht weit gestreut. Auch lokale Lichtquellen wie die Städte Münsingen und Ehingen, das nahe liegende Dorf Buttenhausen und ein angrenzender Bauernhof hellen den Nachthimmel auf. Lichtverschmutzung ist also nicht nur ein Problem des städtischen Raumes. Sie erstreckt sich weit in die ländlichen Regionen hinein.

Es gibt jedoch Möglichkeiten, den Einfluss der künstlichen Beleuchtungen auf die Himmelselligkeit zu reduzieren¹⁹. Die Beleuchtungen sollten voll abgeschirmt sein und das Licht nur dorthin gelenkt werden, wo es gebraucht wird. Hierbei ist es wichtig, dass die Leuchten „kein Licht in und oberhalb der Horizontalen abstrahlen“, da dieses „über weite Strecken in der Atmosphäre gestreut“ wird. Bei der Lichtfarbe ist ein warmweißes, UV-freies Licht mit einer Farbtemperatur von unter 3000 Kelvin und entsprechend geringerer Blauanteile zu bevorzugen. Bei Modernisierungen der Beleuchtungen sind Lampen mit hoher Effizienz einzusetzen. Dementsprechend sollte anschließend die Anschlussleistung reduziert werden, um bei gleicher Lichtmenge Energie einzusparen. Außerdem sind der Bedarf der Beleuchtung, die Leuchtdauer sowie die Lichtmenge sorgfältig zu planen.

¹⁸C.C.M Kyba et al. „Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas“. In: *Lighting Research & Technology* 0.0 (28. Okt. 2020).

¹⁹Fachgruppe DARK SKY der Vereinigung der Sternfreunde e.V. *Energiesparende und umweltgerechte Beleuchtung*. <https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/downloads/printmedien.html>. Aug. 2017.

6 Ausblick

In Zukunft liegt ein Ziel der Kamerastationen darin, die Wirkung des Biodiversitätstärkungsgesetzes in BW auf die Himmelshelligkeit quantitativ zu überprüfen. Mit der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) wurde im Hinblick auf eine mögliche Kooperation bereits Kontakt aufgenommen. Die LUBW kann so ihr Netzwerk an Messstationen zur Umweltbeobachtung erweitern und die Helligkeitsmessungen der Kamerastationen zusammen mit Daten aus ihren anderen Messnetzen auswerten. Die Auswertungsverfahren sollen dabei weiter automatisiert werden und die aufbereiteten Ergebnisse auch für die Öffentlichkeit auf www.allskyview.de zur Verfügung stehen. Die Veröffentlichung dieser Arbeit als Open Source Projekt steht ebenfalls in Planung.

Die $360^\circ \times 180^\circ$ Panoramen aus den Kamerastationen lassen sich entzerrt in einer Virtual-Reality-Brille und in einer Planetariumskuppel darstellen. Diese bis zu 8K aufgelösten Daten können als Bild und Zeitraffer kombiniert mit den gemessenen Helligkeitskurven visualisiert werden. Im hauseigenen Planetarium der experimenta können die Aufnahmen und Daten so der breiten Öffentlichkeit präsentiert werden. Auch besondere Ereignisse wie das Airglow oder helle Meteore lassen sich so sehr realistisch darstellen.

Eine sehr interessante Fragestellung ist, inwieweit die gefundene gemeinsame Änderungsrate der Himmelshelligkeit von $0,10 \text{ mag/arcsec}^2$ bis $0,14 \text{ mag/arcsec}^2$ pro Stunde in der ersten Nachthälfte universell ist. Inwiefern diese auf die Lichtverschmutzung oder natürliche Einflüsse zurückzuführen ist, soll mit weiteren Stationen und Analysen untersucht werden. Angedacht ist dabei auch die Installation einer Kamerastation in einer Umgebung ohne Lichtverschmutzung, was jedoch in ganz Deutschland leider nicht mehr möglich ist, wie man im Lichtverschmutzungsatlas von Falchi et al. erkennt.

Um flexibel und unabhängig von der vorhandenen Infrastruktur Helligkeitsmessungen mit parallelen Allsky-Bildern durchführen zu können, ist der Bau einer mobilen Kamerastation sehr interessant. Eine autarke Station kann an Orten ohne Strom- und Internetversorgung für einige Nächte aufgestellt werden. Dadurch lassen sich mehr Helligkeitsdaten mit Bildern an unterschiedlichen Orten sammeln, ohne jedes Mal eine Station aufwendig installieren zu müssen.

Mit einer leistungsfähigen Drohne kann beispielsweise die Lichtverschmutzung an einem Standort räumlich besser vermessen werden. Eine mit SQM und Kamera ausgestattete Drohne kann so die Umgebung einer Kamerastation hinsichtlich der Himmelshelligkeit genauer vermessen, z.B. wie sich die Himmelshelligkeit mit zunehmender Flughöhe verändert. Auf dem Schachen wurden bereits erste Messflüge gemacht. Derzeit werden die Daten noch ausgewertet.

Literatur

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Aktionsprogramm Insektenschutz*. <https://www.bmu.de/publikation/aktionsprogramm-insektenschutz/>. Broschüre. 1. Sep. 2019.
- Cool, A. private Korrespondenz. 2018.
- Ebel, M. et al. *Ökologie*. Braunschweig, 2013.
- Fachgruppe DARK SKY der Vereinigung der Sternfreunde e.V. *Energiesparende und umweltgerechte Beleuchtung*. <https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/downloads/printmedien.html>. Aug. 2017.
- Falchi, F. et al. „The new world atlas of artificial night sky brightness“. In: *Science Advances* 2.6 (10. Juni 2016).
- Folgen der zunehmenden Lichtverschmutzung*. 9. Jan. 2021. URL: <https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/lichtverschmutzung/mensch-und-natur.html>.
- Grubisic, M. et al. „Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter?“ In: *Annals of Applied Biology* 173.2 (11. Juni 2018), S. 180.
- Knop, E. et al. „Artificial light at night as a new threat to pollination“. In: *Nature* 548 (2017), S. 206–209.
- Koch, M. *Vergleichende Messung der Himmelshelligkeit in Herzberg am Harz und St. Andreasberg*. 9. Jan. 2021. URL: <http://www.astro-electronic.de/lightmeter.htm>.
- Kyba, C. C. M. et al. „Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent“. In: *Science Advances* 3.11 (22. Nov. 2017).
- Kyba, C.C.M et al. „Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas“. In: *Lighting Research & Technology* 0.0 (28. Okt. 2020).
- Naturschutzgesetz Baden-Württemberg*. Gesetz. §21. 23. Juli 2020.
- Schmusch, A. und M. Wolf. *Monitoring der diffusen Himmelshelligkeit bei Nacht*. 2018. URL: https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/images/pdf/Monitoring_der_diffusen_Himmelshelligkeit-Jufo18.pdf.
- Schuler, L. D. „Dark-Sky Switzerland für einleuchtende Dunkelheit“. In: *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich* 158(1/2) (2013), S. 1–10.
- Unsöld, A. und B. Baschek. *Der neue Kosmos*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1988, S. 129.
- Wuchterl, G. und M. Reithofer. *Licht über Wien V - Entwicklung der künstlichen Nachthimmels-Aufhellung über Wien in den Jahren 2011 bis 2017*. Report. 2017.

Abbildungsverzeichnis

1	Kamerastation in Heilbronn	3
2	Screenshot der Live-Daten-Anzeige für die Kamerastation Heilbronn	3
3	SQM-Werte gegen Kamerazählwerte für ISO 1600 in Dotternhausen	5
4	Übersicht der Kalibrierung für jeden Standort	6
5	Typischer Helligkeitsverlauf einer klaren, mondlosen Nacht	8
6	Vergleichsbild einer klaren Nacht aus den drei Stationen	8
7	Helligkeitsverlauf von Arkaroola, Australien (Andrew Cool)	9
8	Verlauf der Himmelshelligkeit in einer Nacht mit aufgehendem Mond	10
9	Aufnahmen aus den Kamerastationen ohne Mond und mit Mondschein	10
10	Verlauf der Himmelshelligkeit in einer teilweise bewölkten Nacht	11
11	Aufnahmen aus den Kamerastation mit wolkenlosem Zenit und bedecktem Himmel	11
12	Verlauf der Mitternachtshelligkeit aller Standorte von 2018 bis 2021	12
13	Kartenausschnitt aus dem Weltatlas der Lichtverschmutzung von 2015 (Falchi et al.) . . .	13
14	SQM-Messungen aus dem Jahr 2018 in Arkaroola, Australien (Andrew Cool)	13
15	Vergleichsaufnahmen vom 1000 m hohen Plettenberg bei Dotternhausen im August 2018 .	14

Tabellenverzeichnis

1	Standardabweichungen bei der Kalibrierung	7
---	---	---

Alle Abbildungen stammen – soweit nicht anders gekennzeichnet – von Antonio Schmusch, Moritz Wolf und Till Credner.

Danksagung

Wolf, M.: Mitentwicklung der Helligkeitskalibrierung; Erstellen der Plotvorlagen für die Helligkeitsdiagramme; Mitaufbau der Kamerastation in Heilbronn; Unterstützung bei diversen Wartungsarbeiten an den Stationen; Gemeinsame Diskussion über Ergebnisse und Interpretationen der Daten; Korrekturlesen der schriftlichen Ausarbeitung; Co-Autor der schriftlichen Jugend forscht Arbeit vom letzten Jahr, auf welche an einigen Stellen verwiesen wird.

Credner, T., Dipl.-Phys., Progymnasium Rosenfeld: Mitaufbau der Kamerastation auf dem Schachen; Kritische Auseinandersetzung mit der Arbeit, damit diese einer klaren und möglichst objektiven, wissenschaftlicher Methodik entspricht; Diskussion bei der Entwicklung von aussagekräftigen Ergebnissen.

Wissenswerkstatt Balingen: Finanzierung der Kamerastation in Dotternhausen und der Demo-Station für den Wettbewerbsstand.

Projekt Sternenpark Schwäbische Alb: Finanzierung der Kamerastation auf dem Schachen; Bereitstellung des Sky Quality Meters.

Science Center experimenta: Finanzierung der Kamerastation in Heilbronn; Übernahme der Betriebskosten; Aufnahme der SQM-Daten zur Kalibrierung durch David Mülheims.

Pfadfinderzentrum Schachen: Kletterturm als Standort für die Kamerastation; Übernahme der Kosten für den Stromverbrauch der Station.

