

Licht aus, Sternenhimmel an!

Lichtverschmutzung in der Schweiz



Maturaarbeit von Rebecca Stadler
Kantonsschule Wettingen, 8. November 2021

Betreuerin: Dr. Maria Samaras, Gegenleserin: Evelyne Kunz

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Lichtverschmutzung in der Schweiz in verschiedenen Grossstädten, Tälern und einem Naturpark gemessen und verglichen. Es wurde untersucht, welche Messmethoden zur Bestimmung von direkten und indirekten Lichtemissionen verwendet werden können, wie sehr sich die Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung von Ballungszentren verändert, wie gross der Einfluss von geografischen Faktoren wie Erhebungen sind, wie sich die Lichtverschmutzung in der Schweiz im Laufe der Zeit entwickelt und wie Lichtverschmutzung nachhaltig verringert werden könnte.

Um einen differenzierten Überblick zu erhalten, wurden die Resultate von verschiedenen Messungen in Tabellen und Diagrammen dargestellt. Bei der Auswertung zeigte sich, dass im Naturpark Gantrisch die Lichtverschmutzung am geringsten ist und sie mit zunehmender Zersiedlung zunimmt. In Agglomerationen von Grossstädten ist die Lichtverschmutzung bereits signifikant höher und in Grossstädten wie Zürich deutlich akzentuiert. Erhebungen und Hügel wie die Lägern haben nur einen geringen Einfluss auf die Messdaten in angrenzenden Tälern. Als effektivstes Messgerät mit vorzüglichen Eigenschaften bezüglich Handbarkeit und Messgenauigkeit kristallisierte sich das Sky-Quality-Meter (SQM) heraus. Ansätze wie das frühere Erlöschen von Strassenlaternen und einen generell bewussteren Umgang mit der Lichtnutzung könnten die Lichtverschmutzung deutlich reduzieren.

Vorwort

Die Kriterien für ein Maturaarbeitsthema an der Kantonsschule Wettingen (KSWE) sind sehr weit gefasst und lassen der eigenen Kreativität und den eigenen Interessen einen grossen Freiraum.

Bei der Recherche nach interessanten Themen bin ich auf das noch eher unerforschte Thema Lichtverschmutzung gestossen.

Viele Menschen können sich etwas unter dem Begriff Lichtverschmutzung vorstellen, jedoch wissen nur wenige, wie das Licht tatsächlich uns Menschen und die Tierwelt beeinflusst. Mich interessierte im Besonderen, wo in der Schweiz die Lichtverschmutzung am ausgeprägtesten ist, wie sie sich in den letzten Jahren verändert hat, wie die Lichtverschmutzung gemessen werden kann und was sie für Auswirkungen auf uns Menschen und die Umwelt hat.

Da Lichtverschmutzung einen umfangreichen Themenbereich umfasst, musste ich mich am Anfang meiner Arbeit auf einen kleinen Teilbereich fokussieren. Ich habe mich bei den Messungen auf drei verschiedene Gebiete konzentriert: Grossstädte, Täler und Naturparks. Es entstand eine Arbeit, welche perfekt auf meinen Interessensbereich zugeschnitten ist, eine ausgewogene Mischung aus praktischer Arbeit und theoretischer Abhandlung.

Motivation

Ich habe letztes Jahr einen Austausch in der US-amerikanischen Stadt Las Vegas verbracht. Über den Verlauf des Jahres ist mir immer mehr aufgefallen, wie viel Licht vom Stadtzentrum her in den Himmel abgestrahlt wird. Es hat mich sehr fasziniert, wie weit das Licht des «Strips» (Hauptboulevard von Las Vegas) gesehen werden kann und wie hell der Nachthimmel allein von der 6.8km langen Aneinanderreihung von Lichtwerbungen erleuchtet wird.

Während meines Praktikums im Winter 2021 habe ich das Observatorium des Astronomischen Instituts der Universität Bern in Zimmerwald besucht. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vor Ort haben mir viel über ihre Teleskope und Projekte erzählt.

Eines dieser Projekte ist der Bau eines riesigen Teleskops in Südamerika, eine Zusammenarbeit mit der ESA. Mir wurde geschildert, dass an jenem Standort der Himmel pechschwarz sei und deshalb sehr gut Satelliten und andere Objekte im Weltall beobachtet und fotografiert werden können.

Der Bericht von einem pechschwarzen Himmel, der hierzulande schon lange nicht mehr anzutreffen ist, war diejenige Schlüsselerzählung, die mich schlussendlich dazu bewogen hat, in meiner Maturaarbeit das Thema Lichtverschmutzung vertieft zu behandeln.

Dank

Dieses Projekt wäre nicht ohne Hilfe zustande gekommen. Deswegen will ich mich ganz herzlich bei nachfolgenden Personen bedanken:

Frau Dr. Maria Samaras | Kantonsschule Wettingen
Betreuungsperson

Frau Evelyne Kunz | Kantonsschule Wettingen
Gegenleserin

Frau Nicole Dahinden | Naturpark Gantrisch BE
Ansprechperson, wertvolle Diskussionspartnerin, Bereitstellung der Messgeräte

Herr Peter Schlatter | Universität Bern
Einführung in das Auswertungsprogramm für die Kameraaufnahmen, Unterstützung bei der Auswertung

Herr Dr. Alessandro Vananti | Astronomisches Institut Universität Bern
Ansprechperson (ehemaliger Mentor), Vermittlung an den Naturpark Gantrisch BE

Herr Dr. Lukas Schuler | Dark Sky Switzerland
Ansprechperson, wertvoller Diskussionspartner, Bereitstellung der Messgeräte

Herr Dr. Manfred Stadler | Wettingen
Unterstützung beim Messen, Gegenleser

Im Besonderen möchte ich meinen Eltern danken, die mir motivierend beistanden und stets ein offenes Ohr für meine Anliegen hatten.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Eingrenzung des Themas.....	1
1.2	Theorie.....	2
1.2.1	Künstliches Licht.....	2
1.2.2	Was ist Lichtverschmutzung?.....	5
1.2.3	Auswirkungen der Lichtverschmutzung.....	7
1.2.4	Was wird bereits gegen Lichtverschmutzung unternommen?	9
1.2.5	Messgeräte.....	11
2	MATERIAL UND METHODEN.....	13
2.1	Methode	13
2.1.1	Angewandte Messmethoden	13
2.1.2	Orte	18
2.1.3	Hypothesen	20
3	RESULTATE	21
3.1	Messresultate.....	21
3.1.1	Grossstadtvergleich.....	21
3.1.2	Talvergleich	27
3.1.3	Naturparkvergleich	30
3.1.4	Zusätzliche Messungen in Grossstädten	34
3.1.5	Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz	35
3.1.6	Vergleich der verschiedenen Messmethoden.....	37
3.2	Fehlerrechnung	40
4	DISKUSSION.....	41
4.1	Diskussion der Resultate.....	41
4.1.1	Grossstadtvergleich.....	41
4.1.2	Talvergleich	43
4.1.3	Naturpark Gantrisch.....	45
4.2	Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz.....	47
4.3	Vergleich verschiedener Messgeräte	48
4.4	Auswirkungen der Lichtverschmutzung und Verbesserungsmöglichkeiten	50
4.5	Fehlerquellen	52
5	REFLEXION.....	53
6	FAZIT.....	54
7	LITERATURVERZEICHNIS	55
	ANHANG	68

1 Einleitung

1.1 Eingrenzung des Themas

Strassenlaternen, Leuchtreklame, Industrie- und Denkmalbeleuchtung, überall wird die Nacht durch künstliches Licht erhellt. Doch ein Grossteil dieses Lichts wird gar nicht genutzt und erhellt unsere Nacht sinnlos. Dies hat nicht nur Folgen für die Gesundheit von Mensch und Tier, sondern beeinflusst auch die astronomische Arbeit sowie jegliche lichtabhängigen Zyklen.

Da Lichtverschmutzung noch ein eher unerforschtes Arbeitsgebiet der Umweltverschmutzung darstellt und das Thema sehr facettenreich ist, beschränkt sich der praktische Teil dieser Arbeit auf den Vergleich von drei verschiedenen Teilbereichen der Lichtverschmutzung in der Schweiz: Grossstadtvergleich (Bern-Zürich), Talvergleich (Rohrdorf-Wettingen- Ehrendingen), Parkvergleich (Naturpark Gantrisch-Eigi Wettingen).

Es wird untersucht, wie Lichtemission gemessen werden kann, welche geografischen Faktoren einen Einfluss auf die Lichtverschmutzung haben, was für Auswirkungen Lichtverschmutzung auf das Ökosystem hat und wie Lichtverschmutzung in Zukunft vermindert werden könnte.

Aus diesen Interessensbereichen entwickeln sich folgende Fragestellungen:

- Welche Methoden eignen sich für die Messung von Lichtemissionen am besten?
- Wie gross ist der Einfluss der Parameter Erhebungen, Hügel und Einwohnerdichte auf die Lichtverschmutzung?
- Hat die Zertifizierung des Gebietes im Städtedreieck Bern-Thun-Fribourg als Naturpark Gantrisch (Bewahrung des Nachthimmels) einen signifikanten Einfluss auf die Lichtverschmutzung im Park?
- Wie sehr unterscheidet sich die Lichtverschmutzung in verschiedenen Schweizer Grossstädten und wie verändert sie sich mit zunehmender Entfernung von Zentren?
- Wie könnte die Lichtverschmutzung in Zukunft verringert werden? Was würde eine Reduktion für unsere Welt bedeuten?

1.2 Theorie

1.2.1 Künstliches Licht

Unter künstlichem Licht wird Licht verstanden, das von unnatürlichen Lichtquellen erzeugt wird. Beispiele dafür sind: Strassenlaternen, Lampen, Laser, aber auch Kerzen, Leuchtfarben und Leuchtmittel.

Natürliches Licht ist das Licht, welches von natürlichen Lichtquellen ausgestrahlt wird. Beispiele dafür sind: die Sonne und andere Sterne, Lava, Feuer, Polarlichter, Blitze und sogar Glühwürmchen.

Alle Arten von Licht beeinflussen sowohl unseren Tag- und Nacht-Rhythmus als auch den Vitamin-D-Haushalt.¹

Die Geschichte der künstlichen Beleuchtung reicht bis in die Steinzeit zurück. Damals wurde die Welt von offenen Feuerstellen erleuchtet, welche ebenfalls als Wärmequelle dienten. Im Laufe der Evolution des Menschen hat sich auch die Beleuchtung weiterentwickelt.

Aus einer offenen Feuerstelle entstanden Fackeln, welche bis ca. 8'000 vor Christus benutzt wurden und anschliessend von den ersten Schalenlampen (Abbildung 1) abgelöst wurden. Diese Lampen wurden aus rotem Ton als Schälchen geformt, welche mit Ölen, Tierfetten oder Wachs befüllt und mit einem Docht versehen wurden. Nach ca. 7'000 Jahren entwickelten sich aus diesen Schalenlampen Tonlampen, welche heute unter Öllampen bekannt sind.



Abbildung 1: Beispiel einer Schalenlampe aus «Das andere Kantonsmuseum Bern»

Doch nicht nur die Innenräume und Höhlen wurden beleuchtet. Um 260 vor Christus wurde bereits der erste Leuchtturm vor der ägyptischen Hafenstadt Alexandria gebaut.

Auch im antiken Antiochia, heute Antakya in der Türkei, wurden aus dem Jahr 378 nach Christus erste Hinweise auf die Beleuchtung von Strassen gefunden.

Im zweiten Jahrhundert nach Christus wurden schliesslich die ersten Kerzen erfunden. Diese wurden meist aus Bienenwachs oder Rindertalg hergestellt. Bienenwachskerzen waren noch bis ins 19. Jahrhundert ein sehr beliebtes Beleuchtungsmittel der adeligen Oberschicht, die ärmeren Bürger verwendeten weiterhin Öllampen.

1783 wurde von Aimé Argand der Rundbrenner erfunden. Die Lampe war eine Weiterentwicklung der bereits erfundenen Öllampe. Sie enthielt einen Runddocht, welcher durch erhöhte Sauerstoffzufuhr eine höhere Brenntemperatur erreichte und somit mehr Licht abgab und einem Glaszylinder, welcher den Brennvorgang beruhigen sollte. Zudem war in der Lampe ein Drehmechanismus eingebaut, mit welchem sich die Lichtmenge regulieren liess.²

Mitte 19. Jahrhundert, mit der Erfindung der Elektrizität, entwickelten sich auch die Möglichkeiten zur Beleuchtung sprunghaft. Die erste elektrische Lichtquelle wurde 1876 von Pawel Jablotschkow erfunden: die sogenannte Bogenlampe. Diese Lampe wurde aus zwei

¹ Beleuchtungsdirekt, o.J.

² Licht, o.J.

Kohlenstiften gebaut und brannte für ca. 1,5 Stunden. Bogenlampen wurden als beliebte Prestigeobjekte im öffentlichen Raum von Grossstädten wie Paris, London und Paris verwendet.

Das eigentliche elektrische Zeitalter begann jedoch erst mit der «neuen» Erfindung der Glühlampe von Thomas Alvar Edison. Diese «neue» Glühlampe war ein technisch weiterentwickeltes Modell der bereits im Jahre 1854 erfundenen Glühlampe mit Bambusfaser von Heinrich Göbel. Dank eines kompletten Systems von Stromerzeugung, Schaltern und Sicherungen machte Edison die elektrische Lichtnutzung für «jedermann» einfach nutzbar. Elektrisches Licht war jedoch immer noch ein Luxus, welcher sich nur die Oberschicht leisten konnte.

Für die Mittelschicht, Handwerker und Industrie sowie für die Strassenbeleuchtung wurde weltweit hauptsächlich Gaslicht als künstliche Lichtquelle verwendet. Dafür wurde der 1885 von Carl Auer von Welsbach erfundene Glühstrumpf genutzt. Ein Glühstrumpf funktioniert nach dem Prinzip des Weissglühens, bekannt von der Bogenlampe, welches der Chemiker auf die Gasbeleuchtung übertrug. Um den Glühstrumpf zu entzünden, wurde eine Bunsenflamme eingesetzt. Diese Methode war effizient und kostengünstig.

Mit einer weiteren Erfindung, der Metallfadenglühbirne, 1898, rund 10 Jahre nach der Kohlefadenlampe von Edison, trug Carl Auer von Welsbach bedeutend zur Entwicklung und Verbreitung des elektrischen Lichts bei.

Von da an wurde vor allem daran gearbeitet, die Lebensdauer und Effizienz von Glühlampen zu verbessern. Die 1959 patentierte Halogenlampe beispielsweise hatte eine beinahe doppelt so lange Lebensdauer und einen deutlich höheren Wirkungsgrad als die Metallfadenglühbirne. Halogenlampen wurden vor allem in Immobilien und im kommerziellen Bereich eingesetzt. Auch wurden sie oft in Scheinwerfern von Motorfahrzeugen eingebaut, sind heutzutage jedoch durch Xenon- und LED-Lampen ersetzt worden.³

LED-Lampen waren eine fundamentale Neuerung in der Nutzung von elektrischem Licht. Keine Lichtquelle zuvor war so effizient und langlebig. LEDs sind heutzutage in 85% aller künstlichen Lichtquellen zu finden, wobei sie am häufigsten in Wohnungen und im privaten Gebrauch zum Einsatz kommen.

Durch die Erfindung der LEDs und später intelligenter Lichtsteuerungssysteme kann das künstliche Licht heutzutage deutlich effizienter genutzt werden.⁴

In der Schweiz gilt der Tag der Beleuchtung des Hotels Kulm in St. Moritz mit elektrischem Licht als Start ins Zeitalter der Elektrisierung. Der damalige Hoteldirektor Johannes Bandrutt liess den Speisesaal des Hotels am Abend des 18. Juli 1879 in elektrischem Licht erleuchten. Dies war jedoch streng genommen nicht der erste Einsatz von elektrischem Licht in der Schweiz. Zuvor wurde es bereits bei einem Anlass in Fribourg und auch an verschiedenen privaten Feiern genutzt.

Elektrisches Licht war im 19. und 20. Jahrhundert ein Luxusgut, welches sich nur sehr wenige Bewohner der Schweiz leisten konnten. Hauptsächlich wurde das Licht in Hotels, Restaurants und für die Strassenbeleuchtung eingesetzt. Mit der Rationierung von fossilen Brennstoffen nach dem ersten Weltkrieg und dem damit verbundenen massiven Ausbau der Schweizer Wasserkraft zur Stromproduktion, war für die breite Bevölkerung Elektrizität plötzlich erschwinglich und in der Folgezeit konnten sich immer mehr Schweizer Haushalte elektrisches Licht leisten.

³ Licht, o.J.

⁴ Licht, o.J.

Heutzutage ist das elektrische Licht kaum mehr aus dem Alltag wegzudenken. Sicherheit und Kommunikation hängen stark davon ab und unser Tagesrhythmus wird davon bestimmt. Die Erfindung des elektrischen Lichts brachte uns viele Vorteile, jedoch auch einige Herausforderungen.⁵

Zusammengefasst: Lange Zeit wurden Öllampen als künstliche Lichtquellen benutzt. Im Jahr 200 nach Christus wurden die ersten Bienenwachskerzen erfunden, welche vor allem die adelige Oberschicht verwendeten. Im 19. Jahrhundert wurde diese Art der Beleuchtung von der elektrischen Glühbirne abgelöst. In der Folgezeit wurde die Lichtnutzung weltweit stark intensiviert. Heutzutage werden hauptsächlich LED Lampen eingesetzt, da diese deutlich effizienter und langlebiger sind als Glühbirnen.

⁵ St. Moritz Energie, o.J.; Schneider, 2017, S.6 ff

1.2.2 Was ist Lichtverschmutzung?

Lichtverschmutzung ist ein Phänomen, bei dem der Nachthimmel durch eine künstliche Lichtquelle aufgehellt wird. Der Grossteil der Lichtverschmutzung wird durch LEDs in der Aussenbeleuchtung verursacht. Lichtverschmutzung ist ein Teilbereich der Umweltverschmutzung.

Lichtverschmutzung kann in verschiedene Teilbereiche aufgeteilt werden. Die wichtigsten Unterteilungen sind «Light Trespass» und «Skyglow»:

- «Light Trespass» beschreibt die Verschmutzung durch eine direkte Blendung einer Lichtquelle, zum Beispiel eine Strassenbeleuchtung, Scheinwerfer und weitere künstliche Lichtquellen.
- «Skyglow» bezieht sich auf die Lichtverschmutzung, bei welcher der Nachthimmel zu leuchten beginnt und somit nicht mehr schwarz erscheint. Im Unterschied zu «Light Trespass» kann «Skyglow» keiner eindeutigen Lichtquelle zugeordnet werden.⁶

Lichtverschmutzung existiert seit der Mensch künstliche Lichtquellen nutzt, also ungefähr 40'000 Jahre. Eine spürbare Veränderung für die Umwelt ergab sich jedoch erst mit der Erfindung der Glühbirne von Thomas Alvar Edison im 19. Jahrhundert.

Lichtverschmutzung entsteht durch den Tyndall-Effekt, die Streuung von Licht an Partikeln in der Luft und durch Reflexion und Refraktion des Lichts.

Grossstädte, Industrieanlagen, internationale Häfen und Flughäfen sind die grössten Verursacher der Lichtverschmutzung. Sie erhellen die Nacht durch Leuchtreklamen, Strassenbeleuchtung, Flutlichtanlagen und auch Industriebeleuchtung. Grossstädte leuchten auch noch aus weiter Entfernung, was hinlänglich als Lichtglocke oder Lichtkuppel bekannt ist (Abbildung 2).

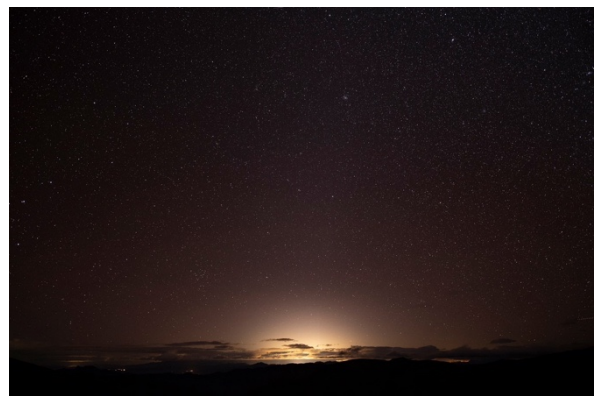


Abbildung 2: Lichtglocke von Las Vegas in 145 Kilometer Entfernung

Künstlich emittiertes Licht erschwert es in Ballungszentren unter einem pechschwarzen Nachthimmel Sterne zu beobachten. Vor etwa 150 Jahren war dies noch möglich. Mit der Erfindung der Elektrizität und der sprunghaften Zunahme der Beleuchtung hellte sich der Nachthimmel nachhaltig auf. Heutzutage wächst weltweit die Lichtverschmutzung immer noch kontinuierlich und es ist de facto nirgends auf der Erde mehr ein pechschwarzer Himmel zu finden. In Chad, Madagaskar und der Zentralafrikanischen Republik ist die Lichtverschmutzung von besiedeltem Gebiet am geringsten. In Singapur, San Marino und Kuwait jedoch ist der Nachthimmel so hell erleuchtet, dass nur noch 0.5% der, von der Erde aus sichtbaren, Sterne gesehen werden können.

In der Schweiz ist die Lichtverschmutzung im Mittelland Region Aarau-Zürich-Winterthur am grössten. In den Alpen wiederum ist sie deutlich geringer, da nur wenige Dörfer und Städte

⁶ Bermudez (o.J.)

für eine Emission sorgen. Die gesamte Südschweiz ist stark von der Lichtglocke der norditalienischen Grossstadt Mailand beeinflusst.

Mailand ist kein Einzelfall für eine solche Lichtglocke. Das wohl populärste Beispiel einer lichtverschmutzenden Stadt ist die US-amerikanische Metropole Las Vegas. Der rund 6.8km lange Las Vegas Strip ist das ganze Jahr über, 24 Stunden pro Tag, von Lichtwerbungen hell erleuchtet (Abbildung 3).

Die Lichtschlange des Strips ist eine regelrechte Schleuder für Lichtverschmutzung.



Abbildung 3: Las Vegas Strip in der Nacht

Neben den unzähligen Leuchtreklamen tragen auch Hotels mit ihrer Aussenbeleuchtung zur Lichtverschmutzung bei.

Besonders ins Auge sticht das Luxor Hotel, das einen, von 39 Xenon-Lampen erzeugten, blauwelligen Lichtstrahl in den Nachthimmel emittiert, welcher als einer der stärksten Lichtstrahlen der Welt gilt (Abbildung 4). Je nach Wetterlage kann der Strahl sogar vom Flugzeug aus gesehen werden und er wird auch als Navigationspunkt vom Luftfahrtministerium genutzt.⁷



Abbildung 4: Luxor Hotel mit Luxor Sky Beam

Blauwellige Lichtstrahlen haben den grössten Einfluss auf die Lichtverschmutzung. Blauwelliges Licht wird in der Atmosphäre stärker reflektiert und gestreut und steuert damit einen grösseren Beitrag zur Lichtverschmutzung bei als vergleichbare Lichtstrahlen mit warmen Farben.

Zusammengefasst: Unter Lichtverschmutzung wird die Aufhellung der Nacht durch künstliches Licht verstanden. Lichtverschmutzung wird in die direkte Blendung «Light Trespass» und die Erhellung des Nachthimmels «Skyglow» unterteilt. Sie entsteht durch Streuung, Refraktion und Reflektion des Lichts an Partikeln in der Luft. Grössstädte mit ihren Lichtglocken beziehungsweise Lichtkuppeln tragen am meisten zur Lichtverschmutzung bei.

⁷ Drake, 2019

1.2.3 Auswirkungen der Lichtverschmutzung

Lichtverschmutzung hat viele unterschiedliche Auswirkungen. Einige davon werden in diesem Abschnitt genauer beleuchtet.

Überflüssiges Licht verändert nicht nur die Farben und den Kontrast des Nachthimmels, sondern hat auch einen grossen Einfluss auf den zirkadianen Rhythmus. Der zirkadiane Rhythmus beschreibt die 24-Stunden Periodenlänge von physiologischen Vorgängen vieler Lebewesen. Durch die Lichtverschmutzung wird dieser Rhythmus gestört, was einen grossen Einfluss auf Umwelt, Mensch und Tier, als auch auf die Forschung hat.

Die Zellreparatur vieler Organismen orientiert sich am Licht und dessen natürlichem Hell-Dunkelrhythmus.

Viele Insekten irritiert Beleuchtung in der Nacht. Sie kreisen immerwährend um Strassenlaternen und andere künstlichen Lichter, bis sie von anderen Tieren gefressen werden oder vor Erschöpfung sterben, mit gravierenden Folgen für nachtaktive Pflanzen, welche nicht mehr bestäubt werden.⁸

Für Vögel hat Lichtverschmutzung einen Effekt auf ihre Tagaktivität. Sie sind früher wach, was besonders in kalten Jahreszeiten eine Herausforderung darstellt, da im Wachzustand mehr Kalorien verbraucht werden und früh am Morgen weniger Futter vorhanden ist. Ein sehr grosses Problem ist ausserdem der stark erhellte Nachthimmel von Grossstädten. Zugvögeln wird die Sicht auf die Sterne eingeschränkt und somit verlieren sie ihre Orientierung. Zudem ziehen die Lichter der Grossstädte Vögel magisch an, was die Gefahr birgt, dass sie mit Gebäuden kollidieren und qualvoll verenden.⁹

Künstliches Licht in der Nacht kann auch eine negative Auswirkung auf die Schlafqualität des Menschen haben und zu Schlafstörungen führen. Für einen erholsamen Schlaf wird vom Körper das Hormon Melatonin ausgeschüttet. Dies geschieht jedoch erst, wenn ein gewisses Mass an Dunkelheit erreicht ist. Ist es zu hell, wird zu wenig Melatonin ausgeschüttet und der Mensch kann sich nicht ausreichend erholen. Mit den heutzutage erreichten Werten der Lichtverschmutzung kann in der Regel ohne Vorhänge oder Rollläden keine ausreichende Dunkelheit mehr erreicht werden.¹⁰

Schlafstörungen sind die am häufigsten genannte Störwirkung der Raumaufhellung. Raumaufhellung beschreibt die unerwünschte Erhellung von Wohnbereichen in der Nacht durch Strassenlaternen, Weihnachtsbeleuchtungen etc. Dabei ist gelbes und weisses Licht am wenigsten störend, grünes, rotes und blaues Licht werden als die störendsten Farben wahrgenommen. Ein zusätzliches Blinken akzentuiert diesen Effekt.

Blaues Licht wird oft in elektronischen Geräten wie Mobiltelefonen verwendet. Diese Tatsache kann einen signifikanten Einfluss auf das Einschlafverhalten insbesondere von Jugendlichen haben und kann im Weiteren zu schlechtem Schlaf beitragen. Auf die Auswirkungen des Blaulichts von elektronischen Geräten auf den Menschen wird in dieser Arbeit jedoch nicht detailliert eingegangen.¹¹

⁸ Köbler-Linser, 2020

⁹ SRF, 2019; Thiele, 2015

¹⁰ Köbler-Linser, 2020

¹¹ BAFU, 2021

Doch auch nur schon eine vergleichsweise kleine Lichtquelle, beispielsweise von einer Taschenlampe, kann mit direkter Blendung, eine störende und belästigende Wirkung auf den Menschen entfalten. Es wird vermutet, dass ein Grund dafür ist, dass eine Lichtquelle mit direkter Blendung zwar die Aufmerksamkeit auf sich zieht, jedoch keinerlei Informationen aus dieser Lichtquelle gezogen werden können. Eine weitere These ist, dass durch die punktuelle Beleuchtung nur gewisse Sehnerven gereizt werden, was zu Irritationen des Sehmuskels und des Irismuskels führen könnte.

Solche Störfaktoren sind jedoch rein subjektiv und können somit jeden Menschen anders belasten. Es wird daher von einer psychologischen Blendung gesprochen.¹²

Zusammengefasst: Lichtverschmutzung beeinflusst nicht nur den Schlaf des Menschen und seine Gesundheit, sondern manipuliert auch den 24h-Zyklus von Tieren und den Zellzyklus. Vögel verlieren beispielsweise ihre Orientierung oder Insekten umkreisen, magisch angezogen, beleuchtete Strassenlaternen, bis sie vor Erschöpfung sterben.

¹² BAFU, 2021

1.2.4 Was wird bereits gegen Lichtverschmutzung unternommen?

Auch wenn Lichtverschmutzung bislang ein noch eher unerforschter Teil der Umweltverschmutzung darstellt, gibt es bereits einige Organisationen, Verbände und auch Gemeinden, welche sich für eine effizientere und umweltschonendere Beleuchtung einsetzen.

Eine namhafte Institution mit Pionierrolle ist die Organisation International Dark-Sky Association (IDA). Ihr Ziel ist es, Licht in der Nacht effizienter zu nutzen, so dass weniger Helligkeit in den Himmel abgestrahlt wird und folglich ein dunklerer Nachthimmel geschaffen wird. Die IDA ist in mehrere kleine Organisationen in verschiedenen Ländern wie zum Beispiel USA, China, Israel, Argentinien, Österreich und auch der Schweiz aufgeteilt.

In den USA engagiert sich die IDA, dass gewisse Regionen «lichtgeschützt» werden. Dieses Engagement soll einerseits der astronomischen Forschung helfen und andererseits auch das Ökosystem an sensiblen Orten schützen.

Lichtgeschützte Regionen werden in International Dark Sky Reserve, International Dark Sky Park, International Dark Sky Community, International Dark Sky Sanctuary und Urban Night Sky Places unterteilt:¹³

- International Dark Sky Reserve (IDSR) bezeichnet ein privates oder öffentliches Gebiet, welches einen besonders schützenswerten Nachthimmel ausweist oder im Gebiet eine Flora und Fauna vorliegt, welche zum nationalen Kulturerbe gehört und durch menschliche Einflüsse möglichst wenig beeinträchtigt werden sollte. Um als IDSR klassifiziert zu werden, muss in der Kernzone eine definierte Mindestdunkelheit vorliegen.
- International Dark Sky Park bezeichnet ein öffentliches Gebiet mit speziellem Nachthimmel, in dem nächtliche Dunkelheit für die Umwelt von zentraler Bedeutung ist.
- International Dark Sky Community ist eine Auszeichnung für eine Gemeinde, welche sich für eine sparsame Beleuchtung einsetzt und damit der Lichtverschmutzung entgegenwirkt.
- International Dark Sky Sanctuary bezeichnet ein oftmals eher abgelegenes, privates oder öffentliches Gebiet, welches aus wissenschaftlichen und ökologischen Gründen geschützt wird und eine herausragende Qualität des Nachthimmels aufweist.
- Mit Urban Night Sky Places werden öffentliche Anlagen bezeichnet, welche, inmitten künstlichen Lichts, ein Nachterlebnis vermitteln sollen.

Die IDA Partnerorganisation in der Schweiz, Dark Sky Switzerland, setzt sich für einen bewussten Umgang mit Licht ein, um die Biodiversität zu erhalten, eine natürliche Nachtlandschaft zu kreieren und Ressourcen gezielt einzusetzen. Dark Sky Switzerland ist eine Freiwilligen-Organisation, deren Schwerpunkt auf der Reduktion der Lichtverschmutzung in der Schweiz liegt. Die Veränderung der Lichtverschmutzung im Laufe der Zeit wird dokumentiert und auf einer Webseite in Form von Lichtemissionskarten der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.¹⁴

Ähnlich wie in den verschiedenen International Dark Sky Parks ist im Naturpark Gantrisch die Bewahrung des Nachthimmels ein Anliegen von grosser Bedeutung, sodass ein natürlicher Sternenhimmel beobachtet werden kann. Der Park liegt in den Berner Voralpen im Städtedreieck Bern-Thun-Fribourg. Seit 2012 ist das Gebiet als regionaler Naturpark zertifiziert, was

¹³ IDA, o.J.

¹⁴ DSS, o.J.

bedeutet, dass darauf geachtet wird, die Vielfalt der Natur und Schönheit der Landschaft zu erhalten, zu verbessern und gleichzeitig eine nachhaltige Wirtschaft und regionale Wertschätzung zu fördern. Der Naturpark Gantrisch ist in der Nacht eine der dunkelsten Regionen der Schweiz und bietet somit eine gute Voraussetzung als Standort für astronomische Forschung. Im 400km² grossen Park sind 3 Observatorien bzw. Sternwarten angesiedelt: das Observatorium Zimmerwald, die Schulsternwarte Schwarzenburg und die Sternwarte Uecht.¹⁵

Auch der deutsche Verein, Paten der Nacht, setzt sich gegen die Lichtverschmutzung ein. Das Ziel dieser Organisation ist es, die Menschheit darüber zu informieren, was Lichtverschmutzung ist und was alles dagegen unternommen werden kann. Die Organisation ist der Meinung, dass bereits genügend Ansätze für die Minderung von Lichtverschmutzung vorhanden sind und diese nur noch umgesetzt werden müssen. Die Organisation unterstützt viele Projekte, welche der Lichtverschmutzung entgegenwirken wie zum Beispiel die Earth Hour und Earth Night. Bei der Earth Hour soll das Licht jeweils in einer Märznacht auf der ganzen Welt eine Stunde lang gelöscht werden, bei der Earth Night, in einer Neumondnacht im September, um 22 Uhr für den Rest der Nacht. Die nächste Earth Night findet am 23. September 2022 statt.¹⁶

Auch in einigen Schweizer Gemeinden sorgt das Thema Lichtverschmutzung für Diskussionsstoff wie zum Beispiel im aargauischen Baden. Die Beleuchtung des Stadtturms und der Altstadt soll in Zukunft bereits um 22:00 Uhr statt wie bis anhin um 1:00 Uhr abgeschaltet werden.

Im Kanton Schaffhausen wurde am 13. Juni 2021 über der Initiative «mehr Raum für die Nacht» abgestimmt. Das Ziel der Initiative ist es, Streulicht im Kanton zu verringern und somit einen klareren Sternenhimmel zu schaffen. Die Initiative wurde jedoch abgelehnt.¹⁷

Zusammengefasst: Es gibt viele verschiedene Organisationen und Gemeinschaften, die sich gegen Lichtverschmutzung einsetzen, beispielsweise die International Dark Sky Association, die sich für eine effizientere Lichtnutzung engagiert und verschiedene Naturgebiete, öffentliche Anlagen oder ganze Gemeinden schützt. Die schweizerische Partnerorganisation nennt sich Dark-Sky Switzerland und setzt sich in der Schweiz für die Erhaltung des Nachthimmels in mehreren Naturparks und Gemeinden ein.

¹⁵ Naturpark Gantrisch, 2017

¹⁶ Paten der Nacht, 2021

¹⁷ Kunz, 2021; SRF, 2021

1.2.5 Messgeräte

Für die Messung von Lichtemissionen gibt es viele verschiedene Messgeräte. In folgendem Abschnitt werden die Wichtigsten vorgestellt: Sky-Quality-Meter, Tess-W Photometer, Luxmeter, Sterne zählen und Smartphone Apps.

Sky-Quality-Meter (SQM, SQM-L)

Ein häufig genutztes Gerät, um die Lichtintensität am Nachthimmel zu bestimmen, ist das Sky-Quality-Meter (SQM). Das Gerät ist in zwei Varianten erhältlich, mit (SQM-L) und ohne (SQM) zusätzlicher Linse. Die zusätzliche Linse verkleinert den Empfindlichkeitsbereich auf ca. 20°,



Abbildung 5: Werte eines SQM für die jeweilige Dunkelheit

was exaktere Messungen ergibt. Das SQM misst die scheinbare Helligkeit der Himmelskörper im Messbereich der Magnitude. Die Helligkeit wird in mag/arcsec^2 (Magnitude pro Bogensekundenquadrat) angegeben. In Abbildung 5 sind die verschiedenen Werte zu sehen. Ein Messwert von 16 mag/arcsec^2 ist sehr «hell» und wird in einer Innenstadt bei Vollmond gemessen. Der Wert 21 mag/arcsec^2 wird an einem Standort praktisch ohne künstliche Lichtemissionen erreicht (komplett dunkle Nacht), von dem aus ein grosser Teil der Sterne von blossen Auge beobachtet werden kann.¹⁸

Tess-W Photometer

Ein weiteres Messgerät ist das Tess-W Photometer. Es wird von der Organisation STARS4ALL H2020 gebaut. Ähnlich wie beim SQM wird bei diesem Gerät das Licht mit einer Fotodiode gemessen und in unterschiedliche Frequenzen umgewandelt. Im Unterschied zum SQM wird der Farbbereich des Tess-W Photometer durch die Benutzung eines dichroitischen Filters auf den roten Bereich erweitert. Ein dichroitischer Filter, auch Interferenzfilter genannt, wird benutzt, um mit Hilfe der Interferenz (Änderung der Amplitude bei Überlagerung zweier Wellen) Licht frequenzabhängig zu filtern. Mit dem Tess-W Photometer können die gemessenen Daten per Wi-Fi direkt an einen Rechner gesendet werden.¹⁹

Luxmeter

Das Luxmeter ist ein handliches Gerät, welches die Lichtintensität in Form von Lux anzeigt. Das Gerät misst die Helligkeit für einen bestimmten Punkt und gibt die Lichtenergie wieder. In einem Luxmeter werden Fotodioden oder Fotowiderstände als Sensoren verwendet. Sie wandeln die aufgenommene Energie in elektrische Spannung um, welche als Messwert wiedergegeben wird. Luxmeter können ein Messspektrum von 0.1 bis 50'000 Lux aufweisen. Für Messungen über einen längeren Zeitraum ist das Gerät zusätzlich mit einem Datenlogger ausgestattet, welcher die Messwerte speichert.

Luxmeter werden vor allem für die Messung von Hallen- und Saalbeleuchtungen, aber auch zur Bestimmung der Helligkeit von Strassenlaternen und Schaufenstern verwendet.²⁰

¹⁸ Schenk, o.J.; Unihedron, 2012

¹⁹ Zamorano, o.J.

²⁰ ITWissen, 2021

Sterne zählen

Eine «manuelle» Möglichkeit besteht darin, die Lichtverschmutzung anhand der sichtbaren Sterne abzuschätzen. Diverse Faktoren haben jedoch einen Einfluss auf diese Messart.

Wolken am Himmel können das Ergebnis beeinträchtigen, weil Sterne nicht mehr sichtbar sind. Der Ausschnitt des Sternenhimmels ist abhängig von Uhr- und Jahreszeit sowie vom Ort der Betrachtung. Da sich die Erde um sich selbst als auch um die Sonne dreht, dreht sich der Sternenhimmel relativ zum Beobachtungsstandort. Zudem ist an unterschiedlichen Orten auf der Erde nicht derselbe Sternenhimmel sichtbar, da sich der «Blickwinkel» auf die Milchstrasse ändert.

Um zu analysieren, wieviele Sterne beobachtet werden können, wird eine Sternkarte des jeweiligen Beobachtungsortes verwendet oder eine Sternbetrachtungs-App.²¹

Smartphone-Apps

Es gibt Apps für das Smartphone, mit denen die Lichtverschmutzung, mit Hilfe der eingebauten Kamera, gemessen werden kann. Mit einem CMOS-Sensor wird der Nachthimmel aufgezeichnet. Bei der Messung wird zuerst die «Lichtintensität» bei völliger Dunkelheit gemessen (die Kamera wird mit der Hand abgedunkelt), um die App zu kalibrieren. Anschliessend wird eine Aufnahme des Nachthimmels gemacht und die Helligkeit gemessen. Der Grad der Bewölkung und die Helligkeit des Mondes zum Messzeitpunkt muss bei der Analyse der Resultate berücksichtigt werden.²²

Zusammengefasst: Die wichtigsten Messgeräte zur Bestimmung der Lichtverschmutzung sind das Sky-Quality-Meter, das Tess W Photometer und das Luxmeter. Alle drei Messgeräte bestimmen die Lichtintensität mit Hilfe einer Fotodiode, welche als Sensor dient und verarbeiten die Informationen entweder durch Umwandlung in elektrische Spannung oder durch Umwandlung in unterschiedliche Frequenzen. Neben diesen drei Messgeräten ist es auch möglich, Lichtverschmutzung mit einer App auf dem Smartphone zu messen oder manuell Sterne am Nachthimmel mit einer Sternkarte zu vergleichen.

²¹ Pfälzerwald, o.J

²² Pfälzerwald, o.J.

2 Material und Methoden

2.1 Methode

Für diese Arbeit wurde die Methode der naturwissenschaftlichen Messung und Beobachtung gewählt. Diese Methode eignet sich, um das Verhalten einer Person, eines Gegenstandes oder einer Sache zu untersuchen.²³

Um eine Aussage zur Lichtverschmutzung zu erhalten, wurde mit unterschiedlichen Messmethoden an verschiedenen Orten in der Schweiz, die Lichtemission erfasst und verglichen. Im Unterkapitel 2.1.1 werden die eingesetzten Messmethoden detailliert erläutert.

Es wurden Messungen in Städten und Messungen auf dem Land durchgeführt. Bei Messungen in einer Stadt wurde jeweils die indirekte Lichtemission am Nachthimmel an einem oder mehreren Standorten, die indirekte Lichtemission am Stadtrand und die direkte Lichtemission der Stadt vom Stadtrand her gesehen, gemessen. Auf dem Land wurde nur die indirekte Lichtemission am Nachthimmel gemessen.

Die aufgezeichneten Daten wurden, zusammen mit der Uhrzeit, dem Datum, dem Wetter, dem Mondstand und den Koordinaten des jeweiligen Standortes, notiert.

2.1.1 Angewandte Messmethoden

Im folgenden Abschnitt werden die in Betracht gezogenen Messmethoden vorgestellt: Lego Mindstorms, Vernier LabPro, Dark-Sky-Meter App, SQM-L, SQM-L Road Runner und die Kamera.

Lego Mindstorms

Um Lichtemissionen messen zu können, wurde mit Hilfe des Lego Mindstorms Sets selber ein Messgerät gebaut.

Damit der EV3 Brick wie gewünscht programmiert werden konnte, musste zuerst das «EV3 MicroPython microSD card image» heruntergeladen und auf der microSD Karte installiert werden. Anschliessend wurde die microSD Karte in den EV3 Brick eingelegt, der Baustein mit dem Laptop verbunden (Abbildung 6) und der Farbsensor an den EV3 Brick angeschlossen.

Um ein Programm zu entwerfen und auf den EV3 Brick laden zu können, wurde die Entwicklungsumgebung Visual Code Studio verwendet.



Abbildung 6: EV3 Lego Mindstorms Messgerät

²³ Brunold, 2018, S.40f

Mit Hilfe des selbstgeschriebenen Programms (Abbildung 7) hat der Farbsensor die Lichtintensität der Umgebung gemessen und auf dem Bildschirm als Prozentwert dargestellt.²⁴

Mit dem Gerät wurde an verschiedenen Teststandorten die Lichtemission aus Richtung Norden, Osten, Süden und Westen, sowie auch aus Richtung des Zenits gemessen. Aus den Daten der einzelnen Messungen wurde der Mittelwert berechnet und die verschiedenen Teststandorte miteinander verglichen. Beim Messvorgang wurde darauf geachtet, dass für alle Himmelsrichtungen das Messgerät in einem 90° Winkel zum Boden ausgerichtet wurde. Beeinflussende Faktoren wie beispielsweise Wetter, Sonnenuntergangs- und Sonnenaufgangszeit und die Uhrzeit der Messung, wurden notiert und bei der Auswertung berücksichtigt.

```

1 main.py
2 #!/usr/bin/env pybricks-micropython
3 from pybricks.hubs import EV3Brick
4 from pybricks.ev3devices import (Motor, TouchSensor, ColorSensor,
5                                   InfraredSensor, UltrasonicSensor, GyroSensor)
6 from pybricks.parameters import Port, Stop, Direction, Button, Color
7 from pybricks.tools import wait, StopWatch, DataLog
8 from pybricks.robotics import DriveBase
9 from pybricks.media.ev3dev import SoundFile, ImageFile
10
11 # This program requires LEGO EV3 MicroPython v2.0 or higher.
12 # Click "Open user guide" on the EV3 extension tab for more information.
13
14 # Create your objects here.
15 ev3 = EV3Brick()
16
17 # Write your program here.
18 farbsensor = ColorSensor(Port.S3)
19 licht = farbsensor.ambient()
20 print(licht, " Prozent Licht")
21
22
23

```

Abbildung 7: Programm des Lego Mindstorms EV3 Brick Messgeräts

Material:

- Lego Mindstorms EV3 Brick
- Lego Mindstorms Farbsensor
- Lego Mindstorms Verbindungskabel
- USB-Kabel
- Transcend microSD Card 2GB
- «EV3 Micro-Python microSD card image»
- Visual Code Studio
- LMP microSD-Card Adapter
- MacBook Pro (13-inch), 2018

Vernier LabPro

Bei dieser Messmethode wurde die Lichtemission mit dem Lichtsensor des LabPro Messgerätes von Vernier aufgezeichnet. Mit Hilfe des Programms LoggerLite konnten die Daten vom Messgerät auf den Laptop übertragen und anschliessend in einer Excel-Tabelle ausgewertet und dargestellt werden (Abbildung 8).

Das Messgerät besteht aus dem Lichtsensor, welcher mit einem Kabel mit einem Regulator verbunden wurde, an welchem der Empfindlichkeitsbereich eingestellt werden konnte. Der Sensor und Regulator wurden mit dem Sensorinterface verbunden und mit einem USB-Kabel an den Laptop angeschlossen.

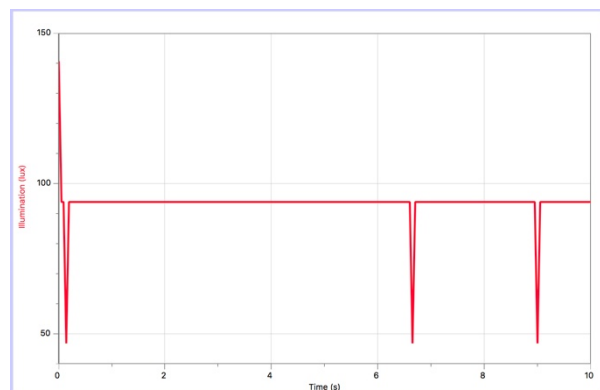


Abbildung 8: Testmessung in Wettingen mit dem LabPro

²⁴ Aetna, 2021, S.19; Lego Education, 2020, S.2ff

Mit dem Lichtsensor wurden pro Standort Messdaten aus allen vier Himmelsrichtungen gesammelt und gemittelt. Für die Analyse der Daten wurde das Wetter, die Mondphase und die Uhrzeit, wie auch die Sonnenuntergangszeit berücksichtigt.

Material:

- Vernier LabPro Sensorinterface
- Vernier LabPro Lichtsensor
- Vernier LabPro Regulator
- Verbindungskabel
- 6 Batterien
- LoggerPro Lite Programm
- MacBook Pro (13-inch), 2018

Dark-Sky-Meter App (DSM)

In dieser Arbeit wurde für Messungen der Lichtemission mit einem Smartphone die Dark-Sky-Meter App gewählt (Abbildung 9). Der Vorteil der Dark-Sky-Meter App im Vergleich zu anderen Apps wie beispielsweise Loss of the Night ist, dass die Kamera des Smartphones als Lichtsensor verwendet wird und die Lichtemission somit auch bei bedecktem Nachthimmel gemessen werden kann. Die Loss of the Night App vergleicht die Sterne am Nachthimmel mit einer Sternkarte und damit dies überhaupt praktikabel ist, ist ein klarer Nachthimmel die Voraussetzung.

Die Dark-Sky-Meter App ist für alle IOS Smartphones verfügbar. Eine Messung besteht aus zwei Schritten. Zuerst wird das Gerät kalibriert, indem bei abgedeckter Kamera eine Aufnahme gemacht wird. Danach wird die Kamera zum Zenit ausgerichtet und das Gerät misst die Helligkeit des Nachthimmels. Es besteht pro Messung die Möglichkeit, den Grad der Bewölkung anzugeben. Die gemessenen Daten werden auf einer Karte online dargestellt und können so einfach mit Messungen von anderen Standorten verglichen werden.

In dieser Arbeit wurde auch die direkte Lichtemission von nahegelegenen Ortschaften mit der App gemessen. Dazu wurde die Kamera des Smartphones jeweils auf das «Zentrum» der Ortschaft ausgerichtet.

Für beide Einstellungen wurden pro Standort fünf Messungen durchgeführt.

Material:

- Iphone 12 Mini mit Dark-Sky-Meter App

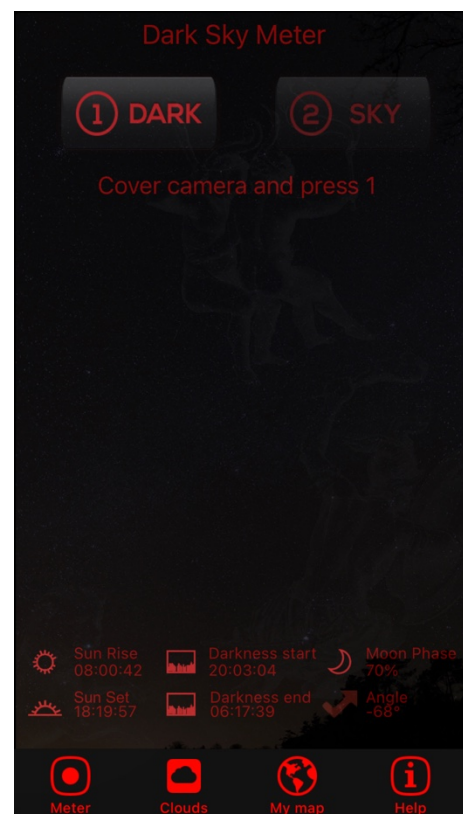


Abbildung 9: Dark Sky Meter App

Sky-Quality-Meter (SQM-L)

Eine weitere Möglichkeit die Helligkeit des Nachthimmels zu bestimmen, ist das Sky-Quality-Meter. In der Atmosphäre reflektieren kleine Staubpartikel, Wolken und Wassertröpfchen das Licht, welches vom Boden aus emittiert wird. Das reflektierte Licht wird vom Sky-Quality-Meter eingefangen und gemessen. Für diese Arbeit wurde ein SQM-L Messgerät eingesetzt, siehe Kapitel Messgeräte (Abbildung 10). Das Messgerät wurde senkrecht zum Boden ausgerichtet und per Knopfdruck die Lichtemission am Nachthimmel gemessen. Das SQM-L wurde ebenfalls benutzt, um die Helligkeit einer benachbarten Ortschaft aus der Entfernung zu bestimmen. Dabei wurde das Messgerät in einem 90° Winkel zum Boden direkt auf das Zentrum der jeweiligen Ortschaft ausgerichtet.

Für die beiden Einstellungen wurden pro Standort jeweils zehn Messungen durchgeführt.



Abbildung 10: SQM-L Messgerät

Die Werte des SQM-Ls werden in mag/arcsec^2 angegeben. Um die Daten des Gerätes mit anderen Messmethoden zu vergleichen, werden sie üblicherweise in cd/m^2 (Candela pro Quadratmeter) umgewandelt. Candela pro Quadratmeter ist eine geläufige Einheit für die Angabe der Lichtstärke.

Folgende Formel wird für die Umrechnung benutzt:

$$[\text{cd/m}^2] = 10.8 * 10^4 * 10^{(-0.4 * [\text{mag/arcsec}^2])}$$

In dieser Arbeit wurden schlussendlich jedoch ausschliesslich Messgeräte mit der Einheit mag/arcsec^2 verwendet, weshalb die Daten nie in cd/m^2 umgerechnet wurden.

Material:

- Sky-Quality-Meter (SQM-L)

SQM-L Road Runner

Der SQM-L Road Runner ist eine Messmethode, welche die Lichtemission auf einer bestimmten Strecke erfassen kann. Dabei wird ein SQM-L Gerät an der Seite eines Autos befestigt und mittels Kabel mit einem Smartphone oder einem Laptop verbunden. Auf dem Smartphone oder Laptop kann mit einem Programm das Intervall angegeben werden, in welchem zeitlichen Abstand das SQM-L eine Messung durchführen sollte (Abbildung 11). Für jede Messung werden zudem die Koordinaten gespeichert.

Mit dem SQM-L Road Runner konnten einfach und schnell viele Messwerte gesammelt werden. Die aufgezeichneten Daten wurden nach der Messung in eine Excel Datei übertragen. Diese Datei konnte in Google Maps (My Maps) eingefügt werden und alle Messwerte wurden mit Hilfe der Koordinaten auf einer Karte angezeigt.

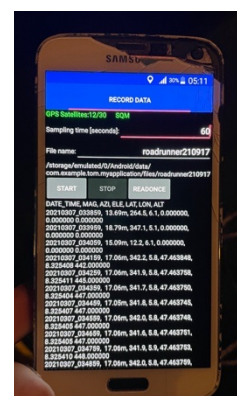


Abbildung 11: Datensammlung mit SQM Road Runner

Material:

- Samsung Smartphone mit Programm
- Sky-Quality-Meter (SQM-L)
- Halterung für das Messgerät am Auto
- Verbindungskabel
- Google Maps (My Maps)
- Skoda Fabia (Auto)

Luxmeter

Das Luxmeter ist eine Messmethode, die sich eignete, die Lichtemission in einem Dorf beziehungsweise in einer Stadt zu messen. Das Messgerät wurde auf einem gut belichteten Platz 360° in einem Kreis gedreht und die verschiedenen Messwerte wurden notiert.

Material:

- PCE-170 A Lightmeter
- Voltcraft Luxmeter

Kamera

Abbildung 12: Aufbau der Kameraaufnahme

In dieser Messmethode wurde mit einer Kamera und einem Fischaugen-Objektiv ein 360° Horizont aufgenommen (Abbildung 12). In zwei Schritten wurde zuerst während zwei Minuten von der Kamera ein Dunkelbild aufgenommen (Objektiv abgedeckt) und anschliessend bei offenem Objektiv während zwei Minuten das Licht des Nachthimmels eingefangen. Während letzterer Aufnahme musste darauf geachtet werden, dass keine Störfaktoren wie beispielsweise vorbeifahrende Autos oder vorbeifliegende Flugzeuge die Aufnahme beeinflussen.

Vor jeder Messung musste ein Bild mit abgedecktem Objektiv aufgenommen werden, um die Hotpixels der Aufnahme zu definieren.

Hotpixels sind weisse Fehlerpixel auf einer Aufnahme (Abbildung 13). Hotpixels könnten fälschlicherweise als Sterne erkannt werden und damit könnte die Orientierung des Bildes nicht korrekt angezeigt werden. Ausserdem müssen Hotpixels von der Helligkeit des Nachthimmels der Kameraaufnahme abgezogen werden, um die Daten nicht zu verfälschen.

Die Bilder wurden mit einem speziell entwickelten Programm ausgewertet. Hierfür musste zuerst die Kameraaufnahme mit offenem Objektiv und das dazugehörige Dunkelbild in das Programm eingefügt werden. Anschliessend wurde der entsprechende Standort, die Belichtungszeit, die genaue Typenbezeichnung der Kamera und die Zeitkorrektur der Kamera angegeben. Mit Hilfe dieser Daten und den beiden Bildern subtrahierte das Programm von jedem Pixel die Helligkeit auf der Aufnahme mit offenem Objektiv von der Hintergrundhelligkeit des



Abbildung 13: Beispielaufnahme mit Hotpixels der Kamera

Dunkelbildes und so entstand schliesslich die «echte» Hintergrundhelligkeit des Nachthimmels, in mag/arcsec^2 . Das Resultat ist ein schwarzweiss Bild. Um die Analyse zu vereinfachen, wurde in einem letzten Schritt eine farbige Skalierung gewählt. Der Nachthimmel ist in Rot- bis Blautönen dargestellt, wobei Blau die grössten und Rot die kleinsten Werte bedeuten. Mit Hilfe der Sterne konnte das Bild nach den Himmelsrichtungen ausgerichtet werden.

Diese Methode ist vor allem bei einem klaren Nachthimmel ohne Visibilität des Mondes geeignet.

Material:

- Canon 60D Kamera mit Fischaugen-Objektiv
- Speziell entwickeltes Auswertungsprogramm von Peter Schlatter
- Stativ
- Auslöser
- 16 GB SD-Speicherkarte
- LMP SD-Karten Adapter
- MacBook Pro (13-inch), 2018

2.1.2 Orte

Grossstadtvergleich:

Ort	Entfernung	Einwohnerdichte	Höhe
Zürich	0	4779 E/km ²	408 m.ü.M.
Wettingen	20.52 km (Westen)	1975 E/km ²	395 m.ü.M.
Bern	0	2607 E/km ²	542 m.ü.M.
Burgdorf	18.4 km (Norden)	957 E/km ²	557 m.ü.M.

Tabelle 1: Grossstadtvergleich von Zürich und Bern

Die erste Messreihe, Tabelle 1, beschränkte sich auf die beiden Grossstädte Zürich und Bern. Es wurde die Lichtverschmutzung in der Stadt, am Stadtrand und in der Agglomeration in ca. 20 km Entfernung gemessen. Als Messmethoden wurden SQM-L und Kamera verwendet. Die erhaltenen Messdaten wurden anschliessend ausgewertet, analysiert und miteinander verglichen.

Mit dieser Messung sollte ermittelt werden, wie stark die Lichtverschmutzung in Grossstädten und im Vergleich zwischen Grossstädten und den Agglomerationen variiert und wie stark die Lichtverschmutzung von der Einwohnerdichte abhängig ist.

Talvergleich:

Ort	Einwohnerdichte	Höhe
Rohrdorf	206 E/km ²	476 m.ü.M.
Heitersberg	0	657 m.ü.M.
Wettingen	1975 E/km ²	395 m.ü.M.
Lägern	0	866 m.ü.M.
Ehrendingen	664 E/km ²	448 m.ü.M.

Tabelle 2: Talvergleich von Rohrdorf, Wettingen und Ehrendingen

In einer zweiten Messreihe, Tabelle 2, wurden drei benachbarte Täler verglichen. Hierfür wurde jeweils eine Ortschaft pro Tal definiert, in welcher die jeweiligen Messungen durchgeführt werden sollten: Rohrdorf (Reusstal), Wettingen (Limmattal) und Ehrendingen (Ausläufer

des Surbtals). Die drei Ortschaften sind durch Hügelzüge voneinander getrennt; zwischen Rohrdorf und Wettingen liegt der Heitersberg (657 m.ü.M.) und zwischen Wettingen und Ehrendingen die Lägern (866 m.ü.M.). Als Messmethode wurden SQM-L, DSM und Kamera verwendet.

Mit dieser Messung sollte ermittelt werden, wie stark sich eine Erhebung bzw. ein Hügel auf die Lichtverschmutzung auswirken kann.

Naturparkvergleich:

Park	Ort	Fläche des Parks	Höhe	Einwohner
Naturpark Gantrisch	Niederblacken	414 km ²	829 m.ü.M	501
Naturpark Gantrisch	Zimmerwald	414 km ²	840 m.ü.M	8956
Eigi Wettingen	Eigihof	1 km ²	450 m.ü.M	19'757 (Wettingen)

Tabelle 3: Vergleich Naturpark Gantrisch und Naherholungsgebiet Eigi Wettingen

In einer dritten Messreihe, Tabelle 3, wurde die Lichtemission im Naturpark Gantrisch gemessen und mit den Messwerten vom Naherholungsgebiet Eigi in Wettingen verglichen. Als Messmethoden wurden das SQM-L, DSM und die Kamera eingesetzt.

Mit dieser Messung sollte ermittelt werden, wie effektiv sich das Engagement gegen die Lichtverschmutzung im Naturpark Gantrisch auswirkt.

Die Kameradaten wurden zudem an die Kontaktperson des Naturparks Gantrisch weitergeleitet und dort für interne Zwecke verwendet.

Zusätzliche Messungen in Grossstädten:

Ort	Einwohnerdichte	Höhe
Genf	12'803 E/km ²	375 m.ü.M.
Mailand	7'250 E/km ²	120 m.ü.M.
Venedig	346 E/km ²	1 m.ü.M.

Tabelle 4: Zusätzliche Messungen in Grossstädten

In Tabelle 4 sind die Messresultate in weiteren Grossstädten aufgelistet. Die Daten dieser Messungen wurden nicht in die Analyse miteinbezogen und haben auf die Schlussfolgerungen keinen Einfluss. Sie wurden jedoch als zusätzliche Indikatoren verwendet, um die Hypothesen im Unterkapitel 2.1.3 zu untermauern.

2.1.3 Hypothesen

Grossstadtvergleich:

Da Zürich von der Fläche, der Einwohnerzahl und der Einwohnerdichte grösser ist als Bern, wird Zürich eine stärkere Lichtverschmutzung aufweisen als Bern.

Mehr Einwohner bedeuten tendenziell mehr Lichtemissionen und wenn überdies eine Stadt mehr Einwohner pro Fläche aufweist, akzentuiert sich dieser Effekt. Auch die Industrie, welche in Zürich stärker ausgeprägt ist als in Bern, trägt einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Lichtverschmutzung bei. Ausserdem ist der internationale Flughafen von Zürich in der Nähe der Stadt und dessen Lichtglocke hat einen beträchtlichen Einfluss auf die Lichtverschmutzung im Norden von Zürich. Flughäfen sind eine der am stärksten beleuchteten Einrichtungen weltweit. Die Umgebung von Zürich ist zudem geografisch relativ offen, wohingegen Bern von Hügeln und Bergen umgeben ist. Diese Erhebungen werden Bern besser vom Licht der angrenzenden Agglomerationen abschirmen.

Talvergleich:

Die Messungen in Ehrendingen werden deutlicher von denjenigen in Wettingen abweichen als die Messungen in Rohrdorf, da die Lägern mit 866 m.ü.M. höher ist als der Heitersberg mit 657 m.ü.M. und somit die Lägern mehr Licht aus Wettingen abschirmt. Zudem werden in Rohrdorf die Auswirkungen der Lichtglocke der Grossstadt Zürich, auf Grund der kleineren geografischen Distanz stärker ausgeprägt sein als in Ehrendingen. Werden die Messungen der Lichtemissionen vom Dorfrand auf das Dorfzentrum analysiert, wird Ehrendingen auf Grund der höheren Einwohnerdichte eine grössere Lichtverschmutzung aufweisen als Rohrdorf. In Wettingen wird die Lichtverschmutzung am ausgeprägtesten sein, da das Dorf die mit Abstand grösste Einwohnerdichte von fast 2000 Einwohner pro Quadratkilometer unter den drei Gemeinden aufweist.

Naturparkvergleich:

Der Naturpark Gantrisch deckt flächenmässig ein sehr weitläufiges Gebiet ab, mit nur wenigen, kleineren Gemeinden. Daher werden die Messwerte der Lichtemission im Park deutlich niedriger sein als im Eigi in unmittelbarer Nähe zur Gemeinde Wettingen. Zudem sind die Bewohner des Naturparks in hohem Masse betreffend Lichtverschmutzung sensibilisiert.

Das Ziel des Naturparks ist es, über die nächsten Jahre die Lichtverschmutzung stetig zu verringern. Nicht ohne Grund wurde die Ortschaft Zimmerwald innerhalb des Parks als Standort für das Observatorium des Astronomischen Instituts der Universität Bern gewählt.

Im Norden des Parks wird die Lichtverschmutzung am grössten sein, da die Grossstadt Bern in relativer Nähe liegt. Im Westen und Osten wird die Lichtverschmutzung in etwa gleich gross sein, da das Gebiet im Westen von Fribourg und dasjenige im Osten von Thun erhellt wird. Beide Städte haben mit ca. 40'000 Einwohner einen vergleichbaren Einfluss.

Entwicklung der Lichtverschmutzung:

Die Lichtverschmutzung in Städten wird sich dynamischer entwickeln als auf dem Land, da auf Grund des Wachstums der Städte und direkt angrenzender Agglomerationen einerseits flächenmässig als auch durch eine stetig zunehmend verdichtete Bauweise immer mehr Infrastruktur benötigt wird. Die Lichtglocke und der Radius des Lichtkreises um eine Stadt werden sich in den nächsten Jahrzehnten deutlich ausdehnen.

3 Resultate

3.1 Messresultate

Im Anhang dieser Arbeit sind alle Messresultate mit Angaben zu Datum und Zeit, genauem Messstandort, vorherrschender Wetterbedingungen und verwendeter Messmethode/Gerät detailliert aufgelistet: Grossstadtvergleich, Tabelle 15 bis Tabelle 34; Talvergleich, Tabelle 35 bis Tabelle 49; Naturparkvergleich, Tabelle 50 bis Tabelle 53; zusätzliche Messungen in Grossstädten, Tabelle 54 bis Tabelle 57. In Abbildung 44 und Abbildung 46 sind alle Kameradaten (Originale) zusammengetragen und in Abbildung 45 und Abbildung 47 die dazugehörigen Falschfarbbilder.

In den folgenden Abschnitten werden die Resultate der verschiedenen Messungen dargestellt. Alle Messwerte sind in der Einheit mag/arcsec^2 aufgelistet.

3.1.1 Grossstadtvergleich

Zürich:

Die Messungen wurden in der Nacht vom 24.09.2021 aufgezeichnet. Der Nachthimmel war wolkenlos. Der Mond schien zu etwa 75%.

Ort	Himmel	Aussicht	Durchschnitt
Flughafen fern	19.089	16.595	17.842
Flughafen nah	18.663	13.328	15.9955
ETH Hönggerberg	18.657	17.034	17.8455
Uni Irchel	18.402	17.268	17.835
ETH Zürich	17.924	17.079	17.5015
Chinagarten	16.725	-	16.725
Josefswiese	17.963	-	17.963
Wettingen Rand	19.76	17.45	18.605
Wettingen Dorf	19.12	-	19.12
Durchschnitt	18.4781111	16.459	17.6704667

Stadtzentrum

17.42275

Stadttrand

17.84025

Agglomeration in

18.7766667

20km Entfernung

Tabelle 5: Lichtverschmutzung Grossraum Zürich mit einem SQM-L gemessen (in mag/arcsec^2)

In Tabelle 5 ist die Lichtverschmutzung im Grossraum Zürich dargestellt (die genauen Standorte der Messungen sind in Abbildung 14 zu erkennen). Es werden die Messungen Himmel und Aussicht des jeweiligen Ortes dargestellt. Himmel ist als Messung der indirekten Lichtemission im Zenit definiert, Aussicht als Messung der direkten Lichtemission des Stadtzentrums beziehungsweise des hellsten Punktes in der Umgebung des Messstandortes. In der rechten Spalte ist der Durchschnitt der beiden Messwerte berechnet.

Der Flughafen in Kloten ist mit einem gemittelten Durchschnitt von ca. 16.92 mag/arcsec² der hellste Ort dieser Messreihe. Der dunkelste Ort ist der Dorfkern von Wettingen, mit einem Durchschnitt von 19.12 mag/arcsec², der dunkelste Himmel mit einem Wert von 19.76 mag/arcsec² ist jedoch am Dorfrand von Wettingen zu finden.

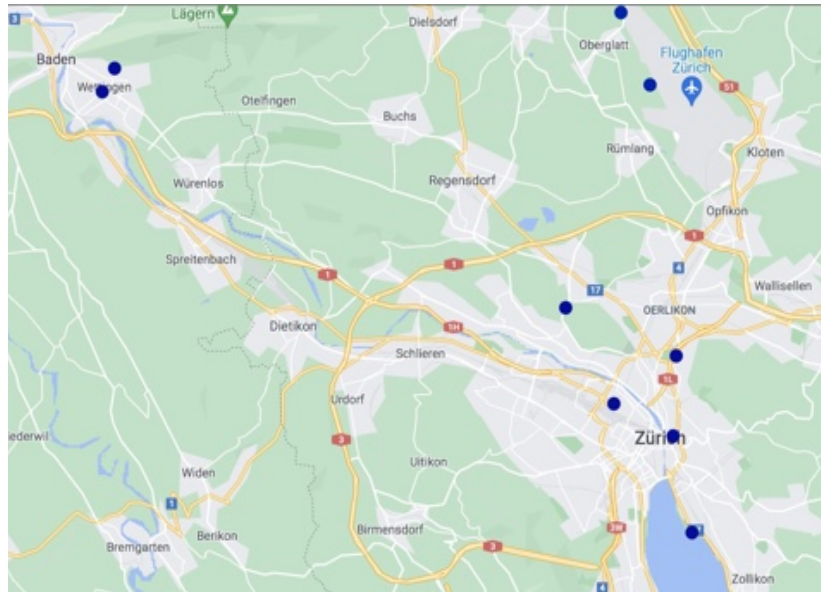


Abbildung 14: Standorte der Messungen im Raum Zürich

Im Stadtzentrum von Zürich beträgt der gemittelte Durchschnitt der Messstandorte (Josefswiese, ETH Zürich und Chinagarten) 17.42 mag/arcsec², am Stadtrand (ETH Höggerberg und Uni Irchel) 17.84 mag/arcsec² und in der Agglomeration in 20 km Entfernung (Wettingen Rand und Dorf) bereits 18.78 mag/arcsec².

Die Änderung der Lichtverschmutzung, Himmel, mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum kann mit Hilfe der Regression als Funktion dargestellt werden (siehe Diagramm 1).

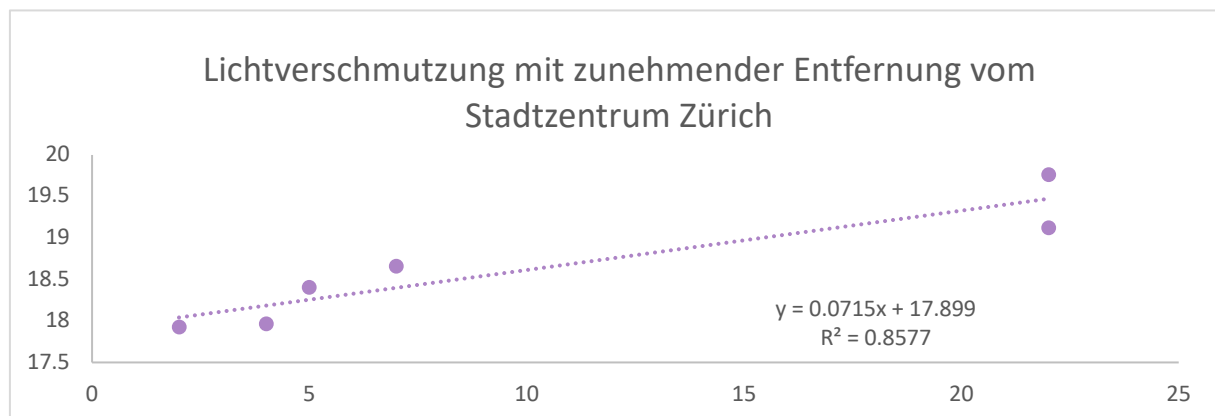


Diagramm 1: Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum im Raum Zürich

Bei der Regression (hier quadratische Regression) soll eine Kurve gefunden werden, die «möglichst gut» zu den erhobenen Daten passt. «Möglichst gut» heisst in diesem Zusammenhang, dass die Abweichungen der Kurve zu den tatsächlichen Messwerten minimiert werden soll. Dies ist bei folgender Funktion gegeben:

$y = 0.0715x + 17.899$ mit einem Regressionswert von $R = 0.8577$.

Die Korrelation $|R^2|$ oder $|R|$ gibt an, wie gut die gewählte Funktion beziehungsweise das gewählte Modell an die Daten angepasst ist. Bei einer Korrelation von $|R^2|=1$ decken sich Messdaten und Kurve.

Ein statistischer Ausreisser (Chinagarten) ist nicht in die Berechnung eingeflossen und die beiden Standorte am Flughafen wurden nicht berücksichtigt.

Bern:

Die Messungen wurden in der Nacht vom 11.10.2021 aufgezeichnet. Der Himmel war grösstenteils klar. Der Mond hat die Messungen nicht beeinflusst, da er nicht sichtbar war.

Ort	Himmel	Aussicht	Durchschnitt
Rosengarten	18.684	16.728	17.706
Grosse Schanze	18.955	-	18.955
Bundesplatz	17.633	-	17.633
Gurten	18.692	17.445	18.0685
Kirchberg Rand	19.354	16.34	17.847
Kirchberg Dorf	19.853	-	19.853
Durchschnitt	18.8618333	16.8376667	18.1871111
Stadtzentrum			18.00
Stadttrand			18.0685
Agglomeration in 20km Entfernung			18.5156667

Tabelle 6: Lichtverschmutzung Grossraum Bern mit einem SQM-L gemessen (in mag/arcsec²)

In Tabelle 6 ist die Lichtverschmutzung im Grossraum Bern dargestellt (die genauen Standorte der Messungen sind in Abbildung 15 zu erkennen). Auf dem Bundesplatz ist die indirekte Lichtemission Himmel mit einem Wert von 17.633 mag/arcsec² am grössten (hellster Ort). Der dunkelste Ort, Himmel, ist in der Region Bern das Dorfzentrum von Kirchberg mit einem Wert von 19.853 mag/arcsec². Der Messwert Aussicht ist auf Kirchberg um 0.388 mag/arcsec² heller als auf das Stadtzentrum von Bern (gemessen am Standort Rosengarten).

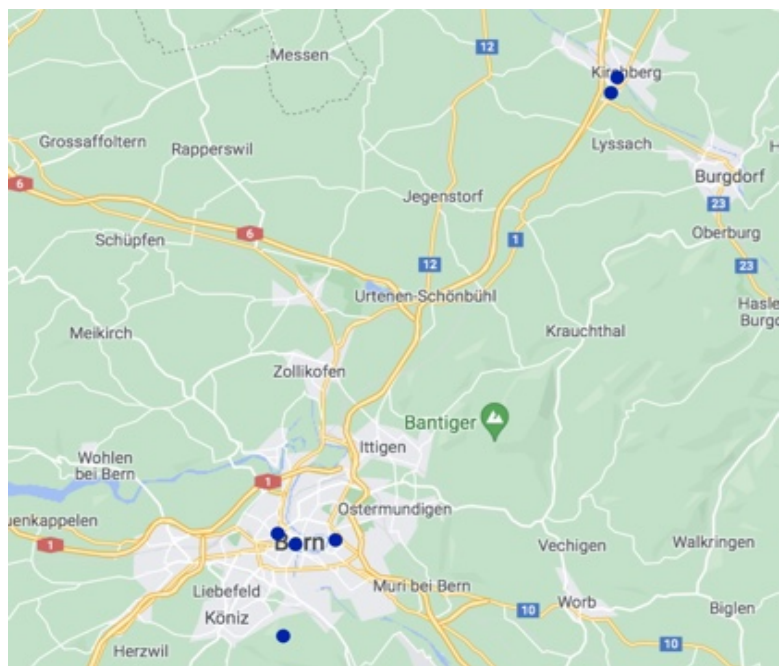


Abbildung 15: Standorte der Messungen im Raum Bern

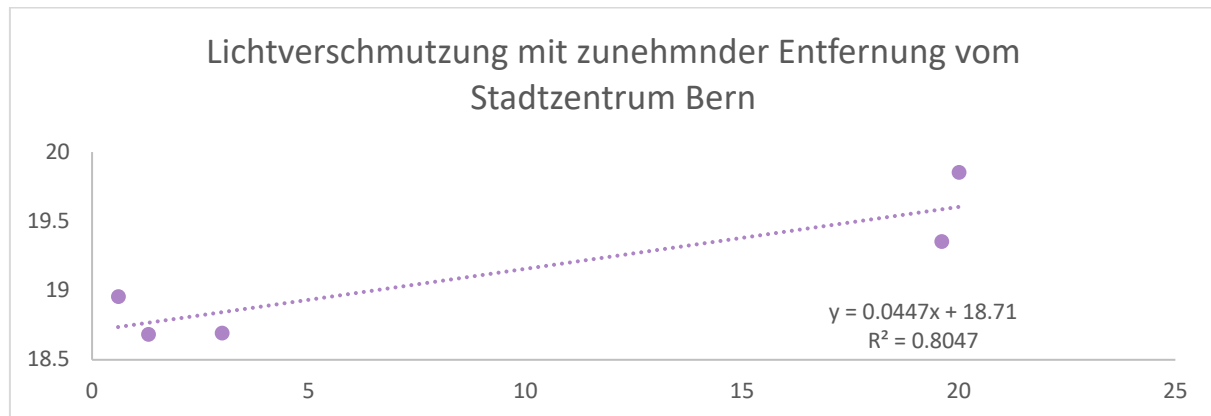


Diagramm 2: Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum im Raum Bern

Die Änderung der Lichtverschmutzung, Himmel, im Raum Bern mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum ist in Diagramm 2 dargestellt und lässt sich durch folgende Funktion beschreiben:

$$y = 0.0447x + 18.71$$

Diese Funktion wurde mit Hilfe der Regression aus den gemessenen Werten, Himmel, gefunden und hat einen Regressionswert von $R = 0.8047$.

Ein statistischer Ausreisser (Bundesplatz) ist nicht in die Berechnung eingeflossen.

Grossstadtvergleich:

Entfernung	Zürich	Bern	Differenz
Stadtzentrum	17.42275	18.00	-0.57725
Stadtrand	17.84025	18.0685	-0.22825
Agglomeration in 20km Entfernung	18.7766667	18.5156667	0.261

Tabelle 7: Grossstadtvergleich der Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung von Stadtzentrum (in mag/arcsec²)

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Veränderung des Grades der Lichtverschmutzung im Grossraum Zürich und Bern. Im Stadtzentrum und am Stadtrand von Zürich ist der Mittelwert der Lichtverschmutzung der jeweiligen Standorte grösser als in Bern. In der Agglomeration Bern wiederum ist der Mittelwert der Lichtverschmutzung in 20km Entfernung grösser als in der vergleichbaren Gemeinde im Raum Zürich.

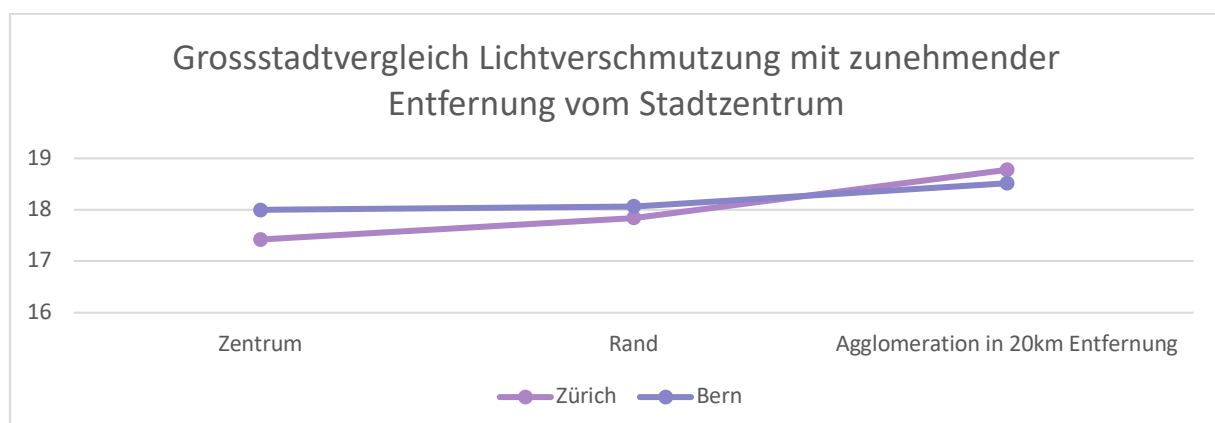


Diagramm 3: Grossstadtvergleich der Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum

In Diagramm 3 ist die Änderung der Lichtverschmutzung im Grossraum Zürich und Bern mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum dargestellt. Die «eigentliche» Stadt Zürich weist eine stärkere Lichtverschmutzung auf als Bern, jedoch ist die Lichtverschmutzung in der Agglomeration Zürich leicht tiefer als in Bern.

Kameraaufnahmen:

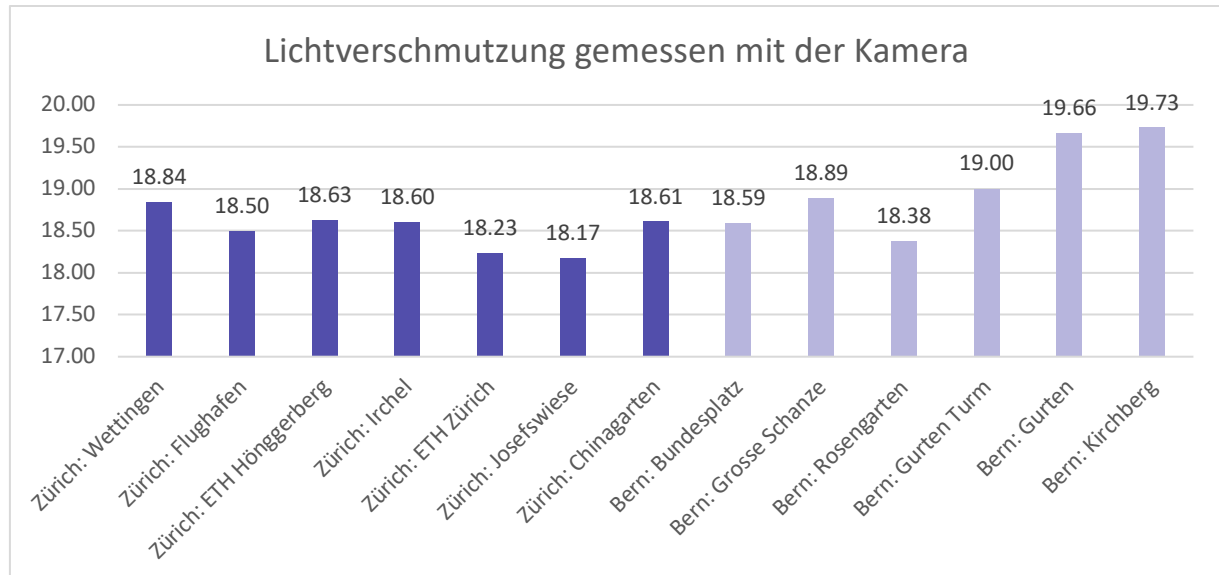


Diagramm 4: Lichtverschmutzung im Grossraum Zürich und Bern, gemessen mit der Kamera (in mag/arcsec²)

In Diagramm 4 ist die Lichtverschmutzung der Regionen Zürich und Bern dargestellt. Auf dem Gurten und in Kirchberg im Grossraum Bern ist die Lichtverschmutzung mit Werten von 19.66 und 19.73 mag/arcsec² am geringsten, im Zentrum von Zürich auf der Josefswiese mit einem Wert von 18.17 mag/arcsec² am höchsten.

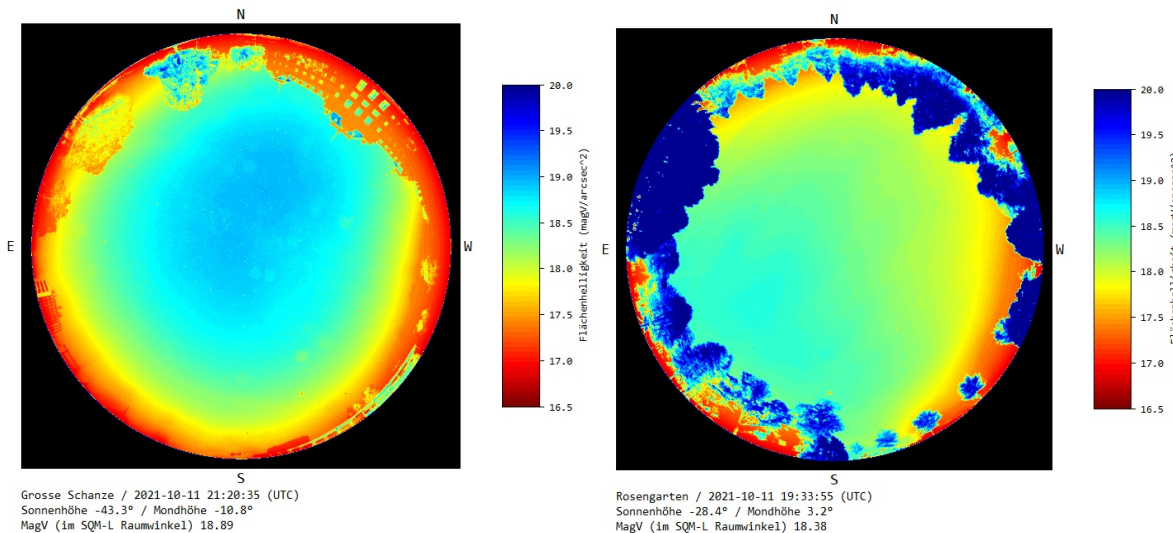


Abbildung 16: Falschfarbbilder Standorte Grosse Schanze BE und Rosengartens BE

Abbildung 16 zeigt die Falschfarbbilder der Grossen Schanze und des Rosengartens in Bern. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Bild der Grossen Schanze im Verhältnis zum Bild des Rosengartens einen deutlich dunkleren Nachthimmel aufweist. Im Bild des Rosengartens ist gut erkennbar, dass der Nachthimmel grösstenteils mit Licht aus Westen erhellt wird.

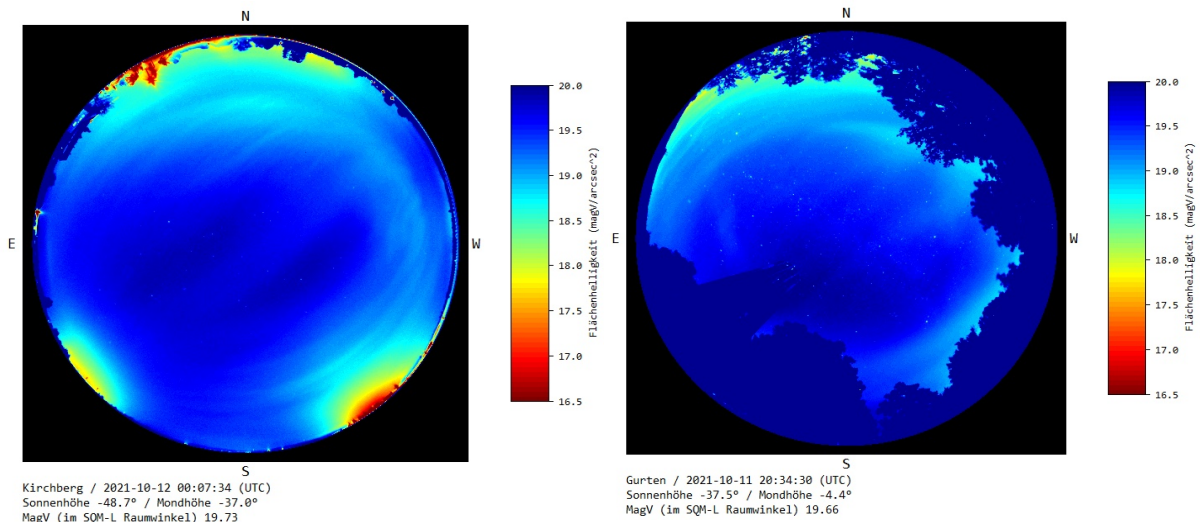


Abbildung 17: Falschfarbbilder Standorte Kirchberg BE und Gurten BE

In Abbildung 17 sind die Falschfarbbilder von Kirchberg und dem Gurten zu erkennen. Der Nachthimmel im Bild von Kirchberg wird vor allem von Licht aus den drei Richtungen Südwesten, Südosten und Norden aufgeheit, im Bild des Gurten stammt die Lichtemission hauptsächlich aus nördlicher Richtung.

Die Farbskalierung wurde so gewählt, dass Rot einen kleinen Wert, also eine hohe Lichtverschmutzung und Blau einen grossen Wert, also eine geringe Lichtverschmutzung darstellt. Die Werte bewegen sich auf einer Skala von 16.5 bis 20.0 mag/arcsec².

3.1.2 Talvergleich

Ort	Himmel am Dorfrand	Aussicht auf das Dorfzentrum	Himmel im Dorfzentrum
Rohrdorf	19.99	17.87	18.56
Heitersberg (Richtung Limmattal)	19.94	18.66	-
Wettingen	19.76	17.45	19.12/18.17
Lägern (Richtung Baden)	19.35	17.32	-
Ehrendingen	19.87	19.40	19.01

Tabelle 8: Lichtverschmutzung in verschiedenen Tälern mit einem SQM-L gemessen (in mag/arcsec²)

In Tabelle 8 sind die Mittelwerte der Lichtverschmutzung mit einem SQM-L gemessen bei Neumond und klarem Himmel zu erkennen. Die stärkste Lichtverschmutzung, Himmel, wurde auf der Lägern mit einem Wert von 19.35 mag/arcsec² gemessen, die geringste in Rohrdorf mit einem Wert von 19.99 mag/arcsec².

Die Lichtemission eines Dorfzentrums aus Entfernung ist in Ehrendingen mit einem Wert von 19.40 mag/arcsec² am geringsten. Ehrendingen ist somit die dunkelste Ortschaft in der Messreihe. Von der Lägern Richtung Baden wurde die stärkste Lichtemission mit einem Wert von 17.32 mag/arcsec² gemessen.

Ort	Himmel am Dorfrand	Aussicht auf das Dorfzentrum	Himmel im Dorfzentrum
Rohrdorf	20.81	20.24	20.65
Heitersberg (Richtung Limmattal)	20.78	20.06	-
Wettingen	20.47	19.28	20.39/19.81
Lägern (Richtung Baden)	20.58	19.38	-
Ehrendingen	21.23	20.52	19.35

Tabelle 9: Lichtverschmutzung verschiedener Täler mit der DSM App gemessen (in mag/arcsec²)

Tabelle 9 zeigt die Daten, gemessen mit der Dark-Sky-Meter App, für dieselben Standorte wie in Tabelle 8. Ehrendingen weist am Dorfrand den dunkelsten Nachthimmel auf (21.23 mag/arcsec²). Auch ist die Aussicht auf das Dorfzentrum mit einem Wert von 20.52 mag/arcsec² in Ehrendingen am dunkelsten. Der Wert Himmel im Dorfzentrum ist in Ehrendingen jedoch am kleinsten (19.35 mag/arcsec², hellster Nachthimmel) und in Rohrdorf am grössten. Das hellste Dorf bei der Messung der direkten Lichtemission ist Wettingen mit einem Wert von 19.28 mag/arcsec².

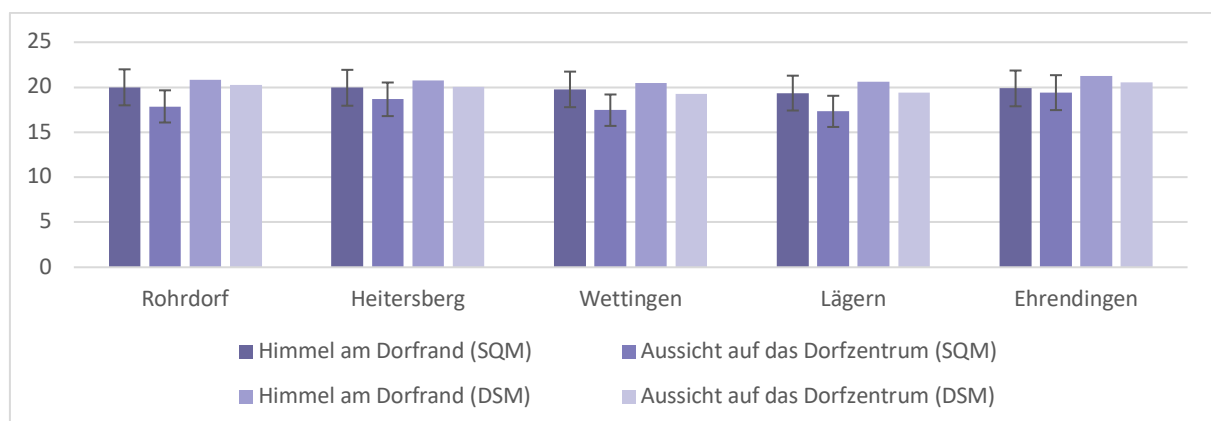


Diagramm 5: Lichtverschmutzung in verschiedenen Tälern und auf dazwischenliegenden Hügelzügen mit einem SQM-L gemessen

In Diagramm 5 sind die Messresultate der Lichtverschmutzung für die verschiedenen Täler und dazwischenliegenden Hügelzügen zusammengetragen. Auf der Lägern ist die Lichtverschmutzung sowohl des Himmels am Dorfrand als auch der Aussicht auf das Dorfzentrum am stärksten. Auf dem Heitersberg wurde festgestellt, dass, verglichen mit der indirekten Lichtverschmutzung Himmel, eine erstaunlich geringe direkte Lichtemission vom Limmattal herrührt. Für Ehrendingen liegen die Werte der Lichtverschmutzung Himmel am Dorfrand und Aussicht auf das Dorfzentrum sehr nahe beieinander.

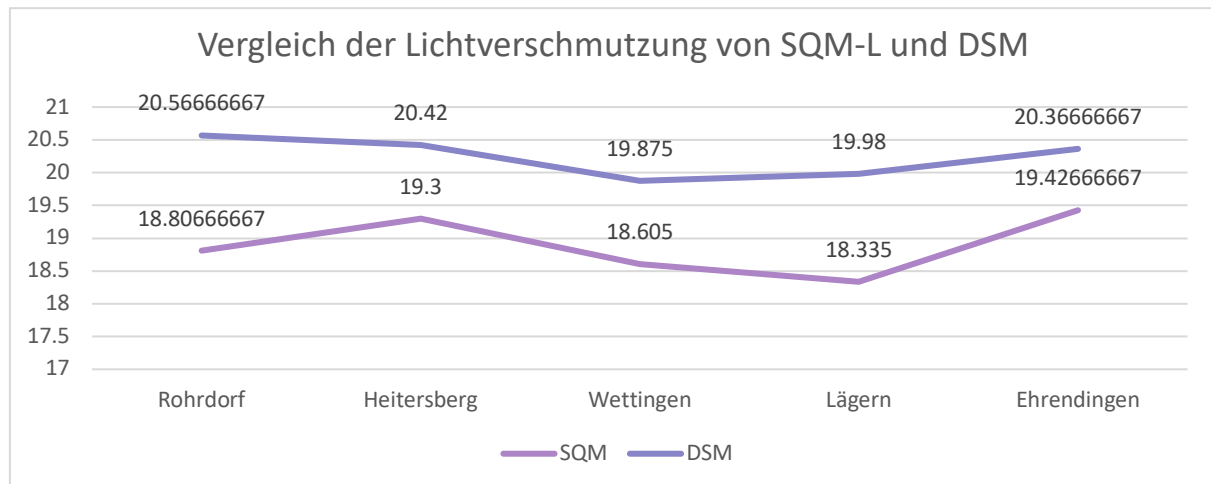


Diagramm 6: Vergleich der Lichtverschmutzung von SQM-L und des DSM, Mittelwerte

In Diagramm 6 sind für jeden der fünf Messstandorte die Mittelwerte der Lichtverschmutzung, gemessen mit SQM-L und DSM, aufgetragen. Es ist augenfällig erkennbar, dass die Messmethode SQM-L deutlicher zwischen den einzelnen Werten differenziert und zudem kleinere Werte misst als die DSM Messmethode. Im Diagramm ist eindeutig zu erkennen, dass in der Region Wettingen-Lägern die Lichtverschmutzung am ausgeprägtesten ist.

Kameraaufnahmen:

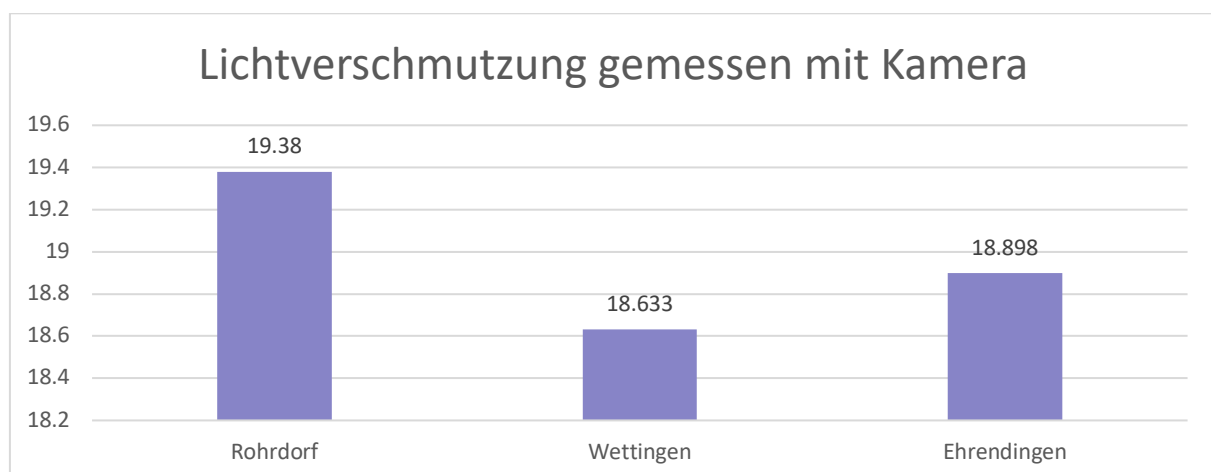


Diagramm 7: Lichtverschmutzung im Talvergleich, gemessen mit Kamera (in mag/arcsec²)

Diagramm 7 stellt die Lichtverschmutzung im Talvergleich dar, gemessen mit der Kamera. Es ist zu erkennen, dass in Rohrdorf die Lichtverschmutzung mit 19.38 mag/arcsec² am geringsten ist und in Wettingen mit 18.633 mag/arcsec² am grössten.

In Abbildung 18 sind die Falschfarbbilder der drei Standorte zu erkennen. Die Skalierungsbandbreite wurde von 16.5 bis 20.0 mag/arcsec² gewählt, wobei hohe Werte in Blau (wenig Lichtverschmutzung) und tiefe Werte in Rot (grosse Lichtverschmutzung) dargestellt werden. Während auf dem Bild von Wettingen der Nachthimmel nur einen kleinen hellblauen Fleck aufweist, sind die blauen Bereiche auf den Bildern von Ehrendingen und Rohrdorf deutlich grösser und dunkler, was einem dunkleren Nachthimmel entspricht.

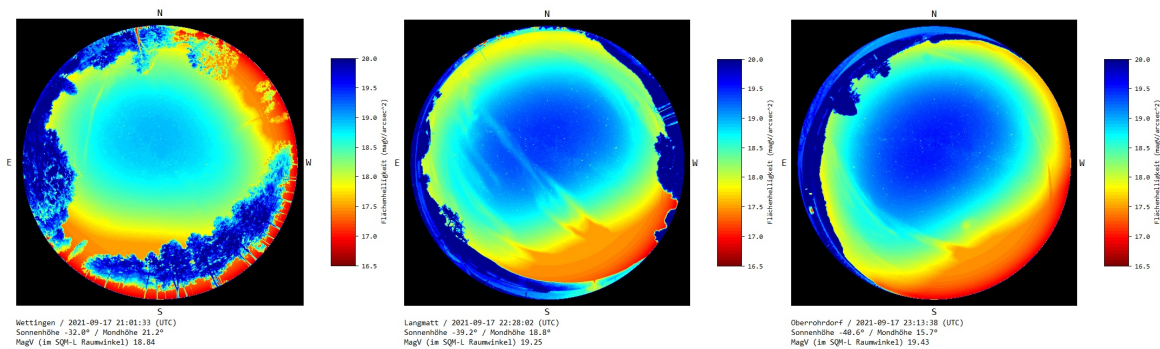


Abbildung 18: Falschfarbbilder von Wettingen, Ehrendingen und Rohrdorf

3.1.3 Naturparkvergleich

Ort	Himmel Kamera	Himmel SQM-L	Himmel DSM
Niederblacken	20.87	20.91	21.2425
Zimmerwald	20.80	20.737	21.34
Eigi	19.13	19.588	20.818

Tabelle 10: Messwerte des Naturparks Gantrisch und dem Eigi Wettingen ohne Mondvisibilität, eigene Messungen (in mag/arcsec²)

In Tabelle 10 sind die Daten der Lichtverschmutzung an zwei Standorten im Naturpark Gantrisch und im Naherholungsgebiet Eigi in Wettingen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Naturpark Gantrisch die Lichtverschmutzung mit einem minimalen Wert von 20.737 mag/arcsec² (SQM-L) viel geringer ist als im Eigi in Wettingen mit 19.588 mag/arcsec² (SQM-L). Auch mit der Messmethode Kamera wurde im Naturpark Gantrisch in Niederblacken der kleinste Wert gemessen (20.87 mag/arcsec²). Die zweite Messung im Naturpark, Standort Zimmerwald, unterscheidet sich mit einem Wert von 20.80 mag/arcsec² nur marginal. Bei den Messungen mit dem DSM ist der dunkelste Messstandort nicht Niederblacken (21.24 mag/arcsec²), sondern Zimmerwald mit einem Wert von 21.34 mag/arcsec².

Ort	Erster Messwert	Zweiter Messwert
Wattwil	21.21 (12/16)	21.23 (09/18)
Selibüel	21.35 (09/17)	21.80 (04/20)
Hengstli	21.64 (07/20)	-
Gurnigel	21.36 (01/19)	21.65 (04/20)
Belp	20.50 (11/17)	20.90 (04/20)
Toffenholz	20.87 (11/17)	21.15 (04/20)
Schwarzenburg	20.95 (06/16)	-
Zollhaus-Sangernboden	21.54 (12/16)	21.12 (07/19)
Niederblacken	21.14 (11/16)	20.87 ²⁵
Zimmerwald	20.80 (08/18)	20.80 ²⁶

Tabelle 11: Messwerte des Naturparks Gantrisch, Messmethode Kamera (in mag/arcsec²)²⁷

In Tabelle 11 sind Messwerte des Naturparks Gantrisch im Verlauf von 6 Jahren dargestellt (die genauen Standorte sind in Abbildung 19 zu finden). Es ist zu erkennen, dass die meisten Standorte ihren Lichtverschmutzungswert verbessern konnten, also aktuell einen dunkleren Nachthimmel aufweisen. Einzig in Zollhaus-Sangernboden und in Niederblacken ist der Messwert gesunken, was auf eine Zunahme der Lichtverschmutzung hindeutet. Am Standort Belp wurde im Jahre 2017 mit einem Messwert von 20.50 mag/arcsec² die grösste Lichtemission im Naturpark Gantrisch gemessen, die kleinste am Standort Selibüel mit einem Messwert von 21.80 mag/arcsec². Dieser Wert wurde im Jahr 2020 gemessen.

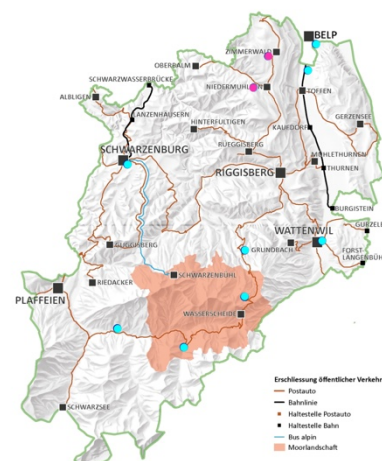


Abbildung 19: Standorte der Messungen im Naturpark Gantrisch (blau: Messungen des Naturparks, violett: eigene Messungen)

²⁵ Eigener Messwert

²⁶ Eigener Messwert

²⁷ Messungen des Naturpark Gantrisch

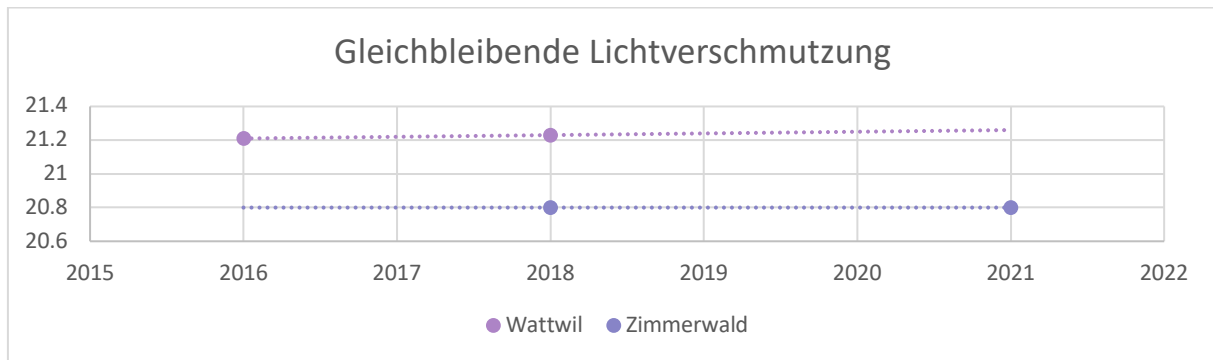


Diagramm 8: Gleichbleibende Lichtverschmutzung im Naturpark Gantrisch

In Diagramm 8 sind die beiden Standorte Wattwil und Zimmerwald im Naturpark Gantrisch dargestellt. In diesen beiden Orten hat sich die Lichtverschmutzung über mehrere Jahre kaum verändert. Während in Wattwil der Messwert innerhalb von 2 Jahren von 21.21 mag/arcsec² auf 21.23 mag/arcsec² minim angestiegen ist, ist die Lichtverschmutzung in Zimmerwald konstant bei 20.80 mag/arcsec² verblieben.

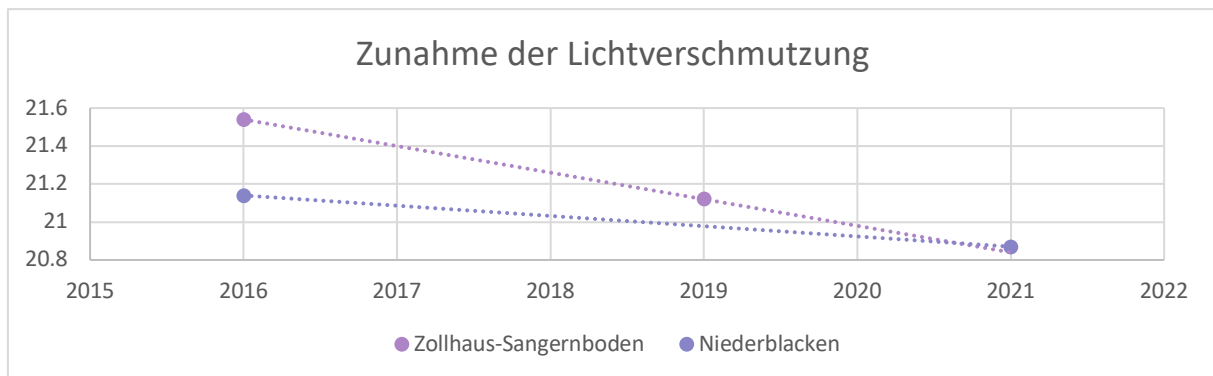


Diagramm 9: Zunahme der Lichtverschmutzung im Naturpark Gantrisch

In Diagramm 9 sind die beiden Standorte Zollhaus-Sangernboden und Niederblacken im Naturpark Gantrisch dargestellt. In diesen beiden Orten hat die Lichtverschmutzung in den letzten Jahren zugenommen. Der Messwert in Zollhaus-Sangernboden ist dabei innerhalb von 3 Jahren deutlicher von 21.54 mag/arcsec² auf 21.12 mag/arcsec² gesunken als derjenige von Niederblacken, der innerhalb von 5 Jahren von 21.14 mag/arcsec² auf 20.87 mag/arcsec² zurückgegangen ist.

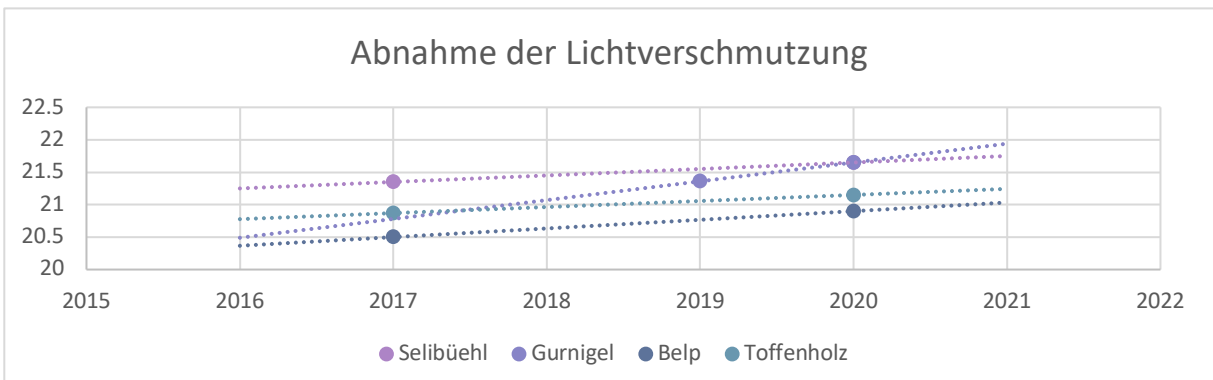


Diagramm 10: Abnahme der Lichtverschmutzung im Naturpark Gantrisch

In Diagramm 10 ist die repräsentative Entwicklung der Lichtverschmutzung von verschiedenen Standorten im Naturpark Gantrisch zusammen mit einer linearen Trendlinie über einen

Zeitraum von 5 Jahren abgebildet. Gurnigel weist mit einer Steigung von $0.29 \text{ mag/arcsec}^2$ pro Jahr die auffallendste Verbesserung der Qualität des Nachthimmels auf, während für die anderen drei Standorte, Selibüehl, Belp und Toffenholz der Verbesserungsgrad ziemlich parallel verläuft.

Kameraaufnahmen:

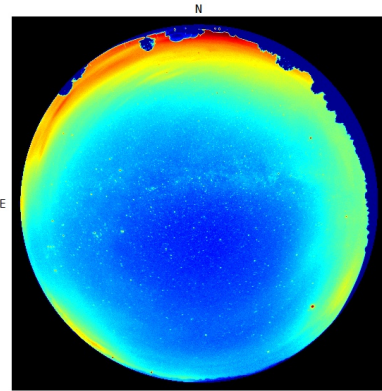


Abbildung 25: Falschfarbbild Naturpark Gantrisch: Zimmerwald

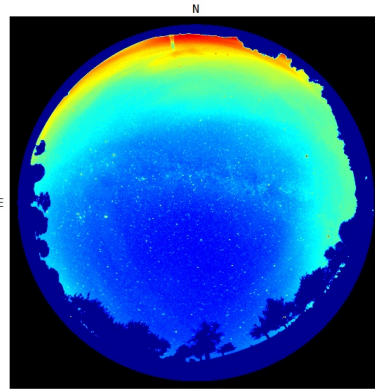


Abbildung 25: Falschfarbbild Naturpark Gantrisch: Niederblacken

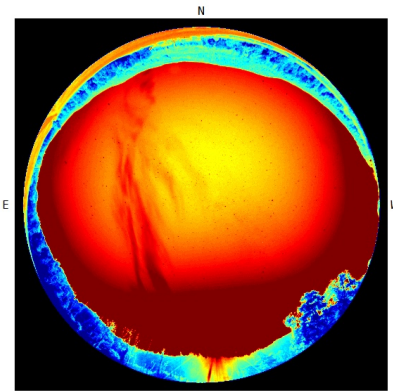


Abbildung 25: Falschfarbbild Eigi Wettingen



Abbildung 25: Kameraaufnahme Naturpark Gantrisch: Zimmerwald um 01:05 Uhr

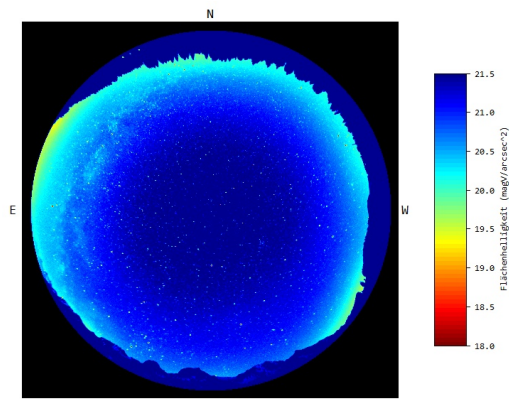


Abbildung 25: Kameraaufnahme Naturpark Gantrisch: Niederblacken um 00:39 Uhr



Abbildung 25: Kameraaufnahme Eigi Wettingen um 23:28 Uhr

Abbildung 25 bis Abbildung 25 zeigen Aufnahmen des Nachthimmels mit der Kamera für drei verschiedene Standorte. Der Unterschied Naturpark Gantrisch-Eigi ist sehr gut erkennbar. In den beiden Bildern des Naturparks, links, hat der Nachthimmel eine dunkle schwarz-braun-rötliche Färbung, während der Nachthimmel im Eigi, rechts, einen hellen Blauton aufweist. Ausserdem ist auf den Bildern vom Naturpark die Milchstrasse zu erkennen, was auf dem Bild vom Eigi nicht möglich ist.



Gurnigel / 2020-04-15 00:13:22 (UTC)
 Sonnenhöhe -32.7° / Mondhöhe -13.5°
 MagV (in SQM-L Raumwinkel) 21.58

Abbildung 26: Falschfarbbild Naturpark Gantrisch:
 Gurnigel (fremde Aufnahme)

In Abbildung 25 bis Abbildung 25 sind die korrespondierenden Falschfarbbilder der drei Standorte abgebildet. In Abbildung 25 ist ein deutlich rot gefärbter Nachthimmel zu erkennen, was aufzeigt, dass im Eigi eine stärkere Lichtverschmutzung auftritt als im Naturpark Gantrisch. Die Falschfarbbilder vom Naturpark sind grösstenteils blau, nur an den nördlichen Rändern ist jeweils ein roter Streifen zu erkennen.

In Abbildung 26 ist ein Falschfarbbild einer Messung des Naturparks Gantrisch auf dem Gurnigel zu erkennen. Der Nachthimmel auf dem Bild ist hauptsächlich dunkelblau, nur am östlichen, nördlichen und südwestlichen Rand ist ein schwacher Lichtstreifen zu erkennen.

3.1.4 Zusätzliche Messungen in Grossstädten

Ort	Himmel	Aussicht	Messgerät
<i>Genf</i>	14.866	13.378	SQM-L
<i>Mailand</i>	15.069	-	SQM-L
<i>Venedig: Rialto</i>	16.11	11.943	SQM-L
<i>Venedig: S. Marina</i>	17.529	-	SQM-L
<i>Venedig: S. Marco</i>	16.552	-	SQM-L

Tabelle 12: zusätzliche Messungen in Grossstädten mit dem SQM-L (in mag/arcsec²)

In Tabelle 12 sind Messungen von folgenden Grossstädten zusammengetragen: Genf, Mailand und Venedig.

In Genf wurde mit einem Wert von 14.866 mag/arcsec² der hellste Nachthimmel gemessen. Der S. Marina Platz in Venedig zeigte mit 17.529 mag/arcsec² den dunkelsten Nachthimmel dieser Messreihe. Den dunkelsten Nachthimmel der drei Grossstädte hatte ebenfalls Venedig mit einem Mittelwert von 16.73 mag/arcsec². Die grösste direkte Lichtemission stammte von der Rialtobrücke, Aussicht.

Ein Vergleich mit den beiden Schweizer Grossstädten Bern und Zürich zeigt (vergleiche Kapitel 3.1.1), dass alle Messstandorte, bis auf den S. Marina Platz in Venedig, kleinere Messwerte aufweisen.

3.1.5 Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz

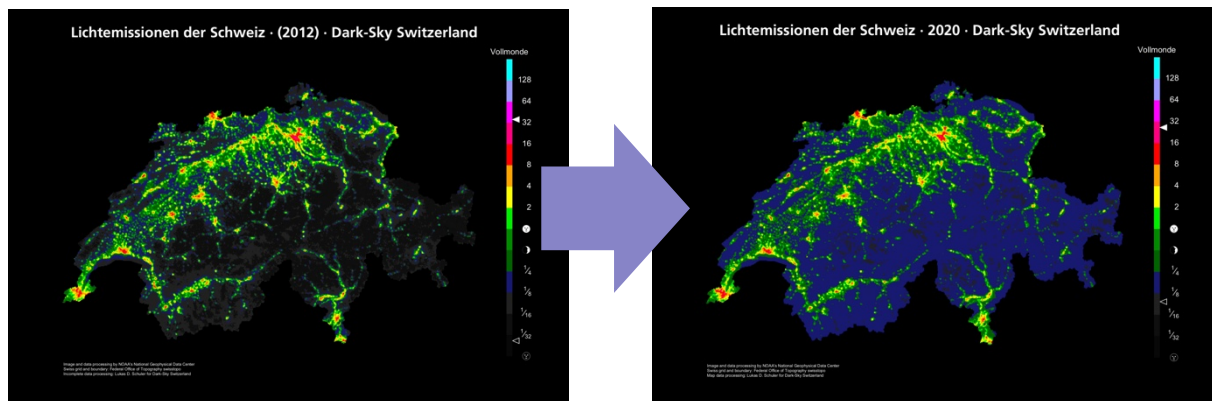


Abbildung 28: Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz von 2012 bis 2020

In Abbildung 28 ist die Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz im Laufe von 8 Jahren aufgezeigt. Die urbanen Regionen haben sich kaum verändert. Hingegen ist im Alpenraum die Lichtverschmutzung von $1/16$ der Helligkeit des Vollmondes auf $1/8$ angestiegen. Sie hat sich also innerhalb weniger Jahre verdoppelt. In der Grafik ist deutlich zu erkennen, dass Ballungsräume wie Zürich, Genf, Basel und Lausanne die Hotspots der Lichtverschmutzung in der Schweiz sind. Der Höchstwert der Lichtverschmutzung ist innerhalb von 8 Jahren leicht gesunken, hingegen ist der Tiefstwert der Lichtverschmutzung vergleichsmässig stark angestiegen. Während der Tiefstwert im Jahre 2012 noch bei etwas weniger als $1/32$ der Helligkeit des Vollmondes lag, ist er im Jahr 2020 auf einen Wert zwischen $1/16$ und $1/8$ angestiegen.

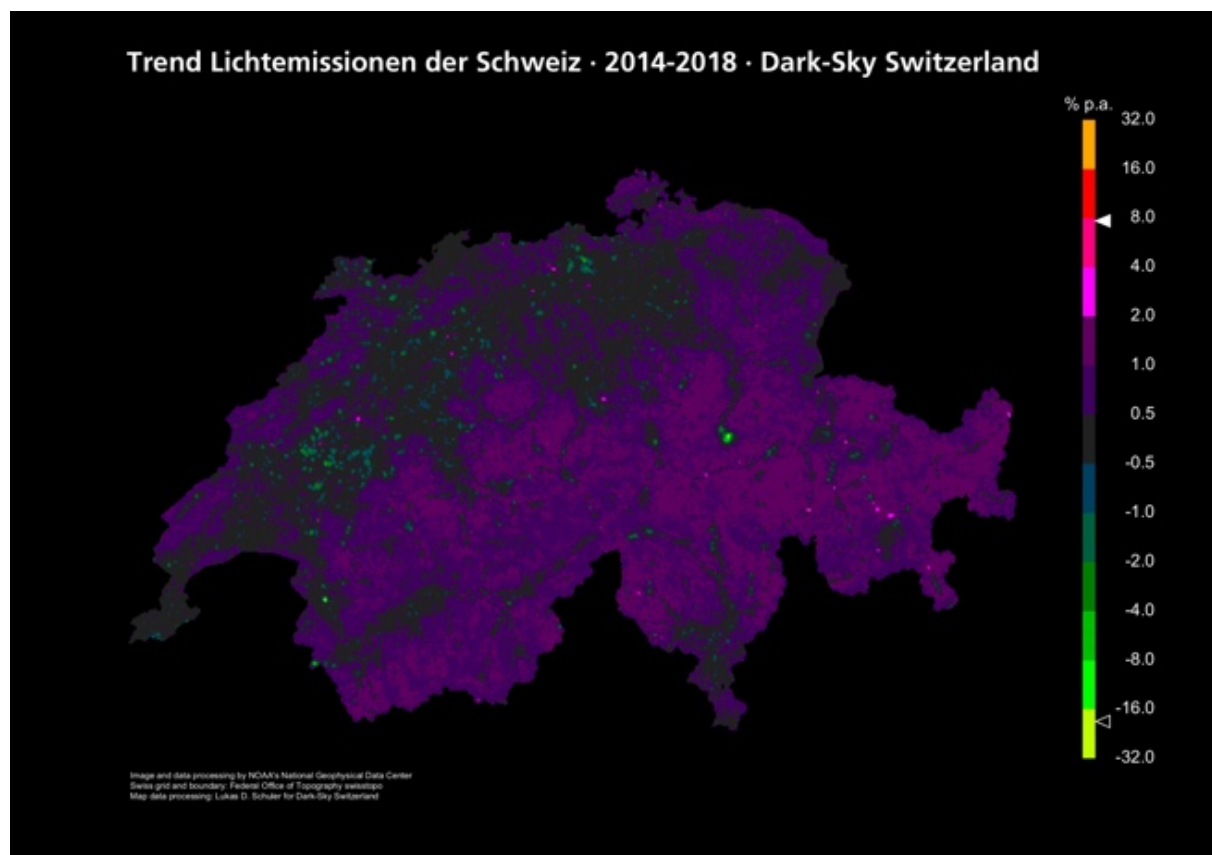


Abbildung 27: Trend der Lichtemissionen in der Schweiz von 2014-2018

In Abbildung 27 ist der Trend der Lichtemissionen in der Schweiz vom Jahr 2014 bis 2018 ersichtlich. Es ist abzulesen, dass vor allem in den dunkleren Regionen der Schweiz der Lichtverschmutzungswert angestiegen ist. Der maximale Anstieg beträgt knapp 8%.

An einigen Orten, vor allem im Mittelland, ist die Lichtverschmutzung jedoch gesunken. Besonders sticht dabei die Region um den Berg Tödi ins Auge, in der die Lichtverschmutzung etwas mehr als 16 % gesunken ist.

3.1.6 Vergleich der verschiedenen Messmethoden

Lego Mindstorms

Diese Messmethode hat für alle gewählten Teststandorte den Messwert 0 ergeben.

Kerze	Schublade	Appenzeller Alpen
70.2% Lichtintensität	0.0% Lichtintensität	0.0 % Lichtintensität

Tabelle 13: Messwerte mit der Lego Mindstorms EV3 Brick Messmethode

Nur bei einer direkten, starken Beleuchtung zeigte das Gerät einen Wert an (siehe Tabelle 13).

Vernier LabPro

Diese Messmethode hat die verschiedenen Standorte nicht differenziert und immer einen konstanten Messwert von 94 angezeigt. Nur falls der Lichtsensor direkt unter eine Lichtquelle gehalten wurde, wurde ein anderer Wert gemessen.

Sky-Quality-Meter (SQM-L) und Dark-Sky-Meter App (DSM)

Verglichen mit dem SQM-L zeigte die Dark-Sky-Meter App bei Messungen am gleichen Standort eine durchschnittliche Wertabweichung von ca. +1.40 mag/arcsec², siehe Tabelle 14. Bei der direkten Aussicht auf das Stadt-/Dorfzentrum wies die DSM App die grösste Abweichung auf, insbesondere bei Messwerten im Grossstadtvergleich. Die Wertabweichung ist generell an hellen Standorten grösser als an dunkeln Standorten.

	Himmel am Stadt-/Dorf- frand	Aussicht auf die Stadt-/Dorf- zentrum	Himmel in der Stadt-/Dorf- zentrum
Differenz zwischen SQM-L und DSM Grossstadtvergleich	+1.0421	+2.4619	+1.613
Differenz zwischen SQM-L und DSM Talvergleich	+0.84	+1.76	+1.34
Differenz zwischen SQM-L und DSM Naturparkvergleich	+ 0.72	-	-
Durchschnitt			+1.3967

Tabelle 14: Vergleich zwischen SQM-L und DSM Messmethode

In dieser Arbeit wurde mit dem SQM-L Werte zwischen 13.22 und 21.02 mag/arcsec² gemessen, mit dem DSM Werte zwischen 17.90 und 21.85 mag/arcsec². Es gilt festzuhalten, dass das SQM-L über ein breiteres Messspektrum verfügt als das DSM. An sehr dunklen Standorten, an welchen das SQM-L noch einen Wert von 21.00 mag/arcsec² oder höher gemessen hat, konnte das DSM teilweise keinen Wert mehr ermitteln und zeigte «too dark for device» an.

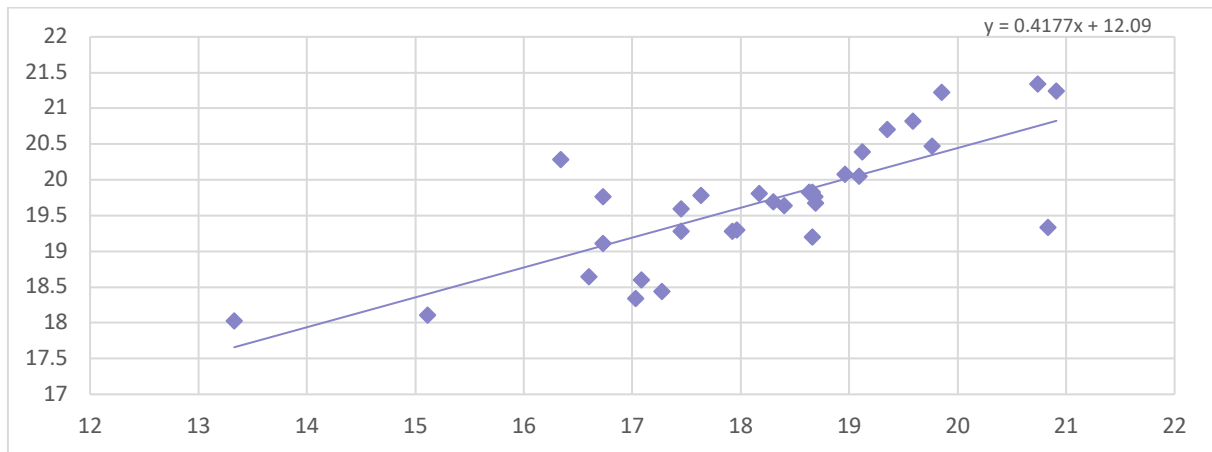


Diagramm 11: Verhältnis zwischen SQM-L und DSM Messwerten für verschiedene Messungen

In Diagramm 11 ist das Verhältnis zwischen SQM-L und DSM Messwerten abgebildet. Die Steigung der Trendlinie ist ungefähr 0.4, was bedeutet, dass die Messwerte der beiden Messmethoden nicht sehr exakt miteinander übereinstimmen (eine Steigung von 1 wäre erwünscht gewesen).

SQM-L Road Runner

Die Messmethode erwies sich als sehr nützlich, die Lichtverschmutzung in einem grösseren Gebiet zu bestimmen. Das Messgerät hat periodisch Werte aufgezeichnet (Zeitintervall benutzerdefiniert). Im Anschluss konnten die Messdaten auf einer Landkarte visualisiert werden.

In Abbildung 29 sind die Messwerte einer SQM-L Road Runner Messung im Grossraum Zürich abgebildet. Es ist gut zu erkennen, dass mit abnehmender Distanz zum Stadtzentrum die Lichtverschmutzung zunimmt. Während eine Messung am Rande Zürichs einen Höchstwert von 18.54 mag/arcsec² aufweist, ist im Stadtzentrum ein maximaler Wert von «nur» 15.63 mag/arcsec² messbar.

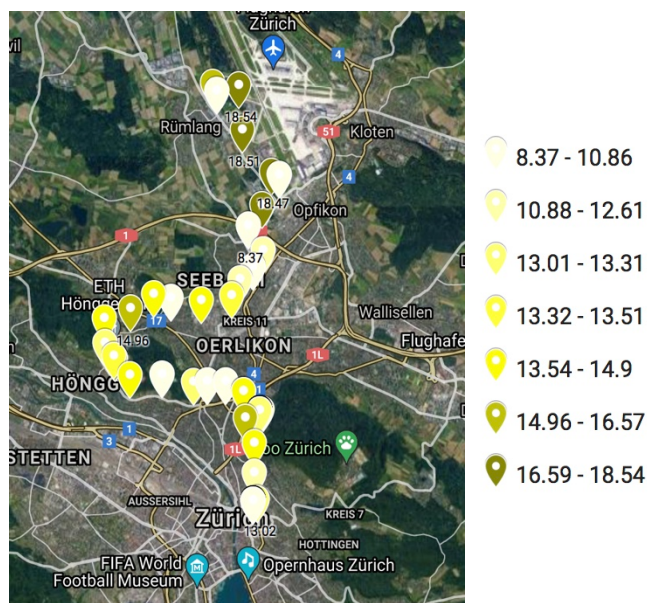


Abbildung 29: SQM-L Road Runner im Grossraum Zürich

Luxmeter

Das Luxmeter zeigte nur bei einer direkten, nahegelegenen Lichtquelle einen brauchbaren Wert an. Bei indirekter Lichtemission oder bei einem grösseren Abstand zur Lichtquelle zeigte das Luxmeter konstant einen Wert von 0 an.

Kamera

Die Kamera als Messmethode stellte sich als relativ abhängig bezüglich Umwelteinflüssen heraus. Die Wetterbedingungen sollten trocken und wolkenlos sein, Wolken verdecken ansonsten den Nachthimmel und reflektieren Licht (siehe Abbildung 30). Zudem muss bei den Messungen beachtet werden, dass astronomische Dunkelheit²⁸ herrscht und der Mond nicht sichtbar ist. Bei Messungen mit Vollmond wird der Nachthimmel stark vom Mond erhellt (siehe Abbildung 31). Die Aufhellung durch den Mond ist an der bläulichen Färbung des Nachthimmels erkennbar, während die «eigentliche» Lichtverschmutzung den Himmel rötlich färbt.

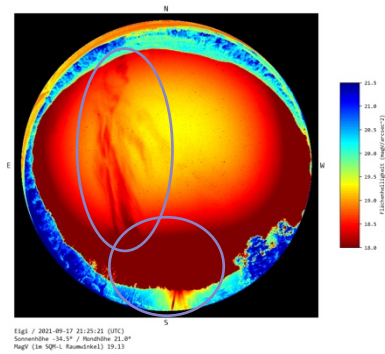


Abbildung 30: Falschfarbbild vom Eigi Wettingen

Grundsätzlich beeinflusst die Mondphase bei allen Messmethoden die Resultate mehr oder weniger. Nur bei Neumond kann ausschliesslich die Lichtverschmutzung gemessen werden, ansonsten verfälscht die Leuchtkraft des Mondes selbst oder eine «Resthelligkeit» bei nicht Visibilität des Mondes die Messresultate.



Abbildung 31: Aufnahme im Eigi in einer Vollmondnacht um 23:28 Uhr

In Diagramm 12 ist das Verhältnis zwischen SQM-L und Kamera Messwerten dargestellt. Die Punkte liegen nahe bei einer Geraden, welche eine Steigung von 0.9945 aufweist. Bei einer Steigung von 1 hätten die Daten der beiden Messreihen den exakt selben Wert. Folglich korrelieren die beiden Messmethoden ziemlich gut.

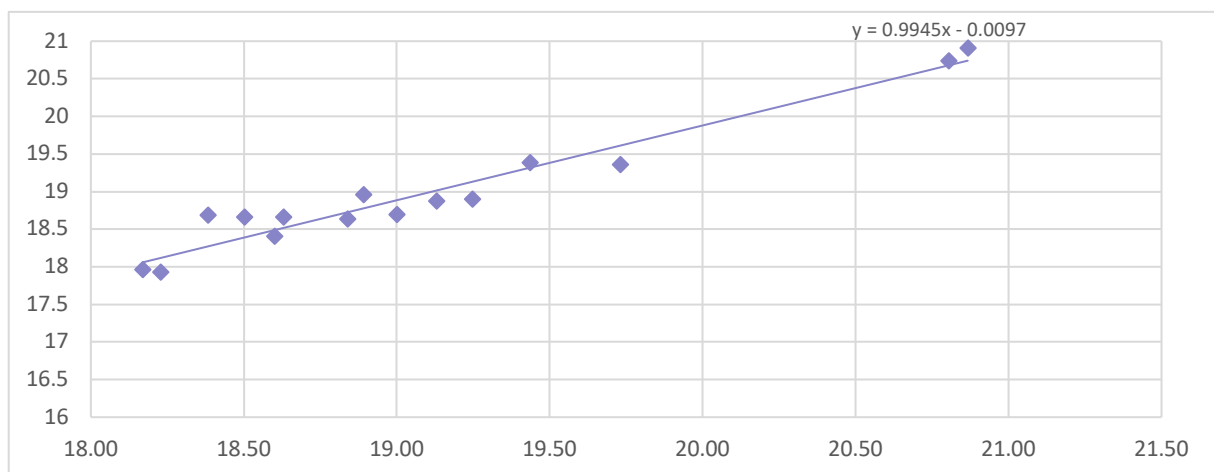


Diagramm 12: Verhältnis zwischen Kamera und SQM-L Messwerten für verschiedene Messungen

Zwei statistische Ausreisser wurden in der Grafik nicht berücksichtigt. Bei Messungen im Chinagarten (Zürich) und auf dem Bundesplatz (Bern) waren die Abweichungen eins oder grösser.

²⁸ Definition astronomische Dunkelheit: die Sonne ist mindestens 18° unter dem Horizont.

3.2 Fehlerrechnung

Fehlerrechnung unterscheidet statistische und systematische Fehler und absolute und relative Fehler. Unter einem statistischen Fehler wird zum Beispiel ein Messfehler des Geräts, ein Ablesefehler oder ein Zählfehler verstanden. Diese Fehler können durch mehrmaliges Messen verkleinert werden.

Systematische Fehler beschreiben Abweichungen, die bei allen Messwerten auftreten, hervorgerufen zum Beispiel durch eine falsche Kalibrierung. Kennzeichnend für einen systematischen Fehler ist, dass der Wert immer in dieselbe Richtung abweicht.

Ein absoluter Fehler ist die Differenz zwischen dem gemessenen und dem exakten Wert. Ein relativer Fehler ist der Quotient aus dem absoluten Fehler und dem gemessenen Wert.²⁹

Der absolute Fehlerwert des SQM-Ls beträgt $\pm 0.10 \text{ mag/arcsec}^2$, der relative Fehlerwert $\pm 10\%$.³⁰

Für die Fehlerrechnung des Mittelwertes wird die Formel der Fehlerrechnung bei einer Addition verwendet (Abbildung 33). Es werden die Fehlerwerte $\pm 0.10 \text{ mag/arcsec}^2$ jeder Messung (10 Messungen) quadriert, addiert und von der Summe die Wurzel gezogen.

$$\Delta(a+b+\dots+j) = \sqrt{10 \cdot 0.01} = 0.316228\dots$$

Das Resultat ist der absolute Fehlerwert der Summe. Wenn vorausgesetzt wird, dass alle Messungen mit demselben Gerät gemacht werden und somit denselben Fehlerwert aufweisen, kann der Fehlerwert der Summe nun durch die Anzahl Messungen geteilt werden, um den Mittelwert zu erhalten.

$$\Delta((a+b+\dots+j)/10) = 0.316228\dots/10 = 0.0316228\dots \approx \mathbf{0.03 \text{ mag/arcsec}^2}$$

Der Fehlerwert des Mittelwerts von 10 Messungen, mit dem SQM-L, entspricht ungefähr $0.03 \text{ mag/arcsec}^2$.

Die Fehlerwerte für die Messmethoden Kamera und Dark-Sky-Meter App sind leider nicht bekannt.

$$\frac{\Delta(a \cdot b)}{a \cdot b} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2}$$

$$\frac{\Delta\left(\frac{a}{b}\right)}{\frac{a}{b}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2}$$

Abbildung 32: Formel der Fehlerrechnung bei einer Multiplikation oder Division

$$\Delta(a + b) = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}$$

$$\Delta(a - b) = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Abbildung 33: Formel der Fehlerrechnung bei einer Addition oder Subtraktion

²⁹ Anklin, 2021, S.1ff

³⁰ Unihedron, 2012

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Resultate

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 3 dargestellten Resultate ausgewertet und analysiert.

4.1.1 Grossstadtvergleich

Die Resultate der Messungen in den Grossstädten Zürich und Bern bestärkten die Hypothese³¹. Diese besagte, dass in Zürich die Lichtverschmutzung stärker sein wird als in Bern.

Die Lichtverschmutzung in Zürich wie auch in Bern nahm mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum ab. In Zürich ist die Abnahme jedoch deutlich akzentuierter als in Bern.



Abbildung 34: Lichtglocke von Zürich um 00:21 Uhr

Es kann weiter festgehalten werden, dass in der Grossstadt Zürich im Stadtzentrum die Lichtverschmutzung deutlich höher ist als in Bern, in der 20 km entfernten Agglomeration sich jedoch die Werte der beiden Standorte angleichen.

Heutzutage ist in der ganzen Schweiz der Nachthimmel mit künstlichem Licht aufgehellert (ein mehr oder weniger ausgeprägtes Grundleuchten), das heisst, es kann an keinem Ort mehr ein komplett dunkler Nachthimmel gefunden werden. Es scheint, dass in 20 km Entfernung der Einfluss der Lichtglocken der beiden Grossstädte Bern und Zürich (Abbildung 34) vernachlässigbar wird. Der Grossteil der Lichtverschmutzung stammt in dieser Zone bereits aus dem starken Grundleuchten des Mittellandes.



Abbildung 35: Lichtglocke des Flughafens Zürich um 23:33 Uhr

Auch die Hypothese, dass Zürich eine stärkere Lichtemission aufweist als Bern, wird durch die Resultate der Messungen bestätigt. Sowohl im Stadtzentrum als auch an der Peripherie von Zürich kann eine stärkere Lichtverschmutzung gefunden werden. Diese Resultate sind darauf zurückzuführen, dass Zürich flächenmässig grösser ist, eine fast doppelt so hohe Einwohnerdichte hat und über mehr Industrieanlagen und einen grossen Flughafen verfügt (Abbildung 35). Industriegebiete, Sportanlagen und Flughäfen haben einen signifikanten Einfluss auf die Lichtverschmutzung einer Stadt.

Insbesondere sind Flughäfen in der Nacht aus Navigationsgründen stark beleuchtet, was deutlich aus den Messungen beim Flughafen Zürich in Kloten hervorgeht. Die dort gemessenen Werte zeigen, mit Ausnahme einer zusätzlichen Messung in Genf, die mit Abstand höchst gemessene Lichtverschmutzung aller in dieser Arbeit definierten Messstandorte der Schweiz auf.

³¹ siehe Hypothese Kapitel 2.1.3

Erstaunlicherweise ergibt die Auswertung der Kameramessmethode am Flughafen eine geringere Lichtverschmutzung als auf der Terrasse der ETH Zürich (Abbildung 36). Diese Diskrepanz lässt sich durch signifikante Lichtquellen in unmittelbarer Nähe des Messstandortes an der ETH Zürich erklären. Während beim Flughafen der Messstandort etwas abseits war, ohne störenden, nahegelegenen Lichtquellen, war der Messstandort ETH mitten in der Stadt lokalisiert und das Resultat wurde durch diverse Strassenlaternen in relativer Nähe beeinträchtigt.

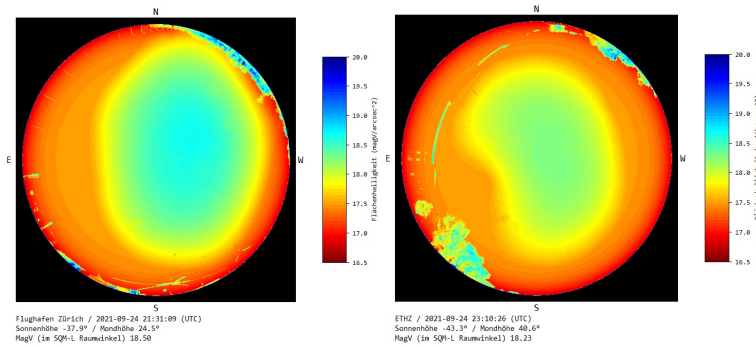


Abbildung 36: Vergleich Flughafen Zürich und ETH Zürich

Neben der zusätzlichen Messung im Stadtzentrum von Genf wurden ebenfalls Messungen in den Zentren der norditalienischen Städte Venedig und Mailand gemacht. Die Lichtglocke von Mailand beeinflusst die gesamte Südschweiz. Mailand zählt zu einer derjenigen Städte Europas, welche die grösste Lichtemission aufweist. Das hängt stark mit der Einwohnerdichte zusammen. Mit 7'250 Einwohnern pro Quadratkilometer gehört Mailand zu einer der am dicht besiedeltsten Grossstädte Europas. Der gemessene Wert des Nachthimmels im Stadtzentrum beträgt 15.07 mag/arcsec² und ist somit deutlich tiefer (grössere Helligkeit) als die gemessenen Werte von Zürich und Bern. Die Lichtglocke Mailands wird durch die Alpen jedoch weitgehend abgeschirmt und hat folglich höchstens eine sehr marginale Auswirkung auf die Lichtverschmutzung im Schweizer Mittelland.

Auf den ersten Blick überraschend ist die Tatsache, dass die gemessene Lichtverschmutzung in Kirchberg, Agglomeration Bern (Abbildung 37), höher ist als in Wettingen, Agglomeration Zürich. Wettingen verfügt nämlich über eine grössere Einwohnerdichte als Kirchberg und ist erst noch durch eine tiefere Lage ausgezeichnet. Die Hypothese besagt, dass mit zunehmender Einwohnerdichte und tieferer Lage die Lichtverschmutzung zunimmt. Dieser Widerspruch kann darauf zurückzuführen sein, dass Wettingen durch die Einbettung in die hügelige Landschaft des Limmattals besser vor Lichtemission abgeschirmt ist als Kirchberg, das sich in einem weitläufigen und offenen Gebiet befindet.



Abbildung 37: Dorfrand von Kirchdorf um 02:08 Uhr

Zusammengefasst: Die Lichtverschmutzung variiert zwischen verschiedenen Stadtzentren, nimmt mit zunehmender Entfernung ab und gleicht sich in der 20km entfernten Agglomeration dem Grundleuchten des Mittellandes an. An Flughäfen wird auf Grund der Navigationsbeleuchtung eine sehr starke Lichtverschmutzung gemessen. Die Lichtverschmutzung einer Grossstadt hängt zudem stark von der Bevölkerungsdichte ab.

4.1.2 Talvergleich

Die Auswirkung der Resultate des Talvergleichs zeigen, dass die drei angewandten Messmethoden am gleichen Standort verschiedene Ergebnisse liefern. Die Resultate der Messmethode Kamera und SQM-L korrelieren recht gut, während die Resultate, die mit der DSM Messmethode erzielt wurden, etwas abfallen. Aus diesem Grund werden in der Diskussion ausschliesslich die Messwerte der Messmethode SQM-L und Kamera verwendet.

Beide Messmethoden, SQM-L und Kamera, massen Rohrdorf als den dunkelsten Standort und Wettingen als den hellsten Standort dieser Messreihe. Dieses Ergebnis widerlegt teilweise die aufgestellte Hypothese³², welche erwartet, dass Ehrendingen stärker von Wettingen abweicht als Rohrdorf. In Ehrendingen wird der dunkelste Nachthimmel (indirekte Lichtemission) und in Rohrdorf die dunkelste Aussicht (direkte Lichtemission) erwartet.

Die Messresultate ergaben jedoch genau das Gegenteil: in Ehrendingen wurde eine geringere direkte Lichtemission, Aussicht, als in Rohrdorf gemessen, dafür war am Rande Rohrdorfs der Nachthimmel dunkler als in Ehrendingen. Dieser Umstand lässt sich einerseits dadurch erklären, dass die Einwohnerdichte eines Ortes einen grösseren Einfluss auf die künstliche Erhellung des Nachthimmels zu haben scheint als geografische Faktoren wie Erhebungen und Hügel und andererseits ist insbesondere bei kleinen Ortschaften die direkte Messung der Lichtemission, Aussicht, in einem nicht zu vernachlässigbaren Mass abhängig von der gewählten Ausrichtung des Messgerätes auf das «Dorfzentrum» und damit fehleranfällig.

Weiter ist erstaunlich an den Messresultaten, dass der Nachthimmel, mit dem SQM-L gemessen, im Zentrum von Rohrdorf heller ist als in Wettingen hinter dem Rathaus. Wird die Messung aus Rohrdorf jedoch mit der Messung aus Wettingen vor dem Rathaus verglichen, so zeigt sich genau das entgegengesetzte Bild.

Die Erkenntnis, dass Wettingen einerseits den dunkelsten und andererseits den hellsten Messwert im Dorfzentrum aufweist, zeigt, dass Messungen im Zentrum stark von nahegelegenen Lichtquellen wie zum Beispiel einem beleuchteten Haus oder einer Strassenlaterne beeinflusst werden. In Wettingen vor dem Rathaus wird viel Licht abgestrahlt von der stark erleuchteten Fassade des Rathauses und einer nahegelegenen Strassenkreuzung, welche gut beleuchtet ist. Hinter dem Rathaus war der Messstandort auf einer grösseren Wiese, umringt von hohen Bäumen, welche das Umgebungslicht besser abschirmen und damit den Messwert erhöhen.

Die Messungen, Aussicht und Himmel, waren beide Male am Standort Lägern am hellsten. Das Ergebnis kann darauf zurückgeführt werden, dass am Standort Lägern beim Schartenfels gemessen wurde. Dieser Standort ist stark exponiert, nicht von Hügeln abgeschirmt und wird gleichzeitig von den Gemeinden Baden, Ehrendingen und Wettingen erleuchtet. Der Standort Heitersberg wiederum befand sich am Waldrand und war somit aus einer Richtung von Lichtemissionen abgeschirmt.

Dieses Resultat zeigt, dass auch geografische Faktoren wie ein Hügel einen Einfluss auf die Lichtverschmutzung haben, solange diese Effekte nicht von signifikanteren Faktoren wie einer starken Beleuchtung am Messstandort überlagert werden.

Es muss zudem erwähnt werden, dass die Kameraaufnahmen in einer Vollmondnacht gemacht wurden und mit den SQM-L Messwerten einer Neumondnacht verglichen werden, was

³² siehe Hypothese Kapitel 2.1.3

die Aussagekraft, insbesondere für die Messungen des Nachthimmels ausserhalb der Dorfzentren, etwas relativiert.

Zusammengefasst: Die Einwohnerdichte einer Gemeinde hat einen grösseren Einfluss auf die Lichtverschmutzung als der Einfluss von geografischen Faktoren wie Hügeln. Bei vergleichbarer Einwohnerdichte zweier Gemeinden haben geografische Faktoren einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Lichtverschmutzung.

4.1.3 Naturpark Gantrisch

Die Resultate der Messungen im Naturpark Gantrisch und im Naherholungsgebiet Eigi in Wettingen bestärken die Hypothese³³. Sie besagt, dass die Lichtverschmutzung im Naturpark deutlich geringer ist als im Eigi in Wettingen.

Dieser Tatbestand lässt sich zu einem grossen Teil durch die geografische Lage und demografischen Merkmale des Parks erklären. Der Naturpark Gantrisch liegt südlich von Bern zwischen Fribourg und Thun, in einiger Entfernung zu den drei Ballungszentren. Im Gebiet konnte der ursprüngliche Charakter weitgehend bewahrt werden. Im Süden des Parks beginnen die nördlichen Voralpen. Durch diese Bergkette ist insbesondere der südlichste Teil des Parks gut von Lichtemissionen abgeschirmt. Innerhalb des Naturparks Gantrisch gibt es keine grossen Gemeinden oder Industriegebiete. Die grösste Gemeinde ist Belp am Rande des Parks mit etwas weniger als 10'000 Einwohnern. Die überwiegende Mehrheit der Gemeinden hat jedoch deutlich weniger als 2000 Einwohner.

Das Eigi in Wettingen ist zwar durch die Lägern (866 m.ü.M.) und den Sulperg (514 m.ü.M.) etwas abgeschirmt, jedoch sind diese Erhebungen nicht mit den 2'000m hohen Berner Voralpen zu vergleichen. Ausserdem wird das Eigi durch das beinahe direkt angrenzende Dorf Wettingen aufgeleuchtet und auch die geografische Nähe zur Stadt Zürich trägt einen marginalen Beitrag zur Lichtemission bei.

Die Hypothese, welche besagt, dass im Norden des Naturparks die Lichtverschmutzung grösser ist als im Süden, wurde durch die Resultate der Messungen im Naturpark ebenfalls bestätigt. Während im Norden des Parks fast nur Messwerte im Bereich von 20 mag/arcsec^2 erhoben wurden, sind die Messwerte im Süden im Bereich von 21 mag/arcsec^2 deutlich besser. Im Westen und im Osten des Parks werden Werte nahe denjenigen im Süden erreicht. Daraus lässt sich ableiten, dass im Norden des Parks die Auswirkungen der Lichtglocke der Grossstadt Bern auf die Lichtverschmutzung spürbar ist, während die beiden Lichtglocken der deutlich kleineren Städte Thun im Osten und Fribourg im Westen kaum Auswirkungen haben.

Das wirft die berechtigte Frage auf, weshalb das Observatorium des Astronomischen Instituts der Universität Bern in Zimmerwald im Norden des Parks lokalisiert ist (Abbildung 38 und Abbildung 39). Im Observatorium wird mit Teleskopen gearbeitet. Eine notwendige Voraussetzung für eine effiziente Arbeit mit Teleskopen ist typischerweise eine möglichst geringe Lichtverschmutzung. Da jedoch die Arbeit im Observatorium Zimmerwald vor allem darin besteht, Weltraumschrott zu überwachen und mit einem Laser die Laufbahn von Satelliten zu kontrollieren, was sogar am Tag möglich ist, hat eine leicht erhöhte Lichtverschmutzung keinen allzu grossen Einfluss. Im Observatorium werden allerdings auch vereinzelt Bilder der Satelliten gemacht.



Abbildung 38: Observatorium Zimmerwald während einer Lasermessung um 01:05 Uhr



Abbildung 39: Observatorium Zimmerwald während einer Lasermessung um 01:05 Uhr

³³ siehe Hypothese Kapitel 2.1.3

Voraussetzung dafür ist ein klarer und relativ dunkler Nachthimmel. Da der Lichtverschmutzungsgrad im ganzen Naturpark Gantrisch sehr gut bis ausgezeichnet ist, der Norden des Parks jedoch leichter zu erreichen ist und nahe bei der Universität liegt, ist die Wahl für den Standort des Observatoriums in Zimmerwald ein ausgewogener Kompromiss und gut nachvollziehbar.

Wird die Entwicklung der Lichtverschmutzung des Naturparks mit der Entwicklung in anderen Gebieten der Schweiz verglichen, kann festgestellt werden, dass im Gegensatz zu vielen ländlichen und alpinen Regionen, in denen die Lichtverschmutzung in den letzten Jahren angestiegen ist, im Naturpark Gantrisch die Lichtverschmutzung abgenommen hat. Dies bestätigt die aufgestellte Hypothese, dass die Lichtverschmutzung durch die Sensibilisierung der Einwohner des Parks gesenkt werden konnte.

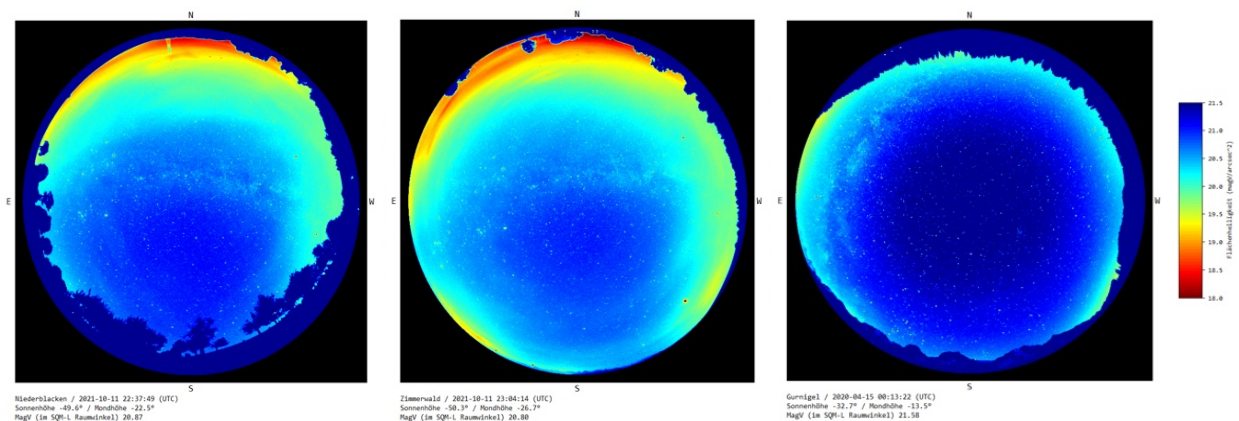


Abbildung 40: Falschfarbbilder von Niederlacken, Zimmerwald und Gurnigel

Abbildung 40 zeigt, dass im Naturpark Gantrisch vor allem Lichtemissionen aus Norden den Park verschmutzen. Im Vergleich der beiden Messstandorte Niederlacken und Zimmerwald ist zu erkennen, dass der Nachthimmel in Niederlacken im Süden deutlich dunkler ist. Die Beobachtung lässt sich durch einen Hügel erklären, welcher einen Grossteil der Lichtemission aus Süden abschirmt. Ausserdem wird der ganze Park grossräumig vom Einfluss der Lichtverschmutzung aus Süden durch die Berner Voralpen stark abgeschirmt.

Bei der Aufnahme des Standortes Gurnigel ist zu erkennen, dass der Nachthimmel vor allem aus Osten und teilweise aus Westen erhellt wird, aus Norden ist der Einfluss eher gering. Diese Beobachtung kann darauf zurückgeführt werden, dass sich im Osten des Standortes die Stadt Thun befindet und im Westen Fribourg. Die nördlich gelegene Grossstadt Bern würde in der Regel einen signifikanteren Einfluss auf die Himmelsqualität haben, jedoch lag zum Messzeitpunkt über der Stadt Bern dichter Nebel, welcher das emittierte Licht der Grossstadt grösstenteils absorbierte.³⁴

Zusammengefasst: Die geografische Lage und demografische Merkmale des Naturparks Gantrisch führen dazu, dass der Park eine sehr geringe Lichtverschmutzung aufweist. Der Park wird vor allem durch die Lichtglocken der nahegelegenen Städte Bern, Fribourg und Thun ein wenig beeinträchtigt. Der Norden des Parks ist durch eine flachere Topologie und einer direkten Sicht auf die Grossstadt Bern am stärksten von der Lichtverschmutzung betroffen.

³⁴ Aussage Peter Schlatter

4.2 Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz

Die Karten zur Entwicklung der Lichtverschmutzung widersprechen der aufgestellten Hypothese³⁵. Es wird erwartet, dass die Lichtverschmutzung in den Städten deutlich ansteigt und sich die Lichtglocken der Städte vergrössern.

Die Daten zeigen jedoch, dass vor allem in ländlichen und alpinen Regionen die Lichtverschmutzung zunimmt, in Städten verändert sie sich kaum oder sinkt teilweise sogar.

Diese Resultate können darauf zurückgeführt werden, dass sich einzelne Städte wie zum Beispiel Schaffhausen oder Baden aktiv dafür einsetzen, die Lichtverschmutzung zu verringern und zum Beispiel Strassen oder Denkmalbeleuchtungen früher in der Nacht ausschalten.

Der Anstieg der Lichtverschmutzung in ländlichen Regionen kann einerseits auf den erhöhten Siedlungsdruck und die zunehmende Zersiedelung dieser Gebiete zurückgeführt werden. Es werden immer mehr neue Wohnungen und dazugehörige Infrastrukturprojekte gebaut, welche zusätzliches Licht emittieren. Andererseits wird die gesamte Südschweiz von der Lichtglocke Mailands erleuchtet. Ein Anstieg der Lichtverschmutzung in Mailand wirkt sich unmittelbar auf die Lichtverschmutzung in der Südschweiz und im südlichen Alpenraum aus.

Bei der Auswertung muss allerdings beachtet werden, dass die Karten über die Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz von Dark-Sky Switzerland ausschliesslich die Lichtverschmutzung der Beleuchtung mit Glühbirnen abbilden, dies, weil die Satelliten, welche die Lichtverschmutzung messen, nur Licht eines gewissen Wellenlängenbereichs messen können. LEDs emittieren Licht mit einer kürzeren Wellenlänge und werden von den Satelliten daher nicht «gesehen».

Die Abnahme der Lichtverschmutzung in den Städten könnte also auch nur durch die Ersetzung der älteren Glühbirnen durch neue und energieeffiziente LED Lampen zustande kommen und könnte im schlechtesten Fall sogar zugenommen haben.

Zusammengefasst: In der Schweiz erhöht sich die Lichtverschmutzung vor allem in ländlichen Gebieten, während sie in den Städten konstant bleibt oder sogar leicht sinkt. Diese Tatsache lässt sich durch die zunehmende Zersiedelung ländlicher Gebiete und allenfalls die Sensibilisierung der Menschen in der Stadt bezüglich Problematik Lichtverschmutzung erklären. Es gilt jedoch zu beachten, dass Satelliten ausschliesslich die Lichtemission von Glühbirnen messen können und die zunehmende Verbreitung von LEDs einen signifikanten Einfluss auf die Resultate haben könnten.

Anmerkung Dark-Sky Switzerland



³⁵ siehe Hypothese Kapitel 2.1.3

4.3 Vergleich verschiedener Messgeräte

Der Vergleich der Messmethoden, siehe Kapitel 3.1.6, zeigt, dass viele Ansätze nicht für die Messung der Lichtverschmutzung geeignet sind. Als die einzigen drei brauchbaren Messgeräte kristallisierten sich das Sky-Quality-Meter (SQM-L), die Dark-Sky-Meter App (DSM) und die Kameraaufnahmen der Canon D60 Kamera mit Fischauge-Objektiv heraus.

Das Messgerät, welches mit Hilfe von Lego Mindstorms gebaut wurde, war eine interessante technische Herausforderung beim Bau und der Programmierung, jedoch hat der Sensor eine viel zu kleine Auflösung, um Messungen in der Dunkelheit zu differenzieren. Dieses Messgerät eignet sich nur für Messungen einer direkten, relativ starken Lichtquelle.

Auch der Lichtsensor von Vernier LabPro kann unterschiedlich «dunkle» Orte nicht voneinander differenzieren. Dieses Messgerät eignet sich wie dasjenige von Lego Mindstorms vor allem, um Messungen einer direkten Lichtquelle zu machen.

Mit der DSM App kann die Lichtverschmutzung relativ einfach bestimmt werden. Die Werte sind aber nicht besonders genau und das Messspektrum ist relativ klein.

Die DSM App ist gut geeignet, die relative Lichtverschmutzung an verschiedenen Standorten zu vergleichen. Zudem wird für eine Messung nur ein Iphone benötigt, auf dem die App installiert ist. Dieses «Messgerät» ist somit für jedermann einfach erhältlich. Ein weiterer Vorteil dieser Messmethode ist, dass die Daten für andere Benutzer freigegeben werden können. Alle Daten werden übersichtlich auf einer Karte dargestellt, welche im Internet zugänglich ist.

Das SQM-L war für diese Arbeit das adäquateste Messgerät, da es einerseits kompakt und zuverlässig ist und andererseits über ein breites Messspektrum verfügt. Das Gerät kann sowohl an dunkeln als auch an hellen Standorten genutzt werden. Im Gegensatz zum DSM hat das SQM-L in dieser Arbeit nie die Grenze der Messauflösung erreicht. Das Gerät ist auch nicht so stark wetterabhängig wie die Messmethode mit der Kamera. Die besten Resultate werden jedoch bei klarem Nachthimmel und wenig Luftfeuchtigkeit erzielt. Durch die Linse, welche im SQM-L eingebaut ist, wird der Empfindlichkeitsbereich des Messgerätes auf 20° zum Zenit beschränkt und folglich sollte eine Laterne oder andere Lichtquellen in der Nähe des Messstandortes nur einen mässigen Einfluss auf das Resultat haben. Wie sich in dieser Arbeit herausstellte, ist dem jedoch nicht so, aller Voraussicht nach, weil eine Laterne das Licht stark streut.

Der SQM-L Road Runner ist eine sehr nützliche Messmethode, um die Lichtverschmutzung in einem grossen Gebiet zu messen. Daten aus dem Grossraum Zürich zeigen, dass sich auf der gesamten abgefahrenen Strecke die Messwerte sehr stark unterscheiden. Daraus lässt sich schliessen, dass nahegelegene Lichtquellen, vor allem Strassenlaternen, einen grossen Einfluss auf die Messresultate haben. Diese Messmethode eignet sich deshalb hauptsächlich für Messungen in eher abgelegenen Regionen, mit wenigen Lichtquellen.

Die App, welche die Daten sammelte, sollte zum jeweiligen Wert der Lichtverschmutzung auch die exakten Koordinaten des Messstandortes speichern. Die Software funktionierte leider nicht immer sehr zuverlässig und mit Ausnahme einer abgefahrenen Strecke, konnten die gemessenen Daten nicht mehr abgerufen werden.

Die Bestimmung der Lichtverschmutzung mit Hilfe von ausgewerteten Kameraaufnahmen ist die aufwändigste Messmethode dieser Arbeit. Es wird jeweils nur ein Bild pro Messstandort

verwendet. Bei der Auswertung der Daten müssen allerdings sehr viele Faktoren wie Wetter, Mondphase etc. berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Kameraaufnahmen korrelieren sehr gut mit denjenigen des SQM-Ls, woraus statistisch gefolgert werden kann, dass diese beiden Messmethoden die exaktesten Messungen ergeben.

Mit dem Luxmeter können sehr starke Lichtwerte in einem gut beleuchteten Stadtzentrum gemessen werden. Jedoch kann das Gerät, auf Grund der geringen Messauflösung, für Messungen ausserhalb einer Stadt schlecht verwendet werden, weshalb die Messmethode Luxmeter für diese Arbeit unbedeutend ist.

Zusammengefasst: Der Vergleich der verschiedenen Messgeräte zeigt, dass einzig das SQM(-L), das DSM und die Kameraaufnahmen zur Bestimmung der Lichtverschmutzung eingesetzt werden können. Am zuverlässigsten und praktikabelsten ist das SQM-L.

4.4 Auswirkungen der Lichtverschmutzung und Verbesserungsmöglichkeiten

Wie in Kapitel 4.1.1 diskutiert ist das gesamte Mittelland von einem Grundleuchten aufgehell, das durch lokale Einflüsse regional mehr oder weniger verstärkt wird. Da ein Grossteil der Schweizer Bevölkerung im Mittelland lebt, stellt die Lichtverschmutzung ein grosses Problem dar, sowohl für die menschliche und tierische Gesundheit als auch für die Forschung. Direkte und indirekte Lichtemissionen sollten daher möglichst minimiert werden.

In Kapitel 4.3 wurde bereits eingeführt, dass Strassenlaternen das Licht weiträumig streuen (siehe Abbildung 41). Strassenlaternen sind in der Schweiz der häufigste Grund für zu helle Schlafzimmer. Zu helle Schlafzimmer können sich negativ auf den Schlafrhythmus der Menschen auswirken.

Neben dem Faktum der Helligkeit spielt auch eine entscheidende Rolle, welche Farbe Licht hat. Blaues, kaltes Licht beispielsweise ist schädlicher als weisses, warmes Licht.³⁶

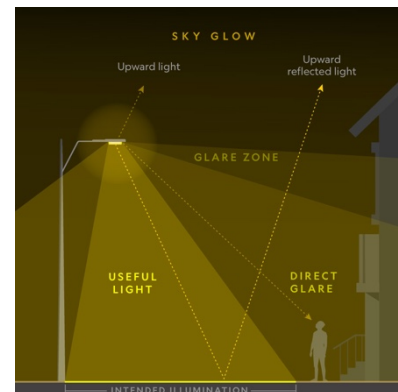


Abbildung 41: Grafik der Lichtstreuung einer Strassenlampe

Viele Gemeinden in der Schweiz sind sich der Problematik bewusst und löschen die Strassenbeleuchtung spät in der Nacht, um die Schlafqualität der Einwohnerinnen und Einwohner nicht zu beeinträchtigen. Aktuell setzt sich in gewissen Gemeinden die Bevölkerung dafür ein, die Beleuchtungsdauer der Strassen weiter zu reduzieren.³⁷

Durch den Austausch und Diskussionen mit Expertinnen und Experten und der Analyse der verschiedenen Messstandorte konnten diverse Massnahmen zur Eindämmung der Lichtverschmutzung eruiert werden.

Der einfachste Weg Lichtverschmutzung zu verringern, ist, «einfach» Lichtemission zu vermeiden, zum Beispiel durch konsequentes Löschen von nicht verwendeten Lichtquellen wie Innenbeleuchtungen nicht benutzter Räume oder selektives Beleuchten von Strassen oder in der Weihnachtszeit auf den Verzicht von Lichterketten zur Dekoration der Hausfassade und des Gartens. Zudem kann Licht durch technische Neuerungen effizienter genutzt, die Lichtstärke mittels Dimmer auf das jeweilige Bedürfnis angepasst oder durch Abschirmen der Leuchtkörper eine gezieltere Lichtnutzung erreicht werden (Beispiel Abbildung 42, Typ 4).

In Abbildung 42 sind verschiedene Modelle von Strassenlaternen erkennbar. Die meistgenutzten Laternen in der Schweiz sind die Typen 2 und 3. An Fussgänger- bzw. Spazierwegen kann auch Typ 1 angetroffen werden. Würden alle Laternen in der Schweiz durch Typ 3 oder 4 ersetzt, könnte der «Skyglow» signifikant reduziert werden und auch die Raumerhellung («Light Trespass») könnte gesenkt werden.

³⁶ siehe Theorie Kapitel 1.2.3

³⁷ siehe Theorie Kapitel 1.2.4

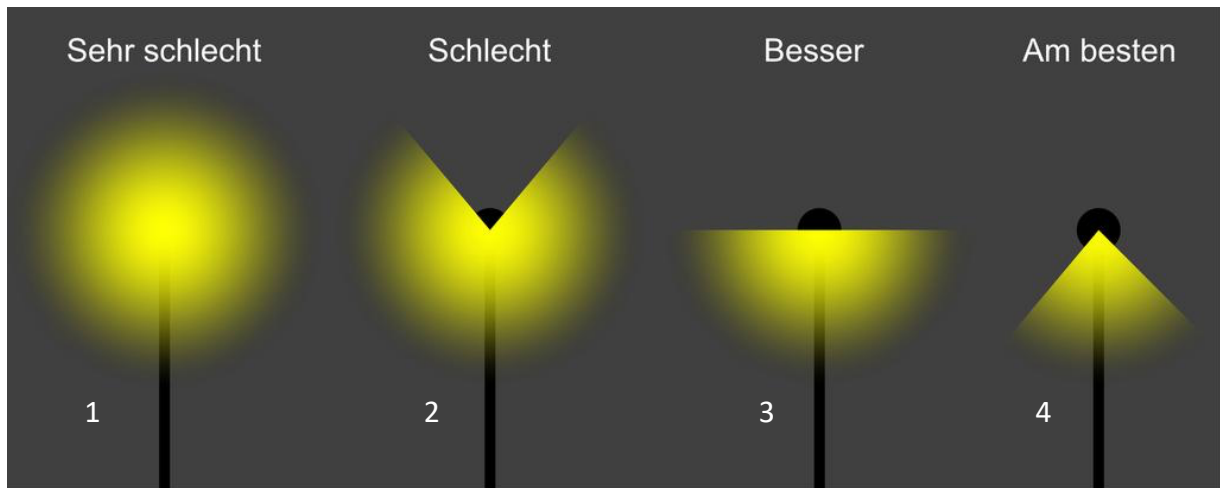


Abbildung 42: Modelle von verschiedenen Strassenlaternen

Eine energieeffiziente Methode der Lichtnutzung ist die Beleuchtung mit LEDs, die bereits in praktisch jedem Schweizer Haushalt zu finden sind und innert weniger Jahre Glühbirnen faktisch verdrängt haben. Die Vorteile der LEDs sind, dass sie sehr viel weniger Strom verbrauchen als Glühbirnen und die Lebensdauer zudem deutlich höher ist. Allerdings verbessern LEDs das Problem der Lichtverschmutzung nur bedingt.

Durch die erwähnten Massnahmen kann jedermann einen Betrag zur Eindämmung der Lichtverschmutzung leisten und so mithelfen, lichtsensible Orte zu schützen.

Zusammengefasst: Ein effektiver Weg Lichtverschmutzung zu mindern, ist, das frühere oder komplette Ausschalten der Aussenbeleuchtung im öffentlichen Raum und die Sensibilisierung der Bevölkerung. Privatpersonen können Lichtverschmutzung reduzieren, indem sie einen bewussten Umgang bezüglich Art und Notwendigkeit von Lichtemissionen im eigenen Heim anstreben.

4.5 Fehlerquellen

Die Messungen an den verschiedenen Standorten wurden teilweise in unterschiedlichen Nächten durchgeführt. Für einen fairen Vergleich müsste berücksichtigt werden, dass nicht alle Messungen unter den gleichen Bedingungen durchgeführt worden sind.

In einigen Nächten war bei den Messungen der Mond sichtbar, was die Resultate stark beeinflusste.

Die Nächte waren nie vollständig wolkenlos, der Himmel war immer mit einem mehr oder weniger ausgeprägten Schleier bedeckt. Wolken reflektieren und streuen das Licht, was bei Messungen zu einem helleren Nachthimmel führt. Dieser Umstand beeinflusste die Messungen mit dem SQM-L und insbesondere die Messwerte der Kamera.

Bei Messungen des Nachthimmels im Zentrum eines Dorfes oder einer Stadt (Abbildung 43) könnten Laternen oder andere Lichtquellen zu verfälschten Ergebnissen geführt haben. Das SQM-L besitzt zwar eine Linse, welche den Zenit fokussiert, um so die Helligkeit gezielt zu messen. Jedoch ist bei der Messung am Rande von Kirchberg aufgefallen, dass eine ca. 20m entfernte Strassenlaterne, welche durch ein vorbeifahrendes Auto temporär heller wurde, die Messung des SQM-Ls stark beeinflusst hatte.



Abbildung 43: Kehrrechtsverbrennungsanlage bei der Josefwiese um 02:38 Uhr

5 Reflexion

In diesem Kapitel geht es darum, meine Maturaarbeit an der Kantonsschule Wettingen, welche sich mit dem Thema Lichtverschmutzung befasst, zu reflektieren. Ziel dieser Arbeit war es, sich in einem selbstgewählten Themenbereich zu spezialisieren, fortzubilden und einen eigenen Sachverhalt zu bearbeiten.

Das Strukturieren und Planen dieser Arbeit fielen mir anfangs relativ leicht. Als ich jedoch feststellte, dass es deutlich anspruchsvoller als erwartet war, ein adäquates Messgerät für meine Messungen zu evaluieren, musste ich den Zeitplan anpassen.

Der adaptierte Zeitplan hat mir schlussendlich geholfen, alle geplanten Messungen rechtzeitig durchzuführen und verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

In Zukunft würde ich für die Auswahl eines geeigneten Messgerätes deutlich mehr Zeit einplanen. Ein detaillierter Zeitplan mit Meilensteinen sollte sehr sorgfältig erstellt werden, um Stresssituationen zu vermeiden und jederzeit einen Überblick über den aktuellen Stand der Arbeit zu haben.

Das eigentliche Messen der Lichtverschmutzung stellte sich als sehr zeitaufwändig und anspruchsvoll heraus, da die Zeitpunkte für die Messungen jeweils von verschiedenen, teils nicht beeinflussbaren Faktoren wie dem Wetter, abhängig waren.

Besonders Messungen mit der Kamera sollten nur in mondfreien Nächten, einem klaren Nachthimmel, geringer Luftfeuchtigkeit, völliger Dunkelheit und keinen Störfaktoren wie Laternen, Bäume, Flugzeuge, Autos und hohe Gebäude durchgeführt werden. Falls eine dieser Voraussetzungen verletzt wurde, musste die Messung wiederholt oder an einem anderen Standort durchgeführt werden. Zeitliche Flexibilität war daher unabdingbar, um keine Gelegenheit mit «optimalen» Bedingungen zu verpassen.

Da ein Neumondzyklus ca. 30 Tage dauert, wurden die meisten Messungen dieser Arbeit nicht bei Neumond, sondern nach dem «Untergehen» des Mondes durchgeführt, was dazu führte, dass die «Arbeitstage» oftmals bis 3:00 Uhr nachts dauerten.

Das Auswerten der Daten erfolgte sehr produktiv. Die Daten wurden in einer Tabelle übersichtlich dargestellt und dadurch wurde die Analyse vereinfacht.

Es war sehr lehrreich und bereichernd, eigene Daten mit Hilfe der angeeigneten Theorie und im Austausch und Diskussionen mit anerkannten Expertinnen und Experten im Bereich Lichtverschmutzung auszuwerten und zu analysieren.

Ich habe in dieser Arbeit gelernt, einen Messversuch zu planen, aufzubauen, Daten zu analysieren und eine schriftliche Abhandlung zu verfassen. Die Maturaarbeit zeigte mir einmal mehr die Freude am praktischen Arbeiten auf, mit den vielen spannenden Facetten einer wissenschaftlichen Abhandlung eines selbstgewählten Themas.

Zusammenfassend kann ich sagen, dass mir diese Arbeit trotz einiger anstrengender und langer Nächte sehr viel Freude bereitet hat.

6 Fazit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Lichtverschmutzung in der Schweiz zu messen und zu vergleichen, um herauszufinden, in welchen Gebieten und unter welchen Einflüssen am meisten beziehungsweise am wenigsten Lichtverschmutzung vorhanden ist.

Ausserdem wurde evaluiert, wie Lichtverschmutzung am genauesten zu bestimmen ist und wie sie sich schweizweit entwickelt.

Zu diesem Zweck wurde mit sieben verschiedenen Messmethoden in drei verschiedenen Bereichen die Lichtverschmutzung verglichen: Grossstadtvergleich (Zürich-Bern), Talvergleich (Rohrdorf-Wettingen-Ehrendingen), Parkvergleich (Naturpark Gantrisch-Eigi Wettingen).

Aus den Vergleichen resultierte, dass in Schweizer Grossstädten die Lichtverschmutzung deutlich stärker ist als in Schweizer Naturparks und im ganzen Schweizer Mittelland ein mehr oder weniger starkes Grundleuchten existiert. Was den Einfluss von geografischen und demografischen Faktoren auf die Lichtverschmutzung betrifft, so konnte anhand der Messungen des Talvergleichs und der Messungen im Naturpark Gantrisch gezeigt werden, dass Hügelzüge und Erhebungen einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Lichtverschmutzung haben, sofern der Messstandort nur schwach beleuchtet ist. Die Messungen zeigten auch, dass die Bevölkerungsdichte einer Ortschaft die jeweilige Lichtverschmutzung beeinflusst.

Es musste festgestellt werden, dass sich die Lichtverschmutzung in den letzten Jahren in ländlichen Gebieten beinahe verdoppelt hat, während sie in einigen Städten sogar leicht rückläufig ist.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Einflüsse von ausschlaggebenden Faktoren auf die Lichtverschmutzung in der Schweiz bestätigten die aufgestellten Hypothesen.

Erhebungen beeinflussten die Lichtverschmutzung positiv. Sie schirmen Lichtemissionen ab und verdunkeln Dörfer. Eine zunehmende Einwohnerdichte resultiert in einem negativen Einfluss auf die Lichtverschmutzung von Dörfern und Städten.

Ein Vergleich der verschiedenen Messgeräten ergab, dass ausschliesslich mit den Messmethoden SQM(-L), DSM und ausgewertete Kameraaufnahmen brauchbare und interpretierbare Ergebnisse erzielt werden konnten.

Die Resultate meiner Messungen und die Bewertung der verschiedenen Messgeräte können von verschiedenen Organisationen verwendet werden und wertvolle Ideen für zukünftige Projekte liefern.

Für die weitere Forschung auf dem Gebiet Lichtverschmutzung wäre es wünschenswert, mehr Messdaten für die jeweiligen Versuche zu sammeln, um fundiertere Mittelwerte und somit eine präzisere Schlussfolgerung zu erhalten. Weiter bietet diese Arbeit die Möglichkeit, die Lichtverschmutzung in Schweizer Grossstädten und Naturparks mit internationalen Messungen abzugleichen und somit einen Vergleich zu anderen Ländern zu erhalten. Es ergeben sich Möglichkeiten für weiterführende Studien, welche die Zusammenhänge mit nicht behandelten Aspekten der Lichtverschmutzung untersuchen. Zudem könnte ein Überblick über die Lichtemissionen verschiedener Länder Europas zusammengestellt werden und prägnanter die Einflüsse von verschiedenen geografischen und demografischen Aspekten untersucht und analysiert werden.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Bücher

Anklin, H. (2021). *Fehlerrechnung*. Wettingen: o.A.

Brunold, S. (2018). *Kompass. Der Wegweiser für schriftliche Arbeiten auf der Sekundarstufe II*. Bern: Bildungsverlag

Ludwig, M. & Hartmeier, G. (2019). *Forschen, aber wie? Wissenschaftliche Methoden für schriftliche Arbeiten*. Bern: Bildungsverlag

Schneider, S. (2017). *Elektrisiert. Geschichte einer Schweiz unter Strom*. Baden: Hier und Jetzt, Verlag für Kultur und Geschichte GmbH

Unihedron (2012). *SQM-L Manual*. o.A.

7.2 Zeitungsartikel

Duschletta, J. (2015). *Keine Angst vor der Dunkelheit*. Engadiner Post. 29.12.2015. S.3

Kunz, S. (2021). *Stadtrat will Nachtbeleuchtung reduzieren*. Aargauer Zeitung. 22.05.2021. S.29

Schmidt, J. A. (2007). *Licht in der Stadt. Leitbilder und Strategien für innovative Lichtkonzepte*. Materialien für die Arbeit vor Ort. Sankt Augustin/Berlin: Konrad-Adenauer-Stiftung e.V.
https://www.kas.de/c/document_library/get_file?uuid=d6c14d0c-4006-6f4e-0131-eae4b99bf28b&groupId=252038

7.3 Internetseiten

BAFU (2021). *Auswirkungen auf den Mensch (Nacht)*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:32 Uhr von
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/lichtemissionen--lichtverschmutzung-/auswirkungen-von-licht/auswirkungen-auf-den-menschen--nacht-.html>

Beleuchtungdirekt (o.J.). *Natürliches Licht und künstliches Licht*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:32 Uhr von
<https://www.beleuchtungdirekt.ch/de/blog/natuerliches-licht-und-kuenstliches-licht>

Bermudez, M. (o.J.). *How does outdoor lighting causes light pollution?* Abgerufen am 27.10.2021 um 20:33 Uhr von
<https://www.delmarfans.com/educate/basics/lighting-pollution/>

Böhm-Schweizer, D. (o.J.). *Lichtverschmutzung*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:33 Uhr von
<https://astrokramkiste.de/lichtverschmutzung>

Dark-Sky Switzerland (2018). *Die Glaskugel bleibt halb leer – wer LED propagiert, muss ganzheitlich denken*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:34 Uhr von <https://www.darksky.ch/dss/de/category/aktivitaeten/messungen-versuche-analysen/>

Dark-Sky Switzerland (o.J.). *Leitbild*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:34 Uhr von <http://www.darksky.ch/dss/de/ziele/leitbild/>

Dark-Sky Switzerland (o.J.). *Lichtverschmutzung*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:35 Uhr von <https://www.darksky.ch/dss/de/wissen/lichtverschmutzung/>

Departement Bau, Verkehr und Umwelt (o.J.). *Was ist Lichtverschmutzung?* Abgerufen am 27.10.2021 um 20:35 Uhr von https://www.ag.ch/de/bvu/umwelt_natur_landschaft/umwelt_1/lichtverschmutzung_2/lichtverschmutzung.jsp

Drake, N. (2019). *Our nights are getting brighter, and Earth is paying the price*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:35 Uhr von <https://www.nationalgeographic.com/science/article/nights-are-getting-brighter-earth-paying-the-price-light-pollution-dark-skies>

Globe at night (o.J.). *What is light pollution?* Abgerufen am 27.10.2021 um 20:36 Uhr von <https://www.globeatnight.org/light-pollution.php>

Illi, M. (2011). *Beleuchtung*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:36 Uhr von <https://hls-dhs-dss.ch/de/articles/016232/2011-02-25/>

International Dark-Sky Association (o.J.). *International Dark Sky Places*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:36 Uhr von <https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/>

ITWissen (2021). *Luxmeter*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:36 Uhr von <https://www.itwissen.info/Luxmeter-luxmeter.html>

Köbler-Linsner, B. (2020). *Licht aus Sternenhimmel an! So wirkt Lichtverschmutzung auf Organismen*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:37 Uhr von <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2020/04/licht-aus-sternenhimmel-so-wirkt-lichtverschmutzung-auf-organismen>

Licht (o.J.). *Geschichte der Beleuchtung*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:37 Uhr von <https://www.licht.de/de/grundlagen/ueber-licht/geschichte-des-lichts/>

Licht Info (o.J.). *Natürliche Lichtquellen*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:38 Uhr von <https://www.licht-info.de/lichtquellen/natuerliche-lichtquellen.html>

Licht Info (o.J.). *Künstliche Lichtquellen*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:38 Uhr von <https://www.licht-info.de/lichtquellen/kuenstliche-lichtquellen.html>

Naturpark Gantrisch (2017). *Erleben Sie die Dunkelheit*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:38 Uhr von <https://www.gantrisch.ch/musse/sterne/>

NLPIP (o.J.). *How is sky glow measured or calculated?* Abgerufen am 27.10.2021 um 20:38 Uhr von <https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightpollution/skyGlowMeasured.asp>

Paten der Nacht (2021). *Licht aus, Nacht an*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:39 Uhr von <https://www.paten-der-nacht.de>

Pfälzerwald (o.J.). *Messung der Lichtverschmutzung*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:39 Uhr von <https://www.pfaelzerwald.de/blog/sternenpark/messung-der-lichtverschmutzung/>

Reinboth, C. (2008). *Lichtverschmutzung – ein ökologisches Problem*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:39 Uhr von <https://scienceblogs.de/frischer-wind/2008/07/03/lichtverschmutzung-ein-okologisches-problem/>

Schenk, M. (o.J.). *Sky Quality Meter - Einfach die Helligkeit des Nachthimmels bestimmen*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:40 Uhr von <https://www.astroshop.de/fotometer/unihedron-fotometer-sky-quality-meter-mit-linse/p,20964>

Sokol, J. (2021). *Study finds nowhere on Earth is safe from satellite light pollution*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:40 Uhr von https://www.sciencemag.org/news/2021/03/study-finds-nowhere-earth-safe-satellite-light-pollution?utm_campaign=SciMag&utm_source=JHubbard&utm_medium=

SRF (2019). *Warum Licht uns den Schlaf und Tieren den Lebensraum raubt*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:41 Uhr von <https://www.srf.ch/sendungen/me-biodiversitaet/warum-licht-uns-den-schlaf-und-tieren-den-lebensraum-raubt>

SRF (2021). *In Schaffhausen soll die Nacht dunkler werden*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:41 Uhr von <https://www.srf.ch/news/abstimmungen-13-juni-2021/kampf-gegen-lichtverschmutzung-in-schaffhausen-soll-die-nacht-dunkler-werden>

St. Moritz Energie (o.J.). *Geschichte & Pioniergeist*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:41 Uhr von <https://www.stmoritz-energie.ch/ueber-uns/portrait/geschichte-pioniergeist.html>

Teleskoptreffen (2020). *Lichtverschmutzung in der Schweiz*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:42 Uhr von <http://www.teleskoptreffen.ch/light-pollution.php>

Thiele, C. (2015). *Das könnte die Lösung für Lichtverschmutzung sein*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:42 Uhr von <https://www.welt.de/vermishtes/article140664217/Das-koennte-die-Loesung-fuer-Lichtverschmutzung-sein.html>

Wikipedia (2021). *Geschichte der Beleuchtung*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:43 Uhr von https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Beleuchtung

Wikipedia (2021). *Kunstlicht*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:43 Uhr von <https://de.wikipedia.org/wiki/Kunstlicht>

Wikipedia (2021). *Lichtverschmutzung*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:43 Uhr von <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtverschmutzung>

Zamorano, J. (o.J.). *TESS-W Night Sky Brightness Photometer*. Abgerufen am 27.10.2021 um 20:43 Uhr von <https://www.instructables.com/TESS-W-Night-Sky-Brightness-Photometer/>

7.4 Abbildungsverzeichnis

Titelbild 1	0
Agentur Umsicht (o.J.). <i>Die Schweiz bei Nacht</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 11:11 Uhr von https://umweltberatung-luzern.ch/themen/umwelt-gesundheit/laerm-luft-strahlung/licht/lichtverschmutzung	
Abbildung 1: Beispiel einer Schalenlampe aus «Das andere Kantonsmuseum Bern»	2
Das andere Kantonsmuseum Bern (o.J.), <i>Schalenlampe</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 10:43 Uhr von http://kantonsmuseum.be/web/de/content/schalenlampe	
Abbildung 2: Lichtglocke von Las Vegas in 145 Kilometer Entfernung	5
Tafreshi, B. (2019). <i>Our nights are getting brighter, and Earth is paying the price</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 10:46 Uhr von https://www.nationalgeographic.com/science/article/nights-are-getting-brighter-earth-paying-the-price-light-pollution-dark-skies	
Abbildung 3: Las Vegas Strip in der Nacht	6
Wikipedia (2021). <i>Las Vegas Strip</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 10:48 Uhr von https://de.wikipedia.org/wiki/Las_Vegas_Strip	
Abbildung 4: Luxor Hotel mit Luxor Sky Beam	6
Tafreshi, B. (2019). <i>Our nights are getting brighter, and Earth is paying the price</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 10:46 Uhr von https://www.nationalgeographic.com/science/article/nights-are-getting-brighter-earth-paying-the-price-light-pollution-dark-skies	
Abbildung 5: Werte eines SQM für die jeweilige Dunkelheit	11
Unihedron (2012). <i>SQM-L Manual</i> . o.A.	
Abbildung 6: EV3 Lego Mindstorms Messgerät	13
Eigene Abbildung	
Abbildung 7: Programm des Lego Mindstorms EV3 Brick Messgeräts	14
Eigene Abbildung	
Abbildung 8: Testmessung in Wettingen mit dem LabPro	14
Eigene Abbildung	
Abbildung 9: Dark Sky Meter App	15
Eigene Abbildung	
Abbildung 10: SQM-L Messgerät	16
Eigene Abbildung	
Abbildung 11: Datensammlung mit SQM Road Runner	16
Eigene Abbildung	

Abbildung 12: Aufbau der Kameramessung	17
Eigene Abbildung	
Abbildung 13: Beispielaufnahme von Hotpixels der Kamera	17
Eigene Abbildung	
Abbildung 14: Standorte der Messungen im Raum Zürich.....	22
Google Maps (o.J.). <i>Zürich</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 11:06 Uhr von https://www.google.ch/maps/@47.3775498,8.4665034,12z?hl=de	
Abbildung 15: Standorte der Messungen im Raum Bern	23
Google Maps (o.J.). <i>Bern</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 11:06 Uhr von https://www.google.ch/maps/@46.9606239,7.4259386,12z?hl=de	
Abbildung 16: Falschfarbbilder Standorte Grosse Schanze BE und Rosengartens BE	25
Eigene Abbildungen (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 17: Falschfarbbilder Standorte Kirchberg BE und Gurten BE	26
Eigene Abbildungen (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 18: Falschfarbbilder von Wettingen, Ehrendingen und Rohrdorf	29
Eigene Abbildungen (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 19: Standorte der Messungen im Naturpark Gantrisch (blau: Messungen des Naturparks, violett: eigene Messungen)	30
GantrischAlpen (o.J.). <i>Naturpark Gantrisch</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 11:04 Uhr von https://www.alpspiegel.ch/de/naturpark	
Abbildung 20: Falschfarbbild Naturpark Gantrisch: Zimmerwald	32
Eigene Abbildung (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 21: Falschfarbbild Naturpark Gantrisch: Niederblacken	32
Eigene Abbildung (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 22: Falschfarbbild Eigi Wettingen.....	32
Eigene Abbildung (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 23: Kameraaufnahme Naturpark Gantrisch: Zimmerwald um 01:05 Uhr	32
Eigene Abbildung	
Abbildung 24: Kameraaufnahme Eigi Wettingen um 23:28 Uhr	32
Eigene Abbildung	
Abbildung 25: Kameraaufnahme Naturpark Gantrisch: Niederblacken um 00:39 Uhr	32
Eigene Abbildung	
Abbildung 26: Falschfarbbild Naturpark Gantrisch: Gurnigel (fremde Aufnahme)	33
Abbildung des Naturparks Gantrisch (ausgewertet von Peter Schlatter)	

Abbildung 27: Entwicklung der Lichtverschmutzung in der Schweiz von 2012 bis 2020	35
Dark Sky Switzerland (2012, 2020). <i>Nachkarten</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 10:54 Uhr von http://www.darksky.ch/dss/de/aktivitaeten/nachkarten/	
Abbildung 28: Trend der Lichtemissionen in der Schweiz von 2014-2018	35
Dark Sky Switzerland (2018). <i>Nachkarten</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 10:54 Uhr von http://www.darksky.ch/dss/de/aktivitaeten/nachkarten/	
Abbildung 29: SQM-L Road Runner im Grossraum Zürich.....	38
Screenshot der gesammelten Daten, dargestellt in Google Maps (My Maps)	
Abbildung 30: Falschfarbbild vom Eigi Wettingen.....	39
Eigene Abbildung (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 31: Aufnahme im Eigi in einer Vollmondnacht um 23:28 Uhr.....	39
Eigene Abbildung	
Abbildung 32: Formel der Fehlerrechnung bei einer Multiplikation oder Division	40
Anklin, H. (2021). <i>Fehlerrechnung</i> . Wettingen: o.A.	
Abbildung 33: Formel der Fehlerrechnung bei einer Addition oder Subtraktion	40
Anklin, H. (2021). <i>Fehlerrechnung</i> . Wettingen: o.A.	
Abbildung 34: Lichtglocke von Zürich um 00:21 Uhr	41
Eigene Abbildung	
Abbildung 35: Lichtglocke des Flughafen Zürich um 23:33 Uhr	41
Eigene Abbildung	
Abbildung 36: Vergleich Flughafen Zürich und ETH Zürich.....	42
Eigene Abbildung	
Abbildung 37: Dorfrand von Kirchdorf BE um 02:08 Uhr	42
Eigene Abbildung	
Abbildung 38: Observatorium Zimmerwald während einer Lasermessung um 01:05 Uhr	45
Eigene Abbildung	
Abbildung 39: Observatorium Zimmerwald während einer Lasermessung um 01:05 Uhr	45
Eigene Abbildung	
Abbildung 40: Falschfarbbilder von Niederblacken, Zimmerwald und Gurnigel.....	46
Eigene Abbildungen (ausgewertet von Peter Schlatter)	

Abbildung 41: Grafik der Lichtstreuung einer Strassenlaterne	50
Canal, M. & D. Champine, R. (2019). <i>Our nights are getting brighter, and Earth is paying the price</i> . Abgerufen am 07.11.2021 um 10:57 Uhr von https://www.nationalgeographic.com/science/article/nights-are-getting-brighter-earth-paying-the-price-light-pollution-dark-skies	
Abbildung 42: Modelle von verschiedenen Strassenlaternen	51
Kaltenegger, F. (2018). <i>Diplomarbeit</i> . Graz: Karl-Franzens-Universität. Abgerufen am 07.11.2021 um 11:02 Uhr von https://docplayer.org/108299127-Wie-kann-man-lichtverschmutzung-messen-diplomarbeit.html	
Abbildung 43: Bild der Kehrichtsverbrennungsanlage an der Josefswiese um 02:38 Uhr	52
Eigene Abbildung	
Abbildung 44: Kameraaufnahmen: Wettingen, Eigi, Ehrendingen, Rohrdorf, Flughafen ZH, ETH Hönggerberg ZH, Irchel ZH, ETH Zürich ZH, Chinagarten ZH, Josefswiese ZH, Rosengarten BE, Gurten Turm BE	83
Eigene Abbildung	
Abbildung 45: Falschfarbbilder: Wettingen, Eigi, Ehrendingen, Rohrdorf, Flughafen ZH, ETH Hönggerberg ZH.....	84
Eigene Abbildungen (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 46: Kameraaufnahmen: Gurten BE, Grosse Schanze BE, Bundesplatz BE, Niederblacken, Zimmerwald, Kirchberg BE	84
Eigene Abbildung	
Abbildung 47: Falschfarbbilder: ETH Zürich, Chinagarten ZH, Josefswiese ZH, Rosengarten BE, Gurten Turm BE, Gurten BE, Grosse Schanze BE, Bundesplatz BE, Niederblacken, Zimmerwald, Kirchberg BE	85
Eigene Abbildungen (ausgewertet von Peter Schlatter)	
Abbildung 48: Falschfarbbild: Gurnigel	86
Eigene Abbildungen (ausgewertet von Peter Schlatter)	

7.5 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum im Raum Zürich.....	22
Eigenes Diagramm	
Diagramm 2: Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum im Raum Bern	24
Eigenes Diagramm	
Diagramm 3: Vergleich der Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum.....	24
Eigenes Diagramm	
Diagramm 4: Lichtverschmutzung im Grossraum Zürich und Bern, gemessen mit der Kamera (in mag/arcsec ²).....	25
Eigenes Diagramm	
Diagramm 5: Lichtverschmutzung in verschiedenen Tälern und dazwischenliegenden Hügelzügen mit einem SQM-L gemessen	27
Eigenes Diagramm	
Diagramm 6: Vergleich der Lichtverschmutzung von SQM-L und des DSM Mittelwerten.....	28
Eigenes Diagramm	
Diagramm 7: Lichtverschmutzung im Talvergleich, gemessen mit Kamera gemessen in mag/arcsec ²	28
Eigenes Diagramm	
Diagramm 8: Gleichbleibende Lichtverschmutzung im Naturpark Gantrisch	31
Eigenes Diagramm	
Diagramm 9: Zunahme der Lichtverschmutzung im Naturpark Gantrisch	31
Eigenes Diagramm	
Diagramm 10: Abnahme der Lichtverschmutzung im Naturpark Gantrisch.....	31
Eigenes Diagramm	
Diagramm 11: Verhältnis zwischen SQM-L und DSM Messwerten für verschiedene Messungen	38
Eigenes Diagramm	
Diagramm 12: Verhältnis zwischen Kamera und SQM-L Messdaten.....	39
Eigenes Diagramm	

7.6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grosstadtvergleich von Zürich und Bern	18
Eigene Tabelle	
Tabelle 2: Talvergleich von Rohrdorf, Wettingen und Ehrendingen	18
Eigene Tabelle	
Tabelle 3: Vergleich Naturpark Gantrisch und Eigi Wettingen	19
Eigene Tabelle	
Tabelle 4: Zusätzliche Messungen in Grossstädten	19
Eigene Tabelle	
Tabelle 5: Lichtverschmutzung Grossraum Zürich mit einem SQM-L gemessen (in mag/arcsec ²)	21
Eigene Tabelle	
Tabelle 6: Lichtverschmutzung Grossraum Bern mit einem SQM-L gemessen (in mag/arcsec ²)	23
Eigene Tabelle	
Tabelle 7: Grosstadtvergleich der Änderung der Lichtverschmutzung mit zunehmender Entfernung von Stadtzentrum (in mag/arcsec ²)	24
Eigene Tabelle	
Tabelle 8: Lichtverschmutzung in verschiedenen Tälern mit einem SQM-L gemessen (in mag/arcsec ²)	27
Eigene Tabelle	
Tabelle 9: Lichtverschmutzung verschiedener Täler mit der DSM-App gemessen (in mag/arcsec ²)	27
Eigene Tabelle	
Tabelle 10: Messwerte des Naturparks Gantrisch und dem Eigi Wettingen ohne Mondvisibilität, eigene Messungen(in mag/arcsec ²)	30
Eigene Tabelle	
Tabelle 11: Messwerte des Naturparks Gantrisch, Messmethode Kamera (in mag/arcsec ²) .	30
Eigene Tabelle	
Tabelle 12: zusätzliche Messungen in Grossstädten mit dem SQM-L 8 in mag/arcsec ²)	34
Eigene Tabelle	
Tabelle 13: Messwerte mit dem Lego Mindstorms EV3 Brick Messmethode	37
Eigene Tabelle	

Tabelle 14: Vergleich zwischen SQM-L und DSM Messmethode	37
Eigene Tabelle	
Tabelle 15: Messwerte SQM-L Wettingen (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)	68
Eigene Tabelle	
Tabelle 16: Messwerte DSM Wettingen (Neumond)	68
Eigene Tabelle	
Tabelle 17: Messwerte DSM Wettingen (Vollmond)	68
Eigene Tabelle	
Tabelle 18: Messwerte SQM-L Flughafen (erste Zahl weiter entfernt, zweite Zahl näher)	69
Eigene Tabelle	
Tabelle 19: Messwerte DSM Flughafen (erste Zahl weiter entfernt, zweite Zahl näher)	69
Eigene Tabelle	
Tabelle 20: Messwerte SQM-L ETH Höggerberg	69
Eigene Tabelle	
Tabelle 21: Messwerte DSM ETH Höggerberg	70
Eigene Tabelle	
Tabelle 22: Messwerte SQM-L Uni Irchel	70
Eigene Tabelle	
Tabelle 23: Messwerte DSM Uni Irchel	70
Eigene Tabelle	
Tabelle 24: Messwerte SQM-L ETH Zürich	71
Eigene Tabelle	
Tabelle 25: Messwerte DSM ETH Zürich	71
Eigene Tabelle	
Tabelle 26: Messwerte SQM-L in der Stadt Zürich	71
Eigene Tabelle	
Tabelle 27: Messwerte DSM in der Stadt Zürich	71
Eigene Tabelle	
Tabelle 28: Messwerte SQM-L Kirchberg BE	72
Eigene Tabelle	
Tabelle 29: Messwerte SQM-L Gurten	72
Eigene Tabelle	

Tabelle 30: Messwerte DSM Gurten.....	73
Eigene Tabelle	
Tabelle 31: Messwerte SQM-L Rosengarten	73
Eigene Tabelle	
Tabelle 32: Messwerte DSM Rosengarten	73
Eigene Tabelle	
Tabelle 33: Messwerte SQM-L Stadt Bern.....	74
Eigene Tabelle	
Tabelle 34: Messwerte DSM Stadt Bern	74
Eigene Tabelle	
Tabelle 35: Messwerte SQM-L Rohrdorf (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond).....	75
Eigene Tabelle	
Tabelle 36: Messwerte DSM Rohrdorf (Neumond)	75
Eigene Tabelle	
Tabelle 37: Messwerte DSM Rohrdorf (Vollmond).....	75
Eigene Tabelle	
Tabelle 38: Messwerte SQM-L Heitersberg (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)	76
Eigene Tabelle	
Tabelle 39: Messwerte DSM Heitersberg (Neumond).....	76
Eigene Tabelle	
Tabelle 40: Messwerte DSM Heitersberg (Vollmond)	76
Eigene Tabelle	
Tabelle 41: Messwerte SQM-L Ehrendingen (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)...	76
Eigene Tabelle	
Tabelle 42: Messwerte DSM Ehrendingen (Neumond)	77
Eigene Tabelle	
Tabelle 43: Messwerte DSM Ehrendingen (Vollmond).....	77
Eigene Tabelle	
Tabelle 44: Messwerte SQM-L Lägern (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)	77
Eigene Tabelle	
Tabelle 45: Messwerte DSM Lägern (Neumond).....	77
Eigene Tabelle	

Tabelle 46: Messwerte DSM Lägern (Vollmond)	78
Eigene Tabelle	
Tabelle 47: Messwerte SQM-L Wettingen (Erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)	78
Eigene Tabelle	
Tabelle 48: Messwerte DSM Wettingen	78
Eigene Tabelle	
Tabelle 49: Messwerte DSM Wettingen (Vollmond)	78
Eigene Tabelle	
Tabelle 50: Messwerte SQM-L Naturpark Gantrisch	79
Eigene Tabelle	
Tabelle 51: Messwerte DSM Naturpark Gantrisch	79
Eigene Tabelle	
Tabelle 52: Messwerte SQM-L Eigi Wettingen	79
Eigene Tabelle	
Tabelle 53: Messwerte DSM Eigi Wettingen	80
Eigene Tabelle	
Tabelle 54: Messwerte mit dem SQM-L in Genf	81
Eigene Tabelle	
Tabelle 55: Messwerte mit dem SQM-L in Mailand	81
Eigene Tabelle	
Tabelle 56: Messwerte mit dem SQM-L in Venedig	82
Eigene Tabelle	
Tabelle 57: Messwerte mit dem DSM in Venedig	82
Eigene Tabelle	

Anhang

Detaillierte Messdaten

Alle Messwerte haben die Einheit mag/arcsec².

Grossstadtvergleich

Zürich: Wettingen

Datum: 07.09.2021/17.09.2021

Zeit: 21:45/23:03

Koordinaten: 47° 27' 49"N / 008° 19' 35"E

Kamera: 2214, 2218

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt kleine Wolken Mond: Neumond/Vollmond

Himmel Dorf	Aussicht Dorf	Himmel Rathauswiese	Himmel Rathausplatz	Messgerät
19.78 / 18.30	18.15 / 14.99	19.15 / 18.60	18.08 / 18.28	SQM-L
19.77 / 18.25	17.82 / 14.95	19.12 / 18.64	18.05 / 18.32	SQM-L
19.78 / 18.40	17.50 / 15.27	19.12 / 18.64	18.02 / 18.32	SQM-L
19.76 / 18.33	17.19 / 15.39	19.10 / 18.62	17.93 / 18.32	SQM-L
19.77 / 18.31	17.48 / 15.23	19.13 / 18.64	17.98 / 18.30	SQM-L
19.76 / 18.35	17.32 / 15.02	19.10 / 18.67	17.98 / 18.30	SQM-L
19.77 / 18.29	17.31 / 15.08	19.10 / 18.67	18.30 / 18.29	SQM-L
19.78 / 18.34	17.08 / 15.04	19.10 / 18.63	18.34 / 18.29	SQM-L
19.75 / 18.29	17.22 / 15.08	19.11 / 18.61	18.35 / 18.28	SQM-L
19.76 / 18.18	17.38 / 15.03	19.14 / 18.61	18.63 / 18.29	SQM-L
19.76 / 18.304	17.45 / 15.108	19.12 / 18.633	18.17 / 18.299	SQM-L

Tabelle 15: Messwerte SQM-L Wettingen (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)

Himmel Dorf	Aussicht Dorf	Himmel Rathauswiese	Himmel Rathausplatz	Messgerät
20.66	19.82	20.30	19.71	DSM
20.36	19.75	20.40	20.04	DSM
20.61	19.98	20.43	19.72	DSM
20.44	19.90	20.43	19.85	DSM
20.36	19.83	20.39	19.73	DSM
20.486	19.856	20.39	19.81	DSM

Tabelle 16: Messwerte DSM Wettingen (Neumond)

Himmel Dorf	Aussicht Dorf	Himmel Rathauswiese	Himmel Rathausplatz	Messgerät
19.46	18.16	19.91	19.79	DSM
19.29	18.19	19.58	19.79	DSM
19.24	18.14	19.95	19.71	DSM
19.27	18.1	19.8	19.51	DSM
19.37	17.97	19.91	19.67	DSM
19.326	18.112	19.83	19.694	DSM

Tabelle 17: Messwerte DSM Wettingen (Vollmond)

Zürich: Flughafen

Datum: 24.09.2021

Zeit: 23:33

Koordinaten: 47°29.129 'N / 008°31.730 'E

Kamera: 2227, 2229

Wetter: klarer Himmel

Mond: 76%, 24.5° aufgegangen

Himmel	Aussicht	Messgerät
19.03 / 18.68	17.10 / 13.61	SQM-L
19.15 / 18.68	16.69 / 13.29	SQM-L
19.13 / 18.66	16.63 / 13.26	SQM-L
19.10 / 18.64	16.64 / 13.22	SQM-L
19.00 / 18.65	16.53 / 13.27	SQM-L
19.10 / 18.68	16.54 / 13.34	SQM-L
19.12 / 18.65	16.51 / 13.32	SQM-L
19.10 / 18.64	16.51 / 13.31	SQM-L
19.06 / 18.68	16.47 / 13.32	SQM-L
19.10 / 18.67	16.53 / 13.34	SQM-L
19.089/18.663	16.595/13.328	SQM-L

Tabelle 18: Messwerte SQM-L Flughafen (erste Zahl weiter entfernt, zweite Zahl näher)

Himmel	Aussicht	Messgerät
20.15 / 19.16	18.56 / 18.13	DSM
20.08 / 19.26	18.72 / 17.90	DSM
20.08 / 19.13	18.64 / 17.99	DSM
19.99 / 19.16	18.61 / 18.08	DSM
20.00 / 19.31	18.68 / 18.06	DSM
20.05 / 19.204	18.638 / 18.032	DSM

Tabelle 19: Messwerte DSM Flughafen (erste Zahl weiter entfernt, zweite Zahl näher)

Zürich: ETH Hönggerberg

Datum: 24.09.2021

Zeit: 00:21

Koordinaten: 47°24.114 'N / 008°30.615 'E

Kamera: 2231, 2232

Wetter: klarer Himmel

Mond: 76%, 32.4° aufgegangen

Himmel	Aussicht	Messgerät
18.69	17.35	SQM-L
18.68	17.08	SQM-L
18.68	17.08	SQM-L
18.65	17.07	SQM-L
18.67	16.95	SQM-L
18.64	16.93	SQM-L
18.64	16.95	SQM-L
18.66	16.95	SQM-L
18.63	16.93	SQM-L
18.63	17.05	SQM-L
18.657	17.034	SQM-L

Tabelle 20: Messwerte SQM-L ETH Hönggerberg

Himmel	Aussicht	Messgerät
20.02	18.30	DSM
19.75	18.11	DSM
19.80	18.39	DSM
19.71	18.52	DSM
19.87	18.36	DSM
19.83	18.336	DSM

Tabelle 21: Messwerte DSM ETH Höggerberg

Zürich: Uni Irchel

Datum: 24.09.2021

Zeit: 00:52

Koordinaten: 47°23.598 'N / 008°32.977 'E

Kamera: 2233, 2234

Wetter: klarer Himmel

Mond: 76%, 37.0° aufgegangen

Himmel	Aussicht	Messgerät
18.40	17.15	SQM-L
18.40	17.16	SQM-L
18.40	17.27	SQM-L
18.43	17.25	SQM-L
18.40	17.38	SQM-L
18.41	17.28	SQM-L
18.39	17.25	SQM-L
18.40	17.41	SQM-L
18.39	17.22	SQM-L
18.40	17.31	SQM-L
18.402	17.268	SQM-L

Tabelle 22: Messwerte SQM-L Uni Irchel

Himmel	Aussicht	Messgerät
19.62	18.47	DSM
19.68	18.42	DSM
19.71	18.40	DSM
19.55	18.46	DSM
19.64	18.46	DSM
19.64	18.442	DSM

Tabelle 23: Messwerte DSM Uni Irchel

Zürich: ETH Zürich

Datum: 24.09.2021

Zeit: 01:15

Koordinaten: 47°22.550 'N / 008°32.791 'E

Kamera: 2235, 2236

Wetter: klarer Himmel

Mond: 76%, 40.6° aufgegangen

Himmel	Aussicht	Messgerät
17.64	17.20	SQM-L
17.97	17.19	SQM-L
17.88	17.11	SQM-L
17.92	16.85	SQM-L
17.98	17.00	SQM-L
17.99	17.00	SQM-L
17.92	17.07	SQM-L

18.00	17.08	SQM-L
17.96	17.06	SQM-L
17.98	17.23	SQM-L
17.924	17.079	SQM-L

Tabelle 24: Messwerte SQM-L ETH Zürich

Himmel	Aussicht	Messgerät
19.27	18.36	DSM
19.23	18.66	DSM
19.26	18.58	DSM
19.34	18.70	DSM
19.28	18.68	DSM
19.276	18.596	DSM

Tabelle 25: Messwerte DSM ETH Zürich

Zürich: Stadt

Datum: 18.09.2021

Wetter: klarer Himmel

Mond: 76%, 46.7°, 52.2°

Chinagarten	Josefswiese	Messgerät
Zeit: 01:54	Zeit: 02:38	
Kamera: 2237, 2238	Kamera: 2239, 2240	
Koordinaten: 47° 21' 18"N / 008° 33' 05"E	Koordinaten: 47° 23' 09"N / 008° 31' 26"E	
16.79	18.01	SQM-L
16.59	17.98	SQM-L
16.69	17.93	SQM-L
16.65	17.92	SQM-L
16.73	17.99	SQM-L
16.75	17.96	SQM-L
16.77	17.96	SQM-L
16.81	17.98	SQM-L
16.78	17.94	SQM-L
16.69	17.96	SQM-L
16.725	17.963	SQM-L

Tabelle 26: Messwerte SQM-L in der Stadt Zürich

Chinagarten	Josefswiese	Messgerät
19.67	19.24	DSM
19.77	19.28	DSM
19.74	19.31	DSM
19.93	19.28	DSM
19.70	19.38	DSM
19.762	19.298	DSM

Tabelle 27: Messwerte DSM in der Stadt Zürich

Bern: Kirchberg

Datum: 12.10.2021

Zeit: 02:08

Koordinaten: 47°04.854 'N / 007°34.693 'E

Kamera: 2259, 2260

Wetter: klarer Himmel, ein wenig Hochnebel

Mond: 24%, untergegangen

Himmel Dorf	Himmel Dorfrand	Aussicht Dorf	Messgerät
19.86	19.37	16.63	SQM-L
19.86	19.28	16.81	SQM-L
19.86	19.22	16.73	SQM-L
19.86	19.36	16.69	SQM-L
19.85	19.35	14.93 (Lampe)	SQM-L
19.85	19.33	14.85	SQM-L
19.85	19.39	15.85	SQM-L
19.84	19.45	16.35	SQM-L
19.85	19.43	16.59	SQM-L
19.85	19.36	16.56	SQM-L
19.853	19.354	16.34	SQM-L

Tabelle 28: Messwerte SQM-L Kirchberg

Himmel Dorf	Himmel Dorfrand	Aussicht Dorfrand	Messgerät
21.08	20.59	20.34	DSM
21.07	20.66	20.28	DSM
21.03	20.69	20.14	DSM
21.08	20.86	20.52	DSM
21.85	20.72	20.12	DSM
21.222	20.704	20.28	DSM

Bern: Gurten

Datum: 11.10.2021

Zeit: 22:36

Koordinaten: 47°55.179 'N / 007°26.220 'E

Kamera: 2245, 2246

Wetter: klarer Himmel, ein wenig Hochnebel

Mond: 24%, untergegangen

Himmel	Aussicht	Messgerät
18.84	17.15	SQM-L
18.31	17.35	SQM-L
18.47	17.38	SQM-L
18.84	17.47	SQM-L
18.74	17.55	SQM-L
18.77	17.54	SQM-L
18.77	17.50	SQM-L
18.76	17.49	SQM-L
18.67	17.52	SQM-L
18.75	17.50	SQM-L
18.692	17.445	SQM-L

Tabelle 29: Messwerte SQM-L Gurten

Himmel	Aussicht	Messgerät
19.60	19.69	DSM
19.63	19.79	DSM
19.65	19.50	DSM
19.73	19.51	DSM
19.74	19.48	DSM
19.67	19.594	DSM

Tabelle 30: Messwerte DSM Gurten

Bern: Rosengarten

Datum: 11.10.2021

Zeit: 21:35

Koordinaten: 47°57.087 'N / 007°27.595 'E

Kamera: 2241, 2242

Wetter: klarer Himmel, ein wenig Hochnebel

Mond: 24%, am Untergehen

Himmel	Aussicht	Messgerät
18.73	16.52	SQM-L
18.70	16.75	SQM-L
18.69	16.92	SQM-L
18.69	16.72	SQM-L
18.66	16.58	SQM-L
18.65	16.90	SQM-L
18.66	16.85	SQM-L
18.69	16.70	SQM-L
18.69	16.75	SQM-L
18.68	16.59	SQM-L
18.684	16.728	SQM-L

Tabelle 31: Messwerte SQM-L Rosengarten

Himmel	Aussicht	Messgerät
19.66	19.29	DSM
19.74	19.01	DSM
19.78	18.97	DSM
19.92	19.25	DSM
19.72	19.02	DSM
19.764	19.108	DSM

Tabelle 32: Messwerte DSM Rosengarten

Bern: Stadt

Datum: 11.10.2021

Wetter: klarer Himmel, ein wenig Hochnebel

Mond: 24%, untergegangen

Grosse Schanze	Bundesplatz	Messgerät
Zeit: 23:27	Zeit: 23:53	
Kamera: 2247, 2248	Kamera: 2250, 2251, 2252	
Koordinaten: 46°56.994 'N / 007°26.327 'E	Koordinaten: 46°56.825 'N / 007°26.644 'E	
18.95	17.79	SQM-L
18.96	17.51	SQM-L
18.96	17.47	SQM-L
18.95	17.41	SQM-L
18.96	17.56	SQM-L

18.96	17.63	SQM-L
18.95	17.78	SQM-L
18.96	17.72	SQM-L
18.96	17.73	SQM-L
18.94	17.73	SQM-L
18.955	17.633	SQM-L

Tabelle 33: Messwerte SQM-L Stadt Bern

Grosse Schanze	Bundesplatz	Messgerät
20.05	19.97	DSM
20.21	19.72	DSM
20.04	19.76	DSM
20.06	19.75	DSM
20.04	19.71	DSM
20.08	19.782	DSM

Tabelle 34: Messwerte DSM Stadt Bern

Talvergleich

Rohrdorf

Datum: 07.09.2021/18.09.2021

Zeit: 23:48/01:15

Koordinaten: 47° 25' 40"N / 008° 19' 14"E

Kamera: 2225, 2226

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt kleine Wolken Mond: Neumond/Vollmond

Himmel Dorfrand	Aussicht Dorfrand	Himmel Dorf	Messgerät
20.02 / 19.42	18.81 / 17.51	18.70 / 18.97	SQM-L
19.99 / 19.34	18.81 / 17.39	18.62 / 18.93	SQM-L
19.99 / 19.40	18.92 / 17.41	18.61 / 18.95	SQM-L
19.99 / 19.40	18.73 / 17.43	18.69 / 18.99	SQM-L
19.99 / 19.38	18.75 / 17.39	18.56 / 18.97	SQM-L
19.99 / 19.39	18.79 / 17.38	18.43 / 18.91	SQM-L
19.99 / 19.38	18.75 / 17.39	18.45 / 18.94	SQM-L
19.99 / 19.38	18.73 / 17.38	18.51 / 18.94	SQM-L
19.97 / 19.37	18.71 / 17.37	18.50 / 18.96	SQM-L
19.98 / 19.34	18.70 / 17.39	18.48 / 18.95	SQM-L
19.99 / 19.38	17.87 / 17.40	18.56 / 18.95	SQM-L

Tabelle 35: Messwerte SQM-L Rohrdorf (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)

Himmel Dorfrand	Aussicht Dorfrand	Himmel Dorf	Messgerät
20.99	20.17	20.69	DSM
20.22	20.14	20.54	DSM
20.90	20.38	20.48	DSM
21.13	20.14	20.79	DSM
20.82	20.39	20.73	DSM
20.812	20.244	20.646	DSM

Tabelle 36: Messwerte DSM Rohrdorf (Neumond)

Himmel Dorfrand	Aussicht Dorfrand	Himmel Dorf	Messgerät
19.68	18.26	20.47	DSM
19.88	18.06	20.28	DSM
19.73	18.00	20.31	DSM
19.70	18.06	20.20	DSM
19.82	18.13	20.24	DSM
19.762	18.102	20.30	DSM

Tabelle 37: Messwerte DSM Rohrdorf (Vollmond)

Heitersberg

Datum: 07.09.2021/18.09.2021

Zeit: 23:33/01:00

Koordinaten: 47° 26' 25"N / 008° 18' 59"E

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt kleine Wolken Mond: Neumond/Vollmond

Himmel	Tal	Messgerät
19.97 / 19.30	18.58 / 18.08	SQM-L
19.94 / 19.29	18.57 / 17.87	SQM-L
19.94 / 19.25	18.61 / 17.86	SQM-L
19.94 / 19.23	18.67 / 17.86	SQM-L
19.94 / 19.31	18.66 / 17.84	SQM-L
19.94 / 19.33	18.71 / 17.82	SQM-L

19.94 / 19.30	18.69 / 17.81	SQM-L
19.93 / 19.33	18.66 / 17.83	SQM-L
19.93 / 19.30	18.73 / 17.85	SQM-L
19.94 / 19.33	18.72 / 17.81	SQM-L
19.94 / 19.30	18.66 / 17.86	SQM-L

Tabelle 38: Messwerte SQM-L Heitersberg (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)

Himmel	Tal	Messgerät
20.56	19.96	DSM
20.92	20.06	DSM
20.85	20.16	DSM
20.80	20.06	DSM
20.76	20.08	DSM
20.778	20.064	DSM

Tabelle 39: Messwerte DSM Heitersberg (Neumond)

Himmel	Tal	Messgerät
20.03	19.29	DSM
20.11	19.18	DSM
20.03	19.21	DSM
20.12	19.28	DSM
20.16	19.29	DSM
20.09	19.25	DSM

Tabelle 40: Messwerte DSM Heitersberg (Vollmond)

Ehrendingen

Datum: 07.09.2021/18.09.2021

Zeit: 23:00/00:30

Koordinaten: 47° 29' 23"N / 008° 20' 26"E

Kamera: 2223, 2224

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt kleine Wolken

Mond: Neumond/Vollmond

Himmel Dorfrand	Aussicht Dorfrand	Himmel Dorf	Messgerät
19.92 / 18.93	19.49 / 18.56	18.45 / 17.94	SQM-L
19.92 / 18.83	19.44 / 18.17	18.40 / 17.87	SQM-L
19.89 / 18.89	19.42 / 18.16	18.56 / 17.83	SQM-L
19.86 / 18.90	19.39 / 18.17	19.59 / 17.83	SQM-L
19.87 / 18.89	19.41 / 17.93	19.55 / 17.82	SQM-L
19.87 / 18.88	19.38 / 18.20	19.59 / 17.88	SQM-L
19.87 / 18.90	19.37 / 18.18	19.08 / 17.86	SQM-L
19.85 / 18.87	19.34 / 18.21	19.00 / 17.85	SQM-L
19.86 / 18.94	19.38 / 18.23	18.97 / 17.87	SQM-L
19.86 / 18.95	19.35 / 18.22	18.91 / 17.81	SQM-L
19.87 / 18.898	19.40 / 18.203	19.01 / 17.856	SQM-L

Tabelle 41: Messwerte SQM-L Ehrendingen (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)

Himmel Dorfrand	Aussicht Dorfrand	Himmel Dorf	Messgerät
20.88	20.51	19.36	DSM
21.47	20.49	19.32	DSM
20.95	20.40	19.39	DSM
21.50	20.57	19.40	DSM
21.36	20.65	19.30	DSM
21.232	20.524	19.345	DSM

Tabelle 42: Messwerte DSM Ehrendingen (Neumond)

Himmel Dorfrand	Aussicht Dorfrand	Himmel Dorf	Messgerät
20.05	19.53	19.18	DSM
20.16	19.37	19.13	DSM
20.11	19.47	19.4	DSM
20.18	19.51	19.29	DSM
20.25	19.48	18.85	DSM
20.15	19.472	19.17	DSM

Tabelle 43: Messwerte DSM Ehrendingen (Vollmond)

Lägern

Datum: 07.09.2021/18.09.2021

Zeit: 22:32/00:01

Koordinaten: 47° 28' 28'' N / 008° 18' 52'' E

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt kleine Wolken Mond: Neumond/Vollmond

Himmel	Tal	Messgerät
19.37 / 19.02	16.77 / 16.88	SQM-L
19.36 / 19.01	16.91 / 16.79	SQM-L
19.35 / 19.03	17.05 / 16.82	SQM-L
19.36 / 18.99	17.23 / 17.06	SQM-L
19.35 / 19.03	17.35 / 17.14	SQM-L
19.35 / 18.99	17.60 / 17.06	SQM-L
19.35 / 19.00	17.65 / 17.06	SQM-L
19.36 / 18.97	17.58 / 17.12	SQM-L
19.35 / 18.99	17.58 / 17.17	SQM-L
19.34 / 19.00	17.50 / 17.18	SQM-L
19.35 / 19.003	17.32 / 17.028	SQM-L

Tabelle 44: Messwerte SQM-L Lägern (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)

Himmel	Tal	Messgerät
21.74	19.35	DSM
20.36	19.40	DSM
20.27	19.45	DSM
20.31	19.16	DSM
20.25	19.52	DSM
20.586	19.376	DSM

Tabelle 45: Messwerte DSM Lägern (Neumond)

Himmel	Tal	Messgerät
19.75	18.53	DSM
19.35	18.7	DSM
19.53	18.56	DSM

19.68	18.53	DSM
19.74	18.52	DSM
19.61	18.568	DSM

Tabelle 46: Messwerte DSM Lägern (Vollmond)

Wettingen

Datum: 07.09.2021/17.09.2021

Zeit: 21:45/23:03

Koordinaten: 47° 27' 49"N / 008° 19' 35"E

Kamera: 2214, 2218

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt kleine Wolken

Mond: Neumond/Vollmond

Himmel Dorfand	Aussicht Dorfand	Himmel Rathauswiese	Himmel Rathausplatz	Messgerät
19.78 / 18.30	18.15 / 14.99	19.15 / 18.60	18.08 / 18.28	SQM-L
19.77 / 18.25	17.82 / 14.95	19.12 / 18.64	18.05 / 18.32	SQM-L
19.78 / 18.40	17.50 / 15.27	19.12 / 18.64	18.02 / 18.32	SQM-L
19.76 / 18.33	17.19 / 15.39	19.10 / 18.62	17.93 / 18.32	SQM-L
19.77 / 18.31	17.48 / 15.23	19.13 / 18.64	17.98 / 18.30	SQM-L
19.76 / 18.35	17.32 / 15.02	19.10 / 18.67	17.98 / 18.30	SQM-L
19.77 / 18.29	17.31 / 15.08	19.10 / 18.67	18.30 / 18.29	SQM-L
19.78 / 18.34	17.08 / 15.04	19.10 / 18.63	18.34 / 18.29	SQM-L
19.75 / 18.29	17.22 / 15.08	19.11 / 18.61	18.35 / 18.28	SQM-L
19.76 / 18.18	17.38 / 15.03	19.14 / 18.61	18.63 / 18.29	SQM-L
19.76 / 18.304	17.45 / 15.108	19.12 / 18.633	18.17 / 18.299	SQM-L

Tabelle 47: Messwerte SQM-L Wettingen (erste Zahl Neumond, zweite Zahl Vollmond)

Himmel Dorfand	Aussicht Dorfand	Himmel Rathauswiese	Himmel Rathausplatz	Messgerät
20.66	19.82	20.30	19.71	DSM
20.36	19.75	20.40	20.04	DSM
20.61	19.98	20.43	19.72	DSM
20.44	19.90	20.43	19.85	DSM
20.36	19.83	20.39	19.73	DSM
20.486	19.856	20.39	19.81	DSM

Tabelle 48: Messwerte DSM Wettingen

Himmel Dorfand	Aussicht Dorfand	Himmel Rathauswiese	Himmel Rathausplatz	Messgerät
19.46	18.16	19.91	19.79	DSM
19.29	18.19	19.58	19.79	DSM
19.24	18.14	19.95	19.71	DSM
19.27	18.10	19.8	19.51	DSM
19.37	17.97	19.91	19.67	DSM
19.326	18.112	19.83	19.694	DSM

Tabelle 49: Messwerte DSM Wettingen (Vollmond)

Parkvergleich

Naturpark Gantrisch BE

Datum: 12.10.2021

Wetter: klarer Himmel, ein wenig Hochnebel Mond: 24%, untergegangen

Niederblacken	Wald	Messgerät
Zeit: 00:39	Zeit: 01:05	
Kamera: 2253, 2254	Kamera: 2255, 2256	
Koordinaten: 46°51.648 'N / 007°26.868 'E	Koordinaten: 46°52.560 'N / 007°27.901 'E	
21.02	20.79	SQM-L
20.97	20.75	SQM-L
20.91	20.74	SQM-L
20.90	20.74	SQM-L
20.88	20.73	SQM-L
20.89	20.73	SQM-L
20.89	20.72	SQM-L
20.88	20.73	SQM-L
20.88	20.72	SQM-L
20.88	20.72	SQM-L
20.91	20.737	SQM-L

Tabelle 50: Messwerte SQM-L Naturpark Gantrisch

Niederblacken	Wald	Messgerät
To dark for device	21.16	DSM
21.12	21.77	DSM
21.08	21.09	DSM
21.76	21.27	DSM
21.01	21.41	DSM
21.2425	21.34	DSM

Tabelle 51: Messwerte DSM Naturpark Gantrisch

Eigi Wettingen

Datum: 07.09.2021/18.09.2021

Zeit: 22:04/23:28

Koordinaten: 47° 28' 16"N / 008° 20' 44"E

Kamera: 2221, 2220

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt kleine Wolken Mond: Neumond/Vollmond

Neumond	Vollmond	Messgerät
19.59	18.89	SQM-L
19.59	18.86	SQM-L
19.59	18.81	SQM-L
19.58	18.85	SQM-L
19.58	18.86	SQM-L
19.60	18.88	SQM-L
19.57	18.85	SQM-L
19.60	18.89	SQM-L
19.57	18.89	SQM-L
19.61	18.91	SQM-L
19.588	18.869	SQM-L

Tabelle 52: Messwerte SQM-L Eigi Wettingen

Neumond	Vollmond	Messgerät
20.87	20.02	DSM
20.67	20.08	DSM
20.92	20.17	DSM
20.83	20.23	DSM
20.80	20.15	DSM
20.818	20.13	DSM

Tabelle 53: Messwerte DSM Eigi Wettingen

Zusätzliche Messungen von Grossstädten

Genf

Datum: 29.09.2021

Zeit: 20.03

Koordinaten: 46.2058592, 6.1470349

Kamera: -

Wetter: klarer Himmel, vereinzelt Wolken

Mond: 30%

Himmel	Aussicht	Messgerät
14.84	13.69	SQM-L
14.85	14.53	SQM-L
14.87	13.78	SQM-L
14.89	12.42	SQM-L
14.87	12.19	SQM-L
14.85	12.62	SQM-L
14.89	14.66	SQM-L
14.84	14.74	SQM-L
14.89	14.81	SQM-L
14.87	12.32	SQM-L
	12.35	SQM-L
	12.42	SQM-L
14.866	13.3775	SQM-L

Tabelle 54: Messwerte mit dem SQM-L in Genf

Mailand

Datum: 09.10.2021

Zeit: 02:26

Koordinaten: 45.459864959, 9.1805357270

Kamera: -

Wetter: klarer Himmel

Mond: 20%

Regina	Messgerät
15.23	SQM-L
15.12	SQM-L
15.09	SQM-L
15.24	SQM-L
15.23	SQM-L
15.00	SQM-L
14.96	SQM-L
14.88	SQM-L
14.99	SQM-L
14.95	SQM-L
15.069	SQM-L

Tabelle 55: Messwerte mit dem SQM-L in Mailand

Venedig

Datum: 05.10.2021

Zeit: 21:09-21:50

Koordinaten: 45.43788111651027, 12.335989077160736

Kamera: -

Wetter:-

Mond: fast Neumond

Rialto Himmel	Rialto Aussicht	S. Marina	S. Marco	Messgerät
16.06	11.77	17.52	16.5	SQM-L
16.07	11.75	17.56	16.59	SQM-L
16.14	11.85	17.59	16.59	SQM-L

16.11	11.93	17.54	16.58	SQM-L
16.10	11.94	17.53	16.58	SQM-L
16.10	11.92	17.55	16.58	SQM-L
16.10	12.05	17.5	16.55	SQM-L
16.11	12.02	17.53	16.56	SQM-L
16.14	12.07	17.51	16.49	SQM-L
16.17	12.13	17.46	16.5	SQM-L
16.11	11.943	17.529	16.552	SQM-L

Tabelle 56: Messwerte mit dem SQM-L in Venedig

Rialto Himmel	S. Marina	S. Marco	Messgerät
18.29	19.32	17.29	DSM
18.32	19.25	17.43	DSM
18.53	19.16	17.39	DSM
18.38	19.21	17.23	DSM
18.25	19.25	17.36	DSM
18.354	19.238	17.34	DSM

Tabelle 57: Messwerte mit dem DSM in Venedig

Kameraaufnahmen

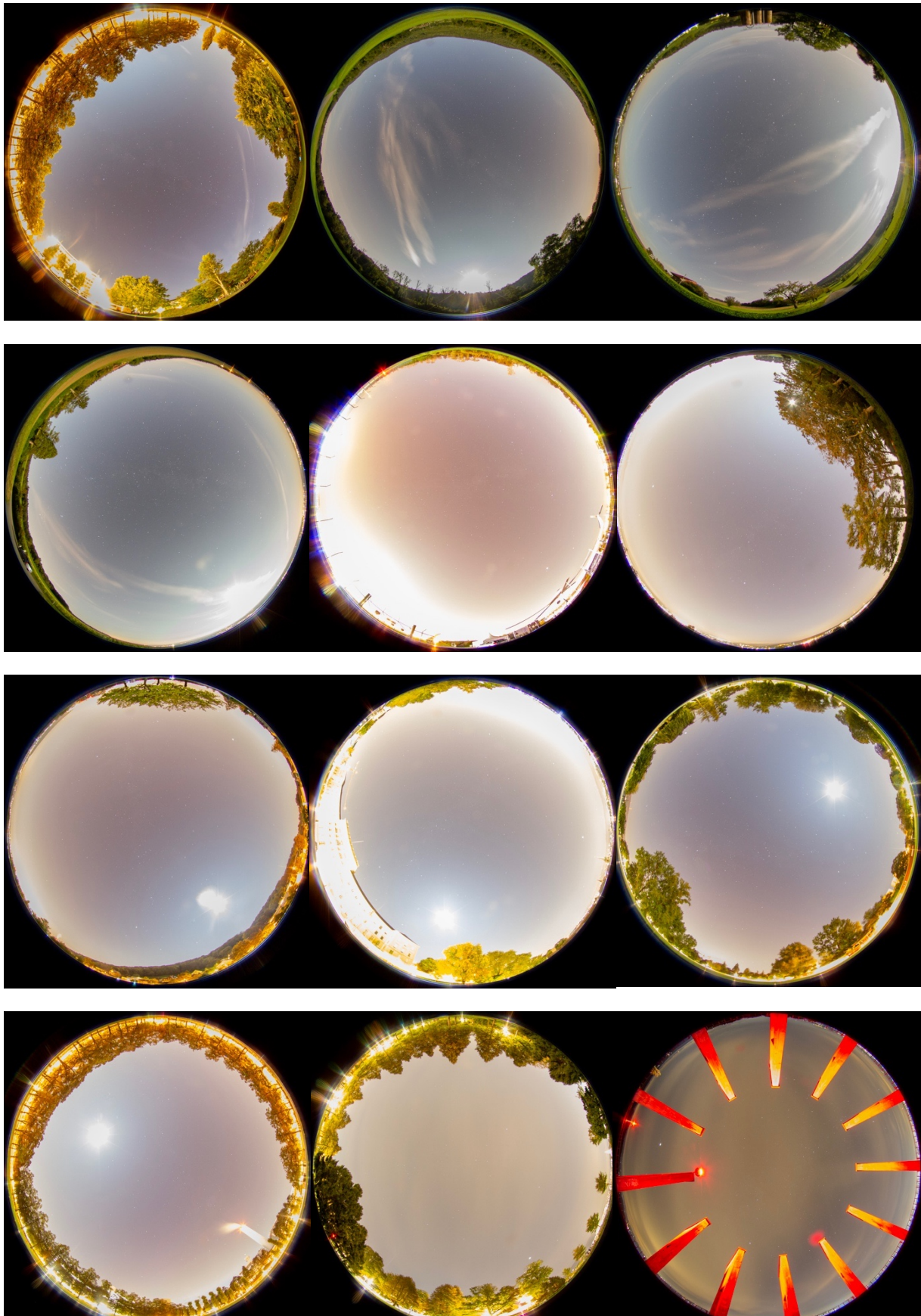


Abbildung 44: Kameraaufnahmen: Wettingen, Eigi, Ehrendingen, Rohrdorf, Flughafen ZH, ETH Hönggerberg ZH, Irchel ZH, ETH Zürich ZH, Chinagarten ZH, Josefschwiese ZH, Rosengarten BE, Gurten Turm BE

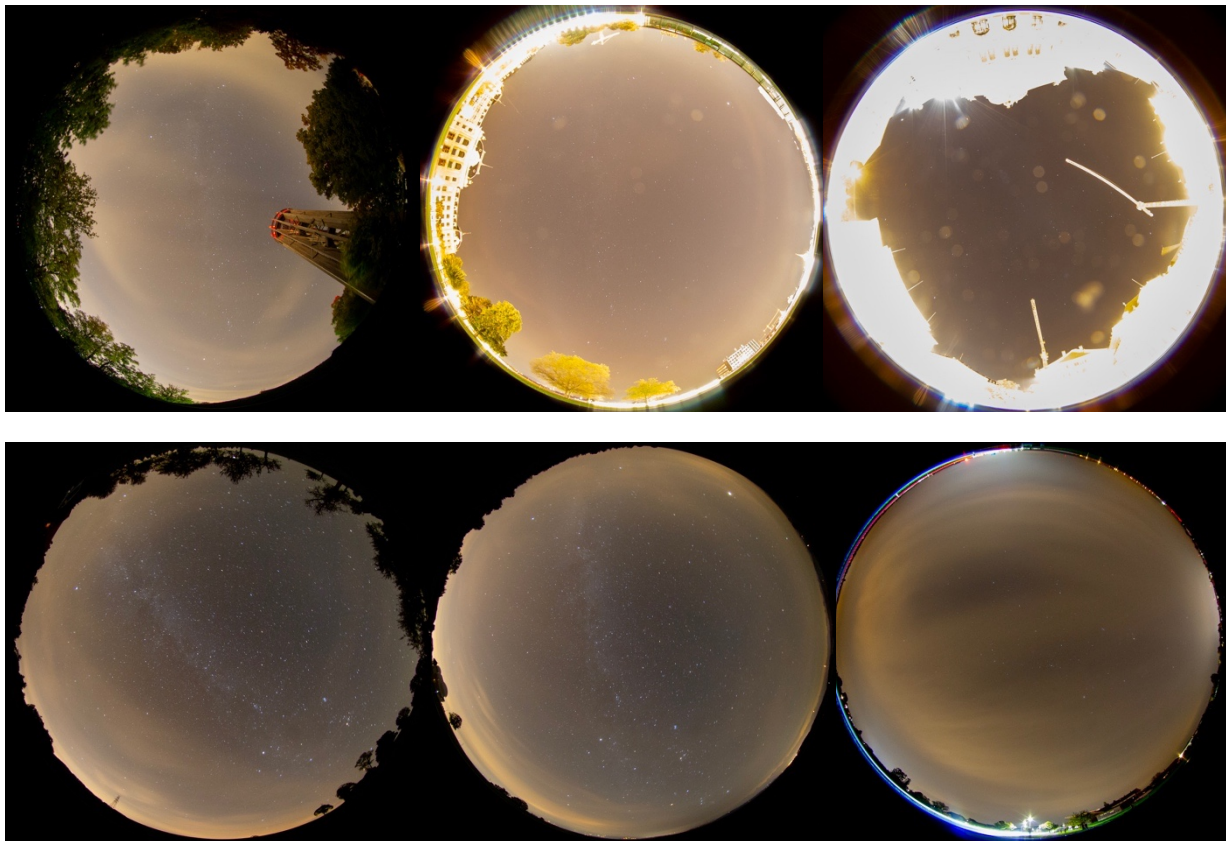


Abbildung 46: Kameraaufnahmen: Gurten BE, Grosse Schanze BE, Bundesplatz BE, Niederblacken, Zimmerwald, Kirchberg BE

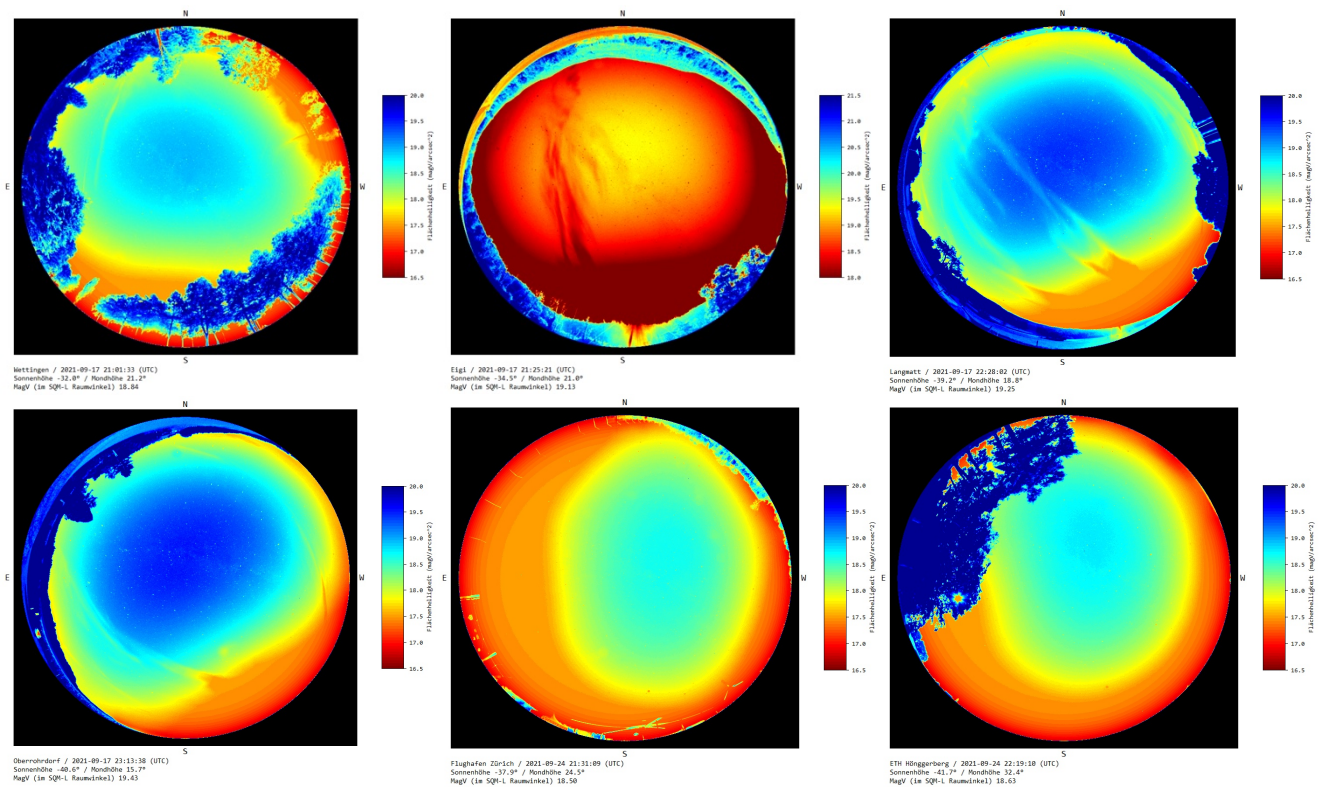


Abbildung 45: Falschfarbbilder: Wettingen, Eigi, Ehrendingen, Rohrdorf, Flughafen ZH, ETH Hönningerberg ZH

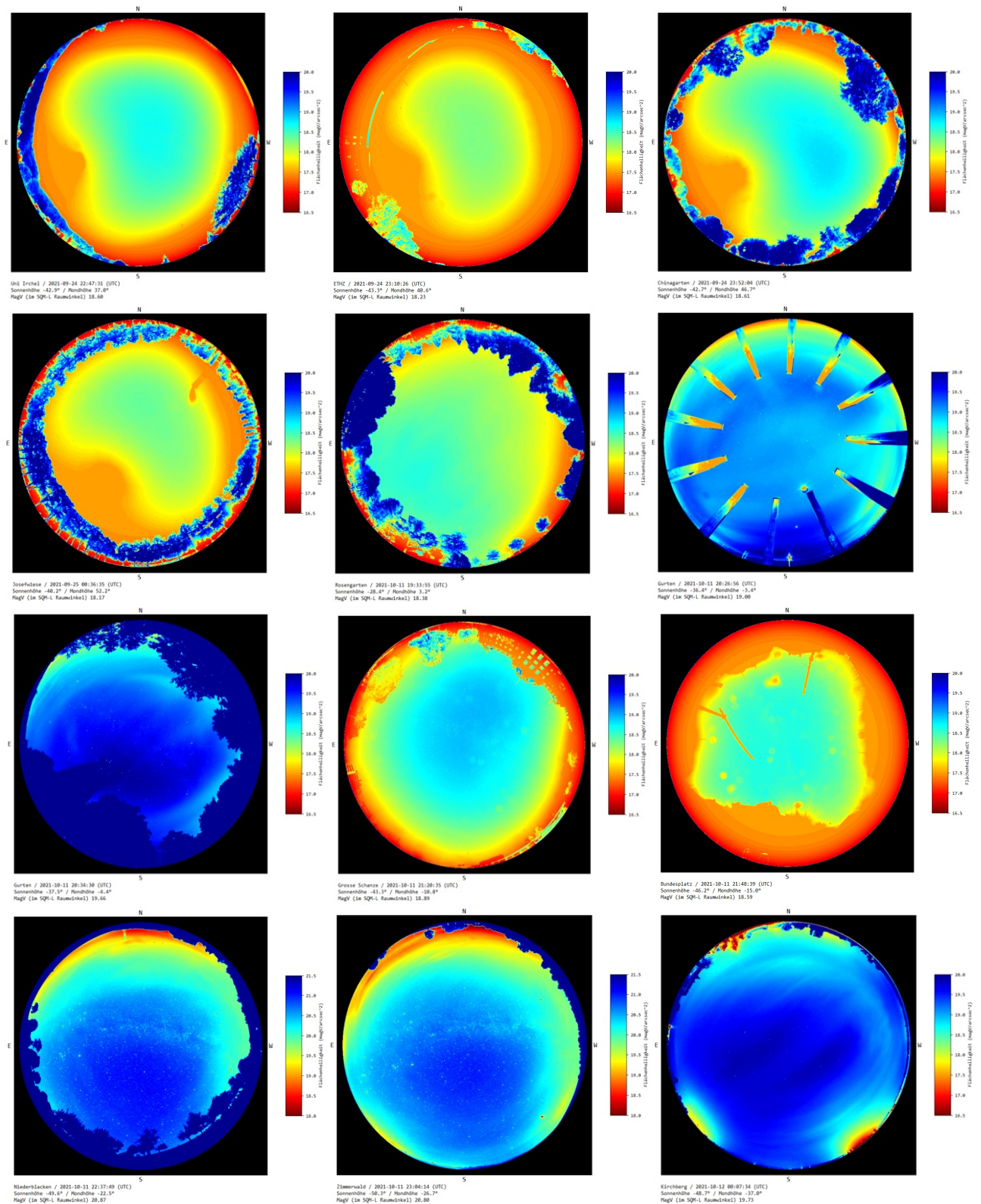


Abbildung 47: Falschfarbbilder: ETH Zürich, Chinagarten ZH, Josefswiese ZH, Rosengarten BE, Gurten Turm BE, Gurten BE, Grosse Schanze BE, Bundesplatz BE, Niederblacken, Zimmerwald, Kirchberg BE

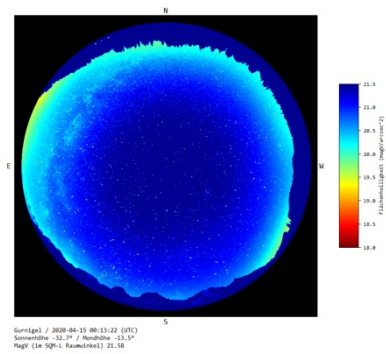


Abbildung 48: Falschfarbbild: Gurnigel

Unter folgendem Link können die einzelnen Aufnahmen der Kamera und die dazugehörigen Dunkelbilder gefunden werden:

<https://www.dropbox.com/sh/1d9vdbapw1pv4vk/AADDLQKY8Js5vX2QiFROwExva?dl=0>