

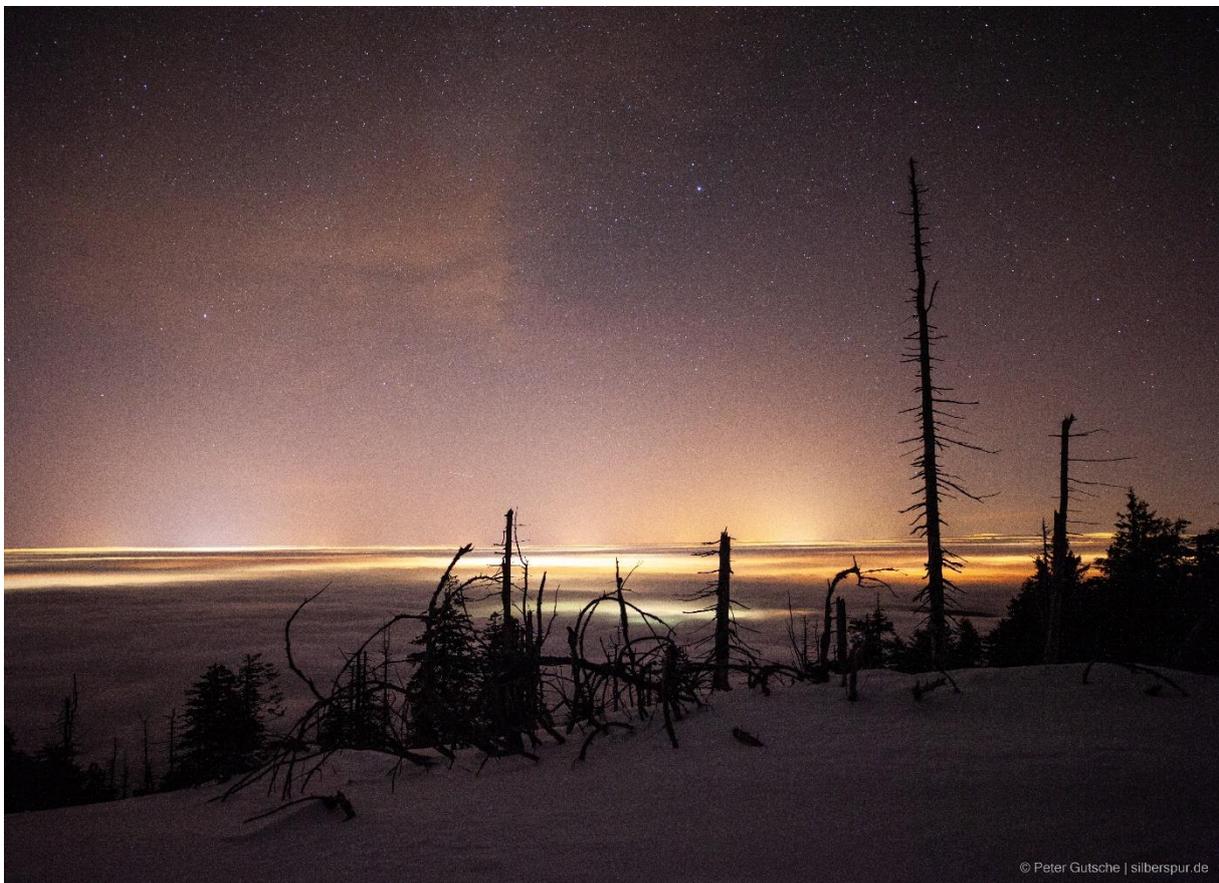
Warum es nachts (bald nicht mehr) dunkel ist

„Before we invented civilization our ancestors lived mainly in the open out under the sky. Before we devised artificial lights and atmospheric pollution and modern forms of nocturnal entertainment we watched the stars. There were practical calendar reasons of course but there was more to it than that. Even today the most jaded city dweller can be unexpectedly moved upon encountering a clear night sky studded with thousands of twinkling stars. When it happens to me after all these years it still takes my breath away.

In every culture, the sky and the religious impulse are intertwined. I lie back in an open field and the sky surrounds me. I'm overpowered by its scale. It's so vast and so far away that my own insignificance becomes palpable. But I don't feel rejected by the sky. I'm a part of it – tiny, to be sure, but everything is tiny compared to that overwhelming immensity. And when I concentrate on the stars, the planets, and their motions, I have an irresistible sense of machinery, clockwork, elegant precision working on a scale that, however lofty our aspirations, dwarfs and humbles us.”

Carl Sagan¹

Das Erlebnis des bestirnten Himmels ist eine Erfahrung, die Menschen seit Jahrtausenden teilen². Welche Auswirkungen hätte es, wenn das Erscheinungsbild des natürlich-dunklen nächtlichen Sternenhimmels – mit seinen scheinbar unzähligen für das bloße Auge sichtbaren Sternen und dem Band der Milchstraße – Schaden nimmt? Was geschieht mit uns Menschen, wenn für einen Großteil der Erdbewohner diese Erfahrung unwiederbringlich verloren geht? Was geschieht dann mit Teilen der Tier- und Pflanzenwelt?



© Peter Gutsche | silberspur.de

Lichter unter dem Nebelmeer, gesehen auf der Hornisgrinde im Schwarzwald; in hoher Auflösung:
<https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/hornisgrinde-fog.jpg>

In diesem Text³ befaße ich mich mit einer Entwicklung, die genau dieses Risiko birgt. Ich spreche über das Thema künstliches Licht bei Nacht, oder auch: „Lichtverschmutzung“.⁴

Da ich seit Jahren auch Landschaftsfotografie zur dunklen Stunde betreibe, findet Ihr zur Illustration eine Reihe von eigenen Fotografien⁵. Als „Bonus-Track“ findet Ihr zu jedem Foto einen Link zu einer hochaufgelösten Bildversion.

Warum ist es nachts dunkel?

Diese Frage scheint trivial, aber das ist sie nicht. Zu Ihrer Antwort bedarf es eines kleinen Ausfluges in die Wissenschaft. Für Interessierte gibt es dazu einen kurzen Artikel:

<https://www.silberspur.de/articles/warum-es-nachts-dunkel-ist.pdf>

Kurze Antwort: Das Universum ist nicht unendlich alt, noch ist sein beobachtbarer Bereich unendlich groß. Dies sorgt dafür, dass der Nachthimmel für uns auf der Erde dunkel erscheint. In klaren Nächten kann man jedoch tausende Sterne und das leuchtende Band der Milchstraße vor diesem dunklen Hintergrund sehen. Im beobachtbaren Weltall gibt es Hunderte von Milliarden Sternensysteme, Galaxien, die jeweils wiederum Hunderte von Milliarden Sternen enthalten. Die Sterne, die wir von der Erde aus mit bloßem Auge sehen können, gehören jedoch allesamt zu unserer eigenen Galaxie. Hierbei befinden sich die Sterne, die unser Auge noch als einzelne Punkte auflösen kann, in unserer unmittelbaren galaktischen Nachbarschaft, maximal einige Hundert bis wenige Tausend Lichtjahre entfernt. Das, was wir in klaren Nächten als leuchtendes Band am Himmel sehen und was wir gemeinhin als „Milchstraße“ bezeichnen, ist die Projektion der Hauptscheibe unserer Galaxie, in der die meisten Sterne verdichtet sind, auf unsere Himmelskugel. Jene Sterne, die wir nicht mehr einzeln wahrnehmen können, sind größtenteils sehr weit von uns entfernt; das Zentrum unseres Sternensystems liegt ungefähr 26.000 Lichtjahre entfernt. Fremde Galaxien hingegen befinden sich in einer Distanz von mehreren Millionen bis Milliarden Lichtjahren. Die Andromeda-Galaxie, unsere Nachbar-Galaxie, ist etwa 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt.

Wie der nächtliche Sternenhimmel das Leben von Mensch und Tier beeinflusst

Es ist plausibel, anzunehmen, dass die Betrachtung des nächtlichen Sternenhimmels schon seit langem eine Inspiration für den menschlichen Geist war. Fundstücke wie beispielsweise die Himmelskarte von Nebra⁶ legen nahe, dass Menschen sich schon seit Jahrtausenden mit dem Sternenhimmel befasst haben. Darüber hinaus hatte das bestirnte Firmament durchaus praktische Bedeutung in der Menschheitsgeschichte.

Von Seefahrern

Als ein Beispiel greife ich die Navigation auf See heraus: Menschen haben schon vor langer Zeit gelernt, sich an den Sternen zu orientieren. Seefahrer im Pazifik praktizierten vermutlich schon vor Jahrtausenden Navigationstechniken, mit deren Hilfe sie zwischen den weit voneinander entfernt liegenden Inseln in Mikronesien und Polynesien reisen konnten. Zu den Techniken gehörten die Beobachtung von Vögeln, Meereswellen und Windmustern, sowie die Navigation nach den Sternen⁷. Dieses Wissen wurde mündlich von Generation zu Generation überliefert.

Um herauszufinden, inwieweit diese Tradition bis in die neuere Zeit überlebt hat, besuchte der Weltumsegler und Abenteurer David Lewis in den 1970er Jahren mehrere Inselgruppen im Pazifik und nahm Kontakt zu Einheimischen auf. Er interviewte Menschen, die in der Navigation kundig waren, und führte längere Kanureisen auf dem offenen Ozean mit ihnen durch, um die Navigationstechniken

selbst zu erlernen. In seinem Buch „We, the navigators: the ancient art of landfinding in the Pacific“⁸ hat er seine Erkenntnisse ausführlich dokumentiert. Eine wichtige Methode, um auf der Reise zwischen zwei Inseln die Orientierung beizubehalten, sind Sterne oder Sternbilder, die knapp über dem Horizont stehen. Insbesondere bieten Sterne in genau östlicher und westlicher Richtung den Vorteil, dass sie dort senkrecht auf- oder untergehen⁹. Die Sterne im Norden und Süden wiederum haben die praktische Bedeutung, dass sie ganzjährig ihre Position beibehalten – zumindest näherungsweise¹⁰.

Ein im Zusammenhang mit dieser Navigationstechnik entwickeltes Gerät ist der „Sternenkompass“ (sidereal compass). Dort stellen Kompasspunkte die Position ausgewählter Sterne (sogenannte „Steuersterne“ oder „Leitsterne“) bei ihrem Auf- oder Untergang dar. Ein Beispiel für ein solches Gerät ist auf den Karolinen-Inseln überliefert („Carolinian star compass“)¹¹. Diese Inselkette erstreckt sich östlich der Philippinen über mehr als 2000 Kilometer auf ungefähr 7° nördlicher Breite. Wegen der Lage knapp nördlich des Äquators ist von dort aus genau im Norden der Polarstern ein wenig über dem Horizont zu sehen und ändert seine Position im Laufe der Zeit nur unwesentlich. Auf dem in dieser Region gebräuchlichen Sternkompass ist Polaris daher als nördlicher Kompasspunkt eingetragen. Der südliche Himmelspol ist von den Karolinen aus nicht mehr zu sehen, wohl aber das Kreuz des Südens, ein Sternbild in der Nähe des südlichen Himmelspols – ungefähr 25° von ihm entfernt. Es ist daher von der Inselgruppe aus zu bestimmten Zeiten im Süden zu sehen, wie es in einem kleinen Halbkreis um den Südpunkt wandert. Um Seefahrer in der Gegend der Karolinen optimal bei ihrer Navigation in südlicher Richtung zu unterstützen, sind auf dem Sternkompass daher mehrere Kompasspunkte mit dem Kreuz des Südens eingezeichnet¹².

Die Geschichte der Navigation auf See im Europa des 18. Jahrhunderts ist untrennbar mit der Entwicklung sehr genauerer Chronometer verbunden. Den Breitengrad (also wie weit man sich nördlich oder südlich des Äquators befindet) können Seefahrer relativ einfach an der Höhe des Himmelspols¹³ ermitteln. Um jedoch den Längengrad festzustellen (also wie weit westlich oder östlich der Kurs ist), muss man auch die genaue Uhrzeit kennen. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Ein Stern, der zu einem bestimmten Zeitpunkt auf dem Nullmeridian (der durch die Londoner Sternwarte Greenwich geht) im Westen gerade untergeht, wird für einen sich gleichzeitig weiter westlich auf dem Atlantik befindenden Beobachter noch eine gewisse Höhe über dem Horizont stehen. Die genaue Höhe zu einer bestimmten Zeit hängt vom Längengrad ab, auf dem sich der Beobachter befindet. Das sehr lesenswerte Buch „Longitude“ der amerikanischen Wissenschaftsredakteurin und Schriftstellerin Dava Sobel¹⁴ beschreibt sehr anschaulich die Suche nach einer Methode zur Bestimmung der Längengrade auf See im 18. Jahrhundert. Das Buch handelt von John Harrison, einem autodidaktischen Uhrmacher, der, gegen alle Widerstände, ein präzises Marinechronometer entwickelte, das die Navigation revolutionierte.

Dieses Detail aus der Geschichte von Wissenschaft und Technik verdeutlicht unmittelbar, wie sehr der Anblick des Sternenhimmels uns ein „unwiderstehliches Gefühl von Maschinerie, Uhrwerk, eleganter Präzision“ vermittelt, wie es Carl Sagan in dem zu Beginn zitierten Satz ausdrückte.

Tiere im Planetarium

Aber nicht nur für Menschen, nein, auch für die Tierwelt spielt der nächtliche Sternenhimmel eine große Rolle. Ich greife zwei Beispiele¹⁵ heraus.

Zugvögel¹⁶ können sich in sternklaren Nächten am Rotationszentrum des Sternenhimmels orientieren, indem sie sich offensichtlich Sternmuster rund um diese Stelle am Himmel merken und mit der aktuell wahrgenommenen Sternenformation vergleichen können.

In einer Arbeit von 2001¹⁷ wird beispielsweise das Verhalten von Trauerschnäppern (*Ficedula hypoleuca*) und Mönchsgrasmücken (*Sylvia atricapilla*) untersucht, deren Verhalten in einem Planetarium beobachtet wurde. Die Ergebnisse des Experiments legen den Schluss nahe, dass Vögel einen zeitunabhängigen Sternkompass verwenden, der auf erlernten geometrischen Sternkonfigurationen basiert, um den Rotationspunkt des Sternenhimmels genau zu bestimmen.

Sternenkundige unter uns Menschen können sich auch ohne Probleme am Muster der Zirkumpolarsterne¹⁸ orientieren und den Himmelspol mühelos finden. Ein Trick, diesen unmittelbar zu visualisieren, besteht darin, eine Langzeitaufnahme des Himmels zu machen, auf dem die Sterne wegen der Umdrehung der Erde Lichtspuren – Sternbahnen – bilden.



Sternbahnen über den Vogesen; in hoher Auflösung: <https://www.silberspur.de/topics/astro/climont-circumpolar.jpg>

Eine in Südafrika lebende Käferart orientiert sich möglicherweise an der Milchstraße¹⁹: Die Mistkäfer der Art *Scarabaeus satyrus* lösen, um ihr Futter vor Konkurrenten zu schützen, ein Stück Dung von einem Haufen, formen es zu einer Kugel und rollen diese entlang eines geraden Pfades davon. Die Tiere sind auch in sternklaren Nächten – und selbst dann, wenn kein Mond am Himmel steht – in der Lage, bei dieser Tätigkeit die Richtung beizubehalten. Sie verlieren dagegen diese Fähigkeit, wenn der Himmel nachts bedeckt ist. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Käfer sich in der Dunkelheit am Sternenhimmel orientieren. Vieles deutet jedoch darauf hin, dass sich *Scarabaeus satyrus* nicht an Sternkonstellationen, sondern an großräumigen Unterschieden in der Beleuchtungsintensität am Himmel orientiert, wie sie durch das Band der Milchstraße entstehen. Diese Strategie bietet den Vorteil, dass sie robust gegenüber Veränderungen der atmosphärischen Bedingungen ist und relativ unabhängig von Sternmustern, deren Position von Jahres- und Uhrzeit abhängt.

Folgende Aufnahme zeigt das Band der Milchstraße über den Cantal-Bergen im Französischen Zentralmassiv.



Milchstraße über dem Cantal; in hoher Auflösung: <https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/puy-mary.jpg>

Lichtverschmutzung durch irdische Lichtquellen

Das Erlebnis des natürlichen Nachthimmels wird zunehmend durch künstliche anthropogene Lichtquellen beeinträchtigt, ein Phänomen, das auch als „Lichtverschmutzung“ bezeichnet wird²⁰. Den größten Beitrag hierzu leisten die Lichter unserer Städte und das Licht, das wir bei anderen Aktivitäten, zum Beispiel Autofahren, nachts abstrahlen.

Folgendes Foto wurde auf der Hornisgrinde im Schwarzwald aufgenommen, in 1150 Metern Meereshöhe. Am Himmel, knapp links der Bildmitte, ist prominent das Sternbild Orion zu sehen. Darüber hinaus ist eine ganz besondere Planetenkonstellation dargestellt: Links oben im Bild der Jupiter, rechts tief über dem Horizont die untergehende Venus und unmittelbar darüber der Mars.



Künstliche Lichter, gesehen von der Hornisgrinde, Schwarzwald; in hoher Auflösung:

<https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/hornisgrinde-orion-venus-mars.jpg>

Der untere Bildteil ist geprägt durch viele unterschiedliche anthropogene Lichtquellen. Rechts leuchten die Lichter von Ortschaften in den angrenzenden Schwarzwaldtälern unter dem Nebel in gelber Farbe hervor, die künstlichen Lichter im Hintergrund rechts stammen von der dicht besiedelten Rheinebene. Links im Bild strahlen die Flutbeleuchtungsanlagen benachbarter Skilifte ein grelles bläuliches Licht in den Himmel. Weiter links (nicht mehr im Bild) streut das Licht eines weiteren Skiliftes in der Atmosphäre und beeinträchtigt die Sicht auf den Sternenhimmel ganz erheblich. Das Licht reflektiert sogar noch auf dem Schnee an meinem, einige Kilometer entfernten Foto-Standpunkt. Die Skilifte grenzen übrigens unmittelbar an den Nationalpark Schwarzwald.

„Light pollution is one of the most pervasive forms of environmental alteration. It affects even otherwise pristine sites because it is easily observed during the night hundreds of kilometres from its source in landscapes that seem untouched by humans during the day, damaging the nighttime landscapes even in protected areas, such as national parks.“²¹

Das folgende Foto vermittelt eine gute Vorstellung davon, wie weit sich die Lichtverschmutzung urbaner Gebiete räumlich erstrecken kann. Hier ist der Effekt allerdings noch durch hohe Cirrus-Wolken verstärkt, die das Licht reflektieren. Das Foto wurde in der Nähe des Grand Mont Rond im Französischen Jura aufgenommen, in ungefähr 1600 Metern Meereshöhe.



Blick vom Grand Montrond, Jura, Frankreich; in hoher Auflösung:

<https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/grand-montrond.jpg>

Das Bild wurde in südlicher Richtung aufgenommen. Die Lichter links unter dem Nebel gehören zur Metropole Genf, die ungefähr 20 Kilometer Luftlinie entfernt liegt. In der Mitte sieht man das Massiv der Crêt de la Neige, den höchsten Berg im Jura. Die künstlichen Lichter, die rechts von den Wolken reflektiert werden, stammen aus dem Großraum Lyon, der mehr als 100 Kilometer entfernt liegt²².

Folgendes Foto zeigt, wie ein sehr nahe gelegener Großraum die nächtliche Landschaftsfotografie beeinflusst. Es wurde in einer klaren Winternacht auf dem Grand Ballon, dem höchsten Gipfel der Vogesen auf etwa 1400 Metern Meereshöhe, in östlicher Richtung aufgenommen. Das Bergmassiv grenzt direkt an das dicht besiedelte Elsass, und man schaut von oben auf die Region Colmar. Das Bild mag – auch und gerade durch die anthropogenen Lichtquellen unter dem Nebel – einen ästhetischen Reiz haben, zeigt aber auch, wie dramatisch unsere Zivilisation den Nachthimmel verändert hat. Dieses Panorama ist aus mehreren Einzelaufnahmen zusammengesetzt, die unmittelbar hintereinander aufgenommen wurden.



Blick vom Grand Ballon, Vogesen, Frankreich; in hoher Auflösung:

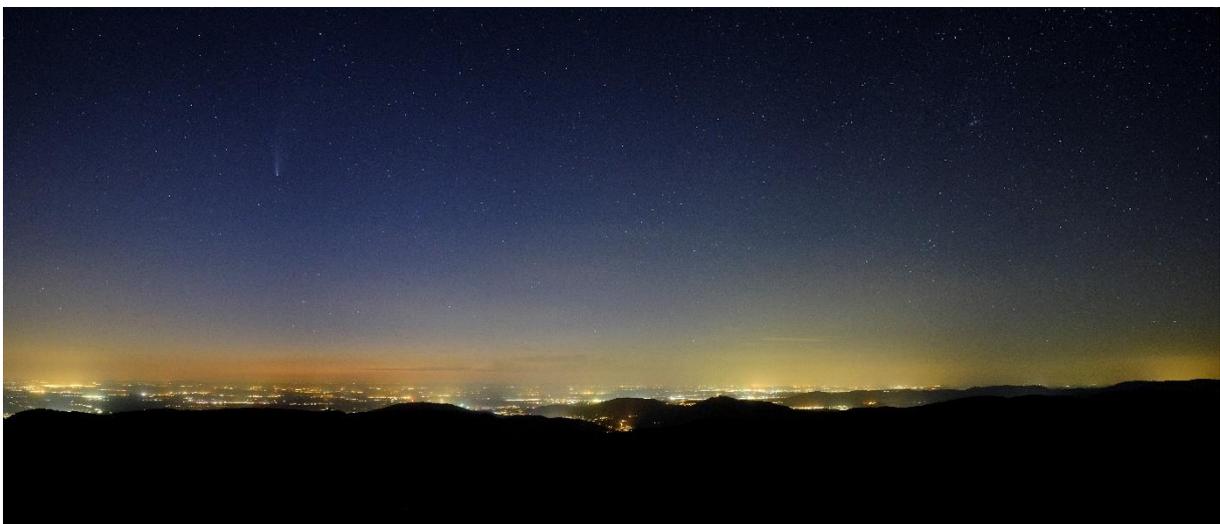
<https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/grand-ballon-milky-way.jpg>

Warum die Zunahme künstlichen Streulichts in der Nacht auch eine Form der **Entropieerhöhung** darstellt, kann man sich klarmachen, wenn man einige der Folgen aufzählt: natürliche Dunkelheit wird durch „ungeordnetes“ Streulicht ersetzt, biologische Rhythmen und ökologische Systeme werden gestört, Energie wird in Wärme umgewandelt.

Künstliches Licht in der nächtlichen Landschaftsfotografie kreativ einsetzen

Ich möchte noch anhand eines Fotos zeigen, wie künstliche Lichtquellen auch auf kreative Weise in die nächtliche Landschaftsfotografie integriert werden können.

Folgendes Foto wurde im Nordschwarzwald auf 1000 Metern Meereshöhe gemacht und zeigt den Blick nach Norden auf die dicht besiedelte Rheinebene mit dem Großraum Karlsruhe. Hier habe ich den Standpunkt bewusst so gewählt, dass am Horizont ein Bereich mit viel „artificial light“ – kombiniert mit gut wiedererkennbaren Bergsilhouetten – zu sehen ist.



Komet Neowise über der Rheinebene; in hoher Auflösung: <https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/northern-black-forest-neowise.jpg>

Das eigentliche Motiv des Bildes ist der Komet „Neowise“ (links oben), der im Sommer 2020 in Europa gut zu sehen war. Ich hatte die Absicht, den Kometen mit einem regionalen Bezug zu zeigen. Daher entschied ich mich für diesen Aufnahmeort. Da die gesamte Berglandschaft in nördlicher Richtung deutlich tiefer als mein Beobachtungsstandpunkt liegt, überblickt man von dort die Ausläufer des Schwarzwaldes und die dahinter liegende Rheinebene besonders gut. Regional Kundige können die einzelnen Städte und Berggipfel erkennen. Das Foto wurde auch in einer regionalen Tageszeitung abgedruckt; für Bewohner dieser Gegend war es vermutlich interessant zu erfahren, dass man den Kometen von ihrer „Heimat“ aus beobachten konnte.

Atlas der Lichtverschmutzung

Wer erfahren möchte, in welchen Regionen auf der Erde das Erlebnis des Nachthimmels besonders stark durch künstliches Licht beeinflusst ist und in welchen Gegenden man noch einen ungestörten Nachthimmel erleben kann, findet mittlerweile viele Informationen dazu im Netz. Ich greife ein paar davon heraus.

Schon seit vielen Jahren detektieren Satelliten die künstlichen Lichtquellen auf der Erde. Im Jahr 2011 wurde der „Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP)“-Satellit gestartet, der an Bord ein Strahlenmessgerät für den sichtbaren und infraroten Bereich enthält (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, abgekürzt: VIIRS). Die Daten werden unter dem Stichwort „Black Marble“ von der NASA veröffentlicht²³. Dieselben Daten bilden die Grundlage für eine Online-Version der „light pollution map“²⁴, von der wir bereits gesprochen haben. Ein 2016 veröffentlichter Weltatlas der Lichtverschmutzung verwendet VIIRS-Daten²⁵:

„This atlas shows that more than 80% of the world and more than 99% of the U.S. and European populations live under light-polluted skies. The Milky Way is hidden from more than one-third of humanity, including 60% of Europeans and nearly 80% of North Americans. Moreover, 23% of the world’s land surfaces between 75°N and 60°S, 88% of Europe, and almost half of the United States experience light-polluted nights.“

Man kann sagen, dass ein Drittel der Menschheit an Orten lebt, an denen man die Milchstraße nicht mehr sehen kann.

Satelliten, deren Daten die Grundlage für die genannte „Light Pollution Map“ bilden, können das nach oben abgestrahlte Licht messen. Sie liefern aber keine Informationen über horizontal abgestrahltes Licht. Sie können also die von der Erde wahrgenommene Lichtverschmutzung nur begrenzt abbilden. Eine Arbeit²⁶, an der Bürgerwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler („citizen scientists“) beteiligt und um die Einschätzung des Lichtverschmutzungsgrades an ihrem Wohnort gebeten wurden, kann die Daten von Satelliten ergänzen. Sie kommt zu dem Schluss, dass sich in den vergangenen Jahren die Helligkeit des Nachthimmels ungefähr alle 8 Jahre verdoppelt hat.

Nun könnte man denken, dass man in den noch „dunklen“, von Orten mit urbaner Beleuchtung weit entfernten Gebieten, einen ungestörten Sternenhimmel genießen kann.

Das ist nun leider nicht so, denn es gibt noch andere Störquellen, die sich nicht auf der Erdoberfläche befinden: Flugzeuge und Satelliten. Fotografinnen und Fotografen, die längere Bildreihen des Nachthimmels – beispielsweise für Zeitrafferaufnahmen – aufnehmen, werden möglicherweise nicht so gut darauf zu sprechen sein.

Lichtverschmutzung durch Flugzeuge und Satelliten

Flugzeuge erzeugen Lichtspuren am Himmel durch ihre Positionslichter. Satelliten leuchten, wenn sie in großer Höhe noch von der Sonne beschienen werden und das Licht auf die bereits dunkle Erdoberfläche reflektieren. Daher sind die Stunden vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang von letzterem Effekt am meisten betroffen. Auf Langzeitbelichtungen des Nachthimmels erscheinen Flugzeuge in der Regel als gepunktete Linien, die den ganzen Himmel bis zum Horizont überstreichen. Satelliten hingegen hinterlassen durchgezogene Linien, die meist an einer Stelle des Himmels verschwinden, wenn der Satellit in den Erdschatten tritt. Das künstliche Licht durch Flugzeuge und Satelliten „stört“ auch den natürlichen Nachthimmel auch an Orten, an denen man sich weit entfernt von irdischen künstlichen Lichtquellen befindet.

Folgendes Sternbahnfoto habe ich im Südschwarzwald, in der Nähe des Herzogenhorns, gemacht.



Sternspuren und Flugzeuge über dem Schwarzwald; in hoher Auflösung:

<https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/krunkelbachsterne.jpg>

Der südliche Schwarzwald ist besonders stark von Flugverkehr beeinträchtigt ist²⁷. Das wird auf der Sternbahnaufnahme unmittelbar deutlich.

Satelliten können auf nächtlichen Aufnahmen interessant sein, wenn sie als „Flares“ – plötzlich auftretende Leuchterscheinungen – zu sehen sind. Dieser Effekt entsteht, wenn ein Satellit oder ein anderes Objekt im Weltraum das Sonnenlicht mit einer Fläche besonders stark reflektiert. Da sich die Orientierung dieser Fläche relativ zu einem festen Beobachtungspunkt auf der Erde während des Umlaufs ändert, überstreicht der Lichtkegel des reflektierten Sonnenlichts kurzzeitig bestimmte Beobachtungsorte. Ein schönes Beispiel ist dieses hier.



Flare; in hoher Auflösung: <https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/satellite-maix.jpg>

Folgende Sternbahnaufnahme zeigt die nördlichen Zirkumpolarsterne, aufgenommen im Bannwald beim Ruhestein im Nordschwarzwald.

Aber was fliegt da durch das Bild? Richtig, Ihr ahnt es schon, es ist die Internationale Raumstation ISS. Das Foto mit der Lichtspur habe ich am 21.03.2009 um 20:25 CET aufgenommen. Wie man sofort sehen kann, fliegt das Objekt knapp unterhalb von Polaris, ich schätze 2° bis 3° entfernt, vorbei. Da der Ruhestein auf 48.5° nördlicher Breite liegt, steht Polaris eben in 48.5° Winkelhöhe über dem Horizont. Das heißt, das überfliegende Objekt hat dort eine Winkelhöhe von ungefähr 45° . Nun kann man einfache Trigonometrie betreiben und sieht sofort, dass der Ort, an dem die ISS in senkrechter Richtung (am Zenit) das Land überfliegt in einer Entfernung von meinem Standpunkt in nördlicher Richtung liegen muss, die näherungsweise der Höhe entspricht, in der sich die ISS dort über dem Boden befindet. Ein Blick auf eine ISS-Tracker-Seite, auf der historische Daten der ISS aufrufbar sind, zeigt, dass an diesem Tag und zu dieser Uhrzeit die ISS einen Ort in der Nähe von Paderborn überflog. Dies ist 350 Kilometer Luftlinie vom Ruhestein entfernt. Und dies entspricht ziemlich genau der Höhe, die die ISS laut ISS-Tracker-Seite bei diesem Überflug hatte (laut Seite: 222 Meilen).



Sternbahnen und ISS; in hoher Auflösung: <https://www.silberspur.de/topics/artificial-light-at-night/startrails-ruhestein-iss.jpg>.

Aufnahmen wie diese können einen ganz eigenen Reiz haben. Die rasant ansteigende Anzahl von Satelliten könnte aber längerfristig unerwünschte Auswirkungen haben, in erster Linie auf erdgestützte astronomische Beobachtungen.

Wie schon die vorangestellten Fotos suggerieren, können Satelliten astronomische Beobachtungen dadurch stören, dass sie Lichtspuren auf den Bildern hinterlassen. Sie können aber die Beobachtungsqualität auch dadurch beeinträchtigen, dass durch deren zunehmende Anzahl der Himmel insgesamt heller wird.

Schon jetzt gibt es Tausende Satelliten im erdnahen Orbit. Die Starlink-Satelliten des Unternehmens SpaceX dominieren das Geschehen derzeit²⁸, und es ist geplant, dass SpaceX eine vierstellige Anzahl von Satelliten in den nächsten wenigen Jahren in den Orbit einbringt.²⁹

Wissenschaftlerinnen³⁰ haben simuliert, wie sich der Nachthimmel durch eine geschätzte zunehmende Satellitendichte verändern könnte. Hierbei modellierten sie Helligkeiten und die Verteilung am Himmel für eine mögliche Zukunft mit 65.000 Satelliten. Diese Zahl wurde auf der Basis von aktuell verfügbaren Informationen zu Satellitenbetreibern geschätzt (mit Informationen zu Umlaufbahnen, die für die Unternehmen Starlink, OneWeb, Kuiper (von Amazon) und StarNet/GW eingereicht wurden).

Erstens gibt diese Arbeit eine Abschätzung über die Anzahl der sichtbaren Satelliten für verschiedene Breitengrade und Jahreszeiten. Zweitens, unter Berücksichtigung der durch die Position im Raum und den Einfallswinkel des Sonnenlichtes beeinflussten Helligkeit, wird abgeschätzt, wie die scheinbare Helligkeit des Himmels durch die Satelliten beeinflusst wird. Es werden die Auswirkungen auf erdgestützte astronomische Beobachtung diskutiert, Darüber hinaus gehen die Autorinnen davon

aus, dass die Helligkeit des Nachthimmels insgesamt zunehmen wird. Eine einfache Rechnung ergibt einen Wert von 4%.

„The first feature that is immediately obvious is that latitudes near 40°N and S have the most sunlit satellites (...) But due to Earth’s shadow, there is a period of few-to-no sunlit satellites for ~5–6 hr around midnight during the winter at these latitudes. However, during summer, there are more than a thousand sunlit satellites above the horizon all night long.“

Nach einer anderen Arbeit³¹ soll die Helligkeit des gesamten Himmels allein durch „Weltraumschrott“ – also Trümmerteile, die unter anderem durch den Zusammenstoß von Satelliten erzeugt wurden – bereits schon jetzt um 10% über das vorindustrielle Niveau erhöht worden sein:

„According to our preliminary estimations, this newly recognized skyglow component could have reached already a zenith visual luminance of about 20 μ cd m⁻², which corresponds to 10 per cent of the luminance of a typical natural night sky, exceeding in that way the IAU’s limiting light pollution ‘red line’ for astronomical observatory sites. Future satellite mega-constellations are expected to increase significantly this light pollution source.“

Ein weiteres Problem sind Satelliten, die besonders hell sind. Der Satellit „BlueWalker 3“, ein kommerzieller Kommunikationssatellit des US-amerikanischen Unternehmens AST SpaceMobile, gehört zu den größten Satelliten, die je ins Weltall gebracht wurden, und damit zu den hellsten Objekten am Nachthimmel überhaupt. Je nach Ausrichtung der Antenne relativ zum Beobachter kann der Satellit die maximale scheinbare Helligkeit von +0,4 mag erreichen³². Die International Astronomical Union (IAU) empfiehlt für Satelliten im niedrigen Erdorbit, eine maximale scheinbare Helligkeit von +7 mag nicht zu überschreiten³³. Daher übertrifft die maximale scheinbare Helligkeit von BlueWalker 3 den durch die IAU empfohlenen „Grenzwert“ um mehr als 400-fache³⁴.

Es gibt aber auch Initiativen, die versuchen, dieser Entwicklung entgegen zu steuern. Die SATCON2-Gruppe³⁵ bringt verschiedene Interessengruppen zusammen, um gemeinsam an einem ethischen, rechtlichen und regulatorischen Rahmen für den Schutz und die Nachhaltigkeit des Weltraums zu arbeiten.

Die kanadische Astronomin Samantha Lawler, die sich für einen Schutz des natürlichen Nachthimmels einsetzt³⁶, meint:

„I often wonder what kind of night sky my children will inherit. Will the stars be hidden behind a rawling grid of bright satellites, or a hazardous snow globe of post-Kessler debris? Or will government regulators set strong safety and light-pollution rules before the night sky is all but lost? The future sky will be chosen in the coming years by the actions of private satellite companies and the government agencies that should be regulating them.“

Mit einer kürzlich gegründeten Initiative mit dem Namen „Kessler Rebellion“³⁷ versuchen Forschende, unter ihnen Samantha Lawler, die Öffentlichkeit gegen den unkontrollierten Einsatz sehr heller Satelliten zu mobilisieren und auf eine Regulierung dieser Entwicklung hinzuwirken.

Warum aber „Kessler“? Darauf gehe ich kurz im nächsten Abschnitt ein.

Wird der erdnahe Orbit bald unbrauchbar? Das sogenannte „Kessler-Syndrom“

Wir haben gesehen, dass die anwachsende Satellitendichte im erdnahen Orbit ein größer werdendes Problem für Forschende, insbesondere in der Astronomie, darstellt. Diese Entwicklung könnte darüber hinaus in der Zukunft noch zu einem ernsthaften Problem für die Raumfahrt werden.

Der Astronom Donald J. Kessler³⁸ untersuchte in den 1970er Jahren die Auswirkungen einer zunehmenden Anzahl von Satelliten im erdnahen Orbit und die damit einhergehende Wahrscheinlichkeit von Kollisionen. Um die zukünftige Entwicklung abzuschätzen, übertrug er statistische Modelle, die die Entstehung des Asteroidengürtels zwischen Mars und Jupiter beschreiben, auf den erdnahen Orbit.

Kessler kam zu dem Schluss, dass Satellitenkollisionen zahlreiche Fragmente erzeugen, die weitere Satelliten zerstören könnten. Dies könnte zu einem exponentiellen Anstieg der Objektanzahl und zur Bildung eines Gürtels aus Weltraummüll um die Erde führen. Dieser Prozess ähnelt dem, der vermutlich den Asteroidengürtel gebildet hat, würde aber aufgrund der geringeren räumlichen Dimensionen im erdnahen Orbit wesentlich schneller ablaufen.

Im Detail stellte Kessler fest, dass die kollisionsbedingte Zerstörung von Satelliten in naher Zukunft zu einem Trümmerstrom führen könnte, der in bestimmten Regionen den natürlichen Meteoritenfluss übertrifft (ohne eine konkrete Zeitabschätzung). Langfristig würde die Menge des Trümmerstroms exponentiell ansteigen.

Dieses Phänomen wurde bekannt unter dem Begriff „Kessler-Syndrom“. Dieser Begriff wurde allerdings nie von Donald J. Kessler selbst in die wissenschaftliche Diskussion eingebracht³⁹.

Die entscheidende Frage ist nun: kann die derzeit zu erwartende Zunahme der Anzahl von Satelliten im erdnahen Orbit in absehbarer Zeit zur Entstehung eines Trümmergürtels führen, der die Nutzung des erdnahen Orbits praktisch unmöglich macht?

Eine neuere Arbeit⁴⁰ kommt zu dem vorsichtigen Schluss:

„In line with previous studies, our model finds that debris congestion may be reached in less than 200 years, though a holistic management strategy combining removal and mitigation actions can avoid such outcomes while continuing space activities.“

In einer Arbeit von 2023⁴¹ wird das sogenannte KESSYM-Modell (KESsler Syndrome Model) vorgestellt und ausführlich erklärt. Als Input verwendet KESSYM Daten zur Population und zum Flux von Weltraumschrott, die von vorhandenen Arbeiten der ESA und der NASA bereitgestellt werden⁴². Zur Berechnung der zukünftigen Entwicklung verwendet KESSYM statistische Methoden, um die Kollisionswahrscheinlichkeit zwischen drei Arten von Objekten im Orbit zu simulieren: Satelliten, Satellitenfragmenten (Trümmerteile) und Mikrofragmenten (<1kg). Hierbei werden diese Objekte wie Partikel eines idealen Gases behandelt, so dass die Kollisionswahrscheinlichkeiten vereinfacht in Abhängigkeit von der „Gasdichte“ berechnet werden können.

“Orbital mechanics and collisions are modeled on a probabilistic basis based on a ‘density’ of objects in the LEO, rather than by tracking exact flight paths.”

Die Arbeit kommt zu dem Ergebnis, dass das Kessler-Syndrom “... is almost an inevitability within 200-250 years of today’s date, but can be delayed or avoided altogether if action is taken.”

Es gibt mittlerweile Hinweise auf ein weiteres, vermutlich bedrohlicheres Risiko von Satelliten-Megakonstellationen: Der herabfallende Weltraumschrott lässt Nanopartikel aus Aluminium und Aluminiumoxid entstehen, die, sobald sie nach Jahrzehnten in der Stratosphäre herabgesunken sind, dort die Ozonschicht beschädigen oder gar ganz abbauen könnten. Das wäre insofern eine absurde Ironie der Geschichte, als die Ächtung von Fluorkohlenwasserstoffen in den 1980er Jahren eine der wenigen erfolgreichen globalen Initiativen der Menschheit war, durch die eine drohende globale planetare Veränderung – nämlich genau der Abbau der Ozonschicht – gestoppt wurde⁴³.

Auswirkungen von Lichtverschmutzung jenseits der Astronomie und Fotografie

Es gibt kaum Zweifel daran, dass „artificial light at night“ in den letzten Jahren erheblich zugenommen hat und weiter zunehmen wird⁴⁴. Auch wenn es, wie gezeigt, auf nächtlichen Landschaftsaufnahmen mitunter kreativ eingesetzt werden kann: Die negativen Auswirkungen sind nicht zu unterschätzen.

Ganz offensichtlich stört Lichtverschmutzung Astronominnen und Astrofotografen bei ihrer Arbeit. Diese Gruppe von Menschen schlägt, sozusagen wie der „Kanarienvogel im Bergwerk“⁴⁵, als erstes Alarm, wenn etwas hier nicht stimmt. Aber wie im Bergwerk das plötzliche Verstummen des Kanarienvogel ein Warnsignal für etwas Größeres, Ernsteres ist, so sollten auch die Klagen der Astronominnen und Astronomen aufhorchen lassen. Denn „artificial light at night“, so es ein bestimmtes Ausmaß überschreitet, hat durchaus weitreichendere Folgen und Implikationen.

Um zunächst vom Homo Sapiens zu sprechen: Diese Übersichtsarbeit⁴⁶ fasst mögliche gesundheitlichen Risiken zusammen, die mit Lichtverschmutzung in Zusammenhang stehen könnten. Nach Ansicht der Autoren ist es plausibel, dass künstliches Licht primär den circadianen Rhythmus⁴⁷ (auch bekannt als die „innere Uhr“) beim Menschen beeinflusst. Ausgehend davon könnten dann die Folgen sein: Störung des Schlaf-Wach-Zyklus, Auswirkungen auf die elektrische Aktivität des Gehirns, Neurodegeneration und weitere biologische Prozesse. All dies kann nach Ansicht der Wissenschaftler sogar die Entstehung von Alzheimer begünstigen.

Nun nochmals ein kurzer Ausflug ins Tierreich.

Inwieweit der Mistkäfer „*Scarabaeus satyrus*“, den wir bereits kennengelernt haben, von zunehmender Lichtverschmutzung beeinträchtigt wird, wäre eine interessante Fragestellung. Dazu müssten vermutlich weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um beispielsweise zu klären, ob die Habitate des Käfers mit Gebieten hoher Lichtverschmutzung überlappen. Wenn künstliches Licht im Wesentlichen nur horizontnahe Himmelsbereiche beeinträchtigt, könnte die Sicht auf die Milchstraße weiterhin ausreichend sein, sodass die nächtliche Orientierungshilfe der Tiere nicht beeinträchtigt wird. Wenn jedoch die Lichtverschmutzung so stark ist, dass die Milchstraße überhaupt nicht mehr zu erkennen ist (wie das typischerweise in Metropolen der Fall ist), könnte dies problematisch werden⁴⁸.

Es ist aber plausibel, anzunehmen, dass Lichtverschmutzung schon deshalb einen erheblichen Einfluss auf Tier- und Pflanzenwelt hat, weil dadurch der natürliche Wechsel des Lichts zwischen Tag und Nacht gestört wird. Es gibt eine unzählige Menge an wissenschaftlichen Arbeiten zu diesem Themenfeld. Als Beispiel greife ich zunächst eine Arbeit⁴⁹ heraus, die der Hypothese nachgegangen ist, dass Lichtverschmutzung den Schlaf von Tieren stört – am Beispiel von Kohlmeisen. Das Schlafverhalten von Tieren, die in einigen Nächten künstlichem Licht ausgesetzt waren, wurde mit dem Verhalten einer Kontrollgruppe verglichen, die stets in Dunkelheit schlief. Künstliches Licht führte dazu, dass die Versuchsvögel früher aufwachten, weniger schliefen und weniger Zeit im Nistkasten verbrachten.

Ein Übersichtsartikel⁵⁰ im Onlinemagazin „The Conversation“ behandelt insbesondere das Problem, dass künstliche Lichtquellen für Insekten tödliche Fallen darstellen können. Die Tiere umkreisen das Licht unentwegt, können keine Nahrung finden, werden leicht von Raubtieren entdeckt und neigen zur Erschöpfung. Viele sterben, bevor der Morgen kommt. Ein weiterer Übersichtsartikel⁵¹ in „ScienceDirect“ behandelt den Einfluss von künstlichem Licht in der Nacht auf Insekten in größerem Detail. Er diskutiert eine Übersicht von Arbeiten, die die Auswirkungen auf verschiedene Aspekte des

Insektenlebens thematisieren – wie beispielsweise die Reproduktion, die Migration und die Beutejagd.

In einem anderen Artikel⁵² in „The Conversation“ wird berichtet, dass Lichtverschmutzung überraschenderweise auch einen Einfluss auf eine Fischart hat, die in seichten Küstengewässern in Neuseeland lebt⁵³.

Die Auswirkungen unserer Handlungen auf den Nachthimmel sind von weitreichender Bedeutung und lassen sich im Rahmen der globalen, planetaren Veränderungen betrachten, die wir mit dem Begriff des „Anthropozäns“ verbinden. Dieser Begriff wurde Anfang der 2000’er Jahre unter anderem vom niederländischen Chemiker und Atmosphärenforscher Paul Crutzen⁵⁴ in die Diskussion eingebracht und fand Eingang in die mediale Berichterstattung bei Themen wie Klimakrise und Mitweltschutz. Es soll damit zum Ausdruck gebracht werden, dass der Mensch seit einiger Zeit zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde – zu einem planetaren Einflussfaktor – geworden ist. Der Vorschlag, das „Anthropozän“ als eine neue geochronologischen Epoche formal festzulegen, wurde allerdings im März 2024 aus unterschiedlichen Gründen von der International Commission on Stratigraphy⁵⁵ abgelehnt⁵⁶.

Was können wir tun?

Wir haben gesehen, dass der natürliche dunkle Nachthimmel ein wertvolles Gut ist, dessen Erhaltung durch die immer dichtere Erdbevölkerung und die zunehmende Anzahl künstlicher Lichtquellen, sowie durch die Verdichtung des erdnahen Orbits durch Satelliten gefährdet ist. Sollte der Zugang zu einem natürlichen Nachthimmel nicht sogar als ein Menschenrecht angesehen werden, das es zu schützen gilt? Die Organisation „DarkSky International“ formuliert es so:

„We believe the natural nighttime environment is a basic human right — for every person for all time — celebrated in diverse communities’ cultures and heritage. Light justice requires responsible lighting and access to a night free of light pollution, for everyone.“⁵⁷

In der Tat haben sich in den letzten Jahren mehrere Initiativen gebildet, die das Ziel verfolgen, dieses Gut zu schützen. Darüber hinaus gibt es mittlerweile erfolgreiche Bemühungen, bestimmte Regionen der Erde als „Lichtschutzgebiete“ auszuweisen.

Lichtschutzgebiete

In einem „Lichtschutzgebiet“ werden Maßnahmen ergriffen, um die negativen Auswirkungen künstlichen Lichtes zu minimieren und so den natürlichen Nachthimmel zu schützen. Die Gemeinden in einem Lichtschutzgebiet befolgen bestimmte Beleuchtungsvorschriften und setzen Technologien ein, um die abgestrahlte Lichtmenge zu begrenzen. Darüber hinaus wird in vielen dieser Schutzgebiete Öffentlichkeitsarbeit betrieben, um Besucher für die Thematik zu sensibilisieren – ähnlich wie in Nationalparks und Biosphärenreservaten.

Ursprünglich wurden Initiativen, das natürliche Nachtlicht zu schützen, von Seiten der Astronomie vorangetrieben. Das ist naheliegend, denn deren tägliches – oder sollte man besser sagen: nächtliches – Geschäft ist die Beschäftigung mit dem Sternenhimmel. Um größere Observatorien vor störendem urbanen Streulicht zu schützen, wurden mit den betroffenen Regionalverantwortlichen Schutzzonen vertraglich vereinbart. Beispielsweise gelang es, für die Inseln La Palma und Teneriffa auf den Kanaren eine entsprechende rechtliche Grundlage zu erlangen. Seither haben verschiedene Länder Lichtschutzgebiete eingerichtet. Kanada gründete beispielsweise das Torrance Barrens

Conservation Area and Dark Sky Reserve⁵⁸. Auch einige europäische Länder folgten diesem Beispiel in den 2000er Jahren, darunter Schottland und Ungarn⁵⁹.

Einen weiteren Auftrieb bekam die „Lichtschutzbewegung“ auf einer Konferenz auf La Palma im Jahre 2007. Dort wurde das Konzept der „UNESCO-Starlight Reserves“ entwickelt, das sich an die Idee der Biosphärenreservate anlehnt⁶⁰, und es wurde dort die Starlight Foundation⁶¹ gegründet.

“An unpolluted night sky that allows the enjoyment and contemplation of the firmament should be considered an inalienable right of humankind equivalent to all other environmental, social, and cultural rights, due to its impact on the development of all peoples and on the conservation of biodiversity.”

Als weiterer wichtiger Schritt wurde dann auf der UNESCO-Welterbekonferenz in Brasília im Jahr 2010 festgestellt, dass auch ein „dunkler Nachthimmel für die Astronomie“ ein schützenswertes Objekt sei⁶².

Heute gibt es mehrere Organisationen, die unabhängig voneinander an Konzepten zum Lichtschutz arbeiten und entsprechende Systeme zur Klassifikation von solchen entwickeln: Die UNESCO, die Dark Skies Advisory Group⁶³ der Weltnaturschutzunion und DarkSky International⁶⁴.

Erwähnenswert ist das internationale Projekt „The World At Night“⁶⁵, das sich darauf spezialisiert hat, künstlerisch ansprechende Fotografien, Filme und Animationen des Nachthimmels über Natur-, Kultur- und Geschichtsdenkmälern weltweit zu produzieren und zu präsentieren.

Lichtschutzgebiete in Deutschland

In Deutschland existieren einige wenige solcher Schutzgebiete, unter anderem das UNESCO-Biosphärenreservat Rhön⁶⁶, dem von der International Dark Sky Association der Titel „Sternenpark“ verliehen wurde. Ein Beispiel, wie in dieser Region Lichtschutz umgesetzt wird: Die im Sternenpark Rhön angesiedelten Kommunen sind eine freiwillige Selbstverpflichtung eingegangen, öffentliche Beleuchtung soweit wie möglich zu reduzieren und an den Bedarf anzupassen. Maßnahmen sind hierbei eine zielgerichtete Lichtlenkung (statt Abstrahlung großer Leistung nach oben in den Himmel), warme Lichtfarben (statt grell blau), angepasste Lichtmengen, bedarfsorientierte und zielgerichtete Beleuchtung. Um die Kommunen, aber auch ansässige Unternehmen und Privathaushalte bei der Planung und Umsetzung zu unterstützen, wird umfangreiches Informationsmaterial kostenlos angeboten. So kann man einer Broschüre beispielsweise entnehmen, dass Solarleuchten im Garten – so beliebt sie auch sind – meist nicht als Lichtquelle, sondern nur als Dekoration gedacht sind und für Insekten zusätzlichen Stress bedeuten.

Weitere Lichtschutzgebiete in Deutschland sind: Der Sternenpark Eifel⁶⁷, der Sternenpark Winklmoosalm⁶⁸ bei Reit im Winkl, der Natur- und Sternenpark Westhavelland⁶⁹, sowie die erste deutsche „Sternenstadt“ Fulda⁷⁰. Geplant und teilweise in der Projektphase sind der Sternenpark Schwäbische Alb⁷¹ und der Naturpark Nossentiner/Schwinzer Heide⁷².

Ein bekanntes Lichtschutzgebiet in Frankreich ist die Bergregion um den Pic du Midi in den Pyrenäen, die von der International Dark Sky Association als „International Starry Sky Reserve“ ausgewiesen wurde⁷³. Einen besonderen Weg geht man in der Metropole Strasbourg⁷⁴. Dort wurde 2022 damit begonnen, die Straßenbeleuchtung zu reduzieren, sofern dies ohne die Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit möglich ist. Auf diese Weise soll stufenweise eine nachhaltigere und energiesparendere Beleuchtung etabliert werden.

Vielleicht bekommen wir als Menschheit die Kurve hin und schaffen es, den dunklen Nachthimmel zu erhalten. Denn natürlich dunkle Himmel sind, wie saubere Luft und sauberes Wasser, eine Ressource,

auf die jeder Mensch ein Anrecht hat. Auch in Zukunft soll niemandem das Erlebnis des nächtlichen Sternenhimmels, das Carl Sagan⁷⁵ so wunderbar beschrieben hat, vorenthalten bleiben.

“Even today the most jaded city dweller can be unexpectedly moved upon encountering a clear night sky studded with thousands of twinkling stars. When it happens to me after all these years it still takes my breath away.”

Peter Gutsche | www.silberspur.de

¹ Sagan, C. (1994): „Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space“. Ballantine Books, The Random House Publishing Group (Chapter 8)

² Angenommen, die Erde wäre – wie die Venus – permanent von dichten Wolken bedeckt gewesen, seit Jahrmilliarden. Es hätte sich dort intelligentes, sich selbst bewusstes Leben entwickelt, abgeschirmt von einem Sternenhimmel, wie wir ihn kennen. Hätten diese Wesen irgendwann damit begonnen, Astronomie zu betreiben? Wären „Religionen“ entstanden, eine Technologie“? Um präzise zu sein: Nehmen wir, der Einfachheit halber, eine Atmosphäre wie auf der Erde mit einer aus Wassertropfen bestehenden Wolkendecke an, die aber permanent die Planetenoberfläche bedecken würde. Sichtbares Licht und höherfrequente elektromagnetische Strahlung würden von einer solchen Atmosphäre durch die Wolkendecke schon nach einer geringen Distanz absorbiert. Langwelligere Strahlung im Radiowellenbereich kann Wolken durchdringen. Allerdings gibt es bisher keine Hinweise, dass Tiere auf der Erde einen Sinn für Radiowellen entwickelt hätten (außer dass Radiowellen offenbar den magnetischen Sinn von Zugvögeln stören können, siehe: Vácha, M., Půžová, T., Kvícalová, M. (2009): „Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach“. J Exp Biol (2009) 212 (21): 3473–3477

(<https://journals.biologists.com/jeb/article/212/21/3473/18994/Radio-frequency-magnetic-fields-disrupt>)). Das ist auch plausibel, denn Strahlung im Radiowellenbereich hat eine zu geringe Energie, um Elektronenzustände in Molekülen zu verändern. Allerdings gibt es hier noch Bedarf an Forschung, siehe: <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/emf/stellungnahmen/emf-tiere-und-pflanzen.html>.

Abgesehen davon, dass sich dann auch eine intelligente Spezies ohne die sinnliche Erfahrung des Sternenhimmels entwickelt hätte: vielleicht würde sie unter einem solchen permanenten Wolkenhimmel zuerst anfangen, Radioastronomie zu betreiben. Wer weiß.

³ Diese Fußnote kommentiert die die unsäglich vielen Fußnoten, die auf den folgenden Seiten noch anzutreffen sind. Der Text kann – so hoffe ich – gewinnbringend auch ohne sie gelesen werden. Die Fußnoten sind gedacht für diejenigen, die sich bei einem bestimmten Thema mehr ins Detail gehen möchten. In den meisten Fällen gibt es Referenzen auf wissenschaftliche Arbeiten. Zu diesem Thema gibt es eine unübersichtliche Fülle an Arbeiten, und ich habe, als wissenschaftlicher Laie, versucht, einige repräsentative Studien auszuwählen. Sollte jemandem ein Fehler, eine Fehleinschätzung oder eine wichtige Lücke auffallen, wäre ich über jeden Hinweis sehr dankbar (mail@silberspur.de).

⁴ Das obige Foto habe ich auf der Hornisgrinde im Nordschwarzwald gemacht. Die Lichter unter dem Nebel stammen vom Großraum Strasbourg in der Rheinebene. In hoher Auflösung: <https://www.silberspur.de/topics/light-pollution/hornisgrinde-fog.jpg>.

⁵ Alle hier abgebildeten Fotos stammen ausschließlich von mir.

⁶ Siehe: <https://www.landmuseum-vorgeschichte.de/himmelscheibe-von-nebra.html>.

⁷ Natürlich bieten auch die Sonne am Tag und der Mond in der Nacht eine Hilfe bei der Orientierung. Da sich Sonne, Mond und Erde im Laufe des Jahres relativ zueinander bewegen, ändern sich die Auf- und Untergangspositionen von Sonne und Mond am Horizont im Laufe des Jahres beziehungsweise eines Monats ganz erheblich. Die Sterne, obgleich sie als Ganzes einmal in 24 Stunden im die Erde zu rotieren scheinen, behalten aber im Laufe des Jahres ihre Positionen relativ zueinander bei. Sterne gehen immer an exakt derselben Stelle auf oder unter. Man spricht daher vom Fixsternhimmel. Dass sich der Fixsternhimmel während der Menschheitsgeschichte nicht verändert hat, stimmt aber nicht ganz. Hier sind zwei Phänomene zu nennen, die einen Einfluss machen. Einerseits führt die Erdachse einmal in ungefähr 26.000 Jahren eine langsam kreiselnde Bewegung durch, die auch als Präzession der Erdachse bekannt ist. Daher verändern sich die Positionen der Himmelpole relativ zu den Sternkonstellationen in einem Zeitmaßstab von mehreren Tausend Jahren deutlich. Der Polarstern war vor Tausenden von Jahren nicht beim Himmelsnordpol lokalisiert. Andererseits bewegen sich die Sterne in der Galaxie in einem sehr langen Zeiträumen (wir sprechen hier von Hunderten von Millionen Jahren) um das galaktische Zentrum. Daher verändert sich die scheinbare Position sehr nahe gelegener Sterne im Laufe der Zeit und damit die Konstellationen selbst. Es wäre sicher interessant, zu erforschen, ob sich diese Effekte in sehr frühen Überlieferungen zur Himmelsnavigation finden und rekonstruieren lassen. Die Präzession der Erdachse wurde übrigens von Hipparchus (geboren um 190 vor Chr.) entdeckt, indem er Sternpositionen, die zu seiner Zeit ermittelt wurden, mit Beobachtungen früherer Astronomen verglich. Hierbei bezog er sich auf Daten zu Sternbedeckungen durch den Mond: Ereignissen, bei denen Sternorte im Tierkreis sehr genau bestimmt werden konnten. Er bemerkte, dass die Positionen der

Sterne sich langsam, aber kontinuierlich verschoben, was darauf hindeutete, dass die Erdachse sich im Laufe der Zeit leicht verlagerte.

⁸ Lewis, D. (1972): „We, the navigators : the ancient art of landfinding in the Pacific“. Australian National University Press.

⁹ In Äquatornähe gehört hierzu beispielsweise das auffällige Sternbild Orion.

¹⁰ Wir sprechen hier von Gegenden in Äquatornähe, wo der nördliche und südliche Himmelspol relativ nahe beim nördlichen beziehungsweise südlichen Horizont sind. Dazu später mehr.

¹¹ Siehe: Lewis, D. (1972). „We, the navigators : the ancient art of landfinding in the Pacific“. Australian National University Press. Kapitel 4.

¹² Auf folgender Seite wird die Verwendung eines Sternkompasses im Detail erklärt:

https://archive.hokulea.com/ike/hookele/on_wayfinding.html. Sie stammt von Charles Nainoa Thompson, einem hawaiianischen Navigator. Er ist der erste Hawaiianer, der seit dem 14. Jahrhundert die alte polynesischen Kunst der Navigation praktiziert hat. Er navigierte ohne die Hilfe moderner Instrumente von Hawaii zu anderen Inselnationen in Polynesien.

¹³ Auf der Nordhalbkugel orientiert man sich am Polarstern (Polaris) und auf der Südhalbkugel kann man den Himmelspol in der Nähe des Kreuz des Südens leicht ermitteln. Weitere Informationen zum „star compass“: https://archive.hokulea.com/ike/hookele/on_wayfinding.html.

¹⁴ Sobel, D. (1995): „Longitude: The True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time“. Walker & Company.

¹⁵ Es gibt eine unübersichtliche Vielzahl von Arbeiten zum Einfluss des nächtlichen Sternenhimmels auf die Tierwelt. Der folgende Artikel gibt einen guten Überblick über Beispiele aus dem Tierreich mit vielen Referenzen zu Publikationen: Foster, J.J., Smolka, J., Nilsson, D.-E. und Dacke, M. (2018): „How animals follow the stars“. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, Volume 285 (<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2017.2322>).

¹⁶ Ein Beispiel: „Emlen S. (1967): Migratory orientation in the Indigo Bunting, *Passerina cyanea*. Part II: mechanism of celestial orientation“. The Auk, Volume 84, Issue 4, 1 October 1967, Pages 463–489. (<https://academic.oup.com/auk/article/84/4/463/5198008>).

¹⁷ Mouritsen, H., Larsen. O.N. (2001): „Migrating songbirds tested in computer-controlled Emlen funnels use stellar cues for a time-independent compass“. Journal of Experimental Biology (<https://journals.biologists.com/jeb/article/204/22/3855/32913/Migrating-songbirds-tested-in-computer-controlled>). Die Tiere wurden hierbei in einem sogenannten Emlen-Trichter in einem Planetarium beobachtet. Der Emlen-Trichter wurde 1966 von Stephen Thompson Emlen und John Thompson Emlen entwickelt, um das Verhalten von Vögeln während der Zuginruhe zu beobachten und systematisch zu erforschen. Das Gerät besteht aus einem trichterförmigen Behälter, in dem ein Vogel platziert werden kann. Damit das Tier nicht wegfliegen kann, ist an der Oberseite des Trichters ein Netz angebracht. In der Originalversion dieser Apparatur ist der Trichter so präpariert, dass der Vogel beim Hochhüpfen Spuren in einem Medium wie Tinte oder Thermopapier hinterlässt. Die Spuren können später im Hinblick auf Häufigkeit und Richtung ausgewertet werden. Für die zitierte neuere Arbeit entwickelten die Wissenschaftler einen computergestützten Emlen-Trichter, der es erlaubte, die Vögel kontinuierlich zu überwachen, ohne sie zu stören. John Thompson Emlen und Stephen Thompson Emlen sind amerikanische Biologen. John Thompson Emlen lebte von 1908 bis 1997 und ist der Vater von Stephen Thompson Emlen, einem amerikanischen Ornithologen, Emeritus an der Cornell University.

¹⁸ Damit bezeichnet man die Sterne in der Nähe des Himmelspols, die im Laufe der Nacht niemals untergehen. Genau an den Polen der Erde besteht der gesamte sichtbare Sternenhimmel aus Zirkumpolarsternen – diese gehen dort niemals auf oder unter. Genau auf dem Äquator gibt es keine Zirkumpolarsterne – dort liegen die beiden Himmelpole genau am Horizont (im Norden und Süden). Um nochmal zu den Karolinen-Inseln zurück zu kehren: Dort, auf 7° nördlicher Breite, sind die (nördlichen) Zirkumpolarsterne auf einen kleinen Kreis in einem Radialabstand von 7° vom nördlichen Himmelspol begrenzt. In Deutschland auf ungefähr 50° nördlicher Breite ist dieser Kreis deutlich größer.

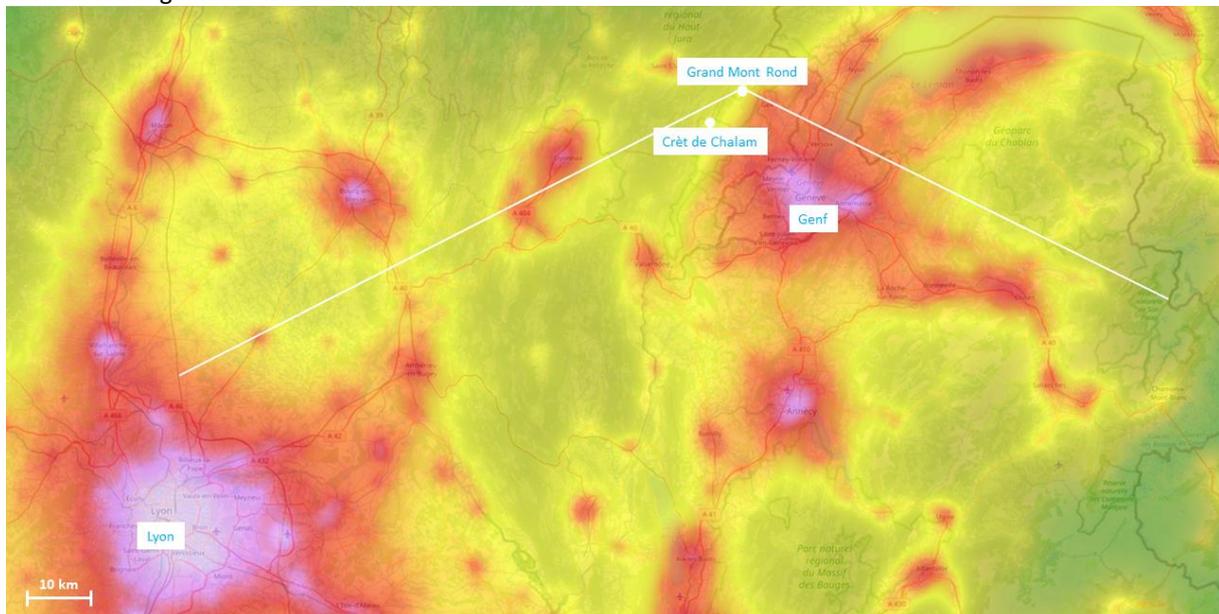
¹⁹ In einer Arbeit wurde das Verhalten der Tiere im Planetarium Johannesburg untersucht. Die Käfer wurden mit ihren Dungkugeln aus der Mitte eines kreisförmigen Areals aus flachem und ebenem Sand freigelassen, das von einer kreisförmigen Mauer umgeben war. Die Tiere wurden bei ihrer Bewegung von oben mit einer Infrarotkamera gefilmt. Die Zeit, die benötigt wurde, um vom Zentrum der Arena zum Rand zu rollen, wurde als Indikator für die Geradlinigkeit der Spur verwendet. Das Experiment wurde unter verschiedenen Bedingungen mit unterschiedlichen künstlich projizierten Sternenhimmeln durchgeführt: Viele Sterne und Milchstraße sichtbar, nur Milchstraße sichtbar, nur die hellsten Sterne sichtbar, komplette Dunkelheit. Die Ergebnisse legen

nahe, dass in einer dunklen, mondlosen Nacht das Helligkeitsband der Milchstraße alleine als Orientierungshilfe für die Tiere ausreicht. Siehe: Dacke, M., Baird, E., Byrne, M., Scholtz, C.H., Warrant, E. J. (2013): „Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation“, *Current Biology* 23, 298–300, February 18 ([https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(12\)01507-2](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(12)01507-2)). Eine Arbeit neueren Datums: Foster, J. J., el Jundi, B., Smolka, J., Khaldy, L., Nilsson, D.-E., Byrne, M. J. und Dacke, M. (2017): „Stellar performance: mechanisms underlying Milky Way orientation in dung beetles“, *Phil. Trans. R. Soc.* (<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2016.0079>). In dieser Arbeit wurden Käfer in einer Art „Mini-Planetarium“ platziert und es wurde dort unter unterschiedlichen Lichtbedingungen ihr Verhalten beobachtet. Die Wissenschaftler simulierten den südafrikanischen Nachthimmel basierend auf kalibrierten Fisheye-Aufnahmen des gesamten Sternenhimmels, die in Südafrika aufgenommen wurden. Die Aufnahmen wurden anschließend gefiltert, um die Lichtverhältnisse darzustellen, die sich dem verschwommen sehenden Facettenauge der Tiere darstellen. Hierbei wurde die Frage untersucht, welche Strategie die Käfer zur Orientierung anwenden: eine Mustererkennungsstrategie, das Fixieren des hellsten Punktes oder den Vergleich mit einem memorisierten Intensitätsgradienten. Dass die Tiere letztere Strategie anwenden, wird auch dadurch nahegelegt, dass *Scarabaeus satyrus* über eine recht schwache Sehschärfe zugunsten einer höheren Lichtempfindlichkeit verfügt.

²⁰ Im Englischen ist auch der Begriff „artificial light at night“ (ALAN) gebräuchlich.

²¹ Zitiert aus Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A. und Furgoni, R. (2016): „The new world atlas of artificial night sky brightness“. *Science Advances* 2016 Jun; 2(6) (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4928945/>).

²² Um die geografischen Verhältnisse bei diesem Foto zu illustrieren, habe ich auf folgender Karte, die den im Bild überblickten Bereich abdeckt, die wichtigsten Fixpunkte des Fotos eingezeichnet. Um die (von Satelliten gemessene) geografische Verteilung des künstlichen Lichtes zu illustrieren, wurde auf diese Karte auch eine Ebene aus der „Light Pollution Map“ gelegt (in der Bereiche mit besonders viel Lichtverschmutzung rot bis violett und solche mit weniger künstlichem Licht grün bis gelb dargestellt sind). Aus dem Vergleich mit dieser Karte wird unmittelbar klar, dass das von den Wolken reflektierte helle Licht rechts auf dem Foto vom Großraum Lyon stammen muss. Die Großstadt selbst bleibt auf dem Foto allerdings von den weiter entfernten Juragipfeln und den Hügeln im Département Ain verdeckt. Lyon ist mehr als 100 Kilometer vom Standpunkt entfernt, an dem das Foto gemacht wurde.



Diese Karte verwendet (wie auch die folgenden Karten) Screenshots aus der online „Light Pollution Map“ (<https://www.lightpollutionmap.info/>). Diese wiederum basiert auf den Daten von Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A. und Furgoni, R. (2016): *The new world atlas of artificial night sky brightness*. *Science Advances* 2016 Jun; 2(6) (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4928945/>) und beinhaltet eine Ebene aus OpenStreetMap, siehe: <https://www.openstreetmap.org/copyright>. Auf diese „Lichtverschmutzungskarten“ komme ich nochmal etwas später zu sprechen.

²³ Siehe: <https://blackmarble.gsfc.nasa.gov/>.

²⁴ Siehe: <https://www.lightpollutionmap.info/>.

-
- ²⁵ Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A. und Furgoni, R. (2016): „The new world atlas of artificial night sky brightness“. Science Advances 2016 Jun; 2(6) (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4928945/>).
- ²⁶ Christopher C. M. Kyba et al. „Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022“. Science 379, 265-268 (2023). DOI:10.1126/science.abq7781 (<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abq7781>).
- ²⁷ Ein Blick auf die Webseite <https://www.flightradar24.com/48.55.6.55/7> zeigt sofort das sehr hohe Flugverkehrsaufkommen über dem südlichen Schwarzwald.
- ²⁸ Die zeitliche Entwicklung von 2019 bis 2023 kann gut hier abgelesen werden: <https://www.statista.com/statistics/1224164/starlink-satellite-launches/>.
- ²⁹ Mal ganz abgesehen von dem Einfluss auf den Nachthimmel, stellen abstürzende Satellitenteile offenbar ein zunehmendes „handfestes“ Problem dar, wie in diesem kanadischen Beitrag erläutert: <https://regina.ctvnews.ca/from-outer-space-sask-farmers-baffled-after-discovering-strange-wreckage-in-field-1.6880353>. Ein anderer Beitrag: <https://www.cbc.ca/news/science/space-debris-responsibility-1.7211473>.
- ³⁰ Lawler, S.M., Boley, A.C., und Rein, H. (2022): „Visibility Predictions for Near-future Satellite Megaconstellations: Latitudes near 50° Will Experience the Worst Light Pollution“. The Astronomical Journal, 163:21 (14pp), 2022 January (<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/ac341b>). Siehe auch Webseite von Prof. Samantha Lawler: <https://uregina.ca/~slb861/about.html>.
- ³¹ Kocifaj, M., Kundracik, F., Barentine, J. C. und Bará, S. (2021): „The proliferation of space objects is a rapidly increasing source of artificial night sky brightness“, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), 504, L40 (<https://academic.oup.com/mnras/article/504/1/L40/6188393>). Wohlgermerkt, wird in dieser Arbeit die Helligkeitszunahme des Himmels abgeschätzt, die durch Weltraumschrott, das aus unzähligen kleineren Trümmerteilen besteht, verursacht wird. Die Anzahl der Satelliten im Weltraum spielt hier nur indirekt eine Rolle, insofern die Menge an Weltraumschrott mit einer Anzahl aktiver Satelliten im All steigt (wegen dem Risiko von Zusammenstößen).
- ³² Nandakumar, S., Eggl, S., Tregloan-Reed, J. et al. „The high optical brightness of the BlueWalker 3 satellite“. Nature 623, 938–941 (2023) (<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06672-7>).
- ³³ Siehe: [https://cps.iau.org/documents/41/Consolidated Recommendations for Satellite Operators 8.1.2023.pdf](https://cps.iau.org/documents/41/Consolidated_Recommendations_for_Satellite_Operators_8.1.2023.pdf).
- ³⁴ Scheinbare Helligkeiten in der Astronomie werden mit der Einheit *mag* (für Magnitude) angegeben, der eine logarithmische Skala zugrunde liegt. Und je heller ein Objekt am Himmel erscheint, desto geringer der *mag*-Wert.
- ³⁵ Venkatesan, A., Lowenthal, J. D., Arion, D., Castro, F. A., Bannister, M., Barentine, J., Begay, D., Chavez, J.-C., Carttar, S. and various institutions: „SATCON2: Community Engagement Working Group Report“ (2021). Astronomy: Faculty Publications, Smith College, Northampton, MA. (https://scholarworks.smith.edu/ast_facpubs/79). Dort heißt es: „The human right to see the naturally dark, unpolluted, starry night sky has been articulated in the Declaration in Defense of the Night Sky and the Right to Starlight (Starlight Foundation, 2007), and Resolution B5 in Defence of the Night Sky and the Right to Starlight (International Astronomical Union, 2009), and by the US National Park Service, which operates an extraordinarily popular Night Skies program whose motto is ‘Half the Park is After Dark’ and whose philosophy is that naturally dark skies are, like clean air and clean water, a natural resource to which every human has a right (National Park Service, 2021). Satellite constellations have the potential to dramatically and irrevocably alter the naked-eye appearance of the night sky.“
- ³⁶ Lawler, S. (2023): „Bright satellites are disrupting astronomy“. Nature, Vol 623, pages 917-918 (<https://www.nature.com/articles/d41586-023-03610-5.epdf>).
- ³⁷ Siehe: <https://www.kesslerrebellion.com/>.
- ³⁸ Kessler, D J., Cour-Palais, B G. (1978): „Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt“. Journal of Geophysical Research, Vol 83, pages 2637-2646 (<https://doi.org/10.1029/JA083iA06p02637>).
- ³⁹ Jahrzehnte nach der Publikation der Originalarbeit klärt Donald J. Kessler dies in einem Artikel auf: Kessler, D. J., Johnson, N. L., Liou, J.-C und Matney, M. (2010): „The Kessler Syndrome: Implications to Future Space operations“. Advances in the Astronautical Sciences. 137. Darin: „There is little doubt that the result of the so-called ‘Kessler Syndrome’ is a significant source of future debris, as predicted over 30 years ago. Although new operational procedures have been developed over this period that have slowed the growth in orbital debris, these procedures have not been adequate to prevent growth in the debris population from random collisions.“
- ⁴⁰ Nomura, K., Rella, S., Merritt, H., Baltussen, M., Bird, D., Tjuka, A., & Falk, D. (2024): „Tipping Points of Space Debris in Low Earth Orbit“. International Journal of the Commons, 18(1), pp. 17–31

-
- (<https://doi.org/10.5334/ijc.1275>). Eine Auswahl von weiteren Arbeiten und Artikeln aktuelleren Datums: Drmola J., Hubik, T.: „Kessler Syndrome: System Dynamics Model“. Space Policy, Volumes 44–45, August 2018, Pages 29–39 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265964617300966>).
- ⁴¹ Hudson, J. (2023). KESSYM: A stochastic orbital debris model for evaluation of Kessler Syndrome risks and mitigations. Journal of Student Research, 12(1). <https://doi.org/10.47611/jsrhs.v12i1.4013>
- ⁴² Konkret wird auf die Modelle MASTER-8 der ESA und ORDEM der NASA Bezug genommen.
- ⁴³ Siehe: <https://www.spektrum.de/news/atmosphaere-vergluehende-satelliten-schaedigen-die-ozonschicht/2219587> und <https://phys.org/news/2024-06-satellite-megaconstellations-jeopardize-recovery-ozone.html>.
- ⁴⁴ Im Internet kann man sich auf einer Seite der NASA sehr schön anschauen, wie Lichtverschmutzung in den letzten Jahren zugenommen hat, siehe: <https://svs.gsfc.nasa.gov/30919>.
- ⁴⁵ Siehe: <https://cosmosmagazine.com/weekly-edition/flagstaff-light-pollution/>. In diesem Artikel wird der Astronom James Lowenthal vom Smith College, Massachusetts, folgendermaßen zitiert: „We astronomers are sort of the canary in the coal mine“.
- ⁴⁶ Karska, J., Kowalski, S., Gładka, A. et al: „Artificial light and neurodegeneration: does light pollution impact the development of Alzheimer’s disease?“. GeroScience 46, 87–97 (2024) (<https://doi.org/10.1007/s11357-023-00932-0>). Diese Arbeit fasst Ergebnisse einer Vielzahl von Studien zusammen.
- ⁴⁷ Ein biologischer Prozess im Körper, der etwa alle 24 Stunden wiederkehrt und verschiedene physiologische und Verhaltensänderungen wie den Schlaf-Wach-Zyklus steuert. Für den Nachweis, wie dieser Prozess durch Gene und Hormone gesteuert wird, wurde 2017 der Medizin-Nobelpreis verliehen, siehe: <https://www.dw.com/de/medizin-nobelpreis-f%C3%BCr-die-erforschung-der-inneren-uhr/a-40775026>.
- ⁴⁸ Diese Frage wird für unseren alten Bekannten, Scarabaeus satyrus, in diesem Artikel in „The Conversation“ diskutiert: Käfer und Orientierung an der Milchstraße: <https://theconversation.com/skyglow-forces-dung-beetles-in-the-city-to-abandon-the-milky-way-as-their-compass-165110>.
- ⁴⁹ Raap, T., Pinxten, R. & Eens, M.: „Light pollution disrupts sleep in free-living animals“. Sci Rep 5, 13557 (2015). (<https://doi.org/10.1038/srep13557>).
- ⁵⁰ Siehe: <https://theconversation.com/the-surprising-reason-why-insects-circle-lights-at-night-they-lose-track-of-the-sky-221387>.
- ⁵¹ Avalon C.S. Owens, Précillia Cochard, Joanna Durrant, Bridgette Farnworth, Elizabeth K. Perkin, Brett Seymoure: „Light pollution is a driver of insect declines“. Biological Conservation, Volume 241, 2020, (<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108259>).
- ⁵² Siehe: <https://theconversation.com/light-pollution-affects-coastal-ecosystems-too-this-underwater-canary-is-warning-of-the-impacts-226599>. Darin: „Patterns in nocturnal illumination (known as artificial light at night, or ALAN) of surface waters have a surprisingly large impact on these fish. The prevalence of light pollution from cities (in this case New Zealand’s capital Wellington) can potentially interfere with their breeding cycles.“
- ⁵³ Es gibt, wie gesagt, eine unüberschaubare Vielfalt an Arbeiten zum Thema. Stellvertretend möchte ich folgende umfangreiche Metastudie anführen: Gaston, K. J., Gardner, A. S., Cox, D. T. C.: „Anthropogenic changes to the nighttime environment“. BioScience, Volume 73, Issue 4, April 2023, Pages 280–290 (<https://doi.org/10.1093/biosci/biad017>). Auf der folgenden folgenden Seite findet man Links eine Fülle von Wissenschaftlichen Artikeln zum Thema: <https://darksky.org/resources/what-is-light-pollution/effects/wildlife-ecosystems/>.
- ⁵⁴ Siehe: Crutzen, P.J. (2002): „Geology of mankind“. Nature Vol 415 (<https://www.nature.com/articles/415023a>).
- ⁵⁵ <https://stratigraphy.org/>
- ⁵⁶ Siehe zum Beispiel: <https://www.science.org/content/article/anthropocene-dead-long-live-anthropocene> oder auch ein Beitrag vom Deutschlandfunk: <https://www.deutschlandfunk.de/entscheidung-expertenkommission-wir-leben-nicht-im-anthropozoen-dlf-7981bc76-100.html>.
- ⁵⁷ Siehe: <https://darksky.org/about/our-strategy/>.
- ⁵⁸ Siehe: <https://www.torrancebarrens.com/>.
- ⁵⁹ Siehe <https://forestryandland.gov.scot/visit/forest-parks/galloway-forest-park> und <https://zselic.csillagpark.hu/>.
- ⁶⁰ Siehe: https://www.starlight2007.net/index_option_com_content_view_article_id_185_starlight-declaration_catid_62_the-initiative_itemid_80_lang_en.html.
- ⁶¹ Siehe: <https://en.fundacionstarlight.org/>.
- ⁶² Auf der Seite des „Portal to the Heritage of Astronomy“ steht eine Studie hierzu zum Download bereit: <https://web.astronomicalheritage.net/index.php/thematic-study-1>. Das darin enthaltene Kapitel 16 über

„starlight, dark-sky areas and observatory sites“ beginnt mit den folgenden Sätzen: „The sky, our common and universal heritage, is an integral part of the environment perceived by humanity. (...) Many different factors, but most notably the continued increase in light pollution, are turning this resource—virtually unchanged throughout the history of humankind—into an extremely scarce asset. An essential element of our civilisation and culture is rapidly becoming lost, and this loss is affecting most countries on Earth. Under these conditions, certain places whose sky is still dark, and whose scientific cultural or environmental values depend on starlight, should be recognized and preserved as points of reference to a common heritage in danger.“

⁶³ Siehe: <https://darkskeyparks.org/>. Hier gibt es eine Liste von „dark sky places“ weltweit: https://darkskeyparks.org/dsag/2021-02-28_DSAG_word_list.htm.

⁶⁴ Siehe: <https://darksky.org/>.

⁶⁵ Siehe: <https://twanight.org/>.

⁶⁶ Siehe: <https://www.biosphaerenreservat-rhoen.de/natur/sternenpark-rhoen>.

⁶⁷ Siehe: <https://www.nationalpark-eifel.de/de/nationalpark-erleben/sternenpark/>.

⁶⁸ Siehe: <https://www.sternenpark-winklmoosalm.de/>.

⁶⁹ Siehe: <https://www.westhavelland-naturpark.de/>.

⁷⁰ Siehe: <https://www.sternenstadt-fulda.de/>.

⁷¹ Siehe: <https://www.sternenpark-schwaebische-alb.de/>.

⁷² Siehe: <https://www.naturpark-nossentiner-schwinzer-heide.de/>.

⁷³ Siehe: <https://www.valleesdegavarnie.com/en/la-reserve-internationale-de-ciel-etoile-du-pic-du-midi/>.

⁷⁴ Siehe: <https://www.francebleu.fr/infos/societe/strasbourg-va-eteindre-d-ici-un-an-la-moitie-de-son-eclairage-public-la-nuit-2989070>.

⁷⁵ Aus dem Zitat von ganz am Anfang des Textes: Sagan, C. (1994): „Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space“. Ballantine Books, The Random House Publishing Group (Chapter 8).