Warum es nachts (bald nicht mehr) dunkel ist-Teil 3¹

"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 Sagan²

Das Erlebnis des bestirnten Himmels ist eine Erfahrung, die Menschen seit Jahrtausenden teilen³. 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?

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 ist⁴. 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 derzeit⁵, und es ist geplant, dass SpaceX eine vierstellige Anzahl von Satelliten in den nächsten wenigen Jahren in den Orbit einbringt.⁶

Wissenschaftlerinnen⁷ 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 $40^{\circ}N$ and S have the most sunlit satellites (...) But due to Earth's shadow, there is a period of few-to-no sunlit satellites for \sim 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 Arbeit⁸ 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 erreichen⁹. Die International Astronomical Union (IAU) empfiehlt für Satelliten im niedrigen Erdorbit, eine maximale scheinbare Helligkeit von +7 mag nicht zu überschreiten¹⁰. Daher übertrifft die maximale scheinbare Helligkeit von BlueWalker 3 den durch die IAU empfohlenen "Grenzwert" um mehr als 400-fache¹¹.

Es gibt aber auch Initiativen, die versuchen, dieser Entwicklung entgegen zu steuern. Die SATCON2-Gruppe¹² 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 einsetzt¹³, 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"¹⁴ versuchen Forschende, unter ihnen Samantha Lawler, die Öffentlichkeit gegen den unkontrollierten Einsatz sehr heller Satelliten zu mobilisieren und auf eine Regulierung dieser Entwicklung hinzuarbeiten.

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. Kessler¹⁵ 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 eingebracht¹⁶.

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 Arbeit¹⁷ 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 2023¹⁸ 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 werden¹⁹. 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 wurde²⁰.

Zum vierten Teil geht es hier entlang: https://www.silberspur.de/articles/warum-es-nachts-bald-nicht-mehr-dunkel-ist-04.pdf
Peter Gutsche www.silberspur.de

https://www.silberspur.de/articles/warum-es-nachts-bald-nicht-mehr-dunkel-ist-01.pdf

Teil 2: Lichtverschmutzung durch irdische Lichtquellen

https://www.silberspur.de/articles/warum-es-nachts-bald-nicht-mehr-dunkel-ist-02.pdf

Teil 3: Lichtverschmutzung durch Flugzeuge und Satelliten

https://www.silberspur.de/articles/warum-es-nachts-bald-nicht-mehr-dunkel-ist-03.pdf

Teil 4: Auswirkungen von Lichtverschmutzung jenseits der Astronomie und Fotografie

https://www.silberspur.de/articles/warum-es-nachts-bald-nicht-mehr-dunkel-ist-04.pdf

Teil 5: Was können wir tun

https://www.silberspur.de/articles/warum-es-nachts-bald-nicht-mehr-dunkel-ist-05.pdf

(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.

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.

¹ Der Text ist Teil eines Essays mit den folgenden Kapiteln:

Teil 1: Wie der nächtliche Sternenhimmel das Leben von Mensch und Tier beeinflusst

² Sagan, C. (1994): "Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space". Ballantine Books, The Random House Publishing Group (Chapter 8)

³ 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 ist 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., Kvíćalová, M. (2009): "Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach". J Exp Biol (2009) 212 (21): 3473–3477

⁴ Ein Blick auf die Webseite <u>https://www.flightradar24.com/48.55,6.55/7</u> zeigt sofort das sehr hohe Flugverkehrsaufkommen über dem südlichen Schwarzwald.

⁵ Die zeitliche Entwicklung von 2019 bis 2023 kann gut hier abgelesen werden: https://www.statista.com/statistics/1224164/starlink-satellite-launches/.

⁶ Mal ganz abgesehen von dem Einfluss auf den Nachthimmel, stellen abstürzende Satellitenteile offenbar ein zunehmendes "handfestes" Problem dar, wie in diesem kanadischen Beitrag erläutert:

⁷ 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.

⁸ 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/mnrasl/article/504/1/L40/6188393). Wohlgemerkt, 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 Risko von Zusammenstößen).

https://cps.iau.org/documents/41/Consolidated Recommendations for Satellite Operators 8.1.2023.pdf.

- ¹¹ 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.
- ¹² 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."
- ¹³ Lawler, S. (2023): "Bright satellites are disrupting astronomy". Nature, Vol 623, pages 917-918 (https://www.nature.com/articles/d41586-023-03610-5.epdf.
- ¹⁴ Siehe: https://www.kesslerrebellion.com/.
- ¹⁵ 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).
- ¹⁶ 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."
- ¹⁷ 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).
- ¹⁸ 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
- ¹⁹ Konkret wird auf die Modelle MASTER-8 der ESA und ORDEM der NASA Bezug genommen.
- ²⁰ 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.

⁹ 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). ¹⁰ Siehe: