



---

## Sachstand

---

### **Leuchtende Nachtwolken** Mögliche Einflüsse und Auswirkungen

**Leuchtende Nachtwolken**

## Mögliche Einflüsse und Auswirkungen

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 166/19  
Abschluss der Arbeit: 14. Februar 2020  
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und  
Forschung

---

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

---

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Forschungsaktivitäten zum Verständnis der Leuchtenden Nachtwolken</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Forschungsaktivitäten zu möglichen Auswirkungen</b>	<b>9</b>
3.1.	Temperatur	9
3.2.	Meteorstaub	10
3.3.	Solare Einflüsse	11
3.4.	Raketenstarts	12
<b>4.</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>14</b>

## 1. Einleitung

Leuchtende Nachtwolken (noctilucent clouds, NLC) sind Ansammlungen von Eiskristallen, die als silbrig-weiß bis blaue Wolkenscheiter – meistens in den Sommermonaten um die Sonnenwende Richtung Norden – gesehen werden können. Sichtbar sind sie, wenn die Sonne zwischen 6° und 16° unter dem Horizont steht. „Im Gegensatz zu anderen Wolkenarten, die maximal eine Höhe von 13 km erreichen, treten die Leuchtenden Nachtwolken in einer Höhe von 81 bis 87 km auf. Aufgrund der großen Höhe können die NLC nach Sonnenuntergang oder vor Sonnenaufgang von der Sonne angestrahlt und damit sichtbar werden, weil der Himmel schon dunkel ist. Für die Entstehung der NLC muss die Temperatur der Mesopause<sup>1</sup> sehr niedrig sein (unter 140 K = -134 °C). Diese tiefe Temperatur stellt sich zwischen Mitte Mai und Mitte August ein. Vor allem im Juni und Juli sind NLC zu beobachten. Die Entstehung der NLC ist wissenschaftlich nicht abschließend geklärt. Eiskristalle, vulkanischen Asche oder Meteoritenstaub können als Kondensationskeime dienen.“<sup>2</sup>

---

1 Die Mesopause ist eine Ebene des Temperaturminimums zwischen der Mesosphäre und Thermosphäre in ca. 90 km Höhe. In ihr liegt das absolute Temperaturminimum der Atmosphäre. Sie ist die kälteste Region der Atmosphäre.

Die Mesosphäre ist eine Schicht der Atmosphäre mit einer vertikalen Temperaturabnahme oberhalb der Stratosphäre zwischen ca. 50 und ca. 90 km Höhe.

Die Thermosphäre ist eine Schicht der Atmosphäre oberhalb der Mesopause, in welcher sich die Temperatur durch Absorption der EUV-Strahlung – einer extrem kurzwelligigen und energiereichen UV-Strahlung mit Wellenlängen zwischen 0,001 und 0,1 µm – erhöht.“

Stratosphäre und Mesosphäre bilden gemeinsam die mittlere Atmosphäre.

Zur „Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre“, wie z.B. Wind, atmosphärische Wellen und Turbulenzen siehe auch: Max-Planck-Institut für Aeronomie (1999). Forschungsinfo 1/99 [https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa\\_9901\\_troposphaere.pdf](https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9901_troposphaere.pdf)

Spektrum der Wissenschaft (2020). „Lexikon der Geographie - Mesopause“, <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/mesopause/5030>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2019). „Leuchtende Nachtwolken“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/leuchtende-nachtwolken-nlc/>

2 Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019). „Leuchtende Nachtwolken - Wolken in der kältesten Zone der Erdatmosphäre“, 08. Juni 2019 [https://www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2019/6/8.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/6/8.html)

Spektrum der Wissenschaft (2020). „Lexikon der Geographie – Leuchtende Nachtwolken“, <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/leuchtende-nachtwolken/4709>

NASA Science (2016). Youtube Video „Noctilucent Clouds explained“, vom 16. August 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=GlsIdzmnTco>

Arbeitskreis Meteore e.V. (2020). „Leuchtende Nachtwolken“, <https://www.meteoros.de/themen/nlc/>

Die AIM-Raumsonde der NASA<sup>3</sup> entdeckte zum ersten Mal im Jahr 2007 Leuchtende Nachtwolken. Die Forscher der NASA gehen davon aus, dass hauptsächlich Meteorstaub als Keimbildung der Eiskristalle in Frage kommt.<sup>4</sup>

Die Wissenschaft führt das Entstehen der NLC auch auf das Zusammenwirken von kälteren Temperaturen und höheren Wasserdampfmen gen zurück. Da jede Erwärmung der Atmosphäre durch Kohlendioxid, Methan oder andere Treibhausgase, zu mehr Wasserdampf in der Atmosphäre führt, verstärkt Wasserdampf den anthropogenen Treibhauseffekt. In den höheren Schichten wandelt sich auch Methan in Wasserdampf um. Forscher vermuten, dass zunehmend atmosphärisches Methan in höheren Schichten eine höhere Feuchtigkeit verursachen und vermehrt NLC auftreten könnten.<sup>5</sup>

Die Entstehung und Wechselwirkungen dieser Phänomene sind noch nicht hinreichend wissenschaftlich untersucht. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Forschung und den Einflüssen und Auswirkungen, die mit dem Phänomen „Leuchtender Nachtwolken“ einhergehen.

## 2. Forschungsaktivitäten zum Verständnis der Leuchtenden Nachtwolken

Ursprünglich wurden NLC erstmalig im Sommer 1885, im Zusammenhang mit einem Vulkanausbruch, beobachtet. „Seitdem wecken sie das Interesse einer zunehmenden Anzahl bodengebundener Beobachter die das regelmäßige Auftreten der bläulich-weißen Wolken zwischen Abend- und Morgendämmerung dokumentieren. Die längsten Messreihen visueller Beobachtungen in Deutschland umfassen mehr als 40 Jahre, reguläre Beobachtungen mit Satelliteninstrumenten begannen 1979.“<sup>6</sup>

Für die Mesosphäre kommen Messmethoden mit Hilfe von Flugzeugen oder Ballonen aufgrund der großen Höhe nicht in Frage. Für die Erforschung dieser Schicht setzen die Wissenschaftler Fernerkundungsmethoden ein. Sie führen ihre Untersuchungen mit Radiowellen (RADAR) oder Lichtwellen (LIDAR) durch. Diese werden in die Schichten gesendet und die rückstreteten Signale (Echos) gemessen und ausgewertet. Staubpartikel und Eisteilchen der polaren Mesosphäre

---

3 NASA, National Aeronautics and Space Administration, Mission: AIM (Aeronomy of Ice in the Mesosphere)

4 NASA Science (2014). „Unexpected Teleconnections in Noctilucent Clouds“, vom 16. April 2014, [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/16apr\\_teleconnections/](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/16apr_teleconnections/)

5 IPCC (2013). Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change, FAQ 8.1, S. 153, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf)

6 Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „NLC und Trends“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/nlc-und-trends/>

liefern beispielsweise starke Radarechos in den Sommermonaten, sogenannte „Sommerechos“.<sup>7</sup> Forschungsraketen kommen in diesen Höhen ebenfalls zum Einsatz.<sup>8</sup>

Der Standort Kühlungsborn des Leibniz-Instituts (IAP) hat für die nationale Erforschung der Mesosphäre eine große Bedeutung. Entsprechende Datensätze aus Lidar- und Radar-Messungen von NLC sowie Temperaturen und Wind in NLC-Höhe sind in den letzten Jahrzehnten erarbeitet worden. Die Wissenschaftler haben u.a. herausgefunden, dass die Jahr-zu-Jahr-Variation der NLC einen sehr viel deutlicheren Zusammenhang mit der Sonnenaktivität (bzw. dem Wasserdampfgehalt) zeigt, als aus Untersuchungen in polaren Breiten bekannt ist. „Dies kann dadurch erklärt werden, dass Kühlungsborn am südlichen Rand des NLC-Gebiets liegt und damit äußere Einflüsse auf die NLC hier deutlicher zu Tage treten. Außerdem zeigt sich – zumindest bei geringer Sonnenaktivität - ein direkter Zusammenhang zwischen kalten Jahren und hoher NLC-Rate bzw. geringer Schwerewellen<sup>9</sup>-Aktivität und hoher NLC-Rate.“<sup>10</sup>

Zur Rolle des Wasserdampfs bei Erwärmung bzw. Abkühlung in der Atmosphäre führt das Umweltbundesamt aus: „Wasserdampf spielt auch bei der anthropogenen Erwärmung des Klimas eine wichtige Rolle, weil der atmosphärische Wasserdampfgehalt von der Temperatur abhängt. Steigt nun die Lufttemperatur, nimmt auch der atmosphärische Wasserdampfgehalt zu und die zuvor eingetretene Erwärmung wird damit verstärkt. Wasserdampf wirkt somit als Verstärker einer durch Kohlendioxid und andere anthropogene Treibhausgase verursachten Erwärmung. Umgekehrt wirkt Wasserdampf auch als Verstärker einer Abkühlung, wie das bei Vereisungen in der Vergangenheit der Fall war. Kühlt sich die Atmosphäre ab, nimmt sie weniger Wasserdampf auf.“

---

7 Max-Planck-Institut für Aeronomie (1999). Forschungsinfo 1/99, „Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre“ [https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa\\_9901\\_troposphaere.pdf](https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9901_troposphaere.pdf)

Als „Polare Mesosphärische Wolken“ (polar mesospheric clouds, PMC) bezeichnet die Fachwelt Wolken der Mesosphäre, die über den Polen lagern. Es gibt Winter und Sommerwolken.

8 Max-Planck-Institut für Aeronomie (1999). Forschungsinfo 1/99, „Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre“ [https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa\\_9901\\_troposphaere.pdf](https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9901_troposphaere.pdf)

9 Schwerewellen entstehen, wenn Luftmassen aus ihrer Ruhelage gebracht werden und zu schwingen anfangen.

Max-Planck-Institut für Aeronomie (1999). Forschungsinfo 1/99 „Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre“ [https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa\\_9901\\_troposphaere.pdf](https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9901_troposphaere.pdf)

10 Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „NLC und Hintergrundatmosphäre“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/leuchtende-nachtwolken-nlc/nlc-und-hintergrundatmosphaere/>

Detaillierte Informationen zu Untersuchungen der Gezeiten in Temperaturen, NLC und Metalldichten“ in: Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/gezeiten-in-temperaturen-nlc-und-metall-dichten/>

Die Folge ist ein verringerter Treibhauseffekt, der die anfängliche Abkühlung verstärkt. Dieser Prozess ist eine wichtige positive (verstärkende) Rückkopplung im Klimasystem.“<sup>11</sup>

Es gibt auch weitere Einflüsse. Beispielsweise können Methan und Kohlendioxidanteile zu einem Absinken der Temperatur in der Mesopause führen und so die Entstehung der NLC begünstigen.

Die Eis-Partikel, aus denen die NLC bestehen, sind nur wenige 10 nm klein und damit kleiner als 1/10 der Wellenlänge von sichtbarem Licht und kleiner als 1/100 eines Staubkorns. „Wie groß die Partikel im Detail sind, aber auch wie viele Partikel pro Volumen vorkommen, ist Gegenstand intensiver Forschung. Insbesondere die Wassermenge pro Wolke ist für das Verständnis der Vorgänge in NLC von Bedeutung.“<sup>12</sup>

Aufzeichnungen von Satellitenuntersuchungen, wie die der NASA, reichen bis ins Jahr 2007 zurück und zeigen, dass NLC zwar nichts Ungewöhnliches in der Antarktis sind, aber ihr Auftreten noch nie so früh im Jahr beobachtet worden war, wie kürzlich Beobachtungen zeigen. Die globale Erwärmung könnte die Entwicklung der Wolken begünstigen, weil sie die kalte Mesosphäre kälter macht. Dies ist kein Widerspruch, so die Forscher. Treibhausgase wie Kohlendioxid verursachen eine Erwärmung nur in der unteren Atmosphäre. In der Mesosphäre kann die Wärme des Kohlendioxids entweichen, wodurch die Temperaturen sinken. Forscher vermuten, dass NLC in der Arktis und Antarktis ein Warnzeichen für den Klimawandel sein könnten. Diese Erklärung kann auch begründen, warum NLC früher selten und in den letzten Jahren häufiger vom Boden aus zu beobachten waren.<sup>13</sup>

Forscher des Leibniz-Instituts haben ihrer Meinung nach gezeigt, dass die NLC der Mesosphäre langfristige Indikatoren für den Klimawandel sind. Die Wissenschaftler führten Modellsimulationen für einen Zeitraum von 138 Jahren durch, um die Auswirkungen der Zunahme von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O auf die Entwicklung von NLC über einen langen Zeitraum zu untersuchen. Die Forscher fanden heraus, dass sich seit Beginn der Industrialisierung das Mischungsverhältnis der Wasserdampfkonzentration in der Mesosphäre bei nahezu konstanten Temperaturen aufgrund des Methananstiegs um ~40% (1 ppmv<sup>14</sup>) erhöht hat. Der Anstieg hat zu einer großen Steigerung der

---

11 Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Ist Wasserdampf nicht ein viel wichtigeres Treibhausgas als Kohlendioxid?“, vom 18.12.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#8-ist-der-vulkanische-co2-ausstoss-nicht-bedeutender-als-der-des-menschen>

12 Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „Leuchtende Nachtwolken“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/leuchtende-nachtwolken-nlc/>

13 Simons, P., The Times (2019). „Noctilucent clouds: a warning sign of climate change“, vom 29. November 2019 12:01, <https://www.thetimes.co.uk/article/noctilucent-clouds-a-warning-sign-of-climate-change-m8d8bnl0x>

Kaifler, N., Institute for Atmospheric Physics (DLR) (2016). „Rare noctilucent cloud observed above southern Germany“, August 2016, [https://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725\\_read-47138/6725\\_page-6/](https://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725_read-47138/6725_page-6/)

14 ppmv = Volumen-Mischungsverhältnisse in „parts per million“ mit nachgestelltem v

NLC-Helligkeit geführt. Damit ist seit dem Beginn der Industrialisierung auch die Wahrscheinlichkeit gestiegen, NLC von nur einer pro mehrere Jahrhunderte, auf einige wenige pro Jahr zu beobachten.<sup>15</sup>

Die zeitlichen Schwankungen von Höhe und Helligkeit der Wolkenschicht sind, nach Aussage der Forscher, Indikatoren für mikrophysikalische und dynamische Prozesse, die innerhalb der Wolke stattfinden. Das Zusammenspiel von atmosphärischen Wellen, Temperaturänderungen und Transport durch den Wind lassen die Struktur der Wolke entstehen.<sup>16</sup>

Dynamische Prozesse haben ebenso einen Einfluss auf die Bildung der NLC. Der Wind in den einzelnen Schichten hat eine horizontale und vertikale Komponente. „In der Mesosphäre gibt es die sogenannte hemisphärische Zirkulation, bei der Luft von der Sommerhalbkugel über den Äquator zur Winterhalbkugel transportiert wird. [...] In der Mesosphäre finden häufig Wechselwirkungen von planetaren Wellen mit Gezeiten<sup>17</sup> oder Schwerewellen statt, wodurch sehr komplizierte Strömungen entstehen.“ Turbulenzen sind unregelmäßige Schwankungen der Dichte, Geschwindigkeit und Temperatur und spielen auch in der Mesosphäre eine Rolle.<sup>18</sup>

Einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten der NLC in den Sommermonaten und den „Polaren Mesosphärischen Wolken“ (PMC), die im Sommer und Winter speziell über den Polen lagern, vermuten Forscher ebenso. Die PMC, die während des gesamten Sommers über den Polen lagern, könnten sich südwärts verlagern und als NLC bzw. verzerrte Form der PMC erscheinen.<sup>19</sup>

Eine Vielzahl von Ansatzpunkten und Forschungsinitiativen untersucht die Zusammenhänge um das Entstehen der Leuchtenden Nachtwolken. Beispielsweise soll das Verbundprojekt „ROMIC“ (Role Of the Middle atmosphere in Climate) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), die Rolle der mittleren Atmosphäre im Hinblick auf ihre Bedeutung für das Klima untersuchen. Das Projekt läuft von 2013 bis 2020. Die Forscher wollen klären, „inwieweit Klimaänderungen Trends in der mittleren Atmosphäre hervorrufen und wie sich Änderungen in den oberen Schichten auf die Troposphäre auswirken können.“ Theoretische Simulationen unterstützen die

---

15 Lübken, F., et al., Geophysical Research Letters (2018). „On the anthropogenic impact on long-term evolution of noctilucent clouds“, Nr. 45, 6681–6689, <https://doi.org/10.1029/2018GL077719>

Detaillierte Informationen zur Modellierung in: Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „NLC-Modellierung mit MIMAS“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/leuchtende-nachtwolken-nlc/mimas/>

16 Kaifler, N., Institute for Atmospheric Physics (DLR) (2016). „Rare noctilucent cloud observed above sothern Germany“, August 2016, [https://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725\\_read-47138/6725\\_page-6/](https://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725_read-47138/6725_page-6/)

17 Thermische Gezeiten entstehen aufgrund der lokalen Sonneneinwirkung

18 Max-Planck-Institut für Aeronomie (1999). Forschungsinfo 1/99 „Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre“ [https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa\\_9901\\_troposphaere.pdf](https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9901_troposphaere.pdf)

19 Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). (IAP) „Mesosphärische Radarechos“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-radarsondierungen/forschungsschwerpunkte/mesosphärische-radarechos/>

Arbeitskreis Meteore e.V (2020). „Leuchtende Nachtwollen“, <https://www.meteoros.de/themen/nlc/>



Interpretation der Messungen. Mit Hilfe von Modellstudien sollen die Auswirkungen der erzielten Ergebnisse auf das Gesamtsystem Erdatmosphäre untersucht werden.<sup>20</sup>

Das IAP beteiligt sich zudem an (Forschungs-) Raketenprogrammen (z.B. ROMA, ECOMA, WADIS), bei denen Temperatur, kleinräumige Fluktuationen im Neutralgas und im ionisierten Anteil sowie Dichten geladener Staub-/Aerosolteilchen bestimmt werden, um das Phänomen der sommerlicher mesosphärischer Radarechos bzw. der entsprechenden Winterechos besser verstehen zu können.<sup>21</sup>

„Zum Zusammenhang zwischen Vulkanismus und Klima gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen. Sie zeigen, dass vor allem explosive Vulkanausbrüche einen merklichen Einfluss auf das Klima haben. Deren Auswurfmasse kann die Stratosphäre – die im Mittel zwischen 10 und 50 km Höhe liegt – oder sogar die darüber liegende Mesosphäre erreichen [...] Von Bedeutung sind dabei vor allem die Sulfatpartikel. Sie bilden sich im Verlauf einiger Monate aus den schwefelhaltigen Vulkan-Gasen. Diese Partikel streuen einen Teil der Sonnenstrahlung. Dadurch gelangt weniger Sonnenstrahlung bis zur Erdoberfläche, und es resultiert ein abkühlender Effekt.“<sup>22</sup>

### 3. Forschungsaktivitäten zu möglichen Auswirkungen

Die folgenden Beispiele zeigen einen kurzen Einblick in die weltweiten Forschungsaktivitäten, die sich mit den leuchtenden Nachtwolken unter verschiedenen Gesichtspunkten befassen.

#### 3.1. Temperatur

Forscher untersuchen insbesondere die Verbindungen bzw. Austauschwege der Atmosphärenschichten und stehen dabei am Anfang ihrer Untersuchungen. Sie haben Wetterdaten statistisch ausgewertet und fanden heraus, dass es eine Verbindung zwischen dem Wetter im Winter und

---

20 Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „Projekte“, <https://romic.iap-kborn.de/romic/strategie>

Im Einzelnen sollen u. a. folgende Forschungsthemen behandelt werden: Solarer und anthropogener Einfluss auf die Stratosphäre und Mesosphäre; Kopplung durch dynamische Prozesse (z. B. Schwerewellen, Gezeiten etc.) und durch den Transport von Spurengasen; Zirkulationssysteme in der mittleren Atmosphäre und deren Ausbreitung in tiefere Schichten; Einfluss der mittleren Atmosphäre auf das Klima in der Troposphäre durch Dynamik, Strahlung und Chemie; Vergleich mit dem solaren Antrieb und dem Einfluss von Vulkanausbrüchen.

Leibniz-Institut für Atmosphärenforschung (IAP) (2018). „Arbeitsplan des IAP für den Zeitraum 2019-2020“, [https://www.iap-kborn.de/fileadmin/user\\_upload/MAIN-dateien/forschung/Arbeitsplan-19-20-final.pdf](https://www.iap-kborn.de/fileadmin/user_upload/MAIN-dateien/forschung/Arbeitsplan-19-20-final.pdf)

21 Leibniz-Institut für Atmosphärenforschung (IAP) (2020). „Mesosphärische Radarechos in polaren und mittleren Breiten“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-radarsondierungen/forschungsschwerpunkte/mesosphärische-radarechos/>

22 Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Ist der vulkanische CO<sub>2</sub>-Ausstoß nicht bedeutender als der des Menschen?“, vom 18.12.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#8-ist-der-vulkanische-co2-ausstoss-nicht-bedeutender-als-der-des-menschen->

dem Rückgang von NLC über der Antarktis besteht.<sup>23</sup> Während der AIM-Mission fanden die Wissenschaftler heraus, dass es weitreichende Verbindungen, sogenannte „teleconnections“, in der Erdatmosphäre zwischen Nord- und Südpol gibt, die mit dem Wetter- bzw. Klimaverhältnissen zusammen hängen. Forscher der Universität Colorado haben herausgefunden, dass in Indianapolis, Indiana, die Lufttemperatur im Winter mit der Häufigkeit des Auftretens der NLC in der Antarktis, statistisch gesehen, korreliert ist. Untersuchungen in anderen amerikanischen Städten zeigten, dass bei Kaltlufttemperaturen am Boden ein Auftreten der NLC über der Antarktis mit einem zeitlichen Versatz von etwa zwei Wochen verbunden ist. Den zeitlichen Versatz erklären die Wissenschaftler mit der Zeit, die die Wechselwirkungen bzw. Signalausbreitungen benötigen, um sich durch drei Schichten der Atmosphäre (Troposphäre, Stratosphäre und Mesosphäre) und von Pol zu Pol auszubreiten.<sup>24</sup>

Ein weiteres Forscherteam hat Langzeitmessungen der letzten 19 bzw. 57 Jahre untersucht. Die bodennahen Messungen in der Region um Moskau sollten Entwicklungen der Temperatur der Mesopause, der Intensität des Nachtleuchtens<sup>25</sup> und der leuchtenden Nachtwolken aufzeigen. Die Auswertungen und der Vergleich mit früheren Untersuchungen weisen auf einen Trend von fast null bei der NLC-Häufigkeit und einen sehr kleinen positiven Trend bei der NLC-Helligkeit hin, die jedoch keine statistische Signifikanz haben.<sup>26</sup>

### 3.2. Meteorstaub

Am IAP finden auch Untersuchungen zum Zusammenhang von Meteorstaub und der Bildung von NLC statt: „Ein anderer mikrophysikalischer Prozess, welcher in der Mesopausenregion stattfindet,

---

23 NASA Science (2018). „ScienceCast 141: Unexpected Teleconnections in noctilucent clouds“, <https://www.youtube.com/watch?v=0w73tjb0Q9Y> ab ca. 4 min.

24 NASA Science (2014). „Unexpected Teleconnections in Noctilucent Clouds“, vom 16. April 2014, [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/16apr\\_teleconnections/](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/16apr_teleconnections/)

NASA's Sun-Earth Connection Education Forum (2011). „AIM-Mission - Science Goal“, <http://aim.hamp-tonu.edu/mission/1mission.html>

25 Dalin, P. et al. American Geophysical Union (2019). „Updated long-term trends in mesopause temperature, airglow emissions, and noctilucent clouds“, doi: 10.1029/2019JD030814, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2019JD030814>

Airglow = Nachtleuchten = Airglow entsteht in der Mesopause und in der Thermosphäre durch Lichtemissionen von Atomen und Molekülen, die durch das UV-Licht verursacht, über chemische Prozesse angeregt werden.

Dagegen entstehen Polarlichter in der Thermosphäre durch die Anregung von Atomen und Molekülen durch Elektronen des Sonnenwinds

26 Thomas, G. et al. (2013). „Project 3 PMC/NLC altitude, frequency and brightness changes related to changes in dynamics and chemical composition“, [http://www.cawses.org/wiki/index.php/Project\\_3\\_PMC/NLC\\_altitude\\_frequency\\_and\\_brightness\\_changes\\_related\\_to\\_changes\\_in\\_dynamics\\_and\\_chemical\\_composition](http://www.cawses.org/wiki/index.php/Project_3_PMC/NLC_altitude_frequency_and_brightness_changes_related_to_changes_in_dynamics_and_chemical_composition).

ist die Formation von Meteorstaubpartikeln. Es gibt einige wenige Erkenntnisse aus Beobachtungen über den Verbleib des metallischen Materials nach der meteorischen Ablation<sup>27</sup>. Es wird allgemein angenommen, dass dieses metallische Material innerhalb weniger Tage sehr kleine Partikel mit Radien im Nanometerbereich formt. Dies konnte jedoch bisher nicht abschließend geklärt werden. Einige Trümmer von Meteoriten können sogar in der Mesosphäre verbleiben wenn die Ablation des Meteors nicht vollständig war oder es zu Fragmentation während der Ablation kommt.“<sup>28</sup>

### 3.3. Solare Einflüsse

Eine wissenschaftliche Arbeit aus dem Jahr 2010 untersuchte die Jahreszeitenabhängigkeit und die Einflüsse auf NLC. Die durchgeführten jahreszeitlichen Analysen der Eigenschaften der NLC zeigen für den Beobachtungszeitraum von sieben Jahren keine signifikanten Trends. Einen bis dato vermuteten 11-jährigen Sonnenzyklus beobachteten die Forscher nicht. Tägliche Variationen der Partikelgrößenverteilung und eine 27-Tage-Abhängigkeit von der Sonnenaktivität wiesen die Forscher nach.<sup>29</sup>

Im Rahmen der Klimaforschung sind auch die Kopplungsmechanismen zwischen den einzelnen atmosphärischen Schichten und solaren Einflüssen von Bedeutung und nach Meinung der Forscher des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bisher nur unzureichend verstanden. Gegenstand ihrer Untersuchungen stellt der Höhenbereich der „mittleren Atmosphäre“ zwischen etwa 10 und 110 km dar: „In der mittleren Atmosphäre führen solare<sup>30</sup> Einflüsse zunächst zu einer Veränderung der chemischen Zusammensetzung. Zwar kommen die meisten Bestandteile in der Atmosphäre nur in geringen Mengen vor (<0,01%), sodass die zugehörigen Änderungen ebenfalls dementsprechend klein sind.“ Aber dennoch glauben die Wissenschaftler, dass „derartige Veränderungen dieser genannten Spurengase einen großen Einfluss auf die gesamte Atmosphäre haben können.“<sup>31</sup>

- 
- 27 Ablation bezeichnet in der Physik das Abtragen von Material durch Aufheizung, etwa durch einen Laser oder durch atmosphärische Reibung.
- 28 Leibniz-Institut für Atmosphärenforschung (IAP) (2020). „Mikrophysik in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-radarsondierungen/forschungsschwerpunkte/mikro-physik-der-atmosphaere/>
- 29 Robert, Ch., Universität Bremen (2010). Dissertation „Investigation of noctilucent cloud properties and their connection with solar activity“, <http://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00101757-1.pdf> Seite 150
- 30 Solare Einflüsse = In diesem Zusammenhang bezieht sich der Begriff „solare Einflüsse“ nicht nur auf das einfallende Sonnenlicht, sondern auch auf von der Sonne stammende geladene Teilchen (hauptsächlich Protonen und Elektronen).
- 31 Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung - Atmosphärische Spurengase und Fernerkundung (2017). „Das IMK-ASF“, <https://www.imk-asf.kit.edu/1033.php>

Weitere Forschungsergebnisse haben mittels langfristiger Veränderungen der mittleren Atmosphäre eine hauptsächlich durch CO<sub>2</sub> und Ozon verursachte Abkühlung der Mesosphäre belegt. Eine entsprechende Abkühlung ist notwendig, damit sich NLC bilden können.<sup>32</sup>

Unter normalen bzw. ruhigen solaren Bedingungen lösen energiereiche geladener Teilchen wie Protonen und Elektronen oberhalb von 60 km Höhe eine Kette von komplexen chemischen Reaktionen aus. Dabei kommt es unter anderem zur Bildung von hochreaktiven Wasserstoff- und Stickstoffverbindungen. Trotz der geringen Konzentrationen tragen beide sehr effektiv zum Abbau von Ozon (O<sub>3</sub>) bei. Insbesondere können während der sogenannten „solaren Protonenereignisse“ Ozonverluste von bis zu 90 % in der unteren Mesosphäre (50-70 km) auftreten.“<sup>33</sup>

### 3.4. Raketenstarts

Einen höheren Wasserdampfanteil in der Atmosphäre können auch Raketenstarts verursacht haben. „Untersuchungen von Forschern des Naval Research Laboratory lassen vermuten, dass „der Weltraumverkehr in genau jenem Maße gewachsen sei, in dem leuchtende Nachtwolken zugenommen hätten.“ Nach Aussage der Autoren passt die Abschätzung der ausgestoßenen Wassermenge der Weltraumflieger gut zur „abnormen Häufigkeit“ der polaren Nachtwolken.<sup>34</sup>

Der global tätige Anbieter für Wetterinformationen „wetteronline.de“ vermutet, dass „die Raumfahrt, insbesondere die Abgase der Raketen, für das gehäufte Auftreten von Leuchtenden Nachtwolken verantwortlich sein [könnten]. Beim Verbrennen des Treibstoffs wird neben Abgasen auch Wasserdampf freigesetzt, der sich in den oberen Schichten der Atmosphäre anlagert. Ebenso gelangen die freigesetzten Rußpartikel in die oberen Luftschichten, wo sie als Kondensationskerne für Eiskristalle dienen können.“<sup>35</sup> Wissenschaftlich fundierte Analysen haben diese Theorie noch nicht bestätigt.

---

32 Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2016). „Senatsstellungnahme zum IAP“, [https://www.leibniz-gemeinschaft.de/fileadmin/user\\_upload/ARCHIV\\_downloads/Archiv/Evaluierung/Senatsstellungnahmen/IAP\\_-\\_Senatsstellungnahme\\_vom\\_17.03.2016\\_mit\\_Anlagen.pdf](https://www.leibniz-gemeinschaft.de/fileadmin/user_upload/ARCHIV_downloads/Archiv/Evaluierung/Senatsstellungnahmen/IAP_-_Senatsstellungnahme_vom_17.03.2016_mit_Anlagen.pdf)

33 Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) - Atmosphärische Spurengase und Fernerkundung (ASF) (2017). „Einfluss solarer Variabilität auf die mittlere Atmosphäre“, <https://www.imk-asf.kit.edu/2855.php>

34 Bojanowski, A., Der Spiegel (2013). „Raketen zaubern Silberschleier an den Himmel“, vom 12. Juli 2013, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/leuchtende-nachtwolken-raumfaehren-ursache-fuer-nlc-a-909248.html>

Siskind, D. et al., Naval Research Laboratory, Geophysical Research Letters (2013). „Recent observations of high mass density polar mesospheric clouds: A link to space traffic?“, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/grl.50540>

35 Wetteronline (2013). „Mehr Leuchtende Nachtwolken-Abgase von Raketen die Ursache?“, <https://www.wetteronline.de/astronews/mehr-leuchtende-nachtwolken-abgase-von-raketen-die-ursache-2013-07-12-ln> 12.7.2013

Ein Zusammenhang zwischen Raketenstarts und dem Ozon<sup>36</sup> erläutern die Experten des Onlineanbieters „wetterdienst.de“ an einem Beispiel. Um die hohen Geschwindigkeiten der Raketen zu erreichen, werden sogenannte "kryogene" oder feststoffartige Antriebsmittel verwendet. Diese Antriebsmittel setzen ozonschädliche Stoffe, wie z.B. Chlor frei. „Bei einem Start der derzeit leistungsstärksten Trägerrakete der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) Ariane 5 werden in der Hochatmosphäre ungefähr 100 Tonnen Chlor freigesetzt. Ein Chloratom reicht aus, um bis zu einer Millionen Ozon-Moleküle zu zerstören. Aber wie so oft, hat ein einzelner Start einer Rakete auf die Ozonschicht noch keine nachhaltigen Auswirkungen.“ Nach Aussage der Autoren zerstören Raketen global derzeit weniger als 1% der Ozonschicht weltweit pro Jahr.<sup>37</sup>

An alternativen Treibstoffen für die Raumfahrt forschen NASA und ESA (Europäische Raumfahrtagentur). Dabei geht es derzeit im Wesentlichen um den Austausch von „Hydrazin“, eine als toxisch bedenklich eingestufte Stickstoffverbindung, die durch umweltfreundlichere Alternativen ersetzt werden soll.<sup>38</sup>

In einem Artikel der NASA aus dem Sommer 2019 heißt es, dass es viele neue Erkenntnisse über nachleuchtende Wolken erst im letzten Jahrzehnt entdeckt worden sind und die Frage, wie sie sich bilden und entwickeln, weiterhin Gegenstand der aktuellen Forschung ist.<sup>39</sup>

\* \* \*

---

36 Ozon (O<sub>3</sub>) ist ein Spurengas, das zum Treibhauseffekt beiträgt und in der Stratosphäre (die Ozonschicht) vor solarer UV-Strahlung schützt.

37 Wetterdienst.de (2018). „Der Einfluss von Raketen auf die Ozonschicht“, vom 17. Juni 2018, [https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema\\_des\\_Tages/3221/der-einfluss-von-raketen-auf-die-ozonschicht](https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/3221/der-einfluss-von-raketen-auf-die-ozonschicht)

38 bizz-energy (2019). „NASA entwickelt grünen Raketen-Treibstoff“, vom 10. Juli 2019, <https://bizz-energy.com/nasa-entwickelt-gruenen-treibstoff-raketen>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Raumfahrtantriebe (2020). „Fortschrittliche Treibstoffe für Satellitenanwendungen“, [https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-8485/14621\\_read-36501](https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-8485/14621_read-36501)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Raumfahrtantriebe (2016). „Forschung für den ‚grünen‘ Raketentreibstoff“, vom 23. September 2016, [https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-4058/6636\\_read-48045/](https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-4058/6636_read-48045/)

39 NASA Science (2019). „Noctilucent Clouds, Reflections, and Silhouettes“, vom 26. Juni 2019, <https://science.nasa.gov/noctilucent-clouds-reflections-and-silhouettes>

#### 4. Quellenverzeichnis

Arbeitskreis Meteore e.V (2020). „Leuchtende Nachtwollen“, <https://www.meteoros.de/themen/nlc/>

bizz-energy (2019). „NASA entwickelt grünen Raketen-Treibstoff“, vom 10. Juli 2019, <https://bizz-energy.com/nasa-entwickelt-gruenen-treibstoff-raketen>

Bojanowski, A., Der Spiegel (2013). „Raketen zaubern Silberschleier an den Himmel“, vom 12. Juli 2013, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/leuchtende-nachtwolken-raumfaehren-ursache-fuer-nlc-a-909248.html>

Dalin, P. et al. American Geophysical Union (2019). „Updated long-term trends in mesopause temperature, airglow emissions, and noctilucent clouds“, doi: 10.1029/2019JD030814, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2019JD030814>

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019). „Leuchtende Nachtwolken - Wolken in der kältesten Zone der Erdatmosphäre“, vom 08. Juni 2019, [https://www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2019/6/8.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/6/8.html)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Raumfahrtantriebe (2020). „Fortschrittliche Treibstoffe für Satellitenanwendungen“, [https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-8485/14621\\_read-36501](https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-8485/14621_read-36501)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Raumfahrtantriebe (2016). „Forschung für den ‚grünen‘ Raketentreibstoff“, vom 23. September 2016, [https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-4058/6636\\_read-48045/](https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-4058/6636_read-48045/)

IPCC (2013). Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change, FAQ 8.1, S. 153, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf)

Kaifler, N., Institute for Atmospheric Physics (DLR) (2016). „Rare noctilucent cloud observed above southern Germany“, August 2016, [https://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725\\_read-47138/6725\\_page-6/](https://www.dlr.de/pa/en/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725_read-47138/6725_page-6/)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) - Atmosphärische Spurengase und Fernerkundung (ASF) (2017). „Einfluss solarer Variabilität auf die mittlere Atmosphäre“, <https://www.imk-asf.kit.edu/2855.php>

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung - Atmosphärische Spurengase und Fernerkundung (2017). „Das IMK-ASF“, <https://www.imk-asf.kit.edu/1033.php>

Leibniz-Institut für Atmosphärenforschung (IAP) (2020). „Mesosphärische Radarechos in polaren und mittleren Breiten“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-radarsondierungen/forschungsschwerpunkte/mesosphaerische-radarechos/>

---

Leibniz-Institut für Atmosphärenforschung (IAP) (2018). „Arbeitsplan des IAP für den Zeitraum 2019-2020“, [https://www.iap-kborn.de/fileadmin/user\\_upload/MAIN-dateien/forschung/Arbeitsplan-19-20-final.pdf](https://www.iap-kborn.de/fileadmin/user_upload/MAIN-dateien/forschung/Arbeitsplan-19-20-final.pdf)

Leibniz-Institut für Atmosphärenforschung (IAP) (2020). „Mikrophysik in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-radarsondierungen/forschungsschwerpunkte/mikrophysik-der-atmosphaere/>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2016). „Senatsstellungnahme zum IAP“, [https://www.leibniz-gemeinschaft.de/fileadmin/user\\_upload/ARCHIV\\_downloads/Archiv/Evaluierung/Senatsstellungnahmen/IAP - Senatsstellungnahme vom 17.03.2016 mit Anlagen.pdf](https://www.leibniz-gemeinschaft.de/fileadmin/user_upload/ARCHIV_downloads/Archiv/Evaluierung/Senatsstellungnahmen/IAP - Senatsstellungnahme vom 17.03.2016 mit Anlagen.pdf)

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2019). „Leuchtende Nachtwolken“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/leuchtende-nachtwolken-nlc/>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). (IAP) „Mesosphärische Radarechos“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-radarsondierungen/forschungsschwerpunkte/mesosphaerische-radarechos/>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „Gezeiten in Temperaturen – NLC und Metalldichten“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/gezeiten-in-temperaturen-nlc-und-metalldichten/>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „NLC und Hintergrundatmosphäre“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/leuchtende-nachtwolken-nlc/nlc-und-hintergrundatmosphaere/>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „NLC und Trends“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/nlc-und-trends/>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „NLC-Modellierung mit MIMAS“, <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-optische-sondierungen-und-hoehenforschungsraketen/forschungsschwerpunkte/leuchtende-nachtwolken-nlc/mimas/>

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. (2020). „Projekte“, <https://romic.iap-kborn.de/romic/strategie>

Lübken, F., et al., Geophysical Research Letters (2018). „On the anthropogenic impact on long-term evolution of noctilucent clouds“, Nr. 45, 6681–6689, <https://doi.org/10.1029/2018GL077719>

Max-Planck-Institut für Aeronomie (1999). Forschungsinfo 1/99 „Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre“ [https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa\\_9901\\_troposphaere.pdf](https://www2.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9901_troposphaere.pdf)

NASA Science (2014). „Unexpected Teleconnections in Noctilucent Clouds“, vom 16. April 2014, [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/16apr\\_teleconnections/](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/16apr_teleconnections/)



- 
- NASA Science (2016). Youtube Video „Noctilucent Clouds explained“, vom 16. August 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=GlsIdzmnTco>
- NASA Science (2018). „ScienceCast 141: Unexpected Teleconnections in noctilucent clouds“, <https://www.youtube.com/watch?v=0w73tjb0Q9Y> ab ca. 4 min.
- NASA Science (2019). „Noctilucent Clouds, Reflections, and Silhouettes“, vom 26. Juni 2019, <https://science.nasa.gov/noctilucent-clouds-reflections-and-silhouettes>
- NASA's Sun-Earth Connection Education Forum (2011). „AIM-Mission - Science Goal“, <http://aim.hamptonu.edu/mission/1mission.html>
- Robert, Ch., Universität Bremen (2010). Dissertation „Investigation of noctilucent cloud properties and their connection with solar activity“, <http://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00101757-1.pdf> Seite 150
- Simons, P., The Times (2019). „Noctilucent clouds: a warning sign of climate change“, vom 29. November 2019 12:01, <https://www.thetimes.co.uk/article/noctilucent-clouds-a-warning-sign-of-climate-change-m8d8bnl0x>
- Siskind, D. et al., Naval Research Laboratory, Geophysical Research Letters (2013). „Recent observations of high mass density polar mesospheric clouds: A link to space traffic?“, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/grl.50540>
- Spektrum der Wissenschaft (2020). „Lexikon der Geographie – Leuchtende Nachtwolken“, <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/leuchtende-nachtwolken/4709>
- Spektrum der Wissenschaft (2020). „Lexikon der Geographie - Mesopause“, <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/mesopause/5030>
- Thomas, G. et al. (2013). „Project 3 PMC/NLC altitude, frequency and brightness changes related to changes in dynamics and chemical composition“, [http://www.cawses.org/wiki/index.php/Project\\_3\\_PMC/NLC\\_altitude,\\_frequency\\_and\\_brightness\\_changes\\_related\\_to\\_changes\\_in\\_dynamics\\_and\\_chemical\\_composition](http://www.cawses.org/wiki/index.php/Project_3_PMC/NLC_altitude,_frequency_and_brightness_changes_related_to_changes_in_dynamics_and_chemical_composition)
- Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Ist der vulkanische CO<sub>2</sub>-Ausstoß nicht bedeutender als der des Menschen?“, vom 18.12.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#8-ist-der-vulkanische-co2-ausstoss-nicht-bedeutender-als-der-des-menschen->
- Umweltbundesamt (UBA) (2017). „Ist Wasserdampf nicht ein viel wichtigeres Treibhausgas als Kohlendioxid?“, vom 18.12.2017, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#8-ist-der-vulkanische-co2-ausstoss-nicht-bedeutender-als-der-des-menschen->
- wetterdienst.de (2018). „Der Einfluss von Raketen auf die Ozonschicht“, vom 17. Juni 2018, [https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema\\_des\\_Tages/3221/der-einfluss-von-raketen-auf-die-ozonschicht](https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/3221/der-einfluss-von-raketen-auf-die-ozonschicht)



wetteronline (2013). „Mehr Leuchtende Nachtwolken-Abgase von Raketen die Ursache?“, vom 12.7.2013, <https://www.wetteronline.de/astronews/mehr-leuchtende-nachtwolken-abgase-von-raketen-die-ursache-2013-07-12-ln>