

## Polarlichter - das geisterhafte Leuchten am Nachthimmel

In Bezug zum Beitrag „Aurora auf einsamem Braunen Zwerg aufgespürt“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 7/2024, Rubrik „Blick in die Forschung: Nachrichten“ (Brennpunkt 2326)

Zielgruppe: Mittel- bis Oberstufe, WIS-ID: 1571248

Monika Maintz

Polarlichter gehören zu den faszinierendsten Phänomenen, die in der Natur vorkommen. Bisweilen kann man sie sogar von Deutschland aus beobachten. Sucht man jedoch nach Erklärungen, wie dieses Himmelsphänomen entsteht, findet man oft stark verkürzte, missverständliche oder falsche Darstellungen. Dabei ist es gar nicht so schwer zu verstehen, was hier passiert. Im WIS-Beitrag wird erklärt, wie Polarlichter entstehen und welche Rolle die Erdatmosphäre und das Erdmagnetfeld dabei spielen. Stichworte im Text verweisen auf **Anknüpfungspunkte zum Physik- oder MINT-Unterricht**. So kann das Phänomen „Polarlicht“ etwa als **Einstieg zu Unterrichtsthemen** aus den Bereichen Elektromagnetismus oder Atomphysik fungieren.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten	Planetenatmosphäre, Erdatmosphäre, Planetenmagnetosphäre, Erdmagnetfeld, <a href="#">Erdmagnetosphäre</a> , <a href="#">Sonnenwind</a> , <a href="#">Polarlicht</a>
Physik	Elektromagnetismus, Atomphysik, Optik	Bewegung von Elektronen in einem Magnetfeld, <a href="#">Plasma</a> , <a href="#">Lorentz-Kraft</a> , <a href="#">Dipolfeld</a> , Erdmagnetfeld, <a href="#">Magnetosphäre</a> , <a href="#">Stoßanregung</a> , <a href="#">Absorption</a> , <a href="#">Emission</a> , <a href="#">Dissoziation</a> , <a href="#">Ionisation</a> , <a href="#">magnetische Rekonnexion</a> , <a href="#">Atommodell</a> , <a href="#">Elektronenhülle</a> , Entstehung von Spektrallinien, <a href="#">Spektralfarben</a> , <a href="#">verbotene Linien</a>
Fächerverknüpfung	Astro - Geografie Astro - Chemie	<a href="#">Aufbau der Erdatmosphäre</a> <a href="#">Zusammensetzung der Erdatmosphäre</a>
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen, Erkenntnis)	Informationen zum Polarlicht-Phänomen, Entnehmen von Informationen aus Texten (Lesekompetenz), Naturphänomene verstehen, Polarlicht-Phänomen als Einstieg oder Anknüpfungspunkt zu Unterrichtsthemen

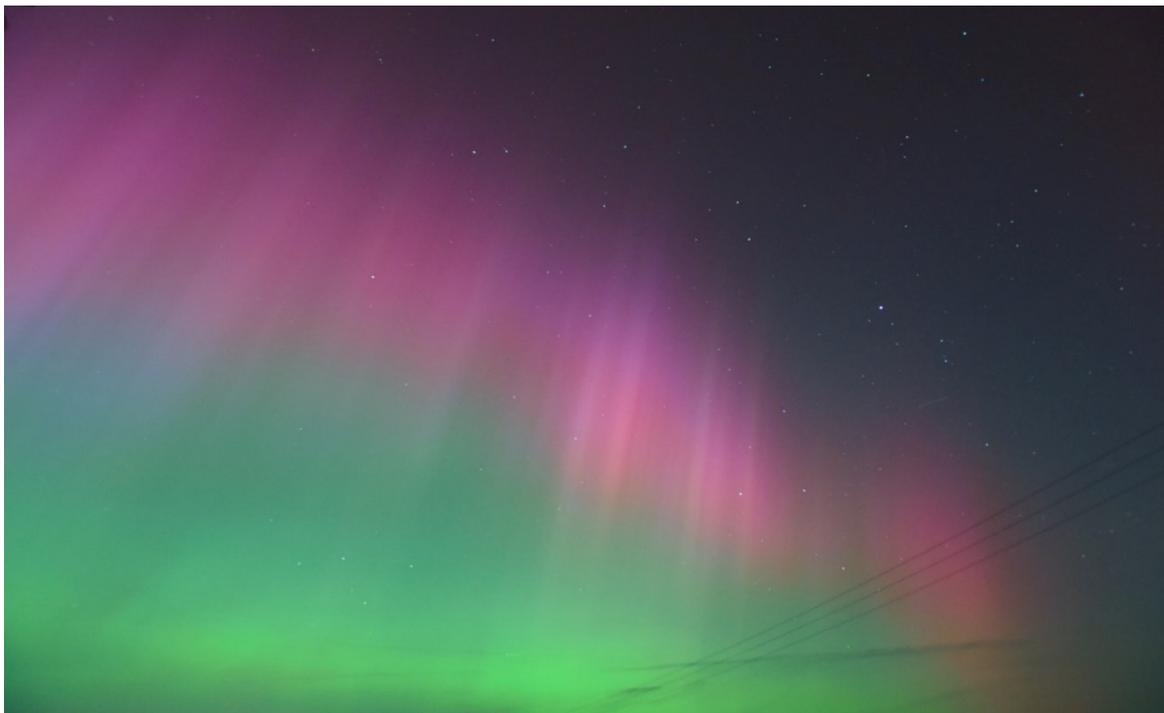


Abbildung 1: Polarlicht über Südhessen, aufgenommen am 11.05.2024 um 0:11 Uhr MESZ. Deutlich zu erkennen sind grünes und pinkfarbenes Polarlicht. ©: Monika Maintz.

[zurück zum Anfang](#)



Abbildung 2: Polarlicht, aufgenommen an einem Ort zwischen Tromsø und Finnsnes, Norwegen im Januar / Februar 2019. Sichtbar ist das typische grüne Polarlicht, das Sauerstoffatome bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 557,7$  nm aussenden. ©: Monika Maintz.

## Wie entstehen Polarlichter?

Polarlichter entstehen, wenn Elektronen aus der Magnetosphäre der Erde in die oberste Schicht der Erdatmosphäre gelangen und dort mit den Atomen, Molekülen und Ionen der Erdatmosphäre zusammenstoßen. Die Elektronen, die sehr energiereich sind, übertragen dabei einen Teil ihrer Energie auf ihre Stoßpartner ( $\Rightarrow$  **Stoßanregung, Absorption**). Das kann dazu führen, dass die getroffenen Teilchen angeregt oder ionisiert werden. Moleküle können dabei auch auseinandergerissen werden ( $\Rightarrow$  **Dissoziation**).

Im Falle einer Anregung gelangen Elektronen in den **Elektronenhüllen** ( $\Rightarrow$  **Atommodell**) der getroffenen Teilchen auf höhere Energieniveaus. Damit die angeregten Elektronen wieder auf ihre ursprünglichen Energieniveaus zurückfallen können, müssen sie die absorbierte Energie wieder loswerden. Das tun sie, indem sie sich wieder „abregen“ und dabei Licht aussenden ( $\Rightarrow$  **Emission**). Polarlicht entsteht also infolge von Abregung nach Stoßanregung von Hüllenelektronen.

### Zusatzinformation:

Wenn bei den Zusammenstößen so viel Energie übertragen wird, dass den Teilchen der Erdatmosphäre Elektronen entrissen werden ( $\Rightarrow$  **Ionisation**), entstehen zusätzliche freie Elektronen. Auch diese können Teilchen der Erdatmosphäre anregen und so das Polarlicht-Phänomen verstärken.

[zurück zum Anfang](#)

## Welche Farben hat das Polarlicht?

Grün ist die dominante Farbe des Polarlichts, das im Bereich des sichtbaren Lichts ( $\Rightarrow$  **elektromagnetisches Spektrum**) entsteht (siehe Abb. 1 und 2). Häufig sieht man auch rote Polarlichter. Seltener sind Polarlichter, die blau oder violett leuchten.

Farbe	Wellenlänge $\lambda$	Emittierendes Atom / Molekül / Ion
<b>Grün</b>	<b>557,7 nm</b>	<b>Neutraler atomarer Sauerstoff <math>\Rightarrow</math> O (dominant)</b>
<b>Rot</b>	<b>630,0 nm</b>	<b>Neutraler atomarer Sauerstoff <math>\Rightarrow</math> O</b>
Rot	636,4 nm	Neutraler atomarer Sauerstoff $\Rightarrow$ O
Rot	661-686 nm	Neutraler molekularer Stickstoff $\Rightarrow$ N <sub>2</sub>
Tiefrot	727-750 nm	Neutraler molekularer Stickstoff $\Rightarrow$ N <sub>2</sub>
Violett	391,4 nm	Ionisierter molekularer Stickstoff $\Rightarrow$ N <sub>2</sub> <sup>+</sup>
Blau	427,8 nm	Ionisierter molekularer Stickstoff $\Rightarrow$ N <sub>2</sub> <sup>+</sup>

Tabelle 1: Polarlichtfarben, die am häufigsten zu beobachten sind

Für die Entstehung dieser Polarlichtfarben sind elektrisch neutrale Sauerstoffatome (O) sowie elektrisch neutrale Stickstoffmoleküle (N<sub>2</sub>) und einfach ionisierte, d. h. einfach elektrisch positiv geladene Stickstoffmoleküle (Ionen, N<sub>2</sub><sup>+</sup>) verantwortlich. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Polarlichtfarben, die im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung angeregt werden und intensiv genug leuchten, damit man sie beobachten kann.

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, kann man jeder Polarlichtfarbe eine spezielle Wellenlänge zuordnen. D.h. wir haben es hier mit reinen Farben ( $\Rightarrow$  **Spektralfarben**) zu tun und nicht mit Farbmischungen. Das liegt an den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, aufgrund derer Polarlicht erzeugt wird, also an den Absorptions- und Emissionsprozessen, die sich in den Elektronenhüllen der Atome und Moleküle abspielen. Denn dabei können nur bestimmte Energiemengen aufgenommen oder abgegeben werden. Diese entsprechen genau der Energiedifferenz zweier Energieniveaus, zwischen denen ein Hüllenelektron hin- und herwechseln kann.

### Zusatzinformation:

*Neben den reinen Farben können auch Mischfarben entstehen. Dies geschieht, wenn sich unterschiedliche reine Polarlichtfarben in Blickrichtung des Beobachters überlagern und es so zu Farbmischung kommt. Auf diese Weise kann z. B. weiß oder gelb entstehen. Außerdem können auch Sonnen- und Mondlicht das reine Polarlicht überlagern. Aus der Lichtmischung können weitere Blau- und Violettöne (Sonnenlicht) sowie lila und rosa Farbtöne (Mondlicht) resultieren.*

*Es gibt auch Polarlichter, die im Ultraviolett oder Infraroten leuchten. Diese können wir jedoch nicht direkt sehen, da unsere Augen für diese Wellenlängenbereiche nicht empfindlich sind.*

## In welcher Höhe entstehen Polarlichter?

Die Erdatmosphäre lässt sich aufgrund physikalischer Eigenschaften wie Temperatur, Dichte, Druck, Zusammensetzung, Durchmischung oder Ionisationsgrad in verschiedene Schichten oder Stockwerke einteilen (Abb. 3 und 4). So nimmt z. B. die Dichte von unten nach oben immer weiter ab, bis der blaue Himmel in einer Höhe von rund 35 km inmitten der Stratosphäre auch bei Tageslicht durchsichtig und tiefschwarz wird. Die Temperatur fällt hingegen in der untersten Atmosphärenschicht, der Troposphäre, zuerst ab, steigt in der Stratosphäre wieder an, um in der Mesosphäre wieder abzusinken, bevor sie in der Thermosphäre schließlich auf Extremwerte ansteigt. Bei der Entstehung von Polarlicht spielen jedoch vor allem die **Zusammensetzung und Dichte der Atmosphäre** die entscheidende Rolle. Bis zu einer Höhe von etwa 80 km ist die Erdatmosphäre gleichförmig durchmischte und besteht aus den folgenden Teilchen (Anteile in Volumen-%):

Molekularer Stickstoff ( $N_2$ ):  $\approx 78$  Volumen-%  
 Molekularer Sauerstoff ( $O_2$ ):  $\approx 21$  Volumen-%  
 Argon (Ar):  $< 1$  Volumen-%  
 Spurengase ( $CO_2, \dots$ ): Rest

Höhe	$N_2$	$O_2$	O	Ar	He	H
80 km	78,08	20,95	0,00	0,93		
120 km	72,96	8,61	18,16	0,27	0,01	
160 km	56,09	4,62	39,16	0,07	0,06	
180 km	48,14	3,51	48,20	0,04	0,11	
200 km	40,72	2,67	56,40	0,03	0,18	
300 km	14,74	0,61	83,48		1,16	0,02
400 km	4,42	0,12	90,77		4,61	0,08
500 km	1,18	0,02	83,76		14,67	0,36

Tabelle 2: Zusammensetzung der Erdatmosphäre in ca. 80 bis 500 km Höhe, angegeben in Volumen-%, nur neutrale Teilchen werden berücksichtigt (Nach „U.S. Standard Atmosphere 1976“, NOAA, NASA, USAF).

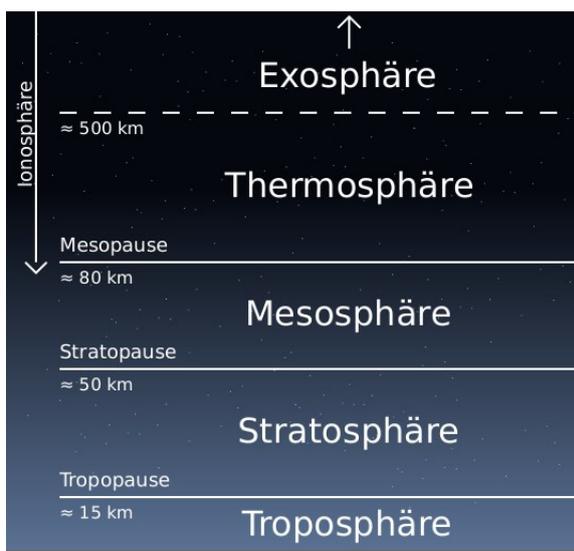
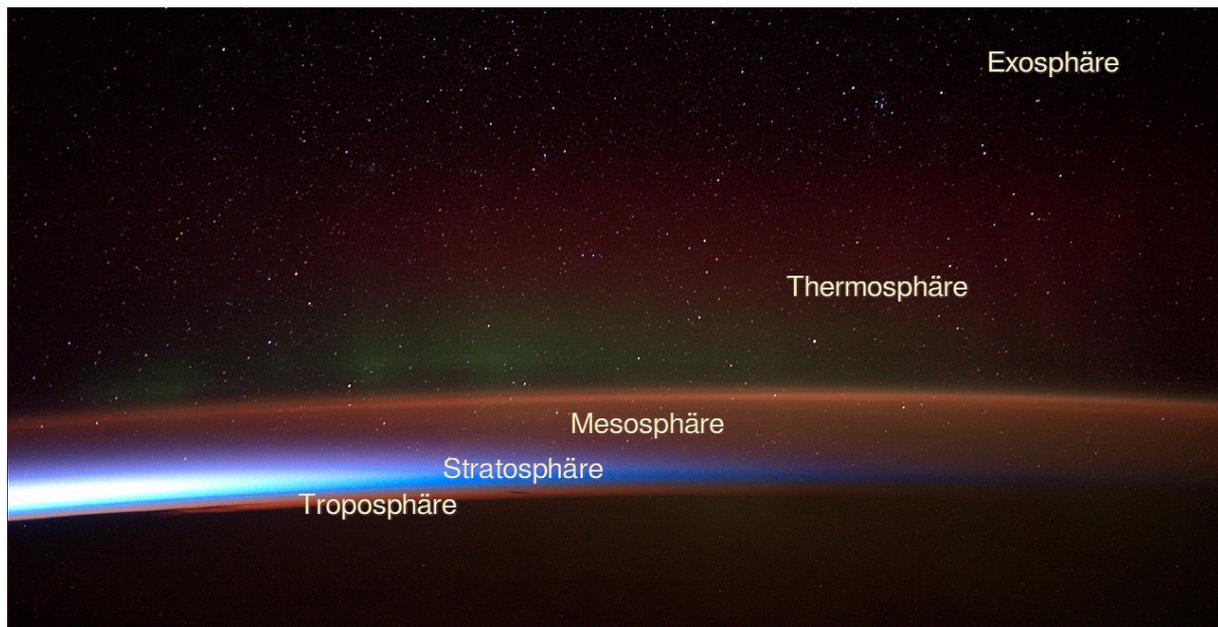


Abbildung 3: Aufbau der Erdatmosphäre über Europa im Sommer. ©: Niko Lang, [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/Atmosph%C3%A4re\\_Stufn.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/Atmosph%C3%A4re_Stufn.svg), CC BY-SA 3.0 de.

Die Volumenanteile gelten für trockene Luft, d. h. für Luft, die keinen Wasserdampf enthält. Wenn man den Wasserdampf berücksichtigt, verschieben sich die angegebenen Volumenanteile leicht. Die Konzentration von Wasserdampf in der Erdatmosphäre variiert zeitlich und räumlich und kann in den Tropen bis etwa 4 Volumen-% betragen.

Tabelle 2 zeigt, wie sich die Zusammensetzung der Erdatmosphäre mit zunehmender Höhe ändert. Aufgrund der hochenergetischen elektromagnetischen UV-Strahlung von der Sonne werden Moleküle in den hohen Atmosphärenschichten auseinandergerissen. Dadurch entsteht aus molekularem Sauerstoff ( $O_2$ ) allmählich atomarer Sauerstoff (O). Außerdem werden zunehmend mehr Atome und Moleküle ionisiert.



**Abbildung 2: Erdatmosphäre, fotografiert von ESA-Astronaut Alexander Gerst von Bord der Internationalen Raumstation ISS. Die verschiedenen Atmosphärenschichten (Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre) sind gut zu unterscheiden. In der Thermosphäre ist grünes und rotes Polarlicht zu erkennen. ©: ESA, CC BY-SA 3.0 IGO – [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2014/06/Antarctic\\_aurora](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/06/Antarctic_aurora); Beschriftung: Monika Maintz.**

Da die Atmosphäre in immer größerer Höhe auch immer dünner wird, kann sich das Gas ab etwa 100 km nicht mehr gleichmäßig durchmischen. Als Folge trennen sich die Teilchen aufgrund ihrer Masse voneinander: Die Volumenanteile der schwereren Teilchen wie molekularer Stickstoff ( $N_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) nehmen mit zunehmender Höhe immer weiter ab, während die Volumenanteile der leichteren Elemente wie atomarer Sauerstoff ( $O$ ) oder Helium ( $He$ ) ansteigen. Dass der Volumenanteil des atomaren Sauerstoffs mit steigender Höhe zunimmt, liegt natürlich auch daran, dass in höheren Schichten auch immer mehr Sauerstoffmoleküle in Sauerstoffatome aufgespalten werden.

Aus Tabelle 2 lässt sich ablesen, dass das von atomarem Sauerstoff erzeugte grüne Polarlicht erst in Höhen oberhalb von 80 km entstehen kann. Darauf kann man auch schließen, wenn man die Abbildungen 3 und 4 vergleicht. Das rote Leuchten in Abbildung 4 muss auch von Sauerstoff herrühren, da es sich sogar noch oberhalb des grünen Polarlichtstreifens befindet. Denn in dieser Höhe gibt es nur noch vergleichsweise wenig Stickstoffmoleküle. Der molekulare Stickstoff wird hingegen vorwiegend im unteren Bereich der Hochatmosphäre leuchten, da hier die meisten Stickstoffmoleküle vorkommen. Tatsächlich ergeben sich folgende Höhenbereiche - für die Polarlichtzone insgesamt und für die stärksten Polarlichtfarben:

#### **Unterer Rand der Polarlichtzone:**

- Zirka 90 km Höhe (bis maximal 70 km Höhe)
- Begrenzung nach unten:
  - Tiefe, bis zu der die Teilchen, die die Polarlichter auslösen, in die Erdatmosphäre eindringen können
  - Gasdichte darf nicht zu hoch sein, damit die Polarlichter überhaupt entstehen können

#### **Oberer Rand der Polarlichtzone:**

- Ca. 500 bis 700 km Höhe (nur selten höher; sichtbarer Rand meist bei 300 km Höhe)
- Begrenzung nach oben: Gasdichte so gering, dass nicht mehr genügend Stoßpartner für Anregung zur Verfügung stehen

[zurück zum Anfang](#)

### Höhenbereich der von Sauerstoffatomen (O) erzeugten Polarlichter:

- Grün  $\Rightarrow$  ca. 100 bis 150 km Höhe, maximale Leuchtkraft in ca. 120 bis 140 km Höhe
- Rot  $\Rightarrow$  ca. 150 bis 250 km Höhe bzw. bis zum oberen Rand der Polarlichtzone (bis 700 km Höhe), maximale Leuchtkraft in 200 bis 320 km Höhe, seltener sichtbar, da meist vom grünen Licht überstrahlt; bei hoher Sonnenaktivität auch über mittleren geographischen Breiten sichtbar

### Höhenbereich der von neutralen Stickstoffmolekülen (N<sub>2</sub>) erzeugten Polarlichter

- Rot  $\Rightarrow$  Unterer Rand der Polarlichtzone (ca. 90 km Höhe (bis maximal 70 km Höhe))

## Warum hat das Polarlicht genau diese Farben?

Dass wir Polarlichter nur in wenigen reinen Farben leuchten sehen, liegt daran, dass nur O, N<sub>2</sub> und N<sub>2</sub><sup>+</sup> in der obersten Atmosphäre in ausreichender Zahl vorhanden ist, um prinzipiell nennenswerte Lichtmengen infolge von Stoßanregung abzustrahlen. Auch einfach ionisierter Sauerstoff (O<sup>+</sup>), neutrale und einfach ionisierte Sauerstoffmoleküle (O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>) sowie neutrale und einfach ionisierte Stickstoffatome (N, N<sup>+</sup>) werden durch Stöße von energiereichen Elektronen zum Leuchten angeregt. Die Intensitäten dieser Strahlungen sind jedoch so gering, dass sie kaum detektierbar sind oder im Licht der viel intensiveren Polarlichter untergehen.

### Zusatzinformation:

*Das Polarlicht, das von O, N<sub>2</sub> und N<sub>2</sub><sup>+</sup> ausgesandt wird, hat eine Besonderheit. Es dürfte eigentlich gar nicht entstehen! Das wird verständlich, wenn man sich die Übergänge in Elektronenhüllen anschaut, die zwischen verschiedenen Energiezuständen prinzipiell möglich sind. Dann stellt man fest, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass genau die Übergänge realisiert werden, bei denen exakt das Licht abgestrahlt werden muss, in dem die Polarlichter leuchten. Viel wahrscheinlicher ist dagegen, dass die Hüllenelektronen zwischen anderen Energieniveaus hin- und herspringen. Diese Übergänge, die sehr viel wahrscheinlicher sind, heißen „erlaubte Übergänge“ (Stichwort: Dipolstrahlung). Die Übergänge, durch die z. B. Polarlicht entsteht, sind statistisch sehr unwahrscheinlich. Daher sind sie „verboten“. Strahlung, die durch einen verbotenen Übergang entsteht, heißt „verbotene Linie“ (Stichwort: Quadrupolstrahlung).*

*Bei erlaubten Übergängen liegt die Dauer zwischen Anregung und anschließender Emission der für die Anregung notwendigen Energiemenge im Bereich von Sekundenbruchteilen. Bei verbotenen Übergängen dauert dieser Prozess erheblich länger. Das bedeutet im Falle des grünen Polarlichts etwa 1 Sekunde. In dieser Zeit versucht ein Hüllenelektron des Sauerstoffatoms vom zweiten in den ersten angeregten Zustand zurückzufallen.*

*Das rote Licht, das von Sauerstoffatomen bei  $\lambda = 630,0$  nm abgestrahlt wird, entsteht, wenn ein Hüllenelektron vom ersten angeregten Zustand in den Grundzustand zurückfällt. Das dauert mit knapp 2 Minuten sogar noch viel länger! In einem normalen, d. h. dichten Gas könnten solche angeregten Zustände nicht überleben. Der angeregte Sauerstoff würde sofort mit anderen Teilchen kollidieren und dabei seine Anregungsenergie verlieren. Verbotene Linien können daher nur im (Beinahe-)Vakuum entstehen. Da die Teilchendichte hier nur sehr gering ist, dauert es deutlich länger, bis ein angeregtes Teilchen auf ein anderes Atom oder Molekül trifft, und der angeregte Zustand kann sich mittels Lichtabstrahlung abregen.*

*Etwas hemdsärmelig kann man den Unterschied zwischen erlaubten und verbotenen Linien etwa so beschreiben: Bei einem erlaubten Übergang versucht man, in einen vorbeifahrenden Bus zu springen. Bei einem verbotenen Übergang muss man während des Sprungs noch eine 180°-Drehung vollführen. Würde man eine Gruppe von Menschen vor die Wahl stellen, einen dieser beiden Sprünge auszuführen, würden sich die meisten bestimmt für die einfachere Variante entscheiden. Es besteht jedoch eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass auch jemand den komplizierten Sprung wagt.*

[zurück zum Anfang](#)

## Woher kommen die Elektronen, die O, N<sub>2</sub> und N<sub>2</sub><sup>+</sup> zum Leuchten anregen?

Die energiereichen Elektronen, die O, N<sub>2</sub> und N<sub>2</sub><sup>+</sup> zum Aussenden von Polarlicht anregen, kommen aus dem Magnetschweif der Magnetosphäre der Erde (vgl. Abb. 5). Die Magnetosphäre umhüllt die Erde und schützt sie vor der hochenergetischen Teilchenstrahlung aus dem Weltraum. Als erstes ist hier der **Sonnenwind** zu nennen, ein ständig von der Sonne abströmender Partikelstrom aus geladenen Teilchen (vor allem Elektronen und Protonen). Hinzu kommen koronale Massenauswürfe (CMEs). Dies sind explosionsartig von der Sonne weggeschleuderte Plasmawolken, die entstehen, wenn sich Magnetfeldlinien auf der Sonne schlagartig umordnen und neu verbinden (⇒ **magnetische Rekonnexion**).

Die Magnetosphäre ist die Fortsetzung des Erdmagnetfeldes im interplanetaren Raum. Sie hat prinzipiell die Form eines **Dipolfeldes**. Die Feldlinien auf der sonnenzugewandten Seite sind jedoch durch den Sonnenwind stark eingedrückt. Auf der sonnenabgewandten Seite bildet sich dagegen ein mehrere Millionen km langer Magnetschweif aus. Innerhalb des Magnetschweifs befindet sich die **Plasmaschicht**. Dies ist ein Bereich, in dem Elektronen und Ionen eingeschlossen sind.

Das langgestreckte Magnetfeld des Magnetschweifs ist nicht stabil. Wenn es zu stark auseinandergezogen wird, können die Magnetfeldlinien wie Gummibänder „auseinanderreißen“. Dort, wo der „Riss“ entstanden ist, ordnen sich die Feldlinien um und verbinden sich neu. Der der Erde abgewandte Teil verbindet sich zu geschlossenen Feldlinien, die dem Sonnenwind folgen. Der der Erde zugewandte Teil verbindet sich ebenfalls zu geschlossenen Feldlinien. Diese bleiben jedoch an das Erdmagnetfeld

gekoppelt. Analog zum gerissenen Gummiband schnell dieser Teil nun auf die Erde zu. Wenn die Magnetfeldlinien innerhalb der Plasmaschicht verlaufen, nehmen sie die darin gefangenen Elektronen und Ionen mit und beschleunigen sie in Richtung Erde. Die Elektronen werden dabei immer schneller und energiereicher. Durch die **Lorentz-Kraft** auf schraubenförmige Bahnen rund die Magnetfeldlinien gezwungen gelangen sie entlang dieser schließlich in die äußeren Bereiche der Erdatmosphäre, wo sie Sauerstoff und Stickstoff durch Zusammenstöße zum Leuchten anregen können.

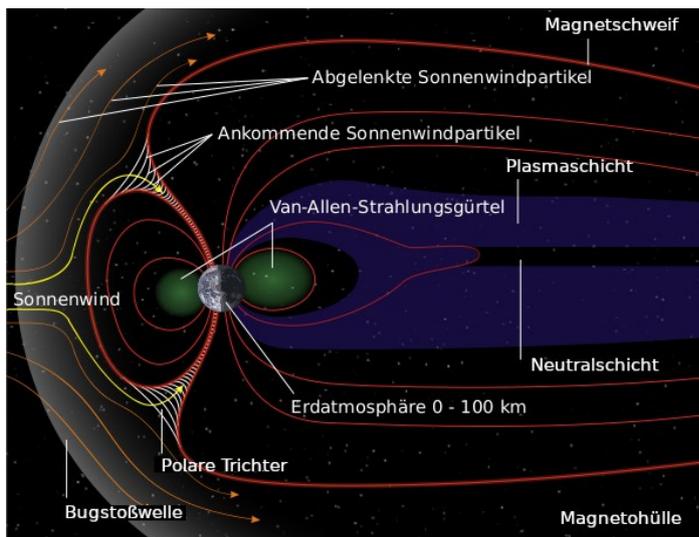


Abbildung 5: Struktur der Magnetosphäre der Erde.  
©: NASA Vector: Aaron Kaase, Medium69. Public domain,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=65031109>.

### Zusatzinformation:

Auch Protonen aus dem Sonnenwind können sichtbare Polarlichter hervorrufen. Die Protonen gelangen durch die polaren Trichter in der Erdmagnetosphäre, die sich über den geomagnetischen Polen befinden (Abb. 5), in die äußersten Bereiche der Erdatmosphäre. Dort regen sie atomaren Wasserstoff zum Leuchten an. Das resultierende Polarlicht erscheint rot (Wellenlänge  $\lambda = 656,3 \text{ nm}$ ) und diffus. Es ist weitaus seltener zu beobachten als das Polarlicht, das durch im Magnetschweif der Erdmagnetosphäre beschleunigte Elektronen hervorgerufen wird.

[zurück zum Anfang](#)

## Literaturangaben und Links

- Pfoser, Andreas; Eklund Tom: Polarlichter – Feuerwerk am Himmel, Oculum-Verlag GmbH, Erlangen, 2013, 2. Auflage, ISBN 978-3-938469-67-5
- <https://www.weltderphysik.de/thema/hinter-den-dingen/wie-entstehen-polarlichter-nordlichter/>
- <https://atoptics.co.uk/blog/aurora-northern-lights/>
- <https://homepage.physics.uiowa.edu/~ghowes/research/scibackground.html>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Polarlicht>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Aurora>
- <https://www.windows2universe.org/earth/Magnetosphere/aurora.html>
- [https://www.windows2universe.org/earth/Magnetosphere/tour/tour\\_earth\\_magnetosphere\\_09.html](https://www.windows2universe.org/earth/Magnetosphere/tour/tour_earth_magnetosphere_09.html)
- <https://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/overview.html>
- <https://www.windows2universe.org/earth/Magnetosphere/overview.html>
- [https://www.windows2universe.org/space\\_weather/space\\_weather.html](https://www.windows2universe.org/space_weather/space_weather.html)
- <https://www.swpc.noaa.gov/>
- <https://www.swpc.noaa.gov/content/education-and-outreach>
- <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena>
- <https://www.gi.alaska.edu/monitors/aurora-forecast>