

4.4 Das Polarlicht

KRISTIAN SCHLEGEL

Aurora: It is a phenomenon which intrigued mankind over centuries. Today it can be explained as a result of solar processes which act on near-Earth space – the magnetosphere – via the solar wind. These processes are described in the article in a simplified manner. Colours and forms of aurora are similarly explained.

Polarlichter, die flackernden und wehenden Lichtschleier am Himmel, haben die Menschen schon immer fasziniert. In früheren Zeiten, als es noch keine Erklärung für dieses Naturschauspiel gab, wurde es häufig mit Furcht und Schrecken registriert und als Vorzeichen für Katastrophen und Krieg angesehen oder auch als Zeichen Gottes, das die Menschen zur Buße ermahnen sollte. Entsprechende Darstellungen finden sich in vielen überlieferten Texten und auf Flugblättern des 16. und 17. Jahrhunderts, die das Gesehene darstellen (SCHLEGEL & SCHLEGEL 2011).

Obwohl sich schon griechische und römische Gelehrte, wie z.B. Aristoteles und Seneca, mit dem Polarlicht beschäftigten, wurden erst im 18. Jahrhundert wissenschaftliche Deutungsversuche unternommen (SCHRÖDER 1984). Der englische Astronom Halley äußerte im Jahre 1716 Vermutungen über einen Zusammenhang zwischen Polarlicht und geomagnetischen Störungen, was die schwedischen Wissenschaftler Celsius und Hjorter im Jahre 1741 eindeutig beweisen konnten. Viele Forscher gingen zunächst davon aus, dass es sich bei dem Leuchten um Sonnenlicht handle, das an Eiskristallen, Wolken oder atmosphärischen Gasen reflektiert werde. Erst der schwedische Physiker Angström folgte 1867 aus der Spektralanalyse des Polarlichts, dass es von einem selbstleuchtenden Gas stammen müsse und kein reflektiertes Sonnenlicht sein könne. Die zahlreichen Messungen in den letzten 50 Jahren, besonders mit Hilfe von Forschungssatelliten, haben die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse weitgehend geklärt.

Ursachen des Polarlichts

Letztlich wird das Polarlicht doch von der Sonne verursacht, wenn auch auf etwas kompliziertere Weise als die frühen Forscher annahmen (SCHLEGEL 2001a).

Neben dem Licht und der Wärme, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können, strömen von der Sonne ständig elektrisch geladene Teilchen ab, der Sonnenwind. Er besteht hauptsächlich aus Protonen und Elektronen und weht mit einer Geschwindigkeit von 400–800 km/s auch auf die Erde zu. In Erdnähe stellt das Magnetfeld der Erde ein Hindernis für den Sonnenwind dar. Das Gebiet um die Erde herum, das vom Erdmagnetfeld erfüllt wird, nennt man Magnetosphäre (SCHLEGEL 2001b). Ohne Sonnenwind wäre sie symmetrisch, wie wir es von den Feldlinien eines Stab-

magneten her kennen. Der Sonnenwind jedoch presst die Magnetosphäre auf der Sonnen-zugewandten Seite (Tagseite) stark zusammen und zieht sie auf der Nachtseite zu einem langen Schweif aus (Abb. 4.4-1).

Da elektrische geladene Teilchen sich nicht quer zu Magnetfeldlinien bewegen können, kann der Sonnenwind nicht direkt in die Magnetosphäre eindringen. Vielmehr strömt er um sie herum, wie ein Fluß um eine darin liegende Insel, nachdem er durch Ausbildung einer Bugstoßwelle von Überschall- auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst wurde.

Den Schweif der Magnetosphäre darf man sich nicht so schön gleichmäßig geformt vorstellen, wie schematisch in Abb. 4.4-1 dargestellt. Tatsächlich flattert er im Sonnenwind wie eine Fahne im irdischen Wind. Dort, weit hinten im Magnetosphärenschweif können Elektronen aus dem Sonnenwind in die Magnetosphäre einsickern, wobei eine Verschmelzung von Feldlinien des irdischen mit denen des interplanetaren Magnetfeldes eine wichtige Rolle spielt. Diese eingesickerten Elektronen bilden dort in der Plasmaschicht zusammen mit Ionen, die aus der irdischen Ionosphäre stammen, ein Teilchenreservoir.

Der an der Magnetosphäre vorbeiströmende Sonnenwind wirkt zusammen mit dem Erdmagnetfeld wie ein Dynamo, der im Inneren der Magnetosphäre ein kompliziertes System von elektrischen Strömen antreibt. Einer dieser Ströme wird von den Elektronen der Plasmaschicht getragen, wobei diese entlang von Magnetfeldlinien aus dem Schweif auf die Erde zu strömen. Dabei bewegen sich die Elektronen auf spiralförmigen Bahnen um die Magnetfeldlinien. In der Nähe der Erde stoßen die Elektronen dann auf Gasteilchen der Erdatmosphäre und regen diese zum Leuchten an. Das passiert in einer Höhe von 100-300 km über dem Erdboden, dort erscheint daher das Polarlicht.

Die Feldlinien aus der Plasmaschicht, an denen entlang sich die Elektronen zur Erde hin bewegen, beginnen etwas äquatorwärts von den Magnetpolen. Daher ist dort das Polarlicht am häufigsten. Weder die weiter zum Pol hin noch die weiter zum Äquator hin beginnenden Feldlinien stellen im Normalfall eine Verbindung zur Plasmaschicht her, daher ist dort sehr selten Polarlicht zu sehen. Erstere führen durch die Magnetosphäre in den Weltraum hinaus, letztere schließen sich vor Erreichen der Plasmaschicht.

Da die Magnetosphäre ein dreidimensionales Gebilde ist, stellt der Bereich, in dem die Polarlichter am häufigsten auftreten, ein ringförmiges Gebiet dar, in dessen Mitte der magnetische Pol liegt (siehe Ausschnitt in *Abb. 4.4-1*). Innerhalb dieses sogenannten Polarlichtovals kann man nahezu jede Nacht Polarlichter beobachten. Besonders deutlich kann diese leuchtende »Krone« der Erde von Satelliten aufgenommen werden, die aus großer Höhe auf die Pole hinunter schauen (*Abb. 4.4-2*).

Warum kommt auch in unseren Breiten Polarlicht vor, wenn auch selten? Der Sonnenwind strömt nicht immer stetig und ruhig. Besonders zu Zeiten der aktiven Sonne ereignen sich kolossale Explosionen in der Sonnenatmosphäre, die »koronalen Massenauswürfe«. Durch dabei ausgelöste Schockwellen wird der Sonnenwind »böig« oder gar zum Sturm. Die Magnetosphäre der Erde wird bei so einem Sonnensturm besonders stark verformt und durchgeschüttelt. Das hat u.a. zur Folge, dass sich die Plasmaschicht weiter zur Erde hin ausbreitet. Dadurch gelangen Magnetfeldlinien in ihren Einflusbereich, die viel weiter äquatorwärts beginnen, als diejenigen, an denen die Elektronen norma-

lerweise entlangströmen. Das bedeutet, dass sich das Polarlichtoval weiter nach Süden ausbreitet als beim ruhigen Sonnenwind. Dadurch können auch bei uns in Deutschland oder in Österreich, nach sehr starken Sonnenexplosionen sogar im Mittelmeerraum, Polarlichter beobachtet werden.

Die Sonne durchläuft einen Aktivitätszyklus von 11 Jahren, im Jahre 2012 wurde wieder ein Aktivitätsmaximum erreicht. Zu diesen Zeiten sind Polarlichter besonders häufig, in dem nach etwa 5½ Jahren folgenden Aktivitätsminimum sind sie selten. Polarlichter sind eine Erscheinung des sog. Weltraumwetters. Wie Licht und Wärme von der Sonne das irdische Wetter verursachen, so bestimmen die verschiedenen, nicht sichtbaren Strahlungen der Sonne (Sonnenwind, energiereiche Protonen und Elektronen, Röntgen- und Gammastrahlen) die »Wetterbedingungen« des erdnahen Weltraums. Bei extremen Weltraumwetterlagen können z.B. Satelliten und Raumstationen beschädigt und die Telekommunikation beeinträchtigt werden (SCHWENN & SCHLEGEL 2001). In diesem Sinne kann man die Polarlichter als Warnsignal auffassen.

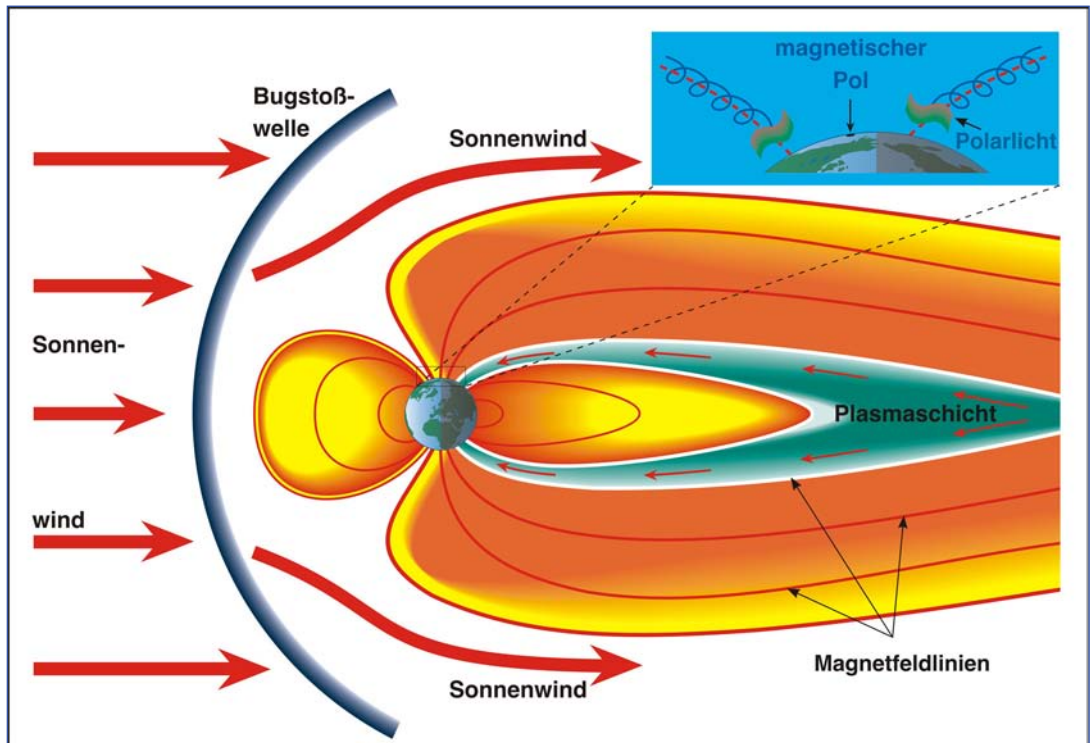


Abb. 4.4-1: Die Magnetosphäre der Erde im Längsschnitt. Die Sonne muss man sich ganz weit links vorstellen. Der anströmende Sonnenwind drückt die Magnetosphäre vorn zusammen und zieht die Magnetfeldlinien auf der Nachtseite zu einem langen Schweif aus. Beim Vorbeiströmen erzeugt der Sonnenwind durch einen Dynamoeffekt komplizierte Stromsysteme im Inneren der Magnetosphäre. Dabei werden unter anderem Elektronen aus der Plasmaschicht entlang der Feldlinien zur Erde hin in Polnahe Gebiete geleitet (Pfeile). Der vergrößerte Ausschnitt zeigt schematisch, wie dort die Elektronen auf Spiralbahnen in die Erdatmosphäre eindringen und das Polarlicht auslösen.

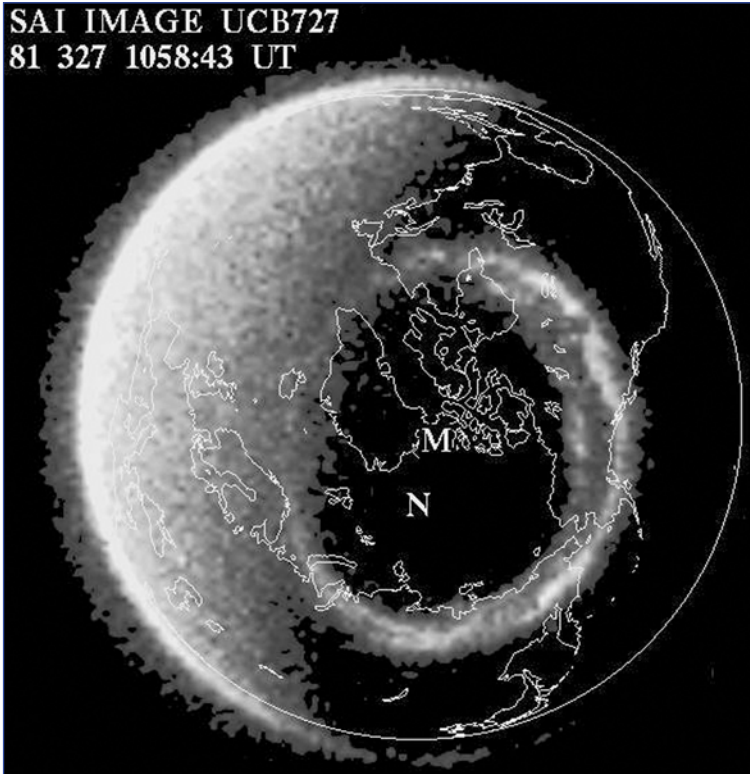


Abb. 4.4-2: Das sogenannte Polarlichtoval, d.h. das ringförmige Gebiet um den magnetischen Pol der Erde, in dem am häufigsten Polarlichter auftreten. Das Bild wurde aus ca. 18.000 km Höhe von dem Satelliten Dynamics Explorer aufgenommen. Die helle Fläche links ist die sonnenbeschienene Tagseite der Erde.

Es muss ausdrücklich daraufhin gewiesen werden, dass die Vorgänge im Sonnenwind und in der Magnetosphäre hier sehr vereinfacht dargestellt wurden. Tatsächlich handelt es sich um sehr komplizierte Plasma-Prozesse, bei denen auch heute noch nicht alle Details geklärt sind.

Noch ein Wort zur Nomenklatur: In der Geophysik wird stets der Begriff »Polarlicht« benutzt und nicht der umgangssprachlich geläufigere Ausdruck »Nordlicht«. Die Magnetfeldlinien aus der Plasmaschicht reichen auch bis in die Nähe des Südpols. Dort spielen sich genau die gleichen Vorgänge ab wie auf der Nordhalbkugel der Erde. Es gibt dort also ein Südlicht. Seefahrer und Forschungsreisende haben dieses Südlicht vor etwa 300 Jahren zum ersten Mal beschrieben (SCHLEGEL & SCHLEGEL 2011). Sie nannten es »aurora australis« im Gegensatz zur »aurora borealis« der Nordhalbkugel. Mit dem Begriff Polarlicht werden beide Phänomene gleichzeitig beschrieben. In der englischen Sprache hat sich die Bezeichnung »aurora« erhalten.

Die Farben und Formen des Polarlichts

Die Farbe des Polarlichts hängt letztlich von den beteiligten atmosphärischen Gasteilchen ab. Reaktionen mit Sauerstoff führen zu roten und grünen Farbtönen, solche mit Stickstoff zu blau-violetten. Häufig mi-

schen sich die Farben zu einem fast weißen Leuchten.

Kommt in unseren Breiten Polarlicht vor, so erscheint es meistens rötlich. Daher brachten unsere Vorfahren es mit Blut oder Feuersbrünsten in Verbindung und sahen es als Vorzeichen für Krieg und Krankheit an.

Die Helligkeit von Polarlichtern wird mit dem »international brightness coefficient« (IBC) klassifiziert, wobei die Intensität in Rayleigh ($1 \text{ Rayleigh} = 10^6 \text{ Photonen/cm}^2\cdot\text{s}$) angegeben wird:

<i>IBC Intensität des grünen Lichtes</i>	<i>Vergleichbare Helligkeit</i>
<i>I 1 kR (kilo Rayleigh)</i>	<i>wie die Milchstraße</i>
<i>II 10 kR</i>	<i>wie vom Mond beschienene dünne Cirruswolken</i>
<i>III 100 kR</i>	<i>wie vom Mond beschienene Cumuluswolken</i>
<i>IV 1000 kR</i>	<i>wie bei Vollmond</i>

Bei den Formen des Polarlichts unterscheidet man grundsätzlich zwischen diffusen und diskreten (Bögen, Bändern, Vorhänge) Polarlichtern.

Diffuse Polarlichter erscheinen meist in Höhen oberhalb 150 km und bilden strukturlose leuchtende Bereiche, die besonders am Nachmittag und Abend bis kurz nach Mitternacht am Südrand des Polarlichtovals auftreten.



Abb. 4.4-3: Ein typischer ruhiger Polarlichtbogen, der sich von West nach Ost über den Himmel spannt und manchmal bleibt (Aufnahme J. Oldroyd in der Antarktis).

Die Form der diskreten Polarlichter wird durch die geometrische Verteilung der Ströme geprägt, die aus der Plasmaschicht zur Erde hin fließen. Im Fall des ruhigen, stetigen Sonnenwindes beobachtet man häufig einen stabilen Polarlichtbogen, der in west-östlicher Richtung den nördlichen Himmel überspannt (Abb. 4.4-3). Treten »Böen« im Sonnenwind auf, so verformt sich der Bogen, es entstehen Falten und Beulen. Man spricht dann von Bändern, denn wie ein Leuchtband huschen diese Leuchterscheinungen über den Himmel. Oft sind es auch wellenförmige Strukturen, die von Ost nach West über den Himmel laufen. Die stark variierenden Polarlichter treten meist gegen Mitternacht oder am frühen Morgen auf, die ruhigen Bögen beobachtet man meist am frühen Abend.

Alle diese Strukturen bilden das Nacht-Polarlicht, da ja die Elektronen aus dem Magnetosphärenschweif zur Nachtseite der Erde strömen. Es gibt aber auch ein Tag-Polarlicht. Es entsteht, wenn Sonnenwindteilchen durch den »Spalt« eindringen, der zwischen den nach hinten und den nach vorn gebogenen Magnetfeldlinien besteht (vgl. Abb. 4.4-1). Dieses Tag-Polarlicht kann nur in etwa 75° nördlicher oder südlicher Breite während des Polarwinters beobachtet werden, wenn es dort 24 Stunden lang dunkel ist.

Die bisher beschriebenen Polarlichtformen und -farben werden von Elektronen ausgelöst. Sehr viel seltener ist das sogenannte Protonen-Polarlicht. Bei besonders starken Explosionen auf der Sonne, den sog. Flares werden Protonen mit hoher Energie in den Weltraum geschleudert und gelangen über die Magnetfeldlinien der Erde in die Polgebiete. Protonen-Polarlicht ist von roter Farbe und generell diffus, d.h. weist keine

Strukturen auf, wie das von Elektronen verursachte, oben beschriebene Polarlicht.

Weitere Informationen

Polarlichter beeindrucken besonders durch ihre Formen- und Farbenvielfalt, die in diesem Artikel nicht adäquat demonstriert werden konnte. Weitere eindrucksvolle Bilder findet man auf den Internetseiten (* = auf englisch):

- <http://www.geo.mtu.edu/weather/aurora/> (*)
- http://www.exploratorium.edu/learning_studio/auroras/ (*)
- <http://www.meteoros.de/polar/polar.htm> (deutsch)
- http://geo.phys.uit.no/articl/North_Light.html (*)
- <http://www.sgo.fi/links.php#aurora> (*)
- <http://aurora.physics.uiowa.edu/> (*)

Literatur

- SCHLEGEL, K. (2001a): Vom Regenbogen zum Polarlicht - Leuchterscheinungen in der Atmosphäre, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2. Aufl., ISBN 3-8274-1174-2
- SCHLEGEL, K. (2001b): Die Magnetosphäre der Erde, *Astronomie und Raumfahrt im Unterricht*, 63, 31-34.
- SCHLEGEL, K. & B. SCHLEGEL (2011): Polarlichter zwischen Wunder und Wirklichkeit – Kulturgeschichte und Physik einer Himmelserscheinung, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011, ISBN 978-3-8274-2880-6.
- SCHRÖDER, W. (1984): Das Phänomen des Polarlichts, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- SCHWENN, R. & K. SCHLEGEL (2001): Sonnenwind und Weltraumwetter, *Spektrum der Wissenschaft*, Dossier 3/2001, ISSN 0947-7934.

Kontakt:

Prof. Dr. Kristian Schlegel
Copernicus Gesellschaft e.V., Göttingen
kristianschlegel@web.de