

# BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

## Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Kristian Schlegel

# Polarlicht

## 1 Einleitung

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 Texte finden sich auf vielen Flugblättern des 16. und 17. Jahrhunderts, die das Gesehene darstellen (z.B. in [1]).

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. Der englische Astronom Halley äußerte 1716 Vermutungen über einen Zusammenhang zwischen Polarlicht und geomagnetischen Störungen, was die schwedischen Wissenschaftler Celsius und Hjärter im Jahre 1741 eindeutig beweisen konnten. Viele Forscher gingen zunächst davon aus, dass es sich bei dem Leuchten um Sonnenlicht handele, das an Eiskristallen, Wolken oder atmosphärischen Gasen reflektiert werde. Erst der schwedische Physiker Angström folgerte 1867 aus der Spektralanalyse des Polarlichts, dass es von einem selbstleuchtenden Gas stammen müsse und kein reflektiertes Sonnenlicht sein könne.

## 2 Ursachen des Polarlichts

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

Neben dem Licht und der Wärme, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können, strömen von der Sonne ständig geladene Teilchen ab, die man Sonnenwind nennt. 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 [2]. Ohne Sonnenwind wäre sie symmetrisch, wie wir es von den Feldlinien eines Stabmagneten her kennen. Der Sonnenwind jedoch presst die Magnetosphäre auf der der Sonne zugewandten Seite (Tagseite) stark zusammen und zieht sie auf der Nachtseite zu einem langen Schweif aus. (Abb. 1).

Da elektrische geladene Teilchen sich nicht quer zu Magnetfeldlinien bewegen können (siehe Anhang), 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. Weitere Einzelheiten zum Son-

nenwind werden in [3] und [4] behandelt. Den Schweif der Magnetosphäre darf man sich nicht so schön gleichmäßig geformt vorstellen wie schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Tatsächlich flattert er im Sonnenwind wie eine Fahne im irdischen Wind. Durch die dauernden Verformungen können auf komplizierte Weise weit hinten im Schweif Elektronen aus dem Sonnenwind in die Magnetosphäre einsickern. Sie bilden dort in der Plasmaschicht zusammen mit Ionen, die aus der irdischen Ionosphäre stammen, ein Teilchenreservoir.

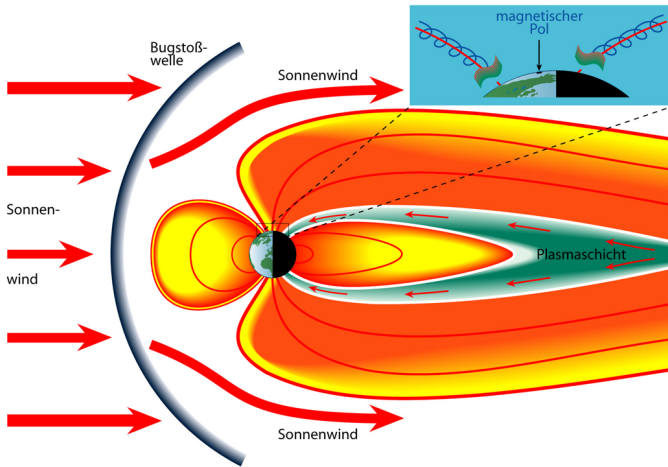


Abb. 1: Die Magnetosphäre der Erde im Längsschnitt. Die Sonne muß man sich ganz weit links vorstellen. Der anströmende Sonnenwind drückt die Magnetosphäre vorn zusammen und zieht die Magnetfeldlinien auf der Nachtseite zu einem langen Schweif aus. Beim Vorbeiströmen erzeugt der Sonnenwind durch einen 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.

Der an der Magnetosphäre vorbeiströmende Sonnenwind wirkt zusammen mit dem Magnetfeld wie ein Dynamo, der im Inneren der Magnetosphäre ein kompliziertes System von elektrischen Strömen antreibt. Eine Komponente 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 (siehe Anhang). In der Nähe der Erde stoßen diese Elektronen dann auf Gasteilchen der Erdatmosphäre und regen diese (teilweise über komplizierte Reaktionsketten) zum Leuchten an. Das passiert in einer Höhe von 100 - 300 km über dem Erdboden, dort erscheint daher das Polarlicht. Anschaulich kann man die Prozesse, die zur

Entstehung des Polarlichts führen, mit den Vorgängen in einer Braunschen Röhre (Fernsehröhre) vergleichen, wie Abb. 2 verdeutlicht.

Nur die Feldlinien, die etwas unterhalb der Pole beginnen, reichen weit in den Magnetosphärenschweif. An ihnen entlang können sich die Elektronen aus der Plasmaschicht auf die Erde zu bewegen. Daher ist dort, wo diese Feldlinien enden, 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.

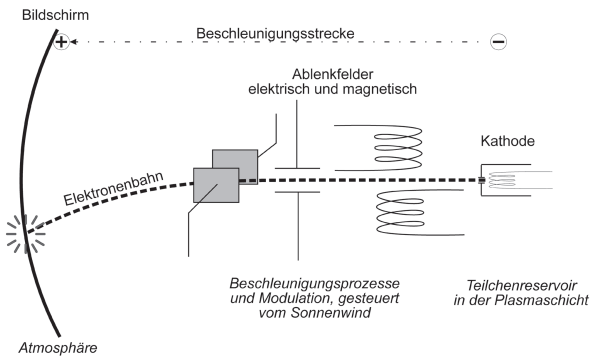


Abb. 2: Analogie zwischen Polarlichtentstehung (s. Abb. 1) und den Vorgängen in einer Braunschen Röhre (s. oben): die Kathode entspricht dem Teilchenreservoir in der Plasmaschicht, die Elektronen werden von dort zur Erde hin beschleunigt, bis sie Gasteilchen in der Atmosphäre (entspricht dem Bildschirm) zum Leuchten bringen. Dazwischen werden sie durch elektrische und magnetische Felder in ihrer Bahn beeinflusst.

Da die Magnetosphäre ein dreidimensionales Gebilde ist, stellt der Bereich, in dem die Polarlichter am häufigsten sind, ein ringförmiges Gebiet dar, in dessen Mitte der magnetische Pol liegt (siehe Ausschnitt Abb. 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. 3). Warum kommt auch in unseren Breiten Polarlicht vor, wenn auch sehr 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 Schocks 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 gelan-

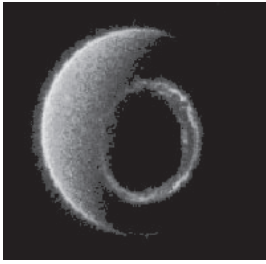


Abb. 3: Das sogenannte Polarlichtoval, d.h. das ringförmige Gebiet um den magnetischen Pol, in dem am häufigsten Polarlichter auftreten. Das Bild wurde aus ca. 18000 km Höhe von dem Satelliten Dynamics Explorer aufgenommen. Die helle Fläche links ist die sonnenbeschienene Tagseite der Erde.

gen Magnetfeldlinien in ihren Einflussbereich, die viel weiter äquatorwärts beginnen, als diejenigen, an denen die Elektronen normalerweise 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.

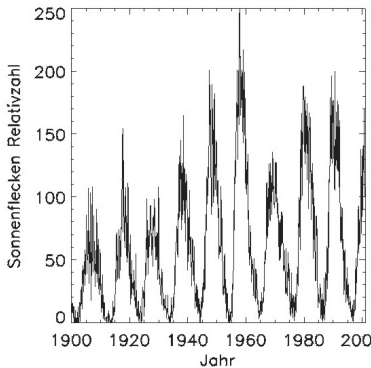


Abb. 4: Sonnenaktivität in den letzten 100 Jahren, dargestellt durch die sog. Sonnenfleckenrelativzahl. Polarlichter treten besonders häufig zu Zeiten der Maxima und auf der absteigenden Flanke der Aktivitätskurven auf.

Die Sonne durchläuft einen Aktivitätszyklus von 11 Jahren, im Jahre 2000 wurde wieder ein Aktivitätsmaximum erreicht. In den Jahren danach können also vermutlich auch bei uns wieder Polarlichter beobachtet werden, da besonders starke Explosionen auf der Sonne häufig auf dem absteigenden Ast der Sonnenaktivitätskurve (Abb. 4) auftreten. 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, wodurch z.B. Satelliten und Raumstationen beschädigt und die Kommunikation beeinträchtigt werden können [5,6].

Es muss ausdrücklich daraufhin gewiesen werden, dass die Vorgänge im Sonnenwind und in der Magnetosphäre hier sehr vereinfacht dargestellt wurden. Tat-

sächlich handelt es sich um sehr komplizierte Plasmaprozesse, die auch heute noch nicht in allen Details verstanden werden. Weitergehende Beschreibungen finden sich in [3] und [4].

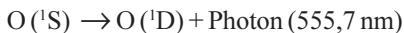
Noch ein Wort zur Nomenklatur: In der Geophysik wird stets der Begriff „Polarlicht“ benutzt und nicht der umgangssprachlich geläufigere Ausdruck „Nordlicht“. Die Magnetfeldlinien aus der Plasmaschicht reichen auch bis in die Nähe des Südpols. Dort spielen sich genau die gleichen Vorgänge ab wie auf der Nordhalbkugel der Erde. Es gibt dort also ein Südlicht. Seefahrer und Forschungsreisende haben dieses Südlicht zum ersten Mal beschrieben. 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.

### 3 Die Farben des Polarlichts

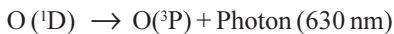
Beim Polarlicht dominieren, grüne, rote und blau-violette Farbtöne. Die Farbe hängt letztlich von den beteiligten atmosphärischen Gasteilchen ab, Abb. 5 gibt einen Überblick über das Spektrum im sichtbaren Bereich. Nur ein geringer Teil der Emissionen wird durch direkte Stoßanregung verursacht, meistens entstehen die angeregten Atome/Moleküle durch chemische Reaktionen, die ihrerseits durch die einfallenden Teilchen ausgelöst oder beeinflusst werden. Der vorherrschende grüne Farbton wird z.B. durch folgende Reaktionen verursacht:



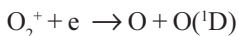
das angeregte Sauerstoffatom geht dann durch Emission eines Photons in einen energetisch tieferen Zustand über



Rotes Licht wird emittiert, wenn dieser metastabile Zustand in den Grundzustand übergeht:



Der  $\text{O}(^1\text{D})$ -Zustand wird direkt auch durch dissoziative Rekombination erzeugt:



Stickstoffmoleküle können durch primäre Elektronen ionisiert und angeregt werden:



Der hierbei angeregte Zustand des ionisierten Stickstoffmoleküls gehört zu einem Vibrationszustand. Er kann in andere Vibrationszustände übergehen, wobei eine ganze Bande von Linien im blau-violetten Bereich emittiert wird. Emissionsban-

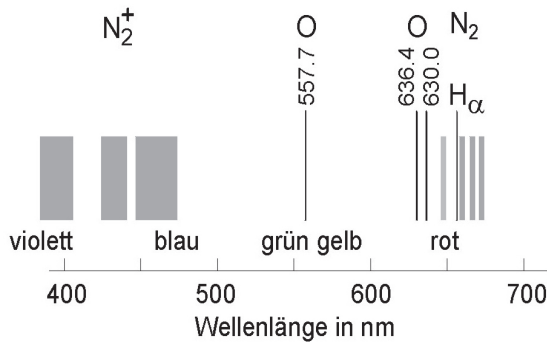


Abb. 5: Die wichtigsten Spektrallinien und -banden des Polarlichts im sichtbaren Licht.

den des neutralen Stickstoffmoleküls liegen im Rot und im Ultraviolett (Abb. 5). Bei der o.g. grünen und roten Linie (letztere ist genaugenommen ein Dublett, siehe Abb. 5) handelt es sich um sogenannte ‘verbotene’ Linien. Die Ausgangszustände des atomaren Sauerstoffs haben eine relativ lange Lebensdauer von 1 s und 110 s. Unter normalem Druck am Erdboden werden diese angeregten Zustände sofort durch Stöße mit anderen Atomen/Molekülen deaktiviert, weil die Zeit zwischen zwei solchen Stößen sehr viel kürzer ist als diese Lebensdauer. Lediglich in Höhen oberhalb 100 km, wo die Luftdichte nur noch weniger als ein Millionstel der Dichte am Erdboden beträgt, ist der zeitl. Abstand zwischen zwei Stößen größer als die Lebensdauer und die Anregungsenergie kann als Licht abgestrahlt werden. Die Zuordnung der beobachteten Linien zum atomaren Sauerstoff bereitete den Spektroskopikern daher zunächst große Schwierigkeiten, sie konnten erst im Jahre 1923 eindeutig identifiziert werden. Ausführlich werden die Polarlichtemissionen in [7] und die historischen Aspekte in [8] behandelt.

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 ( $1 \text{ Rayleigh} = 10^6 \text{ Photonen/cm}^3/\text{s}$ ) angegeben wird:

IBC	Intensität der 557,7nm Linie	Vergleichbare Helligkeit
I	1 kR (Kilorayleigh)	wie die Milchstraße
II	10 kR	wie vom Mond beschienene dünne Cirruswolken
III	100 kR	wie vom Mond beschienene Cumuluswolken
IV	1000 kR	wie bei Vollmond

#### 4 Die Formen des Polarlichts

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen diffusen (flächenhaft-strukturlosen) und diskreten (Bögen, Bändern, Vorhänge) Polarlichtern.

Diffuse Polarlichter entstehen, wenn Teilchen (mit Energien  $< 1$  keV) durch stochastische Prozesse in den Verlustkonus gestreut werden (siehe Anhang). Sie erscheinen meist in Höhen oberhalb 150 km und bilden strukturlose leuchtende Bereiche, die besonders am Nachmittag und Abend bis kurz nach lokaler Mitternacht am Südrand des Polarlichtovals auftreten (siehe Abb. 6).

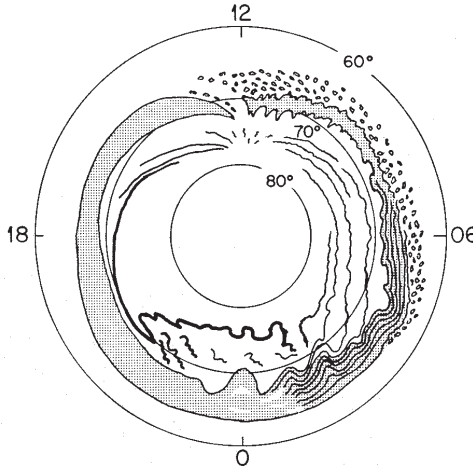


Abb. 6: Schematische Darstellung der Haupterscheinungsformen des Polarlichts in Abhängigkeit von der Lokalzeit (Mittag oben) oberhalb von  $60^\circ$  nördl. Breite. Das gerasterte Gebiet kennzeichnet das diffuse Leuchten ohne Struktur. Die dicke Linie repräsentiert einen ruhigen Bogen, der nach etwa 21 Uhr Lokalzeit in gefaltete und verschlungene Bänder übergeht. In den Morgenstunden zeigen sich häufig am Südrand des Polarlichtovals Leuchtflecke am Himmel, sog. „patches“. Die kurzen Bögen bei etwa  $75^\circ$  um die Mittagszeit stellen das Tagseiten-Polarlicht dar.

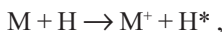
Diskrete Polarlichter werden von Teilchen mit Energien von einigen keV verursacht. Da die Energie der Teilchen aus der Plasmaschicht deutlich kleiner ist, findet in diesem Fall eine Teilchenbeschleunigung statt. Der genaue Mechanismus ist bis heute noch nicht endgültig geklärt, es werden verschiedene derartige Beschleunigungsprozesse diskutiert (siehe z.B. Kapitel 8 in [3]). Da die Teilchen dabei parallel zu den Magnetfeldlinien beschleunigt werden, wächst ihre Geschwindigkeit  $V_{\parallel}$  und damit auch der Anstellwinkel  $\alpha$  bei ihrer Bewegung zur Erde hin (siehe Anhang). Das verschiebt den Spiegelpunkt nach unten, d.h. diese beschleunigten Teilchen dringen tiefer in die Atmosphäre ein. Diskrete Polarlichter entstehen daher meist in Höhen zwischen 90 und 150 km.



Die Form der diskreten Polarlichter wird durch die geometrische Verteilung der Ströme geprägt, die aus der Plasmaschicht zur Erde hin fließen, und die letztlich die Magnetfeldkonfiguration im Schweif der Magnetosphäre widerspiegeln. Im Fall des ruhigen, stetigen Sonnenwindes beobachtet man häufig einen stabilen Polarlichtbogen, der in west-östlicher Richtung den nördlichen Himmel überspannt. 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 (sog. Omega-Bänder, weil die Formen dem griechischen Buchstaben ähneln). Die stark variierenden Polarlichter treten meist gegen Mitternacht oder am frühen Morgen auf, die ruhigen Bögen beobachtet man meist am frühen Abend. Abb. 6 veranschaulicht das zeitliche und räumliche Auftreten von Polarlichtern.

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. 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. Die Protonen werden nach Abbremsung durch Stöße in der oberen Atmosphäre zu neutralem angeregtem Wasserstoff umgeladen:



wobei M ein beliebiges Gasatom ist. Das angeregte Wasserstoffatom geht unter Emission von  $L_{\alpha}$  (121,57 nm, UV-Bereich) und  $H_{\alpha}$  (656,3 nm, rot) in den Grundzustand über. Protonen-Polarlicht ist generell diffus, d.h. weist keine Strukturen auf, wie das von Elektronen verursachte, oben beschriebene Polarlicht. Das rote Leuchten kann mit bloßem Auge nicht von dem roten Leuchten des Sauerstoffs (s.o.) unterschieden werden.

## 5 Weitere Informationen

Da Polarlichter im wesentlichen durch ihre Farbvielfalt beeindruckend sind, wurde in diesem Artikel, der keine Farbfotos erlaubte, bewusst auf Bilder verzichtet. Einige Bilder befinden sich auf der Homepage zu diesem Buch. Weitere eindrucksvolle Bilder findet man auf den Internetseiten

<http://www.geo.mtu.edu/weather/aurora/>,

[http://www.exploratorium.edu/learning\\_studio/auroras/](http://www.exploratorium.edu/learning_studio/auroras/),

<http://www.spaceater.com>

(unter „Nothern Lights-Galery“ Bilder aus der ganzen Welt)

<http://www.meteoros.de> (Polarlichter über Deutschland und Mitteleuropa),  
<http://geo.phys.uit.no/auroras/auroras.html> (über Norwegen),  
<http://www.sgo.fi/Pictures/> (über Finnland),  
<http://sprg.ssl.berkeley.edu/image/>,  
<http://www-pi.physics.uiowa.edu/vis/>  
 (Satellitenaufnahmen und animierte Bildsequenzen).

## 6 Anhang

Zur quantitativen Beschreibung der Vorgänge bei der Polarlichtentstehung, muss man die Bewegung von elektrisch geladenen Teilchen im Erdmagnetfeld betrachten (ausführlich z.B. in [4]). Die Bewegungsgleichungen lauten in einem homogenen Magnetfeld  $\vec{B} = (0,0, B)$ , wenn  $x$  und  $y$  eine Ebene senkrecht zum Magnetfeld aufspannen und  $z$  die magnetfeldparallele Richtung ist:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = q \frac{dy}{dt} B; \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = -q \frac{dx}{dt} B; \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (1)$$

Dabei ist  $m$  die Teilchenmasse,  $q$  seine Ladung und  $B$  die Magnetfeldstärke. Dieses System von Differentialgleichungen ergibt für die Geschwindigkeiten:

$$V_x = V_{\perp} \cos(\omega_B t) \quad V_y = V_{\perp} \sin(\omega_B t) \quad V_z = V_{\parallel} = \text{konst} \quad (2)$$

und für die Bahnpunkte:

$$x = r_B \sin(\omega_B t) \quad y = -r_B \cos(\omega_B t) \quad z = z_0 + V_{\parallel} t \quad (3)$$

Die Bahnen sind Spiralen um die Magnetfeldrichtung, wobei der Radius der Spirale (Larmor-Radius)

$$r_B = \frac{m V_{\perp}}{|q| B} \quad (4)$$

und die Gyrofrequenz

$$\omega_B = \frac{|q| B}{m} \quad \text{ist.}$$

$$V_{\perp} = V \sin \alpha \quad \text{und} \quad V_{\parallel} = V \cos \alpha \quad (5)$$

sind die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht und parallel zum Magnetfeld, wobei  $\alpha$  der sog. Anstellwinkel ist (mehr dazu weiter unten). Nur parallel zum Magnetfeld ist die Bewegung eine reine Translation.

Das Magnetfeld der Erde ist allerdings kein homogenes Feld. In nicht zu großer Entfernung von der Erde kann es mit guter Näherung als Dipolfeld beschrieben werden (in Polarkoordinaten):

$$B = B_0 \left( \frac{R_e}{r} \right)^3 \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi} \quad , \quad (6)$$

wobei  $R_e$  der Erdradius und  $B_0 = 30 \text{ mT}$  ist.

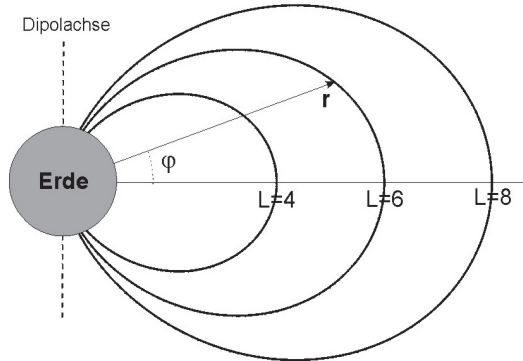


Abb. A1: Dipolfeld des Erdmagnetismus mit 3 Feldlinien, die durch den Schalenparameter  $L$  gekennzeichnet sind. Das Feld ist symmetrisch zur Dipolachse, hier ist nur der rechte Teil gezeichnet.

Die Gleichung für eine bestimmte Feldlinie ist  $r = LR_e \cos^2 \varphi$ , wobei der dimensionslose Parameter  $L$  (Schalenparameter) die Entfernung des Schnittpunkts der Feldlinie mit der Äquatorebene angibt (siehe Abb. A1).

Da die Inhomogenität im Erdmagnetfeld nicht sehr ausgeprägt ist, können die Lösungen (2) und (3) lokal benutzt werden, allerdings muss man berücksichtigen, dass sich sowohl  $r_b$  als auch  $\omega_b$  längs der Feldlinie ändern. Nähert sich daher ein Teilchen aus der Plasmaschicht (sie liegt in der Äquatorebene der Magnetosphäre, d.h.  $\varphi \approx 0$ ) der Erde längs einer Feldlinie, so wird wegen der Zunahme von  $B$  der Larmor-Radius kleiner und die Gyrofrequenz größer. Gleichzeitig ändert sich der o.g. Anstellwinkel  $\alpha$ ; man kann nämlich zeigen, dass

$$B / \sin^2 \alpha \quad (7)$$

eine Konstante der Bewegung ist. Beträgt der Anstellwinkel in der Äquatorebene  $\alpha_0$ , so wird wegen der Zunahme von  $B$  sein Wert immer mehr anwachsen bis er schließlich an einem bestimmten Punkt der Feldlinie den Wert  $90^\circ$  erreicht. Wegen der Definition (5) von  $\alpha$  bedeutet das, dass die Bewegung parallel zur Feldlinie dabei immer kleiner und schließlich Null wird. Eine genauere Betrachtung zeigt,

dass sich die feldparallele Bewegungsrichtung des Teilchens bei  $\alpha = 90^\circ$  umkehrt, d.h. dass das Teilchen schließlich wieder nach oben wandert. Diesen Ort auf der Feldlinie nennt man Spiegelpunkt. Auf diese Weise oszilliert das Teilchen im Erdmagnetfeld ständig zwischen der Nord- und der Südhemisphäre. Der Sachverhalt ist schematisch in Abb. A2 dargestellt. Der Ort des Spiegelpunktes hängt nur vom Anstellwinkel in der Äquatorebene  $\alpha_0$  ab, wegen (7) gilt:

$$B_{\text{Spiegelp}} = B(r, \varphi) / \sin^2(90^\circ) = B(r = LR_e, \varphi = 0) / \sin^2 \alpha_0 \quad (8)$$

Mit Hilfe von (6) kann aus dieser Gleichung das  $r$  und  $\varphi$  des Spiegelpunktes berechnet werden. Für die Feldlinie  $L=4$  ergibt sich für  $\alpha_0 = 5.3^\circ$  eine Spiegelpunkt-höhe Null über der Erdoberfläche, d.h. alle Teilchen, die mit einem kleineren Anstellwinkel in der Äquatorebene der Magnetosphäre starten, werden nicht mehr gespiegelt, sondern gehen verloren. Man sagt, sie liegen im sogenannten Verlustkonus. Der Wert von  $5.3^\circ$  gilt nur theoretisch, tatsächlich gehen die Teilchen ja schon verloren, wenn sie in 90 - 300 km Höhe mit Gasteilchen der Luft zusammenstoßen (wo sie das Polarlicht erzeugen), dadurch absorbiert oder zumindest aus ihrer bisherigen Spiralbahn entfernt werden. Im letzten Fall spricht man davon, dass die Teilchen in den Verlustkonus gestreut werden (vgl. Abschnitt 4).

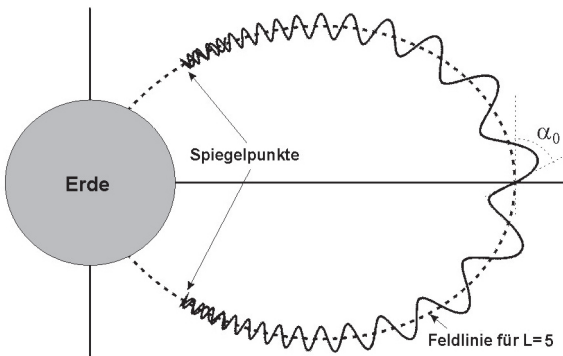


Abb. A2 : Spiral-Bewegung geladener Teilchen im Erdmagnetfeld, dargestellt mit der Feldlinie für  $L=5$ . Der Winkel  $\alpha$  ist der im Text erläuterte Anstellwinkel der Bahn relativ zur Richtung der Feldlinie. Die Höhe des Spiegelpunktes über der Erde hängt nur von dem Winkel  $\alpha_0$  ab, mit dem das Teilchen in der Äquatorebene startet.

## 7 Literatur

- [1] SCHLEGEL, K.: „Vom Regenbogen zum Polarlicht - Leuchterscheinungen in der Atmosphäre“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2. Aufl. 2001
- [2] SCHLEGEL, K.: „Die Magnetosphäre der Erde, Astronomie und Raumfahrt im Unterricht“, Heft 63, p. 31-34., Juni 2001
- [3] GLASSMEIER, K.-H.; M. SCHOLER (HRSG.): „Plasmaphysik im Sonnensystem“, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1991,
- [4] PRÖLSS, G.W.: „Physik des erdnahen Weltraums“, Springer, Berlin, 2001,
- [5] SCHLEGEL, K.: „Wenn die Sonne verrückt spielt“, Physik in unserer Zeit, 31. Jhrg. 2000, Nr. 5, 222-226.
- [6] SCHWENN, R.; K. SCHLEGEL: „Sonnenwind und Weltraumwetter“, Spektrum der Wissenschaft, Dossier 3/2001,
- [7] REES, M.H.: „Physics and Chemistry of the upper Atmosphere“, Cambridge University Press, Cambridge, 1989,
- [8] EATHER, ROBERT H.: „Majestic Lights - The Aurora in Science, History and the Arts“, American Geophysical Union, Washington D.C., 1980,