

5 Entstehung der Polarlichter

5.1 Elektronen-Polarlichter

Da der Sonnenwind nicht bzw. kaum in die Magnetosphäre eindringen kann, kommt es zu einer Aufstauung. Diese Aufstauung hat eine Verstärkung des Magnetfeldes zur Folge, die sich in einem der Magnetosphäre in Richtung Sonne vorgelagerten Bereich befindet, zwischen Stoßwelle und Magnetosphäre (*Magnetosheath*)⁸⁵. Erfolgt diese Verstärkung des Magnetfeldes entsprechend stark, und ist das Feld des Sonnenwindes südwärts gerichtet (antiparallel zum Erdmagnetfeld) verbindet sich das interplanetare Magnetfeld mit dem Erdmagnetfeld (Verschmelzung magnetischer Felder). Dabei kommt es zu einer Umwandlung von magnetischer Energie in Teilchenenergie, die eine extreme Plasmabeschleunigung verursacht.

Diese Teilchen wandern dann längs der Magnetopause in die Plasmaschicht des Magnetosphärenschweifes, von wo aus sie in hohe, polare Bereiche gelangen. Der Sonnenwind kann den Magnetschirm der Erde auch an den polaren *Neutralpunkten* (*polar cusps*)⁸⁶ durchdringen. Das sind die Punkte, an denen die Feldlinien weder vom Sonnenwind nach hinten verschleppt werden, wie es bei Feldlinien der Fall ist, die in Polnähe auf der Tagseite der Erde entspringen, noch ganz auf der Tagseite bleiben, lediglich vom Sonnenwind verformt werden und die die Erde in niedrigen Breiten verlassen. An der Grenze der nichtverschleppten Feldlinien gibt es auf jeder Halbkugel eine Linie, die auf der Magnetopause endet. Das ist nur möglich, da an dieser Stelle die resultierende Magnetfeldstärke Null ist.

⁸⁵ Zur *Magnetosheath* vgl. besonders:
KERTZ, a. a. O., S. 385 ff

⁸⁶ Zu den *Neutralpunkten* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 119 ff
KERTZ, a. a. O., S. 383 ff

An diesen neutralen Punkten können die geladenen Teilchen in die Magnetosphäre eindringen, ohne vom Magnetfeld daran gehindert zu werden. Nach dem Eindringen durch diese äußerst engen sog. Einlaßstore bewegen sich die Teilchen von den hohen, polaren Bereichen mit hoher Geschwindigkeit um die Magnetfeldlinien *gyrierend* (schraubenförmig bewegend)⁸⁷ in Richtung der magnetischen Pole, wo sie durch *Stoßionisation*⁸⁸ oder Anregung elektromagnetische Strahlung auslösen.

Diese Strahlung ist als Polarlicht⁸⁹ in einer Höhe von ungefähr 100-1000 km (*Ionosphäre*) über den Polarregionen bekannt. Die Polarlichter erscheinen in einem ovalen Band über dem geomagnetischen Nord- und Südpol, dem sog. *Aurora-Oval*⁹⁰. Der Mittelpunkt dieses Ovals mit einem Durchmesser von 5000 km ist in Bezug auf den geomagnetischen Pol um einige Grad (ca. 200 km) zur Nachtseite hin verschoben, was bedeutet, daß der Mitternachtsteil des Ovals im Durchschnitt auf einer geomagnetischen Breite von 67° liegt, während der Mittagsteil sich auf einer geomagnetischen Breite von 76° befindet. Da die Radien der Erde und des Ovals viel größer sind als die Höhe der Polarlichter, sieht ein Beobachter auf der Erde nur ein kleines Stück des Ovals.

Die Plasmaschicht in der Magnetosphäre ist das Reservoir für die Teilchen, die das Polarlicht auslösen. Dieses Gebiet stellt mit den ionosphärischen Polarlicht-Zonen (im Norden und Süden) eine Verbindung dar (Birkeland-Ströme), über die die Teilchen durch magnetosphärische Konvektion⁹¹ vom Sonnenwind in diese polare Gebiete gelangen. Diese Ströme bestehen vor allem aus Elektronen. Diese abwärts fließenden

⁸⁷ Vgl. FBA Kapitel 1, S. 5

⁸⁸ Vgl. FBA Kapitel 5.1, S. 36

⁸⁹ Zum *Polarlicht* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 164 ff
AKASOFU, a. a. O., S. 44 ff
LANG, a. a. O., S. 173 ff

⁹⁰ Zum *Aurora-Oval* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 166 ff
LANG, a. a. O., S. 177
BERGMANN/SCHÄFER, a. a. O., S. 567 ff

⁹¹ Zur *magnetosphärischen Konvektion* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 166 ff

Elektronen umkreisen dabei infolge der Lorentz-Kraft⁹² die Magnetfeldlinien in einer schraubenförmigen Bahn (Gyration). Da jedoch die Feldstärke des Erdmagnetfeldes zum Erdmittelpunkt zunimmt, wird je näher sie der Erde kommen, ihre schraubenförmige Bahn um so mehr zusammengedrückt (d. h. Ganghöhe und Schraubendurchmesser werden bei Annäherung an die Erde kleiner) bis sie in eine Kreisbahn und dann wieder in eine Aufwärtsbewegung übergeht und die Elektronen werden wieder auf derselben Feldlinie zur Magnetosphäre zurückgelenkt, ohne jemals in annähernden Polarlichthöhen (-tiefen) gewesen zu sein (Spiegelmaschine bzw. magnetische Flasche).⁹³

Damit die Elektronen also weiter nach unten vordringen können, muß auf sie sowohl ein zusätzlicher Beschleunigungsprozess wirken, als auch muß ihr Eintrittswinkel (Pitch-Winkel)⁹⁴ relativ klein sein. Tatsächlich werden einige nach unten strömende Teilchen durch elektrische Felder auf höhere Energien beschleunigt, und wenige werden nicht gespiegelt sondern kommen weiter herunter in tiefere Atmosphärenschichten, in denen sie ihre Energie durch das Anregen oder das Ionisieren von Atmosphärenteilchen deponieren, die das Polarlicht dann emittieren.

In einer Höhe von ungefähr 100 km haben diese wenigen Elektronen den Großteil ihrer kinetischen Energie durch die Stöße mit den Atmosphärenteilchen verloren, und nur äußerst wenige schaffen es, noch tiefer in die Lufthülle der Erdatmosphäre einzudringen.

Polarlichter werden außerdem von den Strömen verursacht, die zwischen dem positiven Pol auf der Morgenseite und dem negativen Pol auf der Abendseite durch die Ionosphäre fließen. Der Strom nach oben wird dabei durch Elektronen erzeugt, die nach unten fließen und dabei mit Atomen und Molekülen kollidieren.⁹⁵

⁹² Vgl. FBA Kapitel 1, S. 5

⁹³ Vgl. FBA Kapitel 1, S. 5 f

⁹⁴ Vgl. FBA Kapitel 1, S. 6

⁹⁵ Vgl. TIPLER, a. a. O., S. 903 ff

Bei dieser Kollision kommt es zu einer Anregung oder zu einer Ionisierung⁹⁶ der Atome der Erdatmosphäre. Dieser Vorgang wird als *Stoßionisation*⁹⁷ bezeichnet. Um so größer nun die kinetische Energie der Elektronen ist, um so heftiger ist in der Folge die Energieeinwirkung bzw. die Kollision mit den Atmosphärenteilchen und desto energiereicher ist dann das ausgestrahlte Licht. Um so energiereicher das Licht, desto weiter geht es in den *ultravioletten* Bereich des Lichtspektrums, um so energieärmer, desto weiter in den *infraroten* Bereich. Die Atome der verschiedenen Gase können jedoch nur bestimmte energetische Zustände einnehmen. Daraus folgt, daß jeder Stoff nur gewisse Farben des Spektrums erzeugen kann. Das Aurora-Spektrum⁹⁸ ist nicht so durchgehend wie das Sonnenlichtspektrum, das sich von Rot über Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigoblau nach Violett erstreckt, sondern besteht aus einzelnen, relativ wenigen Spektrallinien und Spektralbanden.

Die herrlichen und vielfältigen Farben⁹⁹ so einer Aurora durch Gasentladung sind also zum einen abhängig von der Gasart und dem Energieinhalt der sie erzeugenden Sonnenwindteilchen und zum anderen von der Höhe, da sich mit dieser die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre stark ändert. Die schönste, stärkste und häufigste Aurorafarbe ist ein blasses, fahles, weißliches Gelbgrün mit einer Wellenlänge von 557,7 nm (5577 Å oder $5,577 \cdot 10^{-7}$ m) oder einer Frequenz von $5,4 \cdot 10^8$ MHz, das durch Sauerstoffatome in einer Höhe von ca. 100 km erzeugt wird.¹⁰⁰ Sauerstoffatome in einer Höhe von ungefähr 300 km bringen das seltene, rote Licht mit Wellenlängen von 630 nm ($4,8 \cdot 10^8$ MHz) oder 636,4 nm ($4,7 \cdot 10^8$ MHz) hervor.¹⁰¹ Molekularer Sauerstoff

⁹⁶ Vgl. FBA Kapitel 1, S. 3 f

⁹⁷ Zur *Stoßionisation* vgl. besonders:
FINKLENBURG, a. a. O., S. 20 ff, S. 71 ff

⁹⁸ Zum *Aurora-Spektrum* vgl. besonders:
TIPLER, a. a. O., S. 903 ff
RENNICK, a. a. O., S. 60

⁹⁹ Zu den *Aurora-Farben* vgl. besonders:
LANG, a. a. O., S. 179
RENNICK, a. a. O., S. 60
SOUZA, a. a. O., S. 28 ff

¹⁰⁰ Vgl. LANG, a. a. O., S. 179

¹⁰¹ Vgl. ebda

emittiert im infraroten Bereich bei 1270 und 1580 nm ($2,4 \cdot 10^8$ u. $1,9 \cdot 10^8$ MHz).¹⁰² Die blau-violetten Farben bewirken ionisierte Stickoxidmoleküle, neutrale Stickoxidmoleküle erzeugen ein purpurfarbiges Rot unterer Vorhangberandungen und ionisierte Stickstoffmoleküle ein starkes, ultraviolettes Licht mit 391,4 nm ($7,7 \cdot 10^8$ MHz), das allerdings mit bloßem Auge nur sehr schwer zu sehen ist. Auch ist ein blau-violettes Licht von 427 und 470 nm ($7 \cdot 10^8$ u. $6,4 \cdot 10^8$ MHz) möglich.¹⁰³

Was die Leuchtdichte des Polarlichtes betrifft, so macht diese höchstens den hunderttausendsten Teil des Lichtes bei Vollmond aus.

Die Aurora emittiert neben dem langwelligen infraroten und kurzwelligen ultravioletten Licht auch die äußerst kurzwellige Röntgen- und Gamma-Strahlung. Sowohl die ultraviolette, als auch die Gamma-Strahlung werden in der Atmosphäre absorbiert, daher erreichen sie nicht die Erdoberfläche.¹⁰⁴

Die Aurora sendet auch Radiowellen über einen Frequenz-Bereich von ungefähr 500 bis 1600 kHz oder einem Wellenlängenbereich von 600 bis 185 m aus, bekannt als Störungen im Radiowellenbereich. Glücklicherweise schützt uns die Ionosphäre vor diesen Störungen. Ohne der Ionosphäre, die einen Schirm bildet und uns vor einem Großteil dieser Radiowellen schützt, wären wir nämlich nicht in der Lage, das Radio zu benutzen.¹⁰⁵

Vielen Berichten zufolge verursacht das Polarlicht auch manchmal einen hörbaren, leise knisternden Laut. Solche akustischen Phänomene sind jedoch noch nicht physikalisch geklärt, man entdeckte lediglich, daß eine sehr intensive Polarlicht-Entfaltung äußerst niedrige Schallwellen, bekannt als *Infrasonics*¹⁰⁶, erzeugen kann, die aber aufgrund ihrer niedrigen Frequenz von weniger als 20 Hz kaum hörbar sind.

¹⁰² Vgl. ebda

¹⁰³ Vgl. ebda

¹⁰⁴ Vgl. RENNICK, a. a. O., S. 65 f

¹⁰⁵ Vgl. ebda, S. 66

¹⁰⁶ Zu den *Infrasonics* vgl. besonders:
RENNICK, a. a. O., S. 66

5.2 Teilstürme

Wird vom Sonnenwind aufgrund von Sonneneruptionen der Korona mehr Energie als üblich in die Magnetosphäre geliefert, unterliegt das Erdmagnetfeld starken Schwankungen; diese *geomagnetischen Stürme*¹⁰⁷ können mehrere Tage andauern. Diese überschüssige Energie kann jedoch nicht vollkommen aufgenommen bzw. umgewandelt werden, und so wird ein großer Teil im Neutralschichtstrom der Magnetosphäre in Form von magnetischer Energie durch eine Verstärkung des Neutralschichtstroms gespeichert. Nach dieser halb -bis einstündigen Speicherphase wird diese Energie durch eine Kurzschließung und Umleitung des Neutralschichtstroms entlang der Magnetfeldlinien in Ionosphäre transportiert (*Expansionsphase*). Diese einstündigen Intervalle von Energiespeicherung (*Erholungsphase*) und plötzlicher Umwandlung (*Dissipation*) nennt man *Teilstürme* oder *Substürme*¹⁰⁸, da sich ja ein magnetischer Sturm aus mehreren dieser Teilstürme zusammensetzt.

Die Dissipation während eines Teilsturmeinsatzes hat ein plötzliches Aufflammen und schnelle, dynamische Bewegungen bzw. Intensitätsänderungen des Polarlichtes in sehr kurzer Zeit zufolge, und ein ganzer Sektor der Polarlicht-Zone füllt sich mit starkem Licht. In dieser Dissipationsphase (Expansionsphase) breitet sich das Polarlicht, vor allem nach Westen, aus und es hat dabei die Form einer Woge (westwärts wandernde Woge), bei der hauptsächlich der westliche Rand aktiv bleibt.

Der Teilsturm bewirkt also ein Aussetzen der Aktivität des Polarlichtes und er liefert den sichtbaren Beweis für elektromagnetische Störungen bzw. Unruhen im Umkreis der Erde. Die Ursache für das Auslösen des Teilsturms ist noch nicht vollkommen geklärt.

¹⁰⁷ Zu den *geomagnetischen Stürmen* vgl. besonders:
LANG, a. a. O., S. 180

¹⁰⁸ Zu den *Teilstürmen* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 113 ff
HONES, a. a. O., S. 126 ff.
AKASOFU, a. a. O., S. 47 ff

Eruptionen der Sonnenkorona jedoch haben einerseits zur Folge, daß sich das Polarlicht-Oval zum Äquator hin ausweitet, andererseits verschiebt sich die obere Höhenbegrenzung des Polarlichtes in größere Höhen. Diese Veränderung der Höhe ist darauf zurückzuführen, daß durch den höher energetischen Sonnenwind eine Verstärkung der elektrischen Entladungsströme hervorgerufen wird, welche Magnetfeldfluktuationen erzeugt. Bei diesem magnetischen Sturm heizen die elektrischen Ströme die obere Atmosphäre auf, was zur Folge hat, daß tiefere, dichtere Schichten der Atmosphäre aufwärts strömen und weiter oben die Dichte erhöhen.

Diese beiden Faktoren, die Ausweitung des Aurora-Ovals und die Veränderung der Höhe haben zu Folge, daß Polarlichter auch in mittleren, äquatornäheren Breiten zu beobachten sind.¹⁰⁹

Die verschiedenen Formen¹¹⁰ des Polarlichtes entstehen durch zeitliche und örtliche Unterschiede bzw. Variationen der in die Atmosphäre eindringenden Teilchenströme. Die schnellen Ortsveränderungen und Bewegungsspiele des Polarlichtes am Firmament sind also nicht die Bewegungen der einzelnen leuchtenden Atome und Moleküle, sondern der durch magnetosphärische elektrische und magnetische Felder gelenkte Elektronenstrahl. Man unterscheidet unter folgenden Formen¹¹¹: *Bögen, Bänder, Lichtstrahlen, Koronen, Vorhänge* und *diffuse Schleier*.

¹⁰⁹ Vgl. TIPLER, a. a. O., S. 903 ff

¹¹⁰ Zur Entstehung der *Aurora-Formen* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 175 ff
BERGMANN/SCHÄFER, a. a. O., S. 567 ff

¹¹¹ Vgl. FBA Kapitel 6.1, S. 42 ff

5.3 Protonen-Polarlicht

Die bisher beschriebenen Grundlagen und Prozesse basieren darauf, daß Elektronen das Polarlicht auslösen, was auch meistens der Fall ist. Ohne Zweifel gibt es aber auch Polarlichter, deren Verursacher Protonen sind, die mit Wasserstoffatomen kollidieren. Dieses sog. *Protonen-Polarlicht*¹¹² hat im Allgemeinen eine diffuse Form, ohne detaillierte Strukturen wie die gewöhnlichen Elektronen-Polarlichter. Die meist große Flächen überdeckende, rot-violette Leuchterscheinung mit 656,2 nm ($4,57 \cdot 10^8$ MHz) stammt, im Gegensatz zu Elektronen-Polarlichtern, aus größeren Höhen von 300 bis 500 km. Es tritt zwar häufig zeitlich zusammen mit Elektronen-Polarlichtern auf, erscheint aber meist nur am Abend am südlichen Rand des nördlichen Polarlicht-Ovals. Diese Protonen dürften auch Meßergebnissen zufolge aus dem Ringstrom, und nicht aus der Plasmaschicht stammen.

Die Magnetosphäre ist im Inneren also höchst dynamisch und voller Wechselwirkungen, wie ein Spiegelbild der Veränderungen auf der Sonne. Im Grunde bilden sie und der Sonnenwind einen riesigen, elektrischen Generator, der die kinetische Energie des Teilchenwindes in elektrische Energie umwandelt.

¹¹² Zum *Protonen-Polarlicht* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 177 f

