

Fortschritte in der Polarlichtforschung

Von E. Seiler *

Zusammenfassung: Zur Erklärung des räumlichen und zeitlichen Auftretens von Polarlichtern werden neben Bodenbeobachtungen Meßergebnisse von Raketen und Satelliten herangezogen. Der entscheidende Einfluß des solaren Windes auf die Gestalt des erdmagnetischen Feldes und daraus folgende Deutungsmöglichkeiten werden diskutiert. Es zeigt sich, daß Polarlichter nur der direkt sichtbare Teil eines großräumig ablaufenden Ereignisses sind. Seine Ursache ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf Vorgänge zurückzuführen, die sich in vielen Erdradien Entfernung im Schweif der Magnetosphäre abspielen.

Summary: Ground based measurements as well as rocket and satellite measurements are used to explain time and space distributions of auroras. The importance of the solar wind for the configuration of the earth's magnetic field and resulting explanation possibilities from this circumstance are discussed. It is shown that auroras are only the visible part of a spacious event. It is highly probably that the causes for this are processes in the tail of the magnetosphere in a distance of many earth radii.

Bereits im Jahre 1741 machten der schwedische Astronom Anders Celsius, dem wir auch unsere Temperaturskala verdanken, und sein Kollege Olaf Hiorter eine interessante Entdeckung. Die beiden Astronomen hatten sich die Aufgabe gestellt, die Richtung von Polarlichtern zu bestimmen. Aber immer dann, wenn ein Polarlicht am Himmel aufleuchtete, begann die Kompaßnadel zu tanzen. Oft wanderte sie um mehrere Grad aus der ursprünglichen Nordrichtung aus. Über dieses merkwürdige Verhalten unterrichteten sie den damals berühmten Londoner Uhrmacher George Graham, der die Bewegungen der Nadel bereits 20 Jahre vorher wohl als erster entdeckt hatte. Und bald darauf stellten sie zu ihrer Überraschung fest, daß die Bewegungen der Kompaßnadeln in Uppsala und London zur gleichen Zeit auftraten. Bereits von diesem Zeitpunkt an wurde klar, daß das Nordlicht nur der direkt sichtbare Teil eines Ereignisses ist, das sich, wie wir heute wissen, in der hohen Atmosphäre abspielt.

Berichte über Nordlichterscheinungen wurden schon im vorigen Jahrhundert von dem Österreicher Fritz [1873] gesammelt. Als Ergebnis seiner Arbeit konnte er eine Landkarte veröffentlichen, in die er die geschätzte prozentuale Häufigkeit von Polarlichtern in klaren, dunklen Nächten eingetragen hatte. Sie zeigte, daß für die Lappen Nordnordwestens Polarlichter allnächtliche Ereignisse sind, während man in Norddeutschland günstigenfalls 10 pro Jahr, in Süddeutschland aber nur 3 bis 4 pro Jahr beobachten kann. Überschreitet man die Linie 100%iger Polarlichthäufigkeit, die Polarlichtzone bei etwa 67° Breite, so nimmt die Häufigkeit zum Pol hin wieder ab. Offensichtlich treten also Nordlichter in ganz bestimmten Breiten auf, und nur gelegentlich verlagern sie ihren Erscheinungsort.

Ein Einzelner kann Polarlichter nur von Horizont zu Horizont verfolgen. Was sich darüber hinaus abspielt, bleibt seinem Blick verborgen. Die Längenausdehnung und großräumige Bewegung von Polarlichtern zu erforschen, war ein Ziel, das während des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 verfolgt wurde. Mehr als 100 Weitwinkelkameras photographierten den Himmel über der Arktis und der Antarktis jede Nacht in regelmäßigen Zeitabständen.

Zusätzlich wurde in vielen Ländern ein Beobachtungsdienst organisiert, an dem neben Meteorologen, Astronomen, Funkamateuren und Piloten viele Interessierte teilnehmen. Mehr als irgendein anderes Forschungsvorhaben hat wahrscheinlich das Polarlicht Amateure gelockt und begeistert. Dadurch kam ein so gründliches Bild der Erscheinungen zustande, wie es vorher keines gegeben hatte.

Die Auswertung all dieser Beobachtungen ergab in mancher Hinsicht recht überraschende

* Dr. E. Seiler, Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität, 33 Braunschweig, Mendelssohnstraße 1.

Ergebnisse. So stellte man fest, daß Polarlichter sich häufig über mehrere tausend Kilometer erstrecken, also gleichzeitig über Alaska und Sibirien zu sehen sind. Oft reihen sich mehrere Bögen hintereinander. Der Ort ihres wahrscheinlichsten Auftretens zu einem gewissen Zeitpunkt ist nicht durch die Polarlichtzone bei etwa 67° Breite gegeben, sondern durch ein Oval, das nur um Lokal-Mitternacht mit der Polarlichtzone zusammenfällt, sonst aber innerhalb derselben verläuft. Dieses Oval bleibt fest im Raum, während sich die Erde darunter hinwegdreht. Könnte man von außerhalb auf die Nachtseite der Erde blicken, so würde man zwei leuchtende Ringe sehen, die wie Heiligenscheine über beiden Polkappen schweben. Und nur aus dieser Sicht könnte man eine Erscheinung überblicken, die man sonst nur nachträglich aus Aufnahmen vieler Weitwinkelkameras rekonstruieren kann. Gemeint ist ein sogenannter Polarlichtsturm. Er kündigt sich durch das Aufblitzen eines ruhigen Bogens im Mitternachtsgebiet an. Helle Streifen und Strahlen durchziehen plötzlich den Bogen, und auf einmal formt sich eine Ausbuchtung. Sie wächst und dehnt sich polwärts mit einer Geschwindigkeit von mehreren Kilometern pro Sekunde aus. Entlang dem ruhigen Bogen auf der Abendseite läuft wie eine überschäumende Woge der eine Rand der Störung. Auf der Morgenseite löst er sich in einzelne Leuchtflecke auf, die schnell nach Osten wandern. Nach etwa 10 bis 30 Minuten hat die Ausbuchtung ihren polnächsten Punkt erreicht, und die Wanderung ist beendet. Wie nach einer Verschnaufpause setzt nach wenigen Minuten eine rückläufige Bewegung ein. Etwa ein bis zwei Stunden später haben die Polarlichtbögen ihren ursprünglichen Standort wieder erreicht, und die Unruhe klingt ab. Aber schon nach 3 bis 4 Stunden kann sich das Schauspiel wiederholen, und oft schon sind bis zu

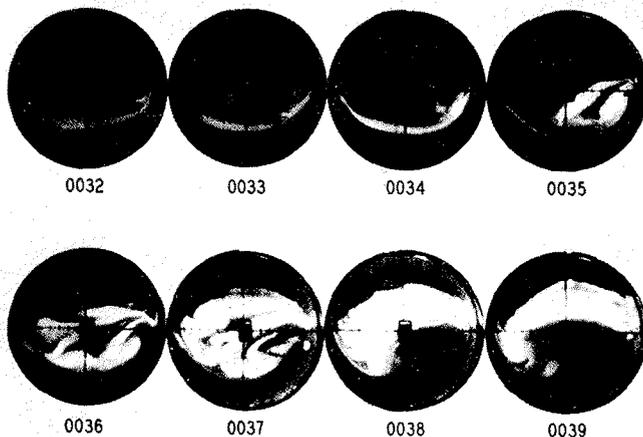


Abb. 1: Aufnahmen des nächtlichen Himmels über Ft. Yukon (Alaska) am 10. 2. 1958 in Minutenabständen. Zu sehen ist die Entwicklung einer „westwärtswandernden Woge“ zu Beginn eines Polarlichtsturmes. Die Richtung zum Nordpol ist nach oben [Akasofu, Chapman und Meng, 1965].
Fig. 1: All sky camera photographs taken at Ft. Yukon (Alaska) on February 10, 1958, in intervals of 1 minute; showing the development of a westward travelling surge at the beginning of a polar substorm.

vier aufeinanderfolgende Polarlichtstürme während einer einzigen Nacht beobachtet worden [Akasofu et al., 1965].

Gleichzeitig mit diesen Stürmen treten ganz typische Störungen des erdmagnetischen Feldes auf. Hervorgerufen werden sie durch elektrische Ströme, die in etwa 100 bis

150 km Höhe fließen. Die Auswertung von Bodenregistrierungen dieser Magnetfeldschwankungen ergab, daß Ströme von oft mehreren 100 000 Ampere in westlicher Richtung längs des Polarlichtovals fließen. Unter der Wirkung dieser Ströme dreht sich die Kompaßnadel, wie es schon von Celsius und Hiorter beobachtet worden ist.

Ebenso wie die Nordhalbkugel hat die Südhalbkugel eine Polarlichtzone. Ein Vergleich von Beobachtungen aus beiden Zonen zeigt eine verblüffende Ähnlichkeit im Ablauf eines Ereignisses. Wenn in der nördlichen Zone ein Polarlicht aufflammt, ist zur selben Zeit in der südlichen auch eins zu beobachten. Das gleiche gilt für magnetische Störungen. Neben der zeitlichen Übereinstimmung liegen auch die Orte fest, an denen ein Ereignis auf beiden Halbkugeln stattfindet. Beide Orte sind nämlich durch die magnetische Feldlinie verbunden, die auf der Südhalbkugel am Beobachtungsort entspringt und sich in einem weiten Bogen bis zur Nordhalbkugel erstreckt und am zweiten Beobachtungsort in die Erde einmündet.

Von jeder Theorie wird man fordern, daß sie diese auffälligen Erscheinungen erklären kann, ebenso wie die Tatsache, daß Polarlichter vorzugsweise längs eines Ovals auftreten und eigentlich immer von Magnetfeldstörungen begleitet werden. Doch bevor davon die Rede sein soll, muß erklärt werden, wie das Leuchten in der hohen Atmosphäre über 100 km überhaupt zustandekommt. Man weiß, daß die Atome und Moleküle der Atmosphäre von einfallenden Elektronen und in geringem Maße auch von Protonen zum Leuchten angeregt und auch ionisiert werden. Der Nachweis dieses Vorganges ist durch direkte Messungen erbracht worden, wie sie z. B. auch an Bord des deutschen Satelliten AZUR durchgeführt wurden. Vorweg einige technische Einzelheiten, die für das Weitere wichtig sind. AZUR wurde im November 1969 von Vandenberg in Kalifornien aus in eine polare Erdumlaufbahn geschossen. Er war magnetisch stabilisiert, d. h. zwei große Stabmagneten richteten den gesamten Satelliten immer parallel zu den Magnetfeldlinien der Erde aus. Über den magnetischen Polen zeigt eine Seite in Richtung auf den Erdmittelpunkt, die andere in den Zenit. Das gibt die Mög-

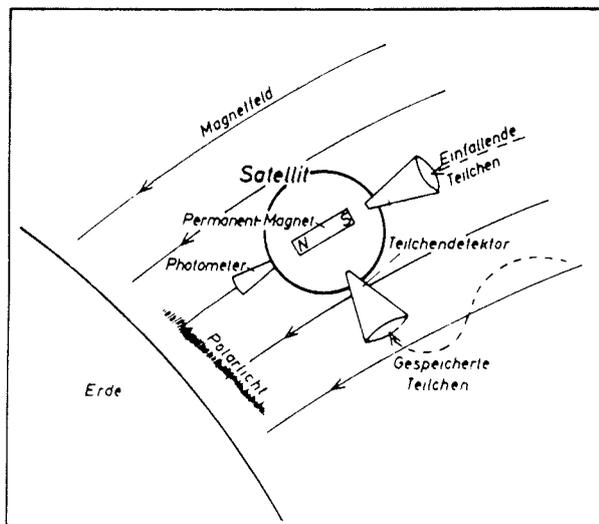


Abb. 2: Schematische Darstellung der Arbeitsweise des Satelliten AZUR. Durch einen starken Permanentmagneten wird der Satellit in die Richtung des Erdmagnetfeldes gedreht. Teilchendetektoren sind so angeordnet, daß sie Teilchen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln zum Magnetfeld messen können. Mit Photometern können Polarlichter von oben registriert werden.

lichkeit, mit einem Photometer Polarlichter zu beobachten und auf der anderen Seite mit Teilchendetektoren einfallende Teilchen nachzuweisen.

Die mit den Photometern des Instituts für Physik der Atmosphäre in Oberpfaffenhofen und den Teilchendetektoren des Max-Planck-Instituts für Aeronomie in Lindau am Harz gewonnenen Ergebnisse lassen eine deutliche Korrelation der Elektronenflüsse in die Atmosphäre mit der Zunahme der Intensität der beiden Polarlichtlinien bei 3914 Ångström und bei 2972 Ångström erkennen [Stätter, Rossberg, persönl. Mitteilung]. Auf Unterschiede in Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden. Vollständigkeithalber muß aber gesagt werden, daß AZUR nicht der erste Satellit war, der solche Messungen durchgeführt hat.

Einzelheiten des Anregungsmechanismus werden hier nicht erörtert, sondern die Fragen nach Herkunft und Beschleunigung der Teilchen sollen untersucht werden; denn durch irgendeinen physikalischen Prozeß müssen sie die beobachteten Energien von einigen Kiloelektronenvolt aufnehmen.

Da es sich um elektrisch geladene Teilchen handelt, können sie z. B. durch elektrische Felder beschleunigt werden. Zum Nachweis solcher Felder dient dem Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching bei München folgendes Experiment [Haerendel, Lüst und Rieger, 1966]: Ein Behälter mit einigen Kilogramm Barium wird mit einer Rakete in Höhen über 250 km transportiert, dort ausgestoßen und verdampft. Man wählt den Zeitpunkt so, daß die Sonne diese Höhe noch mit ihren Strahlen erreicht, während die Erde bereits im Schatten liegt. Durch die Sonnenstrahlen wird das Barium zu einem Fluoreszenzleuchten angeregt, und mit fortschreitender Zeit werden immer mehr Bariumatome ionisiert. Auf diese ionisierten Atome üben elektrische Felder Kräfte aus, denen sie nach bekannten Gesetzen der Physik folgen müssen. Umgekehrt können aus dem Weg der ionisierten Atome in Abhängigkeit von der Zeit Aussagen über herrschende elektrische Felder gemacht werden. Zu diesem Zweck wird die Bariumwolke von drei verschiedenen Beobachtungspunkten von der Erde aus in regelmäßigen Zeitabständen photographiert. Die Ergebnisse zeigen, daß die Größenordnung der gemessenen elektrischen Felder nicht ausreicht, um die für die Erzeugung von Polarlichtern verantwortlichen Elektronen auf die beobachteten Energien zu beschleunigen. Aber sie sind verantwortlich für die elektrischen Ströme, die in ca. 100 bis 150 km Höhe parallel zur Erdoberfläche fließen und deren Magnetfelder das Permanentfeld der Erde stören. Unter der Wirkung dieser Ströme dreht sich die Kompaßnadel, wie es von Celsius und Hiorter beobachtet wurde. Abbildung 3 zeigt schematisch, wie etwa die Stromverteilung in der Ionosphäre bei einem südlich gerichteten elektrischen Feld aussehen könnte, das längs der gut leitenden Magnetfeldlinien in die Ionosphäre abgebildet wird. Wesentlich ist, daß durch stark unterschiedliche Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit Polarisationsladungen entstehen können, die das Stromsystem modifizieren. Neben dem Hauptanteil eines Stromes, z. B. in westlicher Richtung, entsteht zusätzlich ein meridionales Stromsystem, dessen Magnetfeldstörungen man grundsätzlich nicht am Erdboden beobachten kann.

Es bleibt aber noch zu klären, wie die elektrischen Felder und die energiereichen Teilchen entstehen, die sowohl Polarlichter als auch Magnetfeldstörungen hervorrufen. Dazu muß etwas genauer auf das Magnetfeld unserer Erde eingegangen werden. Dieses Feld läßt sich am Erdboden recht gut mit dem eines magnetischen Dipols im Zentrum der Erde vergleichen. Man hatte nun ursprünglich erwartet, daß sich die Feldlinien immer weiter in den Raum hinaus erstrecken würden und erst im interplanetaren Raum verlorengingen. Diese Vorstellungen treffen aber nicht zu, wie Magnetfeldmessungen mit Satelliten ergeben haben. Das Feld sieht ganz anders aus (Abb. 4). In etwa 10 Erdradien Entfernung vom Erdmittelpunkt hört das Magnetfeld auf der Tagseite, also in

Richtung auf die Sonne, ziemlich plötzlich auf, während es sich auf der Nachtseite wie ein langer Schlauch ausdehnt. Das Ende dieses Schlauches ist noch unbekannt, aber vermutlich reicht es noch weit über die Mondbahn hinaus. Schuld an diesem unerwarteten Verhalten des Feldes ist die Sonne. Von ihr geht ständig nach allen Seiten ein Teilchenstrom aus. Der solare Wind, wie der Teilchenstrom genannt wird, ist ein ionisiertes Gas. Es besteht im wesentlichen aus Protonen und Elektronen. Das Gas bewegt sich in der Nähe der Erdbahn mit einer Geschwindigkeit von etwa 400 km/sek. Trifft der

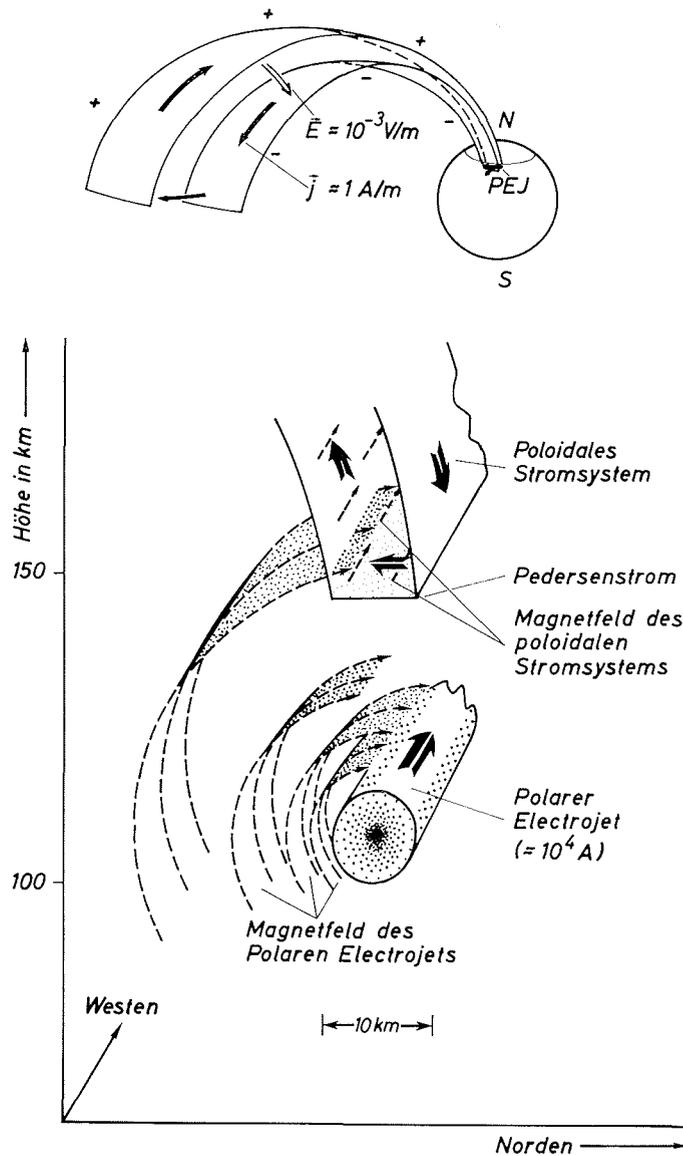


Abb. 3: Schematische Darstellung der Ströme und Magnetfelder in der Ionosphäre für ein südlich gerichtetes elektrisches Feld aus der Magnetosphäre [Seiler und Kertz, 1967, nach Boström, 1964].

Fig. 3: Schematic representation of currents and magnetic fields in the ionosphere for a southward electric field mapped down from the magnetosphere.

solare Wind auf das Magnetfeld, so kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen beiden. In etwa 10 Erdradien Entfernung ist das Magnetfeld so stark, daß es dem Druck des solaren Windes standhält. Er muß deshalb um das Magnetfeld herum fließen, weil es für ihn ein Hindernis darstellt. Dadurch wird das Magnetfeld auf der Tagseite zusammengedrückt und auf der Nachtseite teilweise vom solaren Wind über weite Strecken mitgeführt. Die Feldlinien des Schweifes berühren die Erde in den Polarregionen, und in ungefähr 20 Erdradien Entfernung verlaufen sie parallel zueinander und parallel zum Sonnenwind. Der Magnetfeldschweif ist der Länge nach in eine obere und eine untere Hälfte geteilt. In diesen Hälften ist die Richtung der magnetischen Feldlinien einander entgegengesetzt. Die zwei Hälften sind durch eine relativ dünne Schicht voneinander getrennt, indem sich die Magnetfeldrichtung umkehrt und die magnetische Feldstärke sehr gering ist. Diese Schicht wird neutrale Zone genannt. Sie wurde zuerst durch ein Magnetometer entdeckt, mit dem der Satellit Explorer 18 ausgerüstet war. Als die russische Weltraumsonde Lunik 2 auf dem Weg zum Mond durch die neutrale Schicht flog, registrierten Zähler an Bord hohe Teilchendichten energiereicher Plasmas. Diesem Plasma kommt eine besondere Bedeutung zu; denn von beiden Seiten der neutralen Schicht drückt das Magnetfeld in diese Richtung. Es möchte den magnetfeldfreien Raum ausfüllen. Das Plasma wirkt durch seinen Druck dem Magnetfelddruck entgegen, so daß sich schließlich ein Gleichgewicht einstellt. Wahrscheinlich entstammt dieses Plasma dem solaren Wind, der von beiden Seiten der Magnetosphäre leicht in die neutrale Zone eindringen kann.

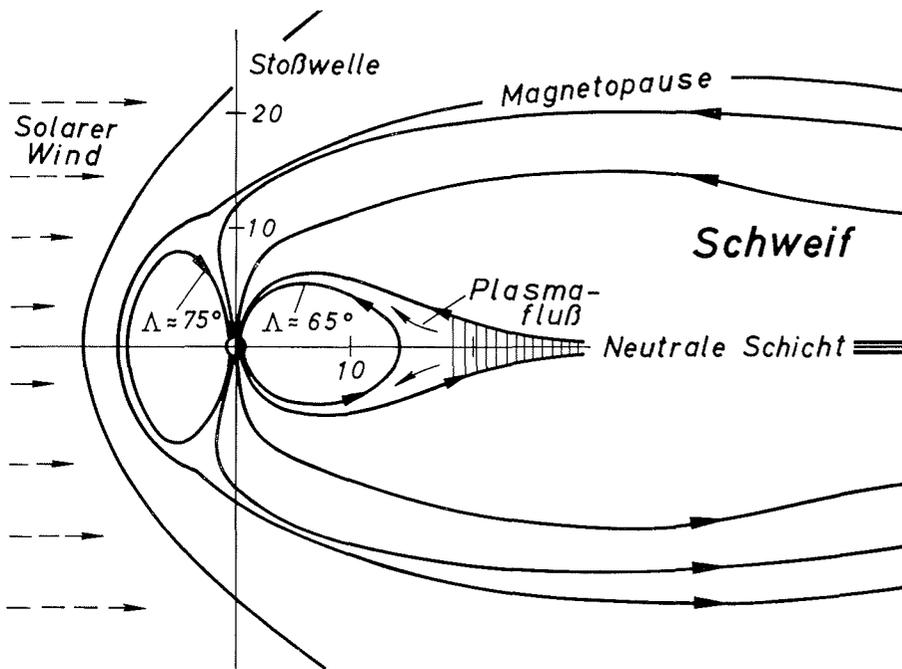


Abb. 4: Schematische Darstellung eines Meridianschnitts durch die Magnetosphäre für den idealisierten Fall, daß geomagnetische Achse und Rotationsachse der Erde zusammenfallen und diese senkrecht auf der Ebene der Ekliptik stehen. Die starken Linien mit Pfeilen zeigen den Verlauf der Magnetfeldlinien. Auf den Koordinatenachsen ist die Entfernung in Erdradien notiert.

Fig. 4: Meridional cross-section of the magnetosphere under the simplifying assumption that geographical and geomagnetic axis are identical and that these axis are vertical to the ecliptic plane. Thick curves with arrows show the configuration of magnetic field lines. Distances in earth radii are marked at the coordinate system.

Nach den gegenwärtigen Theorien ist die neutrale Zone die Quelle derjenigen Teilchen, die die Strahlungsgürtel erzeugen und die Polarlichterscheinungen hervorrufen. Aber wie gelangen die Teilchen aus der neutralen Schicht, die ja viele Erdradien weit entfernt ist, in die Atmosphäre? Dies kann geschehen, wenn aus irgendeinem Grund das Gleichgewicht in der neutralen Schicht gestört wird und der Magnetfelddruck größer als der Plasmadruck wird. Dann können sich Feldlinien entgegengesetzter Richtung vereinigen. Die nunmehr geschlossenen Feldlinien ziehen sich stark zusammen. Als Folge davon wird Plasma in Richtung auf die Erde geworfen, und zwar aus einer der Sonne abgewandten Seite. Ein Teil des Plasmas bewegt sich längs der nun geschlossenen Magnetfeldlinien und dringt sowohl auf der Nord- wie auf der Südhalbkugel in die hohe Atmosphäre über den Polarregionen ein. Diese Teilchen erzeugen dann in bekannter Weise die Polarlichter und ionisieren die Atome und Moleküle in der Atmosphäre.

Zumindest eine Ursache ist bekannt, die die neutrale Zone aus dem Gleichgewicht werfen kann. Wenn sich nämlich auf der Sonne eine Explosion ereignet, wird Sonnenmaterie mit einer größeren Geschwindigkeit ausgestoßen. Sie erreicht etwa nach einem Tag die Erde und drückt das Magnetfeld stärker zusammen. Der Druck des Plasmas in der neutralen Schicht reicht dann nicht mehr aus, um die in entgegengesetzter Richtung oberhalb und unterhalb der Schicht verlaufenden Feldlinien auseinanderzuhalten. Es kommt zu einer Vereinigung von Feldlinien unterschiedlicher Richtung mit den eben beschriebenen Folgen. So einfach und einleuchtend diese Theorie auch klingen mag, sie birgt mancherlei Schwierigkeiten in sich. Durch sie kann vielleicht die Erscheinung des Polarlichtsturmes recht gut erklärt werden: der plötzliche Beginn soll durch die plötzliche Störung des Gleichgewichtes in der neutralen Schicht verursacht werden. Das in Richtung auf die Erde beschleunigte Plasma kann sich zwar längs der Magnetfeldlinien ausbreiten, aber quer dazu wird die Bewegung behindert. Dadurch bildet sich ein Stau, und das Plasma wird gezwungen, längs solcher Feldlinien zu fließen, die immer weiter in der Polkappe enden. Dadurch soll die zu Beginn eines Polarlichtsturmes zu beobachtende Ausbuchtung erklärt werden, die ja im Verlaufe des Sturmes immer weiter polwärts wandert. Der Rückstau des Plasmas soll außerdem zum Abklingen des Sturmes beitragen. Auch die gleichzeitig mit dem Polarlichtsturm auftretenden Magnetfeldschwankungen könnten erklärt werden, da sie ursächlich mit dem Teilchenfluß und der Magnetfeldbewegung im Schweif verknüpft sind.

Zur Erklärung von ruhigen Bögen und Banden ist ein Mechanismus erforderlich, der nicht so explosiv abläuft wie der eben beschriebene. Hält man an den bisher entwickelten Vorstellungen fest, so würde diese Forderung am einfachsten dadurch erfüllt, daß man die Voraussetzungen des Druckgleichgewichtes zwischen Plasma und Magnetfeld in der neutralen Schicht fallen läßt. Wäre der Plasmadruck stets oder wenigstens über einen Zeitraum von mehreren Stunden geringer als der Magnetfelddruck, würden ständig Magnetfeldlinien von beiden Seiten in die neutrale Schicht eindringen. Sie würden sich dort vereinigen und in Richtung auf die Erde zusammenziehen. Dabei würde ständig Plasma aus der neutralen Schicht in gleicher Richtung beschleunigt werden. Da dieser Prozeß stetig abläuft, könnte man erwarten, daß der in die Atmosphäre eindringende Teil des Plasmas immer entlang den Magnetfeldlinien einfällt, die die Grenze zwischen dem Schweif und dem übrigen Teil der Magnetosphäre bilden. Diese Feldlinien entspringen oder münden aber gerade längs des Polarlichtovals. Damit wird die Bedeutung des Ovals klar. Magnetische Feldlinien, die äquatorwärts vom Polarlichtoval entspringen, sind geschlossen und bilden den inneren Teil der Magnetosphäre, Feldlinien, die polwärts entspringen laufen in den Schweif.

Für den Verlust des Plasmas in der neutralen Schicht kann der solare Wind aufkommen, der ständig neue Teilchen heranführt. Auch für den Verlust von Magnetfeldlinien, der

durch Vereinigung in der neutralen Schicht entsteht, kann der solare Wind Ersatz schaffen, indem er von der Tagseite Feldlinien auf die Nachtseite transportiert. Eine Verstärkung des solaren Windes, wie sie z. B. nach einer Explosion auf der Sonne erfolgt, bewirkt, daß mehr Feldlinien als gewöhnlich in den Schweif transportiert werden. Das hat eine Verschiebung des Polarlichtovals zu niedrigeren Breiten zur Folge. Aus diesem Grund werden nach heftigen Explosionen auf der Sonne Polarlichter in Gegenden beobachtet, die weit von der Polarlichtzone entfernt sein können.

Literatur

- Akasofu, S. I., S. Chapman, and C. I. Meng, The polar electrojet, *J. Atm. Terr. Phys.*, **27**, 1275—1305, 1965.
- Boström, R., A model of the auroral electrojets, *J. Geophys. Res.*, **69**, 4983—4999, 1964.
- Fritz, H., Verzeichnis beobachteter Polarlichter, C. Gerold's Sohn, Wien, 1873.
- Haerendel, G., R. Lüst und E. Rieger, Motion of artificial ion clouds in the upper atmosphere, Max-Planck-Institut für Phys. u. Astrophys., München, MPI—PAE 27/66, 1966.
- Seiler, E. und W. Kertz, Der polare Elektrojet, *Z. Geophys.*, **33**, 371—402, 1967.