

9. In einer Spule, die vom Strom I durchflossen wird, ist die Energie

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2$$

gespeichert. Diese Energie steckt im Magnetfeld, das die Spule erzeugt. Im allgemeinen ist die Energiedichte des Magnetfelds durch

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

gegeben.

Essay: Das Polarlicht

Syun-Ichi Akasofu

Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks

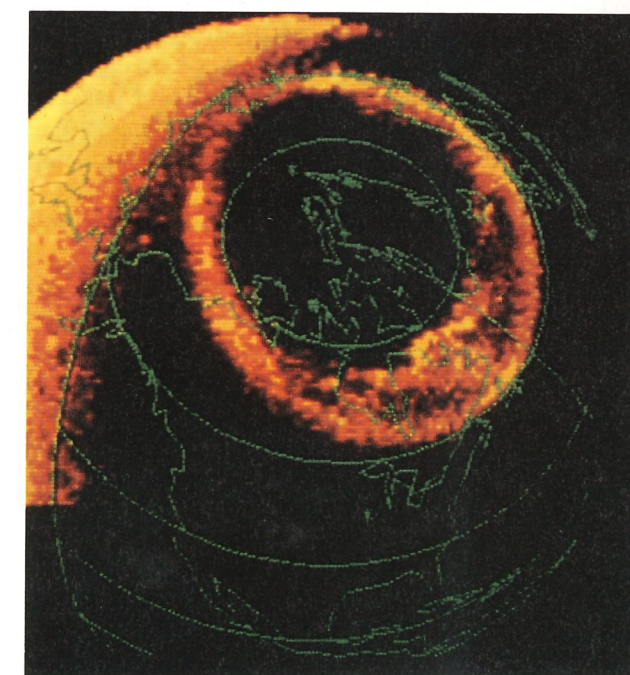
Am Nachthimmel im hohen Norden und weit im Süden zeichnet sich bisweilen ein prächtiges, ehrfurchtgebietendes Farbenspiel ab, das man Polarlicht oder Aurora nennt (Abbildung 1). Oft sieht diese Leuchterscheinung wie ein fahler, grünlich-weißer Bogen aus, tatsächlich ist sie jedoch ein langes, leuchtendes, wellenförmiges Band – ein Schleier oder Vorhang – aus leuchtenden Streifen und Strahlen in zahllosen Farben. Die Helligkeit der Aurora schwankt sehr stark. Ist sie sehr hell, erscheinen die Farben dramatisch und wunderschön. Das untere Ende des Aurorabandes liegt in einer Höhe von etwa 100 km, die Oberkante kann bis zu 1000 km hinaufreichen. Die Aurora ist nur in zwei ringförmigen Gebieten zu finden, die sich wie Gürtel zwischen dem 60. und 75. Breitengrad rund um die Erde erstrecken (Abbildung 2a, 2b), wobei jeder Gürtel zentriert über einem der magnetischen Pole der Erde angeordnet ist. Man bezeichnet diese Gürtel auch als Zonen der Polarlichter oder Auroraovale. Früher hielt man das



(a)



Abbildung 1 Das Polarlicht oder die Aurora borealis. (Foto: N. Braun, Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks)



(b)

Abbildung 2 a) Das südliche Polarlicht, aufgenommen vom Astronauten Robert Overmyer mit einer 35-mm-Kamera. (Foto: N.A.S.A. 85-HC-148) b) Computerverstärktes Bild des nördlichen Polarlichts, aufgenommen von einem Satelliten in einem Abstand von drei Erdradien (mit freundlicher Genehmigung von L. Frank, University of Iowa).

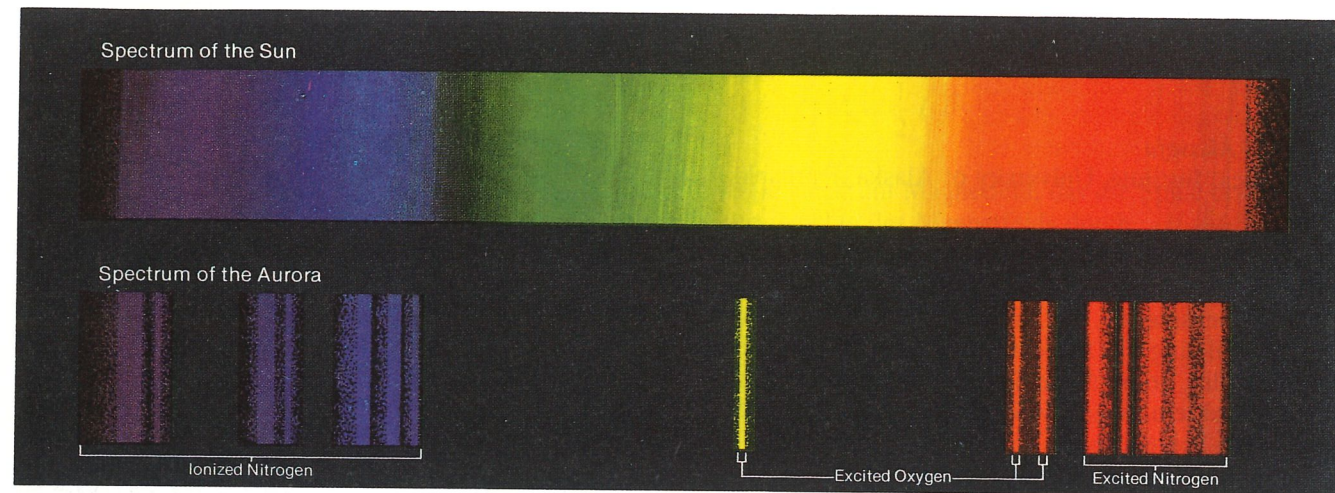


Abbildung 3 Vergleich der sichtbaren Spektren der Sonne und des Polarlichts (Ionized Nitrogen = ionisierter Stickstoff; Excited Oxygen = angeregter Sauerstoff; Excited Nitrogen = angeregter Stickstoff). (Foto: Syun-Ichi Akasofu)

Licht der Aurora für Sonnenlicht, welches an Eiskristallen in der Atmosphäre reflektiert wird, bis 1888 Anders Jonas Ångström zeigte, daß zwischen dem Licht der Aurora und dem Sonnenlicht wesentliche Unterschiede bestehen. Viele Wellenlängen, die im Sonnenspektrum vertreten sind, fehlen im Spektrum der Aurora völlig (Abbildung 3). Ein ähnliches Spektrum wie das der Aurora kann man erzeugen, indem man an zwei Elektroden in einer mit Neon gefüllten Vakuumröhre eine Hochspannung anlegt. Die Elektronen fließen von der negativen Elektrode zur positiven und stoßen dabei mit Neonatomen zusammen, die dadurch angeregt werden und infolgedessen Licht aussenden. Durch einen ganz ähnlichen Prozeß entsteht das Polarlicht. Hier emittieren Atome und Moleküle in der oberen Atmosphäre (Abbildung 4) Licht, wenn sie von schnellen Elektronen getroffen werden.

Für ein genaues Verständnis der Prozesse, die zu diesen Leuchterscheinungen führen, ist es hilfreich, sich an die Funktionsweise eines elektrischen Generators zu erinnern. In einem Generator wird bekanntlich dadurch elektrischer Strom erzeugt, daß sich eine Leiterschleife in einem Magnetfeld bewegt. Den Polarlichtern liegt ein ganz ähnlicher Mechanismus zugrunde: Ein Strom geladener Teilchen, der von der Sonne ausgeht (der sogenannte Sonnenwind), fungiert als Leiter im Magnetfeld der Erde (Abbildung 5).

Die äußere Schicht der Sonnenatmosphäre, die Korona, besteht aus einem Plasma, also einem Gas (zum größten Teil Wasserstoff), das so heiß ist, daß die elektrisch neutralen Atome in Protonen und Elektronen dissoziiert sind. Der Sonnenwind ist ein dünnes, heißes Plasma dieser geladenen Teilchen, welches mit Geschwindigkeiten zwischen 300 und 1000 km/s von der Sonne in alle Richtungen bis zu den Grenzen des Sonnensystems wegströmt. Magnetische Feldlinien verhalten sich im Sonnenwind wie elastische Saiten. Während

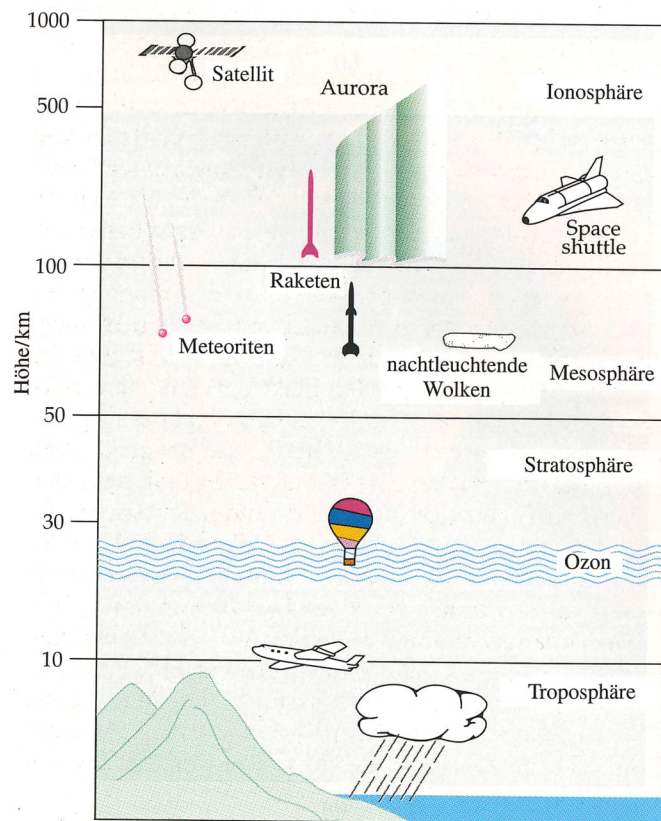


Abbildung 4 Schemazeichnung der Erdatmosphäre zur Illustration der Höhenschichtung. Polarlichter bilden sich sowohl innerhalb als auch oberhalb der Ionosphäre. Die Ionosphäre ist eine Atmosphärenschicht, die viele freie Elektronen und Ionen enthält, welche durch die Sonneneinstrahlung im UV- und Röntgenbereich entstanden sind.

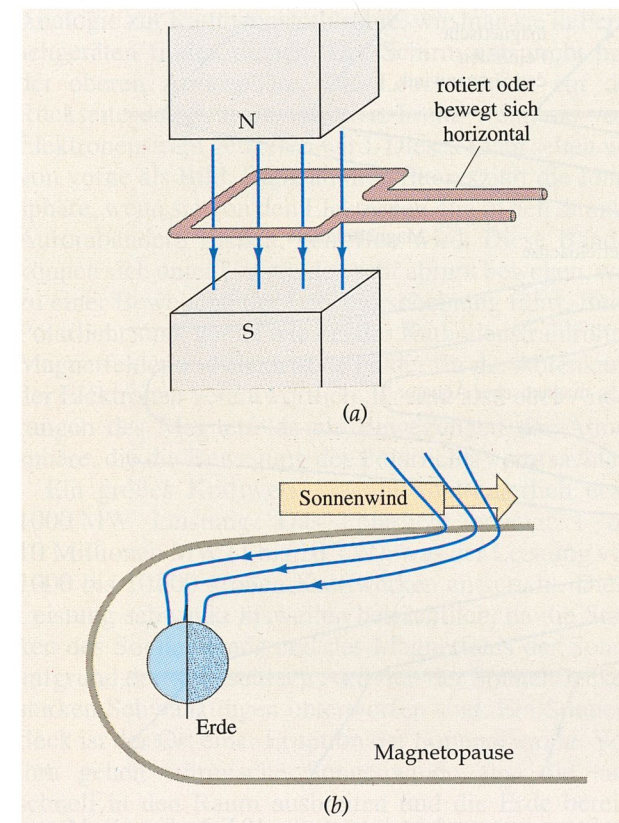


Abbildung 5 a) Schemazeichnung eines typischen Generators. b) Das Zusammenspiel des Sonnenwinds und des Erdmagnetfelds bildet einen natürlichen Generator.

der Sonnenwind sich von der Sonne wegbewegt, dehnt er die Magnetfeldlinien der Sonne nach außen. Beim Hinströmen zur Erde zwingt er die Feldlinien des Erdmagnetfelds in eine kometenartige Form, die man Magnetosphäre nennt (Abbildung 6). Die äußere Grenze dieses Gebildes heißt Magnetopause.

In einer Entfernung von etwa 10 Erdradien oberhalb der Erdoberfläche sind Erdmagnetfeld und (das ausgedehnte) Sonnenmagnetfeld ungefähr gleich stark ($30 \cdot 10^{-5}$ G). Ihre Feldlinien treffen an der Grenze der Magnetosphäre aufeinander und bilden ein „Verbundfeld“ mit besonderer Form. Die Bewegung der geladenen Teilchen im Magnetfeld, so auch in diesem Verbundfeld, ist der Bewegung eines elektrischen Leiters in einem Magnetfeld äquivalent. Schaute man von der Erde aus, so sähe man die Protonen des Sonnenwinds nach links und die Elektronen nach rechts abgelenkt (durch die Lorentz-Kraft $e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$). Sie bilden so den positiven und negativen Pol des Polarlichtgenerators (Abbildung 7a). Die Magnetosphäre ist mit dünnem Plasma gefüllt, so daß zwischen den Polen ein Strom fließen kann. Der Strom fließt vom positiven Pol weg, spiralförmig die Feldlinien entlang in die Ionosphäre (die elektrisch leitfähige Schicht der Atmosphäre), durch

die Ionosphäre hindurch quer über die Polarregion und weiter spiralförmig die Magnetfeldlinien hinauf von der Ionosphäre zum negativen Pol. Das ist der primäre elektrische Entladungskreis. Auf der sogenannten „Morgenseite“ der Magnetosphäre fließt Strom an den inneren Rand des Auroraovals als Teil des primären Entladungskreises und wird zum äußeren Rand des Ovals geleitet. Da der Bereich außerhalb dieses Ovals nicht besonders leitfähig ist, fließen einige Ströme wieder zurück nach außen, die Feldlinien entlang, und erzeugen einen parallelen, sekundären Kreis. Der entsprechende Prozeß findet auch auf der „Abendseite“ statt (Abbildung 7b). Es gibt somit zwei Paare elektrischer Ströme (nach oben und nach unten), die spiralförmig längs der Feldlinien fließen, ein Paar auf der Abend- und eines auf der Morgenseite der Magnetosphäre. Der Strom nach oben wird durch Elektronen erzeugt, die nach unten fließen und dabei mit Atomen und Molekülen in der Atmosphäre kollidieren, welche ihrerseits Licht emittieren. Dies ist der Anteil des Entladungskreises, der das Polarlicht erzeugt (genau wie der Entladungsvorgang in der oben beschriebenen Neonröhre).

Weshalb aber haben die Leuchterscheinungen die Form eines Schleiers oder Vorhangs? Man nimmt an, daß die Elektronen in der oberen Atmosphäre in dünnen Schichten fließen, wobei der Grund hierfür jedoch noch unbekannt ist. Die untere Begrenzung dieses Schleiers ist durch die Eindringtiefe der Elektronen in die dichteren Teile der Atmosphäre gegeben. In einer Höhe von etwa 100 km haben die meisten Elektronen einen Großteil ihrer kinetischen Energie durch Stöße mit Atomen und Molekülen verloren, und nur wenige schaffen es, noch tiefer in die Lufthülle der Erde einzudringen.

Die starken Farbschwankungen der Aurora lassen sich auf zwei Faktoren zurückführen. Zum einen hängt die Farbe einer Gasentladung von der Gasart und der Energie der sie erzeugenden Elektronen ab, zum anderen ändert sich die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre stark mit der Höhe. Zusammengefasst führt dies zur großen Farbvielfalt der Polarlichter. Den Hauptanteil der Ionosphäre bildet atomarer Sauerstoff, der entsteht, wenn ultraviolettes Sonnenlicht O_2 -Moleküle spaltet. Die Anregung von atomarem Sauerstoff führt zu einer grünlich-weißen Leuchterscheinung (die häufigste Aurorafarbe). Höherenergetische Elektronen dringen weiter in die Atmosphäre ein und erzeugen beim Zusammenstoß mit Stickstoffmolekülen rosarote bis violette Leuchterscheinungen mit unregelmäßiger Begrenzung. Ionisierte Stickstoffmoleküle erzeugen ein blauviolett Licht. Sichtbares Licht bildet nur einen geringen Bruchteil des emittierten Spektrums der Aurora, es gehören genauso Anteile im infraroten, ultravioletten und sogar im Bereich der Röntgenstrahlung dazu.

Zum Verständnis, warum sich die Leuchterscheinungen der Polarlichter häufig stark bewegen, kann die

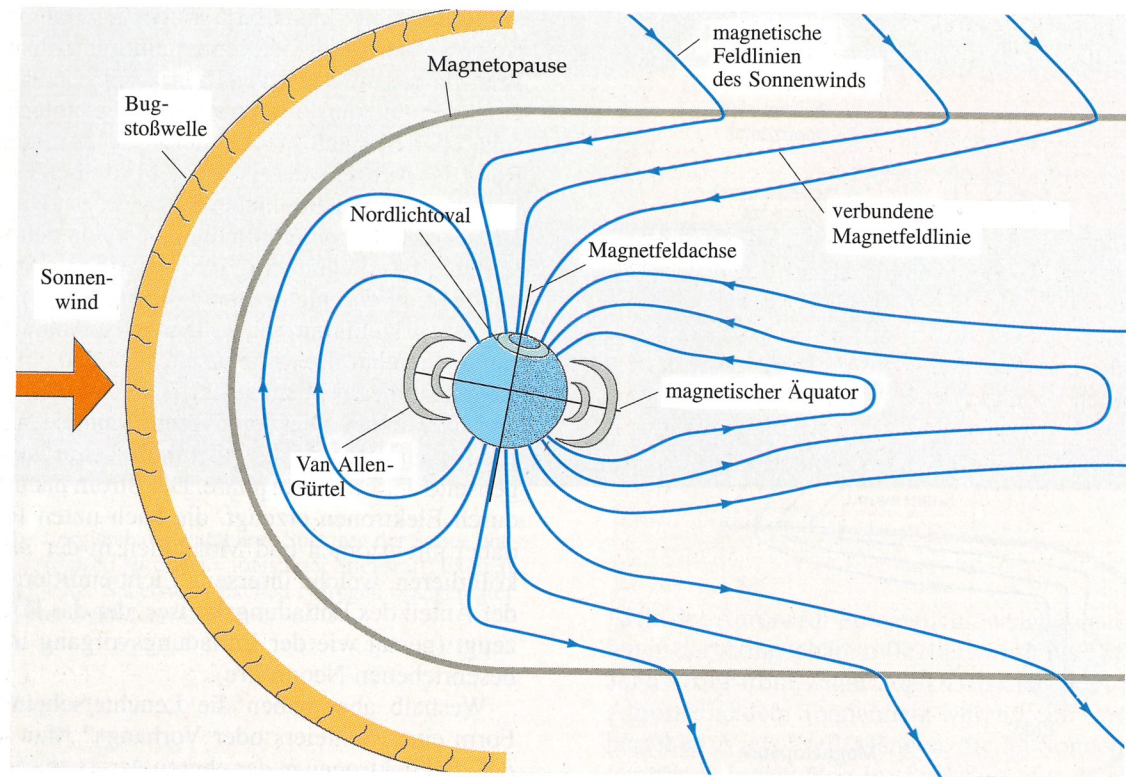


Abbildung 6 Die Magnetosphäre der Erde. Der Sonnenwind drückt das Erdmagnetfeld zur Form eines Kometenschweifes zusammen. In seinem Mittelpunkt befindet sich unsere Erde. Der Abstand zwischen der Erde und der Seite der Magnetosphäre, die

der Sonne zugewandt ist, beträgt etwa 10 Erdradien. Die Magnetosphäre wird zu einem langen Schwanz ausgezogen (hier nicht dargestellt), der sich bis zu einem Abstand von mehr als 1000 Erdradien von der Sonne weg erstreckt (rechte Bildseite).

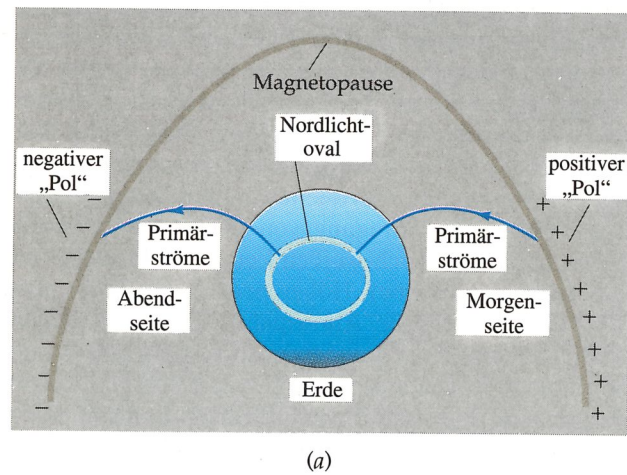
Analogie zur Kathodenstrahlröhre, wie man sie in Fernsehgeräten findet, dienen. Der Schirm entspricht hier der oberen Atmosphäre. Die Leuchtschicht auf der Rückseite des Schirms emittiert Licht, wenn sie vom Elektronenstrahl getroffen wird. Dieses Licht sehen wir von vorne als Bild. Ganz ähnlich fluoresziert die Ionosphäre, wenn sie von den Elektronen, die in den dünnen Aurorabändern fließen, getroffen wird. Diese Bänder können sich unter Umständen sehr abrupt bewegen, was zu einer Bewegung der Leuchterscheinung führt. Beim Polarlicht sind, genau wie bei der Kathodenstrahlröhre, Magnetfelder und elektrische Felder für die Ablenkung der Elektronen verantwortlich. Es sind also eher Änderungen des Magnetfelds als Bewegungen der Atmosphäre, die die Bewegung des Polarlichts verursachen.

Ein großes Kraftwerk erzeugt kontinuierlich etwa 1000 MW Leistung. Das Polarlicht erzeugt 1 bis 10 Millionen MW (1 bis 10 TW), was der Leistung von 1000 bis 10000 großen Kraftwerken entspricht. Diese Leistung schwankt bisweilen beträchtlich, da die Stärken des Sonnenwinds und des Magnetfelds der Sonne aufgrund der wechselnden Aktivität der Sonnenflecken starken Schwankungen unterworfen sind. Ein Sonnenfleck ist der Ort einer Eruption der Sonnenkorona. Von ihm gehen stürmische Sonnenwinde aus, die sich schnell in den Raum ausbreiten und die Erde bereits nach 40 Stunden erreichen. Durch die Wechselwirkung dieses stürmischen Sonnenwinds mit der Magnetosphäre kann die erzeugte Leistung gegenüber dem „üblichen“ Wert um das Tausendfache erhöht werden. Dann dehnen sich die ringförmigen Leuchtgürtel bis zum Äquator hin aus, und man kann sie noch weit entfernt von den Polarregionen sehen. Nach solchen Sonnen-

eruptionen sind die Leuchterscheinungen wesentlich heller als sonst, und die obere Begrenzung des Polarlichtschleiers verschiebt sich in größere Höhen, so daß Teile der nördlichen Aurora sehr viel weiter südlich, beispielsweise von Mexiko oder Mitteleuropa aus, gesehen werden können.

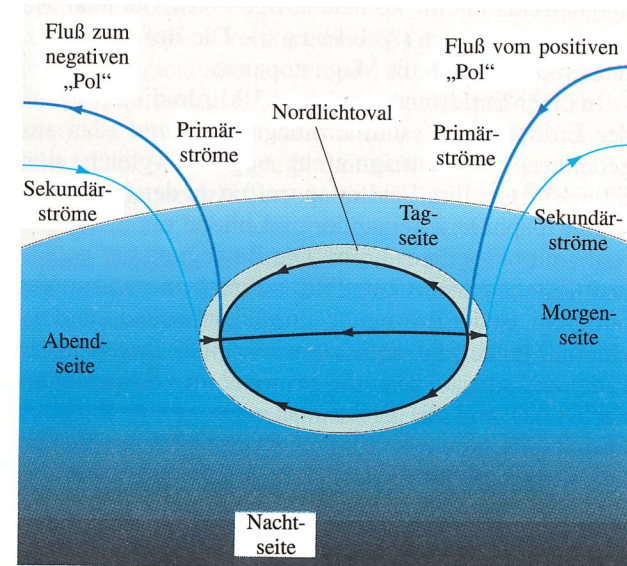
Die durch den stürmischen Sonnenwind hervorgerufene Verstärkung der elektrischen Entladungsströme erzeugt starke Magnetfeldfluktuationen. Dann spricht man davon, daß sich magnetische Stürme bilden. Die elektrischen Ströme heizen die obere Atmosphäre auf, was dazu führt, daß tiefere, dichtere Schichten der Atmosphäre nach oben strömen und weiter oben die Dichte erhöhen. Dies kann überraschende Auswirkungen auf in dieser Höhe die Erde umkreisende Satelliten haben: Die Reibung zwischen Satelliten und Atmosphäre erhöht sich, was deren Flughöhe vermindert. Es sind Fälle bekannt, wo Satelliten durch einen magnetischen Sturm aus ihrer Umlaufbahn gebracht wurden.

Wir verstehen nun wichtige Abläufe, die die Polarlichter erzeugen, wenigstens zum Teil: die Herkunft der ringförmigen Auroragürtel um die geomagnetischen Pole, die Prozesse, die die gigantischen elektrischen Entladungen mit Energie versorgen, die Gründe für die Fluktuationen dieser Prozesse sowie die Beziehung zwischen der Aktivität der Polarlichter und der Sonnenaktivität, die sich neben anderen Vorgängen in den Eruptionen der Sonnenflecken zeigt. Es bleibt aber auch am Ende des 20. Jahrhunderts eine Herausforderung an die Wissenschaft, die elektrischen Entladungsprozesse genauer zu untersuchen, die diese beeindruckende Naturscheinung – einen gewaltigen, natürlichen Generator – erst möglich machen.



(a)

Abbildung 7 a) Aufsicht auf Erde und Magnetosphäre. Die positiven und negativen „Anschlüsse“ (Morgen- bzw. Abendseite der Magnetosphäre) sind zusammen mit den primären Strömen abgebildet. b) Primärer und sekundärer Entladungskreis. Die Ströme über die Polkappen und längs des Polarlichtovals hängen von der Leitfähigkeit der Atmosphäre ab.



(b)

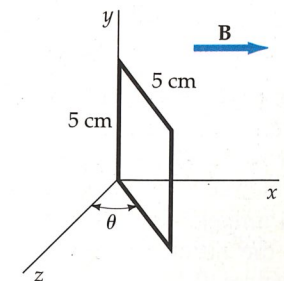
Aufgaben

Stufe I

26.1 Der magnetische Fluß

1. Ein homogenes Magnetfeld der Stärke 2000 G verlaufe parallel zur x -Achse. Eine quadratische Spule mit einer Windung und der Kantenlänge 5 cm bilde mit der z -Achse den Winkel θ , wie in Abbildung 26.29 gezeigt. Bestimmen Sie den magnetischen Fluß durch die Spule für a) $\theta = 0^\circ$, b) $\theta = 30^\circ$, c) $\theta = 60^\circ$ und d) $\theta = 90^\circ$.

2. Eine ringförmige Spule mit dem Radius 5 cm habe 25 Windungen und befinde sich am Äquator, wo das Erdmagnetfeld eine Stärke von 0,7 G in Richtung Norden hat. Berechnen Sie den magnetischen Fluß durch



26.29 Zu Aufgabe 1.

die Spule, wenn ihre Ebene a) horizontal liegt, b) vertikal steht und die Achse nach Norden zeigt, c) vertikal steht und die Achse nach Osten zeigt und d) vertikal