The background of the page features a large, light gray watermark of the official seal of the University of Würzburg. The seal is circular and contains a central shield with various heraldic symbols, including a cross and a checkered pattern. Above the shield are two figures, and below it are two lions. The Latin text 'UNIVERSITAS WÜRZBURGENSIS' is visible around the top and sides of the seal, and 'MDCLXV' (1665) is at the bottom.

Universität Würzburg  
**Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik**  
Fakultät für Physik und Astronomie

**Schriftliche Hausarbeit**  
**im Rahmen der ersten Staatsprüfung**  
**für ein Lehramt an Gymnasien**

Polarlichter im Schulunterricht der gymnasialen Oberstufe

Eingereicht von  
**Philipp Vobornik**

im  
**September 2023**

*Gutachter:* Dr. S. Lück



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Erklärung des Polarlichts</b> .....	<b>9</b>
2.1	Physikalische Grundlagen – geladene Teilchen im Magnetfeld .....	9
2.1.1	Definition des elektrischen und magnetischen Felds .....	9
2.1.2	Drei-Finger-Regel .....	10
2.1.3	Geladene Teilchen auf einer Kreisbahn .....	10
2.1.4	Geladene Teilchen auf einer Schraubenbahn .....	11
2.1.5	Magnetische Flasche .....	12
2.2	Physikalische Grundlagen – Anregung von Atomen .....	13
2.3	Entstehung von Polarlichtern .....	14
2.3.1	Entstehung des Sonnenwinds .....	14
2.3.2	Sonnenflecken, Protuberanzen und Sonnensturm .....	15
2.3.3	Sonnenwind auf dem Weg zur Erde .....	16
2.3.4	Interaktion des Sonnenwindes mit dem Erdmagnetfeld .....	17
2.3.5	Entstehung der Leuchterscheinung .....	21
2.3.6	Grund der verschiedenen Farben von Polarlichtern .....	21
<b>3</b>	<b>Experimente zur Visualisierung von Polarlichtern</b> .....	<b>24</b>
3.1	Terrella-Experimente von Kristian Birkeland .....	24
3.2	Weiterentwicklung zur Planeterrella .....	25
<b>4</b>	<b>Aurora-Experiment</b> .....	<b>27</b>
4.1	Vorbereitungen .....	28
4.2	Konstellation 1 – Aurora-Oval .....	32
4.2.1	Durchführung .....	32
4.2.2	Erklärung .....	33

4.3	Konstellation 2 – Ringstrom .....	34
4.3.1	Durchführung .....	34
4.3.2	Erklärung.....	34
4.4	Konstellation 3 – Aurora auf der Sonne.....	35
4.4.1	Durchführung .....	35
4.4.2	Erklärung.....	35
4.4.3	Anmerkung.....	35
4.5	Konstellation 4 – zwei Kugeln, Erde – Sonne .....	37
4.5.1	Durchführung .....	37
4.5.2	Erklärung.....	38
4.6	Allgemeine Hinweise zur Durchführung .....	39
4.7	Vergleich mit Realbedingungen.....	40
4.8	Ausblick und Optimierung.....	41
4.9	Gefährdungsbeurteilung .....	42
<b>5</b>	<b>Simulation des Magnetfelds einer Kugel in Newton II .....</b>	<b>43</b>
5.1	Kurzeinführung Newton II.....	43
5.2	Simulation in Newton II.....	43
5.3	Vergleich der Simulation mit der Realität .....	48
5.4	Variation der Simulationsparameter .....	50
<b>6</b>	<b>Aktuelle Behandlung von Polarlichtern in der Schule.....</b>	<b>53</b>
6.1	Lehrplanverortung (LehrplanPLUS Bayern) .....	53
6.2	Polarlichter in Schulbüchern.....	55
<b>7</b>	<b>Beobachtung von Polarlichtern.....</b>	<b>56</b>
7.1	KP-Index .....	56
7.2	Beobachtung.....	57

7.3	Vorkommen in Deutschland.....	60
7.4	Sonnensturm – Gefahr und Schönheit zugleich .....	60
<b>8</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>66</b>
<b>A</b>	<b>Erklärung nach §29 LPO-I .....</b>	<b>69</b>



# 1 Einleitung

Seit jeher sind Menschen von atmosphärischen Phänomenen fasziniert. Seien es optische wie ein Regenbogen, beängstigende wie ein Gewitter oder beeindruckende wie das Polarlicht. Viele dieser Erscheinungen zogen verschiedene Kulturen in ihren Bann, welche diesen oft mystische Bedeutung zugeteilt haben. So wurden Gewitter als Zeichen der Unzufriedenheit der Götter gesehen, die Menschen für ihren Frevel bestrafen und daran erinnern sollen, dass diese ihren Göttern hörig zu sein haben. Ähnlich dazu verhält es sich mit dem Polarlicht in nordeuropäischen Kulturen. Auch deren Existenz konnte man sich nicht ohne ein ihnen überlegenes mystisches Wesen erklären. Polarlichter waren laut der dortigen Überzeugung entweder Ankündigungen der Erscheinung von Göttern, wie Thor, oder auch Spuren von Kämpfen zwischen den Göttern und ihren Widersachern, wenn diese beispielsweise rötlich leuchteten. (Schlegel 2011, S. 22 ff.)

Auch in anderen Kulturkreisen wurde vereinzelt von Polarlichtsichtungen berichtet. Weil diese in südlicheren Regionen, wie dem Mittelmeerraum, deutlich seltener vorkommen, werden sie meist als Ankündigung einer Gotteserscheinung angesehen. (Schlegel 2011, S. 29 ff.)

Mittlerweile hat sich der Ruf des Polarlichts von einem eher negativen Ereignis gewandelt hin zu einem spektakulären Naturphänomen, das jedes Jahr viele Menschen in ihren Bann zieht. So werben Regionen, in denen häufig Polarlichter zu sehen sind aktiv damit, um Touristen anzulocken. Bekanntestes Beispiel hierfür ist Island, welches verstanden hat mit seiner nordischen Landschaft mit heißen Quellen und Polarlichtern Touristen anzusprechen und zu einer Reise zu bewegen. (Icelandair 2023)

Doch nicht nur aus touristischer Perspektive, sondern auch aus einer physikalischen Sichtweise sind Polarlichter faszinierend. So verbindet die Erklärung der Entstehung von Polarlichtern verschiedene Teilbereiche der Physik miteinander.

Diese Arbeit setzt sich daher zum Ziel, das Phänomen des Polarlichts bezüglich der Vermittelbarkeit in der Schule zu untersuchen. Dafür werden zunächst die beteiligten physikalischen Phänomene und Gesetzmäßigkeiten untersucht und der Weg des Polarlichts von seinem Ursprung als Sonnenwind bis hin zu den Leuchterscheinungen in der Atmosphäre nachvollzogen. Anschließend sollen diese theoretischen Überlegungen auch praktisch in ein Realexperiment und eine Computersimulation übergehen, die sich zum Einsatz im Unterricht eignen. Sie werden auf den Einsatz in der Schule hin untersucht und es werden praktische Hinweise zum persönlichen Erleben von Polarlichtern gegeben.

Diese Arbeit soll auch als eine Handreichung für Lehrerinnen und Lehrer dienen, da einerseits atmosphärische Phänomene im aktuellen Lehrplan Plus keine bzw. nur wenig Zeit einnehmen. Andererseits erfreuen sich Naturphänomene einem vergleichsweise stabil hohen Sachinteresse bei Jungen und insbesondere einem noch höheren Interesse bei Mädchen. (Hoffmann et al. 1998, S. 48) Somit kann die Behandlung von Polarlichtern dazu beitragen, einen Physikunterricht zu schaffen, der gleichermaßen bei Mädchen und Jungen ein Interesse an den verbundenen physikalischen Themen weckt.

Gerade im Angesicht dessen, dass Polarlichter immer stärker in den Fokus der Werbung gelangen, sollte es Teil der naturwissenschaftlichen Aufklärung sein, die Entstehung dieser zu erklären. Zudem können Polarlichter auch Begleiterscheinungen realer Bedrohungen sein. So sollen sich die Schülerinnen und Schüler selbst davon überzeugen können, welche Informationen über dieses Phänomen zur mystischen Bedeutung, zu einem wirklichen Risiko oder auch zum Irrglauben gehören.

## 2 Physikalische Erklärung des Polarlichts

Im folgenden Verlauf dieser Arbeit wird rasch festzustellen sein, dass für die physikalische Erklärung der Entstehung des Polarlichts Wissen über verschiedene physikalische Prinzipien und Effekte benötigt wird. Damit diese Arbeit unabhängig vom physikalischen Vorwissen nachvollzogen werden kann, werden hier am Anfang einige benötigte Effekte der Elektrodynamik und Quantenphysik erläutert. Zum Großteil, jedoch nicht vollständig, werden diese Themen im gymnasialen Schulunterricht behandelt, siehe dazu die Behandlung von Polarlichtern in der Schule in Kapitel 6. Allerdings finden sich dort nicht alle Themen ausreichend wieder. Im nachfolgenden Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen zu geladenen Teilchen im Magnetfeld und der Anregung von Atomen besprochen, bevor die Entstehung der Polarlichter erklärt wird.

### 2.1 Physikalische Grundlagen – geladene Teilchen im Magnetfeld

In diesem Kapitel wird das Verhalten eines geladenen Teilchens in einem Magnetfeld theoretisch untersucht. Dies dient als Basis für die auftretenden Phänomene, die im Zusammenhang mit Polarlichterscheinungen wichtig sind.

#### 2.1.1 Definition des elektrischen und magnetischen Felds

Befindet sich ein geladenes Teilchen in einem elektrischen Feld, so wirkt auf dieses eine Kraft  $\vec{F}_E$ . Das Elektrische Feld  $\vec{E}$  in einem Raumpunkt wird über die Kraft  $\vec{F}_E$  auf eine Probeladung  $q$  definiert durch:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q} \quad (1)$$

Da es keine magnetischen Monopole gibt, wird analog zum elektrischen Feld das Magnetfeld  $\vec{B}$  darüber definiert, welche Kraft  $\vec{F}_B$  auf ein geladenes Probetaeilchen wirkt, wenn dieses sich im Magnetfeld bewegt.

Zum einen ergibt die experimentelle Bestimmung des Betrags der Kraft  $\vec{F}_B$ , dass dieser 0 ist, falls  $\vec{v} \parallel \vec{B}$ , sich das Teilchen also parallel zu den Magnetfeldlinien bewegt, und maximal ist, falls  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , das Teilchen sich also senkrecht zu den Magnetfeldlinien bewegt. Zum anderen lässt sich über den Betrag des Magnetfeldes im Fall maximaler Kraft folgender Zusammenhang feststellen:

$$B = \frac{F_B}{|q|v} \quad (2)$$

wobei hier  $q$  die Ladung des Probeteilchens darstellt.

Werden diese beiden Beobachtungen zusammengefasst, lässt sich die Kraft  $\vec{F}_B$  durch die sogenannte Lorentzkraft beschreiben:

$$\vec{F}_B = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (3)$$

Für den Betrag von  $\vec{F}_B$  gilt folglich:

$$F_B = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

wobei  $\varphi$  den Winkel zwischen  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$  bezeichnet. (Halliday et al. 2009, S. 836 f.)

### 2.1.2 Drei-Finger-Regel

Um herauszufinden, in welche Richtung eine Kraft auf ein bewegtes geladenes Teilchen in einem Magnetfeld wirkt, kann man die Erkenntnis aus (3) nutzen. Die Definition des Vektorproduktes sagt aus, dass das Ergebnis des Vektorproduktes aus zwei Vektoren einen Vektor beschreibt, der senkrecht auf beiden Vektoren steht. (Mathematische Formeln und Definitionen 2004, S. 81)

So kann man seine rechte Hand verwenden und Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger in jeweils zueinander rechten Winkel ausstrecken. Dann zeigt der Daumen in Richtung der Geschwindigkeit des Probeteilchens  $\vec{v}$ , der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes  $\vec{B}$  und der Mittelfinger dadurch resultierend automatisch in Richtung der wirkenden Kraft  $\vec{F}_B$ . Die rechte Hand verwendet man dabei für positive Ladungsträger, wohingegen man für negative Ladungsträger analog die linke Hand nutzt. (Hermann-Rottmair et al. 2022, S. 24 ff.)

Dies ist sowohl in der Schule als auch beim Nachvollziehen dieser Arbeit eine schnelle Methode, die Krafrichtung zu bestimmen.

### 2.1.3 Geladene Teilchen auf einer Kreisbahn

Bewegt sich ein geladenes Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit  $\vec{v}$  in einem homogenen Magnetfeld  $\vec{B}$ , so wirkt nach (3) bzw. der Drei-Finger-Regel immer eine Kraft, die sowohl senkrecht zu  $\vec{v}$ , als auch zu  $\vec{B}$  ist. Sind zusätzlich  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$  senkrecht zueinander, so bewirkt  $\vec{F}_B$ , dass sich das Teilchen auf einer Kreisbahn bewegt, wobei  $\vec{B}$  senkrecht auf der Kreisbahnebene steht. Der Radius dieser Kreisbahn  $r$  berechnet sich, indem die Beträge der zum Mittelpunkt

des Kreises gerichteten Lorentzkraft (5) und der Zentripetalkraft (6) gleichgesetzt und nach dem Radius (7) umgestellt werden.

$$F_B|_{\varphi=90^\circ} = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \varphi = qvB \quad (5)$$

$$F_{Zentripetal} = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (6)$$

$$r = \frac{1}{B} \cdot \frac{m \cdot v}{q} \quad (7)$$

Dieser Radius ist also direkt proportional zur Geschwindigkeit des Teilchens und indirekt proportional zur Stärke des Magnetfeldes. (Demtröder 2017a, S. 91 f.)

### 2.1.4 Geladene Teilchen auf einer Schraubenbahn

Besitzt das Teilchen, das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit in einem homogenen Magnetfeld bewegt, nicht nur eine Geschwindigkeitskomponente, die senkrecht zu dem Magnetfeld gerichtet ist, sondern zusätzlich eine, die (anti-)parallel zum Magnetfeld gerichtet ist, so beschreibt die Bewegung des Teilchens eine Schraubenbahn.

In den folgenden Abbildungen 1 a) und b) ist das Magnetfeld parallel zur z-Achse (nach oben) ausgerichtet. Dabei startet in Abbildung 1 a) ein negativ geladenes Teilchen auf der y-Achse mit einer Geschwindigkeit, die nur eine Komponente in die x-Richtung besitzt. Durch das in z-Richtung anliegende Magnetfeld beschreibt es eine Kreisbahn im Uhrzeigersinn.

Wird zur Startgeschwindigkeit  $v_0$  auch eine z-Komponente hinzugefügt, so beschreibt das Teilchen eine Schraubenbahn, die im Uhrzeigersinn verläuft, jedoch auch gleichzeitig in z-Richtung wandert (siehe Abb. 1 b) ).

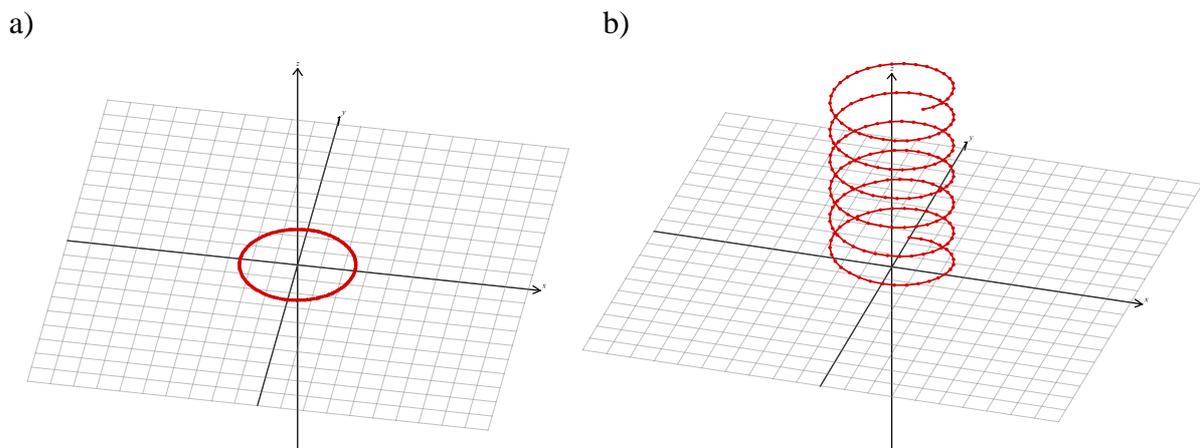


Abb. 1: Geladenes Teilchen im Magnetfeld: a)  $v_0$  ohne z-Komponente.  
b)  $v_0$  mit z-Komponente. [eigene Abbildung]

### 2.1.5 Magnetische Flasche

Befindet sich ein geladenes Teilchen in einem inhomogenen Magnetfeld, wie es beispielsweise in Abbildung 2 zu sehen ist, so stellt sich der Effekt einer magnetischen Flasche ein. Das Magnetfeld verändert hier entlang der Feldrichtung seine Feldstärke in der Art, dass es von einem Bereich höherer Feldstärke zu einem Bereich geringerer Feldstärke übergeht, welcher in einen Bereich höherer Feldstärke wechselt. Dabei befindet sich das Teilchen zwar auf einer Schraubenbahn um die Feldlinien herum, jedoch bewirkt die Veränderung der Feldstärke eine Reflexion des Teilchens von Bereichen höherer Feldstärke zurück in den Bereich mit der geringeren Feldstärke. Da es nun eine entgegen dem Magnetfeld gerichtete Geschwindigkeitskomponente besitzt, wird das Teilchen weiter in die andere Richtung in einen Bereich höherer Feldstärke gelenkt. Dort wird es wiederum reflektiert und der Vorgang beginnt von Neuem. So ist das Teilchen in dieser Anordnung „eingefangen“. Auf Grund der Form der Magnetfeldlinien spricht man hierbei von einer magnetischen Flasche. Die Reflexion rührt daher, dass durch die Inhomogenität des Magnetfelds immer eine Kraftkomponente wirkt, die zum Zentrum dieser Flasche zeigt. Somit wird die Geschwindigkeitskomponente, die in Richtung des Magnetfeldes zeigt, so lange negativ beschleunigt, bis das Teilchen die Flugrichtung ändert und sich schraubenförmig in Richtung Zentrum der Flasche bewegt. (Halliday et al. 2009, S. 847)

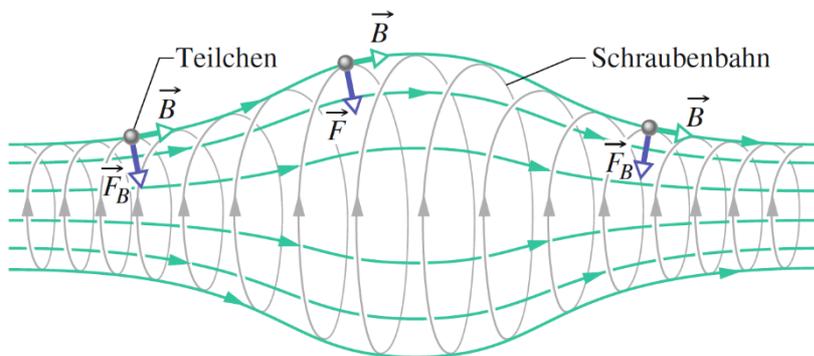


Abb. 2: Magnetische Flasche [entnommen von (Halliday et al. 2009, S. 847)]

Nachdem das Verhalten von bewegten Ladungen in magnetischen Feldern beschrieben wurde, in denen es außer der Probeladung an sich und dem Magnetfeld keine weiteren Interaktionspartner gibt, soll folgend betrachtet werden, wie diese mit Materie interagieren.

## 2.2 Physikalische Grundlagen – Anregung von Atomen

In der Modellvorstellung des Bohr'schen Atommodells besitzen Atome diskrete Energiezustände. Trifft ein Lichtquant mit der zum Übergang zwischen zwei diskreten Niveaus passenden Energie auf ein Atom, so wird dieses vom Atom aufgenommen und dessen Energie genutzt, um das Atom in einen höheren Energiezustand zu versetzen. Dabei muss folgendes gelten:

$$E_{\text{Lichtquant}} = h \cdot \nu \stackrel{!}{=} E_k - E_i \quad (8)$$

Dabei beschreiben  $E_{\text{Lichtquant}}$  die Energie des eintreffenden Lichtquants,  $\nu$  dessen Frequenz,  $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum und  $E_k, E_i$  zwei Energiezustände des beteiligten Atoms, wobei hier  $E_k > E_i$  gilt.

Befindet sich ein Atom in einem angeregten Energiezustand, so ist dies energetisch ungünstig und es strebt einen energetisch günstigeren (Grund-)Zustand an. Fällt das Atom in einen niedrigeren Energiezustand, so entsteht erneut ein Lichtquant mit eben dieser Energie. (Demtröder 2016, S. 102)

Nach der Theoriebildung durch Bohr wiesen James Franck und Gustav Hertz experimentell nach, dass diese Anregung der Atome nicht nur durch die Aufnahme von Lichtquanten möglich ist, sondern auch durch Stoßprozesse. In dem nach ihnen benannten Franck-Hertz-Versuch beschleunigten sie hierzu Elektronen, die in einer mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre auf Quecksilberatome trafen. Verkürzt formuliert stellten sie dabei fest, dass die Elektronen, die die Anregungsenergie der Quecksilberatome in Form von kinetischer Energie besitzen, zu einem gewissen Anteil mit diesen mittels Stößen interagieren und dabei ihre kinetische Energie abgeben, welche die Quecksilberatome anregt. Dies bezeichnet man auch als Stoßanregung. Analog zur Anregung mittels Lichtquanten geben die angeregten Quecksilberatome beim Übergang in einen tieferen Energiezustand die Anregungsenergie wieder Energie in Form von Photonen ab. (Demtröder 2016, S. 103 ff.)

## 2.3 Entstehung von Polarlichtern

Nachdem einige Grundlagen geklärt wurden, soll geklärt werden, was nötig ist, damit hier auf der Erde Polarlichter beobachtet werden können.

Oft liest man vor allem im populärwissenschaftlichen Kontext eine vereinfachte Erklärung, dass Teilchen der Sonne vom Magnetfeld der Erde in Richtung der Pole abgelenkt werden und dort Luftmoleküle zum Leuchten bringen. (Horneffer 2022) Diese didaktische Elementarisierung nutzt eine Vereinfachung der Interaktion der Sonnenwindteilchen mit dem Erdmagnetfeld, ist jedoch hinsichtlich der Entstehung des Sonnenwinds, seinem Weg zur Erde und die dortigen Auswirkungen auf das Erdmagnetfeld in einem physikalischen Kontext zu kurz gedacht.

Aus physikalischer Sicht sind Polarlichter zum Großteil gut erklärt und mit gewissen kleineren Einschränkungen Schülerinnen und Schülern der Oberstufe auch komplett vermittelbar – näheres dazu in Kapitel 6, in welchem eine Lehrplanverortung von Polarlichtern vorgenommen wird.

Ziel dieser Arbeit soll unter anderem eine komplette Beschreibung der Entstehung von Polarlichtern sein, die im Inneren der Sonne beginnt und bei den Leuchterscheinungen am Himmel endet.

### 2.3.1 Entstehung des Sonnenwinds

Zu Beginn ist zu klären, welche die grundlegenden Teilchen sind, die zu den Leuchterscheinungen am Himmel führen. Dazu muss man sich zunächst gedanklich ins Innere eines Sterns begeben.

Im Inneren von Sternen, wie unserer Sonne, werden auf Grund der dort herrschenden starken Gravitation Wasserstoffkerne (Protonen) fusioniert. Dabei entsteht in den Kernen der Sterne einerseits Helium, andererseits wird bei diesem Fusionsprozess Energie freigesetzt. So werden beispielsweise im Proton-Proton-Zyklus vier Protonen zu einem Heliumatom und zwei Protonen fusioniert. Bei den einzelnen Fusionschritten wird die freiwerdende Energie hauptsächlich in Form von  $\gamma$ -Photonen abgegeben.

Bei Sternen mit höheren Kerntemperaturen können noch weitere Fusionsprozesse in Gang gesetzt werden. Diese tragen in ähnlicher Weise zur Entstehung von Photonen bei.

Verkürzt beschrieben wird die im Kern erzeugte Wärmeenergie anschließend an die Sonnenoberfläche transportiert, von der sie in Form von elektromagnetischen Wellen abgestrahlt wird. (Halliday et al. 2009, S. 1353 f.)

Dies sorgt dafür, dass sich die innerste Schicht der Sonnenatmosphäre, die Photosphäre, auf ca. 5700 K aufheizt. Die äußerste Schicht der Sonnenatmosphäre, die Korona, besitzt hingegen eine Temperatur von ca. 1 bis 2 Millionen K. Dies reicht aus, dass ein Teil des dortigen ionisierten Gases genug kinetische Energie besitzt, um der Gravitation der Sonne zu entkommen. Dieses Gas entweicht ständig aus der Korona und bildet die Heliosphäre. Dieser Strom an Gas aus der Korona der Sonne wird auch Sonnenwind genannt. In Erdnähe besteht der Sonnenwind u.a. zu 95 % aus Protonen, 4 % Heliumionen und zusätzlich Elektronen. Er besitzt eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 300 bis 800  $\frac{\text{km}}{\text{s}}$  und eine Dichte von 3 bis 10  $\frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3}$ .

Der Sonnenwind ist keineswegs immer gleichmäßig, sondern seine Zusammensetzung und Intensität hängen von der Aktivität der Sonne ab, die sich maßgeblich in Sonnenflecken und koronalen Massenauswürfen zeigt, welche im folgenden Kapitel besprochen werden. (Schlegel 2011, S. 153 ff.)

### **2.3.2 Sonnenflecken, Protuberanzen und Sonnensturm**

Im Gegensatz zur Erde besitzt die Sonne kein globales magnetisches Dipolfeld. Durch lokale Konvektion des heißen ionisierten Gases (Plasma) in und unter der Photosphäre entstehen Plasmaströme, die ein Magnetfeld erzeugen. Diese Ströme kommen in Form von isolierten vertikalen Flussröhren vor, die Durchmesser von 100 – 200 km besitzen. Die Orientierung der Magnetfelder kann lokal variieren, da durch die Konvektion die Gaspakete unterschiedliche Bewegungsrichtungen aufweisen. Aufgrund der Lorentzkraft können Plasmateilchen, die durch die Konvektion bewegt werden, das Magnetfeld selbst mitführen und verformen es dadurch. Die Superposition von allen lokal auftretenden Magnetfeldern mit unterschiedlichen Orientierungen führt dazu, dass sich ein schwächeres globales Magnetfeld ausbildet. Die Feldlinien dieses Magnetfeldes verlaufen in der Photosphäre vom Süd- zum Nordpol. Auf Grund der differentiellen Rotation der Sonne, was bedeutet, dass diese sich am Äquator schneller dreht als in Richtung der Pole, werden die Magnetfeldlinien des globalen Magnetfeldes in einer bestimmten Art verformt und bilden parallel zu den Breitenkreisen enge Schleifen (siehe Abb. 3). Gaspakete aus tieferen Schichten der Sonne können durch Konvektion senkrecht nach oben steigen. Hierbei verformen sie ebenfalls das Magnetfeld der Photosphäre lokal, sodass die Magnetfeldlinien die Photosphäre verlassen. In dem Bereich oberhalb der Photosphäre ist die Plasmadichte geringer, weshalb sich das mitgeführte Magnetfeld dort abschwächt. Dies führt dazu, dass sich eine Magnetfeldschleife auf der Sonnenoberfläche mit eigenem Nord- und Südpol bildet. An

diesen Berührungspunkten der Schleife und der Sonnenoberfläche werden durch die Lorentzkraft Plasmapakete, die aus dem Sonneninneren aufsteigen, abgelenkt und somit behindert. Dies führt dazu, dass weniger heiße Materie aus dem Inneren an die Sonnenoberfläche gelangen kann, welche somit lokal abkühlt. Diese kühleren Stellen lassen sich als dunklere Flecken auf der Sonnenoberfläche beobachten, den sogenannten Sonnenflecken.

(Demtröder 2017b, S. 313 f.)

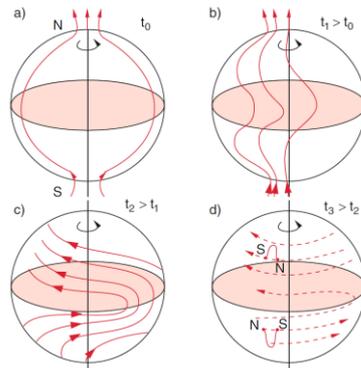


Abb. 3: Schematische Darstellung der Verformung der Magnetfeldlinien der Sonne [entnommen von (Demtröder 2017b, S. 314)]

Durch diese schlauchartigen Verformungen aus der Photosphäre hinaus, wird mehr Plasma in die Korona transportiert. Dies führt zu einem stärkeren Sonnenwind. Ragen die Verformungen weit aus der Photosphäre hinaus, spricht man von Protuberanzen. Diese Protuberanzen können sich zurückbilden oder aufreißen. Reißen sie auf, spricht man auch von eruptiven Protuberanzen oder koronalen Massenauswürfen. Bei diesen Massenauswürfen werden große Mengen an Plasma mit hoher Geschwindigkeit von der Sonne ausgeworfen. Da dies eine starke Veränderung des sonst eher gleichmäßigen Sonnenwinds bedeutet, spricht man hier auch von einem Sonnensturm. (Demtröder 2017b, S. 315; Schlegel 2011, S. 164 ff)

### 2.3.3 Sonnenwind auf dem Weg zur Erde

Wie im Kapitel zuvor beschrieben, besitzt die Sonne ein durch die Konvektionsströme erzeugtes magnetisches Dipolfeld. Dieses ist radialsymmetrisch und die magnetische Feldstärke nimmt mit  $B(r) \sim \frac{1}{r^3}$  ab. Rechnerisch würde man also in Erdnähe ein Magnetfeld mit der Stärke von  $B \approx 10^{-11}$  T erwarten. Tatsächlich werden jedoch Feldstärken zwei Größenordnungen höher (typisch:  $B \approx 4$  bis  $10 \cdot 10^{-9}$  T) gemessen. Dies kommt daher, dass der Sonnenwind durch die elektrisch geladenen Teilchen ein Plasma ist und somit das Magnetfeld der Sonne durch

Induktionsprozesse weiter in den Raum transportiert. Dieses Magnetfeld wird das interplanetare Magnetfeld genannt. Durch die Rotation der Sonne beschreibt das interplanetare Magnetfeld die Form einer rotierenden Spirale und ändert sich zeitabhängig.



Abb. 4: Visualisierung der Parker Spirale. [entnommen von (ESA 2019)]

In Abbildung 4 ist die heliosphärische Strömungsschicht zu erkennen, die auch Parker-Spirale genannt wird, entlang derer der Sonnenwind und somit auch das interplanetare Magnetfeld verläuft. Die Strömungsschicht rotiert gemeinsam mit der Sonne, welche für eine Rotation um die eigene Achse ca. 25 Tage benötigt. Somit ändert sich auch die Orientierung des interplanetaren Magnetfelds aus Sicht der Erde kontinuierlich. (Klecker 2007)

#### **2.3.4 Interaktion des Sonnenwindes mit dem Erdmagnetfeld**

Auf Grund der Lorentzkräfte können sich elektrisch geladene Teilchen nur entlang der Magnetfeldrichtung bewegen. Daher tritt der Sonnenwind, der sich entlang des interplanetaren Magnetfeldes bewegt, zunächst nicht in das Erdmagnetfeld ein. Trifft jedoch das interplanetare Magnetfeld auf das Erdmagnetfeld in genau entgegengesetzter Orientierung, so kann es zu einer Verschmelzung der Feldlinien kommen, der Rekonnexion. Dabei verbinden sich die Feldlinien beider Magnetfelder und das Plasma des Sonnenwindes kann sich entlang der neu verbundenen Feldlinien der Erde nähern. Durch diese Rekonnexion verändert sich das Erdmagnetfeld, hier auch Magnetosphäre genannt, und wird, wie in Abbildung 5 erkennbar, so verformt, dass es auf der sonnenzugewandten Seite komprimiert und auf der sonnenabgewandten Seite zu einem langen Schweif gezogen wird. (Wiebke 2022)

Damit die Magnetfeldlinien des Erdmagnetfeldes mit dem interplanetaren Magnetfeld rekonnexieren, muss wie oben erwähnt, einerseits die Orientierung entgegengesetzt sein und andererseits die Feldstärke des Erdmagnetfeldes betragsmäßig gleich der des interplanetaren Magnetfeldes sein.

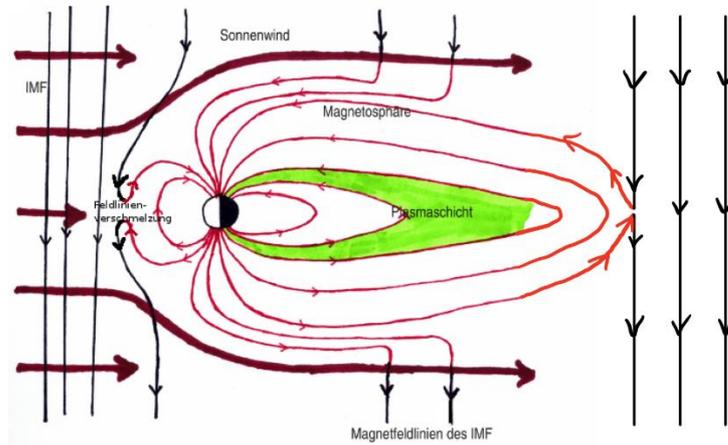


Abb. 5: Schematische Darstellung der Magnetosphäre im Sonnenwind.  
[entnommen von (Wiebke 2022) mit eigenständigen Ergänzungen]

Um herauszufinden, in welchem Abstand diese Rekonnexionen typischerweise auftreten, wird zunächst das Erdmagnetfeld als Dipolfeld eines Stabmagneten mit einem Dipolmoment  $m = 7,75 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$  betrachtet.

Die Magnetfeldstärke des Erdmagnetfeldes lässt sich über die Ableitung des magnetischen Potentials, das ähnlich zum Schwerepotential definiert ist, herleiten. Somit ergibt sich für dessen Betrag in Abhängigkeit des Abstandes  $r$  und der Polhöhe  $\theta$ :

$$|B(r, \theta)| = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \quad (9)$$

(Clauser 2015, S. 199)

Ersetzt man die Polhöhe  $\theta$  durch die magnetischen Breite  $\lambda$  so, dass

$$\lambda = 90^\circ - \theta$$

so ergibt sich die Beziehung:

$$\cos^2 \theta = (\cos \theta)^2 = (\sin 90^\circ - \theta)^2 = (\sin \lambda)^2 = \sin^2 \lambda$$

Berechnet man den Vorfaktor und fasst diesen zu  $M$  zusammen

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot m = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}}{4\pi} \cdot 7,75 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2 = 7,75 \cdot 10^{15} \text{ T}$$

vereinfacht sich (9) zu:

$$|B(r, \lambda)| = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda} \quad (10)$$

Interessiert man sich dafür, in welcher Entfernung die Stärke des Erdmagnetfeld auf die typischen Werten für die Stärke des interplanetaren Magnetfeldes von 4 bis 10 nT abgefallen ist, so ergibt sich in Abhängigkeit der magnetischen Breite  $\lambda$  folgender Zusammenhang:

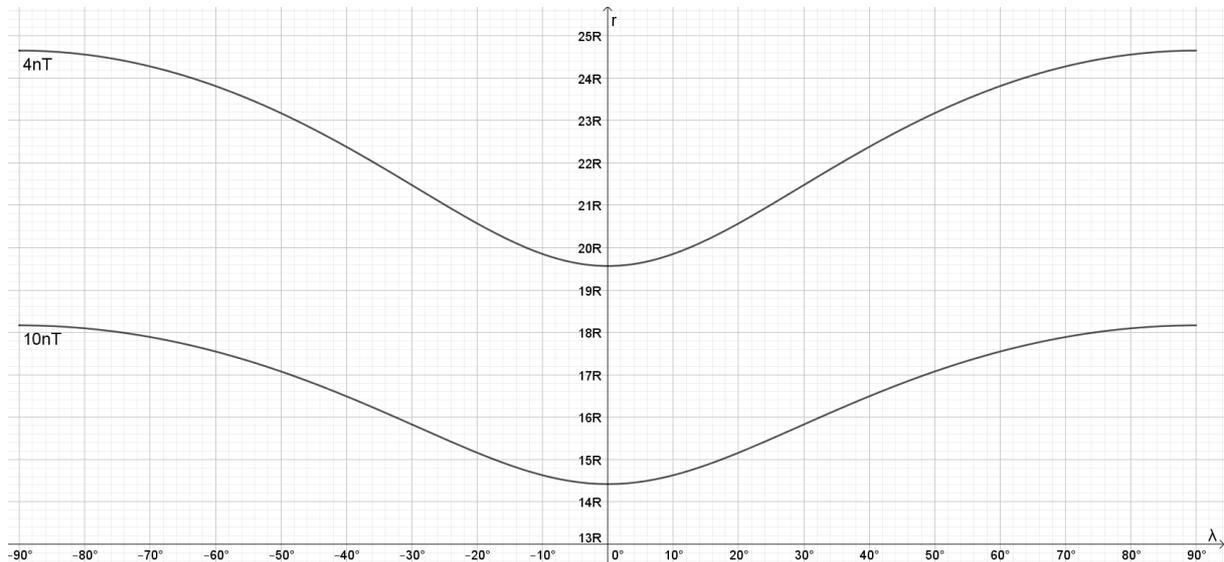


Abb. 6: Berechnung der Entfernung des Erdmagnetfeldes mit Feldstärke von 4 nT und 10 nT in Abhängigkeit zur magnetischen Breite. R entspricht dabei  $R_e$ . [Eigene Abbildung]

Es lässt sich in Abbildung 6 erkennen, dass auf Höhe des magnetischen Äquators die Rekonnexion in einer Entfernung von gut  $14,5 R_e$  bis  $19,5 R_e$  und auf Höhe der magnetischen Pole in einer Entfernung von ca.  $18 R_e$  bis  $24,5 R_e$  zur Magnetachse stattfindet. Hierbei bezeichnet  $R_e \approx 6371$  km den Erdradius.

Die auf der sonnenzugewandten Seite verschmolzenen Feldlinien werden durch den Sonnenwind auf die sonnenabgewandte Seite gedrückt, auf der sie wieder miteinander verschmelzen. Dabei verbinden sich jeweils die Feldlinien des interplanetaren Magnetfeldes und die des Erdmagnetfeldes wieder (vergleiche Abb. 5). So bleibt das Plasma, das im vorherigen Schritt vom interplanetaren Magnetfeld in das Erdmagnetfeld übergegangen ist, im Erdmagnetfeld gefangen und bildet eine Plasmaschicht. Von dieser Plasmaschicht aus können sich die Sonnenwindteilchen entlang des Erdmagnetfeldes der Erde und somit der Erdatmosphäre nähern. Dies geschieht allerdings nicht direkt. So bleiben die Sonnenwindteilchen in der Plasmaschicht innerhalb der Magnetosphäre gespeichert. Die Magnetosphäre besitzt auf der sonnenzugewandten Seite eine durchschnittliche Ausdehnung von 8 bis  $10 R_e$ . Dies ist etwas weniger als in Abbildung 6 berechnet, da hier von einem gleichmäßigen, also unverformten, Dipolfeld ausgegangen wird. Auf der sonnenabgewandten Seite kann der Schweif eine Ausdehnung von

mehreren  $100 R_e$  haben. Der an dieser Plasmaschicht vorbeiziehende Sonnenwind führt dann dazu, dass sich zusammen mit dem Erdmagnetfeld ein Dynamoeffekt einstellt, der die Teilchen aus der Plasmaschicht in Richtung Erde beschleunigt. Die Plasmateilchen, die sich entlang der Feldlinien des Erdmagnetfeldes bewegen, sind dabei, wie in der Skizze (Abb. 7) dargestellt, in einer magnetischen Flasche eingeschlossen und nähern sich entlang dieser der Erdatmosphäre. (Schlegel 2011, S. 159 f.)

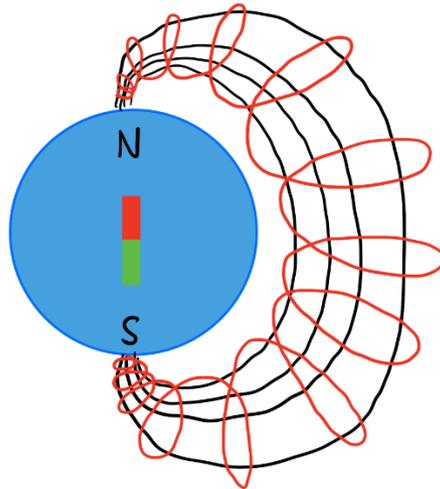


Abb. 7: Skizzenartige Darstellung der gekrümmten Flasche entlang des Erdmagnetfeldes.  
[Eigene Abbildung]

Diese gekrümmte magnetische Flasche wird auch als Van-Allen-Strahlungsgürtel bezeichnet. Sie spielt in der (bemannten) Raumfahrt eine große Rolle, da durch die Ansammlung an bewegten geladenen Teilchen die Strahlenbelastung für Menschen und Technik vergleichsweise hoch ist. (Johnston et al. 1975, S. 106 ff.)

Eine Ausnahme zu diesem Ablauf stellt das so genannte Protonenpolarlicht dar. Dabei können bei starken Sonneneruptionen direkt aus der Korona Protonen ausgeworfen werden, die auf Grund ihrer hohen Energie direkt vom Erdmagnetfeld in Richtung der Pole abgelenkt werden. Dort interagieren diese schon in deutlich größeren Höhen ( $> 1000$  km) mit dem dort vorkommenden Wasserstoff. Das führt unter anderem dazu, dass das Leuchten auf der Erdoberfläche nur sehr schwach oder gar nicht mit dem Auge zu sehen ist. Daher soll dies nur zur Vollständigkeit erwähnt sein. (Schlegel 2011, S. 161 f.)

Wie in Abbildung 7 zu erkennen, befinden sich die beiden Flaschenhälse der magnetischen Flasche an den beiden magnetischen Polen. Dort verhält sie sich wie ein magnetischer Spiegel

und reflektiert das einfallende Plasma wieder zurück. So wandert es beispielsweise vom magnetischen Nordpol zum Südpol und von dort wieder zurück. Diese Oszillation zwischen den Polen geschieht mit einer großen Geschwindigkeit, wobei für Elektronen eine Oszillationsperiode von  $\tau_{Osz,e^-} \approx 1$  s und für Protonen eine Oszillationsperiode im Bereich von  $\tau_{Osz,p^+} \approx$  einigen 10 s gemessen wird. (Raith und Bergmann 2001, S. 552)

### 2.3.5 Entstehung der Leuchterscheinung

Bei jeder Oszillation nähern sich die Protonen und Elektronen der Erdoberfläche und somit auch der Atmosphäre. Trifft eines dieser Teilchen auf seinem Weg in der Atmosphäre auf ein dortiges Gasteilchen, gibt es durch Stoßanregung (einen Teil) seine(r) Energie an dieses ab. Dieses Atom oder auch Molekül befindet sich daraufhin in einem energetisch höheren Zustand und gibt die aufgenommene Energie in Form von Photonen ab, während es auf den energetischen Grundzustand fällt. Diese abgegebenen Photonen sieht man dann als Leuchterscheinung am Himmel, die im Deutschen als Polarlicht bzw. wissenschaftlich als Aurora bezeichnet werden.

Die Farbe der Aurora hängt davon ab, welche Atome/ Moleküle angeregt werden. Einerseits beeinflusst die Energie der Teilchen, welche Zustände angeregt werden können, andererseits dringen höherenergetische Teilchen tiefer in die Erdatmosphäre ein und regen in tieferen Schichten der Atmosphäre Atome und Moleküle an. Die Zusammensetzung der Atmosphäre ändert sich im Höhenverlauf, weshalb sich durch die Eindringtiefe der Teilchen auch die Interaktionspartner ändern. So gibt die Farbe der Aurora einerseits Aufschluss darüber, welche Atome und Moleküle angeregt wurden, andererseits auch darüber, wie energiereich die einfallenden Teilchen waren. (Schlegel 2011, S. 138 ff.)

### 2.3.6 Grund der verschiedenen Farben von Polarlichtern

Wie oben genannt, variiert die Zusammensetzung der Atmosphäre je nach Höhe. Von der Erdoberfläche bis ca. 100 km Höhe besteht die Atmosphäre zu ca. 78 % aus  $N_2$  und 21 % aus  $O_2$ , also aus molekularem Stick-, bzw. Sauerstoff. Die restlichen ca. 1 % setzen sich aus weiteren Gasen (u.a. Ar,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ) zusammen. (Klose und Klose 2016, S. 17)

Diese Zusammensetzung ändert sich mit zunehmender Höhe insofern, dass in der Ionosphäre durch kurzwellige Sonnenstrahlung die Gasbestandteile ionisiert werden und sich teilweise

auch zu neuen Molekülen kombinieren. So befinden sich im unteren Teil der Ionosphäre ab ca. 100 km Höhe überwiegend die Ionen  $O_2^+$  und  $NO^+$ .

Ab ca. 300 km Höhe finden sich hauptsächlich atomaren Wasserstoff H bzw. in ionisierter Form  $H^+$  wieder. (Schlegel 2011, S. 117)

In größeren Höhen stellen ab ca. 500 km zunehmend Helium He und ab ca. 1000 km Wasserstoff H den größten Anteil. (Klose und Klose 2016, S. 19)

Werden Aufnahmen aus großer Höhe betrachtet, wie z. B. der ISS (Abb. 8), so ist ein vertikaler Verlauf der auftretenden Farben von rot über violett hinzu grün zu erkennen.



Abb. 8: Aufnahme eines Polarlichts aus der ISS. [entnommen von (NASA 2016)]

Wird dies mit den Spektrallinien der oben genannten Gase verglichen, so bestätigt sich der Zusammenhang zwischen Höhe der Lichterscheinung und der atmosphärischen Zusammensetzung.

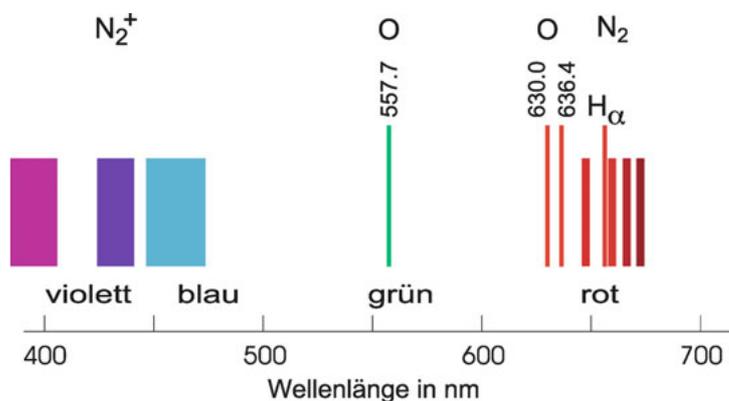


Abb. 9: Emissionsspektren von Sauerstoff und Stickstoff. [entnommen von (Schlegel 2011, S. 137)]

Betrachtet man die Emissionsspektren von Sauerstoff und Stickstoff (siehe Abb. 9), so lässt sich feststellen, dass in größeren Höhen Übergänge im rötlichen Bereich des elementaren Sauerstoffs überwiegen. In den mittleren überwiegt  $N_2^+$  in der Gaszusammensetzung, was sich durch das violett-bläuliche Licht zeigt. In der niedrigsten Höhe der Ionosphäre überwiegt zwar anteilmäßig  $N_2$  jedoch finden hier hauptsächlich Anregungen der Sauerstoffatome statt.

Dies hat gleich zwei Besonderheiten. Einerseits werden geringere Energien benötigt, um Sauerstoff O anzuregen (im Vergleich zu Stickstoff  $N_2$ ), da die vorkommenden Wellenlängen größer sind und somit eine geringere Energie besitzen. Deshalb sind die violetten Anteile nur bei stärkeren Sonnenstürmen zu sehen. Andererseits nimmt das menschliche Auge die Farbe Grün intensiver wahr als Rot, weshalb Polarlichter in dieser Höhe nur als grün wahrgenommen werden. (Demtröder 2017a, S. 333)

Weiter sei anzumerken, dass lange unbekannt war, dass Sauerstoff zum grünen Leuchten angeregt werden kann, da es sich unter Laborbedingungen bei Normaldruck um einen verbotenen Übergang handelt. Wird der Druck verringert und eine höhere Position in der Atmosphäre simuliert, so befinden sich die Sauerstoffatome im Mittel weiter voneinander entfernt und stoßen seltener zusammen. Dabei verschwindet dieser verbotene Übergang. Jener kommt dadurch zustande, dass angeregte Atome ihre Energie durch Stoßprozesse an andere Atome abgeben und nicht durch Emission eines Photons. Somit stoßen die Sauerstoffatome bei niedrigerem Druck seltener zusammen und geben ihre Anregungsenergie in Form eines Photons, hier bei 557,7 nm (grün), ab. (Schlegel 2011, S. 133 f.)

Wie sich anhand der Erklärungen dieses Kapitels erkennen lässt, spielen bei der Entstehung des Polarlichts physikalische Phänomene aus verschiedenen Fachbereichen zusammen: Mechanik in der Teilchenbewegung von der Sonne zur Erde, Elektrodynamik in der Wechselwirkung der Teilchen mit den Magnetfeldern der Sonne/ Erde und Atomphysik in der Leuchtanregung. Somit ist dies ein gutes Beispiel dafür, dass es lohnend ist, Verknüpfungen von verschiedenen Teilgebieten der Physik zu beleuchten.

### 3 Experimente zur Visualisierung von Polarlichtern

Schon seit dem 16. Jahrhundert versuchen Forschende magnetische, elektrostatische und elektromagnetische Phänomene zu rekonstruieren, indem sie so genannte Terrellas verwenden. Das Wort Terrella kommt aus dem Lateinischen und bedeutet „kleine Erde“. Bei den ersten Terrellas handelte es sich um Kugeln, die aus dem magnetischem Gestein Magnetit bestanden und die Erde als magnetische Kugel im Raum repräsentieren sollten. Über die Zeit wurde das Material dieser Terrellas immer wieder verändert, um so beispielsweise nicht nur magnetische, sondern auch elektrostatische Phänomene untersuchen zu können.

#### 3.1 Terrella-Experimente von Kristian Birkeland

Eine bekannte Version, an der sich das Experiment der zu Grunde liegenden Arbeit orientiert, stammt vom norwegischen Physiker Kristian Birkeland (1867 - 1917). Dieser befasste sich in den Jahren um die Jahrhundertwende intensiv mit der Erforschung der Polarlichter und versuchte mit Hilfe verschiedener Terrellas seine Beobachtungen im Labor zu reproduzieren. Dies hielt er ausführlich in dem zweibändigen Werk „The Norwegian aurora polaris Expedition 1902 – 1903“ fest, welches 1908 bzw. 1913 erschien.

Genauer gesagt handelt es sich bei den Experimenten von Birkeland um Terrellas, die er in einem nahezu evakuierten Gefäß platzierte. Die Terrellas sind dabei Kugeln aus Bronze oder Aluminium, in deren Inneren sich eine Spule befindet. Diese Spule dient dazu, in den Terrellas ein beliebiges und auch veränderbares Magnetfeld zu erzeugen. Während seinen Forschungen verwendete Birkeland Terrellas in verschiedenen Größen, wobei diese von einigen Zentimetern bis zu 36 cm im Durchmesser maßen.

Um mit diesem Aufbau (siehe Abb. 10) Aurora-Phänomene rekonstruieren zu können, ist es notwendig, so genannte Gasentladungen zu erzeugen. Dafür platzierte Birkeland in einer Ecke der nahezu evakuierten Kammer eine scheibenförmige Elektrode, die bei angelegter Spannung eine Potentialdifferenz und somit ein elektrisches Feld zur leitenden Oberfläche der Terrella erzeugt.

Birkelands Terrella-Experimente hatten hauptsächlich den Zweck, Aurora-Phänomene zu demonstrieren. Allerdings gelang es ihm, auch die Ringe des Saturn, Sonnenflecken und die Sonnenkorona zu simulieren. Es wird auch beschrieben, dass Birkeland selbst von den Visualisierungen sehr begeistert gewesen sein soll. Dies kann von Lehrkräften genutzt werden, um bei

Schülerinnen und Schülern durch das Demonstrieren des Phänomens eine Begeisterung für das Thema zu wecken.

Leider sind viele Aufzeichnungen von Birkeland verschwunden und es sind nur wenige Informationen darüber bekannt, wie die Experimente konkret realisiert wurden. So gab es Bestrebungen, sein Experiment nachzubauen, in dem man sich mit den erhaltenen Bauteilen beschäftigte. Dies gelang jedoch nicht vollumfänglich. (Brundtland 1998)

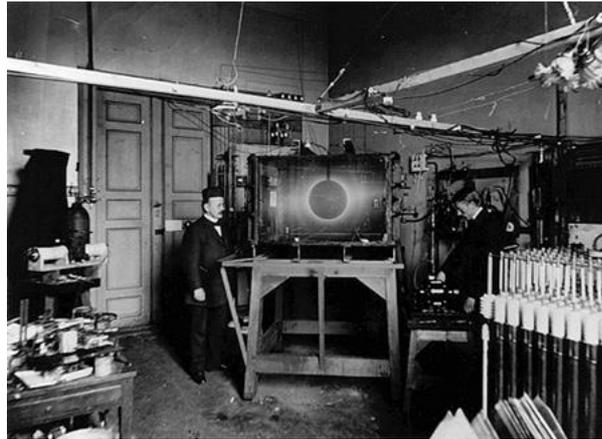


Abb. 10: Birkeland neben der von ihm gebauten Terrella in Betrieb.  
[entnommen von (Brundtland 1998)]

Ein funktionierender Nachbau von Birkelands Experiment befindet sich im Aurora Observatorium der Universität von Tromsø. Dieser Nachbau ist auch zeitweise im Technischen Museum in Oslo zu sehen. (Det Norske Videnskaps-Akademi 2019; Brundtland 2017)

### 3.2 Weiterentwicklung zur Planeterrella

Dem experimentellen Aufbau von Birkeland hat sich ein Team der Universität Grenoble um Jean Lilensten in den 2000er-Jahren angenommen und versucht, diesen zu erweitern, um noch mehr Variationen durchführen zu können. In Birkelands Original befindet sich eine fest installierte Kupfer-Kugel in einer Vakuumkammer. Weiter, wie auch schon oben beschrieben, befindet sich eine Elektrode in der Kammer, die den ausgehenden Sonnenwind simulieren soll. Diese starre Anordnung lässt keine großen Variationen zu, weshalb sich das Team aus Grenoble als Ziel gesetzt hat, diese einzelnen Bauteile beweglich zu machen.

Die erste Variation lässt die fest installierte Elektrode sich frei entlang an einer Schiene bewegen. Zudem ist die als Erde dienende Aluminiumkugel auf einem Stativ ebenfalls frei beweglich – sowohl in der Höhe als auch die Stativposition auf der Platte der Vakuumkammer. Anders als

bei Birkelands Aufbau wird hier kein Elektromagnet im Inneren der Aluminiumkugel verwendet, sondern ein Permanentmagnet. Dieser ist frei in der Kugel positionierbar, um so Planeten mit unterschiedlich ausgerichteten Magnetfeldern simulieren zu können.

Die zweite Variation ermöglicht, dass sich auch verschieden große Kugeln in der Vakuumkammer befinden können. Daran schließt sich direkt die letzte Variation an, bei der sich das Experiment nun stark von Birkelands Original unterscheidet. Durch die beiden Kugeln besteht die Möglichkeit, statt nur zwischen der stabförmigen Elektrode und einer der Kugeln ein elektrisches Feld aufzubauen, dies nun auch zwischen den beiden Kugeln zu realisieren. Daraus entsteht der Vorteil, dass das elektrische Feld eines Sternes hin zu einem Planeten genauer simuliert werden kann.

Da sich aus diesem neuen Aufbau, wie er schematisch in Abbildung 11 zu sehen ist, viele Realisierungsmöglichkeiten ergeben, hat man sich entschieden diesem Experiment, besser gesagt dieser Reihe an Experimenten, den Namen „Planeterrella“ zu geben. (Lilensten et al. 2009, S. 222 ff.)

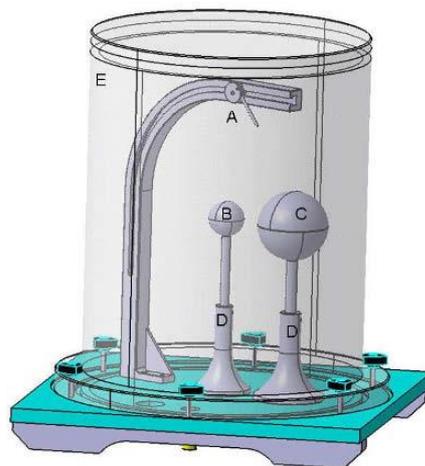


Abb. 11: Versuchsaufbau der Planeterrella. [entnommen von (Lilensten et al. 2009, S. 222)]

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, orientiert an den Arbeiten von Birkeland und Lilensten et. al., eine Version des (Plane-)Terrella mit einfachen Mitteln und möglichst geringem (Kosten-)Aufwand zu realisieren, damit dieses Experiment im Physikunterricht eingesetzt werden kann. Dabei werden einige Vereinfachungen getroffen, die dazu führen, dass dieses Experiment nicht so umfangreich, wie ein mögliches Planeterrella-Experiment ist. Jedoch sollen wichtige Phänomene trotzdem demonstriert werden können.

## 4 Aurora-Experiment

Zur Erzeugung und Visualisierung verschiedener Aurora-Phänomene wird im Folgenden ein Aufbau verwendet, der sich an den Arbeiten zu dem Planeterrella-Experiment orientiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die benötigten Komponenten, falls möglich, kostengünstig und einfach selbst zu erstellen sind.

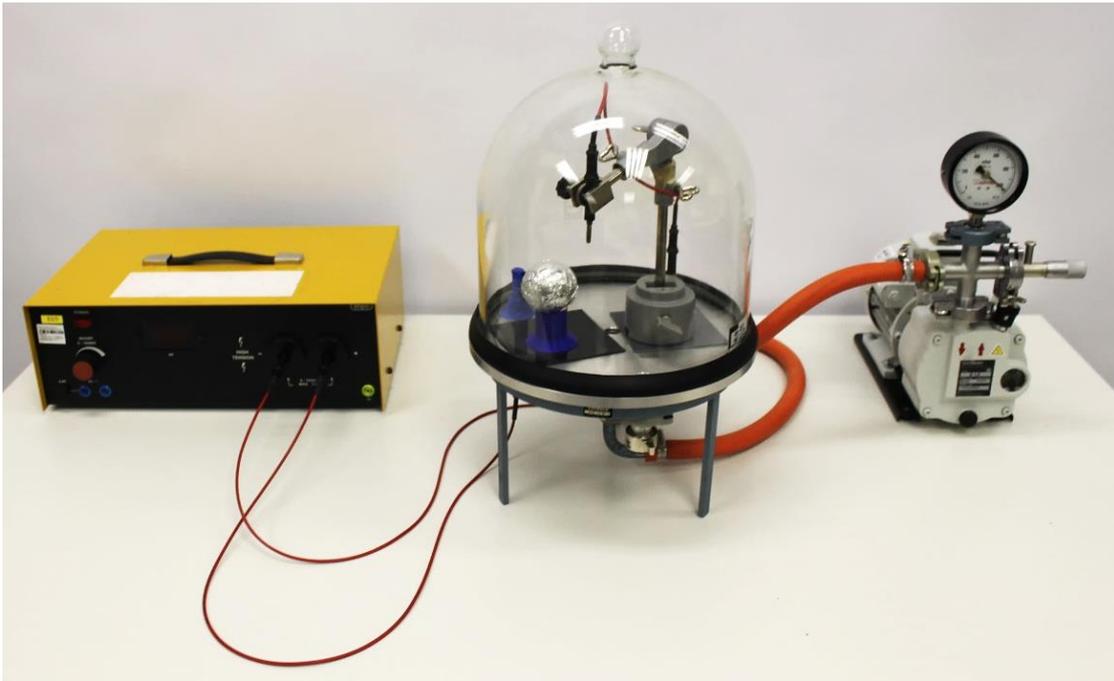


Abb. 12: Versuchsaufbau Aurora-Experiment. [Eigene Abbildung]

Hierfür werden benötigt:

- Hochspannungsnetzgerät (hier  $U_{max} = 10 \text{ kV}$  und  $I_{max} = 3 \text{ mA}$ )
- Vakuumglocke
- Vakuumpumpe (hier Leybold Kleine Kompakt Pumpe S 1,5)
- Hochspannungskabel
- Stative/Halterungen für Elektrode und Kugel(n)
- Isoliermaterial (hier Knete und Kunststoffplatten)
- Kugel(n) mit einer leitenden Oberfläche
- (starke) Magnete im Inneren der Kugeln (hier mit Feldstärken von ca. 150 mT, 250 mT und 750 mT)

## 4.1 Vorbereitungen

Die meisten oben genannten Bauteile sollten so oder vergleichbar in einer gut sortierten Physiksammlung zu finden sein. Allerdings kann die Leistungsfähigkeit der Pumpe ein Problem darstellen, da sichergestellt werden muss, dass in der Vakuumlöcke ein Druck von  $< 1$  mbar vorherrscht. Weiter werden für dieses Experiment eine oder mehrere Kugeln benötigt, in denen sich ein Magnet im Inneren befindet und die eine leitende Oberfläche besitzen.

Dies wird hier so realisiert, dass in Holzkugeln mit Durchmessern von 50 mm und 60 mm jeweils mittig ein Loch gebohrt wird, in welches (starke) Magnete eingesetzt werden (Abb. 13 a)). Dabei gilt zu beachten, dass die Magnete nicht über die Oberfläche der Holzkugel hinausragen dürfen. Anschließend werden die noch offenen Bereiche mit Knetmasse verschlossen, sodass sich eine möglichst homogene Kugeloberfläche ausbildet (Abb. 13 b)).

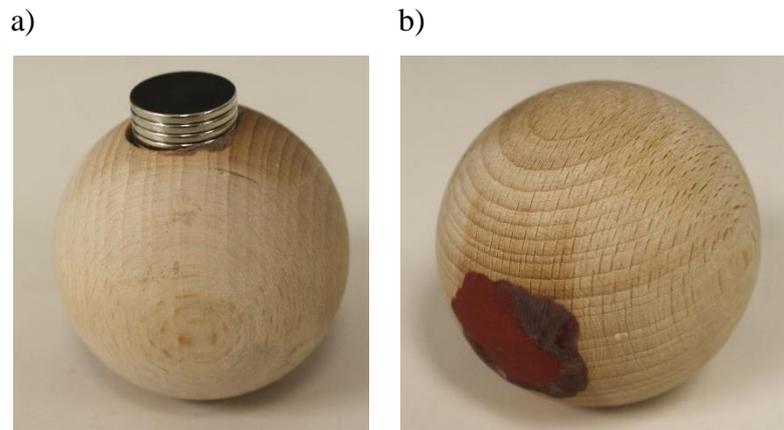


Abb. 13: Präparierte Holzkugel a) Magnete werden in die Öffnung der Kugel eingelassen.  
b) Die verbleibende Öffnung ist mit Knete verschlossen. [Eigene Abbildung]

Anschließend muss für die Kugel eine leitende Oberfläche geschaffen werden. Während der Umsetzung dieses Experiments hat sich Aluminiumfolie als einfache, günstige und effektive Möglichkeit erwiesen, dies zu erreichen. Es gilt, eine möglichst glatte Oberfläche zu erstellen, da es sonst zu einem Funkenüberschlag zwischen der Elektrode und der Kugel kommen kann. Dazu mehr im Kapitel über Hinweise zur Durchführung.

Damit sich zwischen der Kugeloberfläche und der Elektrode ein elektrisches Feld ausbilden kann, muss diese Kugel kontaktiert werden können. Dazu wurde für die Kugel eine Halterung entworfen, die es erlaubt, die Kugel mittels eines ‚Nests‘ aus Kupferdraht aufzunehmen und kontaktieren zu können. Dieses Nest besteht dabei aus einer Litze, die an einem Ende an einen Bananenstecker montiert und am anderen Ende großzügig abisoliert wird. Das Nest besteht somit aus dem abisolierten Teil der Litze, der kreisförmig gewickelt wurde.

In Abbildung 14 sind verschiedene Möglichkeiten dargestellt, wie dies praktisch umgesetzt werden kann. Die einfachste Möglichkeit bedient sich dabei nur eines Holzstücks, in das eine Vertiefung für das Nest gebohrt wird, in dessen Mitte sich ein Loch für den isolierten Teil der Litze befindet. Die beiden Möglichkeiten rechts davon sind mit einem 3D-Drucker gedruckte Stützen, die für diese Umsetzung eigens modelliert und angefertigt wurden. Auf der Website der Didaktik der Universität Würzburg werden diese 3D-Dateien zum Download angeboten. Die beiden Versionen der 3D-gedruckten Stützen unterscheiden sich nur darin, dass beim rechten die Standfläche größer ist und somit die Halterung unempfindlicher gegen versehentliche Stöße oder Erschütterungen des Experimentaufbaus ist, sodass die Kugel dort stabiler gestützt wird. Die Stützen sind so geformt, dass sie oben eine Aussparung für eine Kugel mit dem passenden Durchmesser (hier 50 mm und 60 mm) haben, in der sich mittig wiederum eine Aussparung für das Drahtnest befindet. Der isolierte Teil der Litze wird dann über eine Aussparung in der Mitte der Stütze und im Fuß dieser zum Bananenstecker geführt.

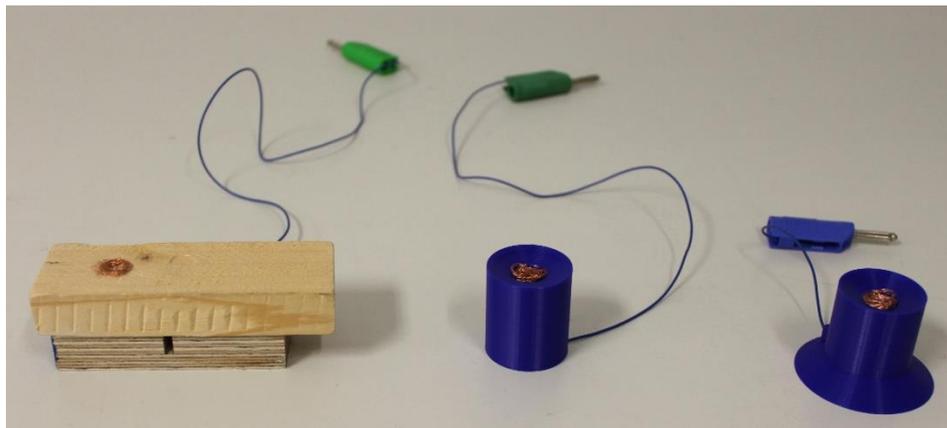


Abb. 14: Verschiedene Stützen zur Kontaktierung der Kugel. [Eigene Abbildung]

Diese Art der Halterung hat den Vorteil, dass die Kugel frei positionierbar ist und somit die Anordnung des Magnetfelds nicht fest vorgegeben ist. Über die Verbindungsstecker im Boden der Vakuumkammer wird die Kugel mit der Spannungsquelle verbunden.

Weiter gilt es, die Elektrode, die ein Ende eines Hochspannungskabels ist, in der Vakuumkammer mit Hilfe mehrerer Stativelemente, wie in Abbildung 15 gezeigt, zu platzieren. Es sollte darauf geachtet werden, dass dieses Kabel möglichst kurz ist, doch noch so lange, dass die Position der Elektrode frei in der Kammer wählbar ist. Es ist auch möglich das Hochspannungskabel mittels Klebestreifen an der Innenseite der Glasglocke zu befestigen. Dies hat sich als unpraktikabel erwiesen, da einerseits die Klebeverbindung nicht zuverlässig gehalten hat. An-

dererseits muss beim Öffnen der Vakuumkammer beachtet werden, dass das Hochspannungskabel aus dem Verbindungsstecker der Bodenplatte entfernt werden muss, um nicht die Klebeverbindung durch unabsichtliches Ziehen zu lösen. Das Entfernen hat den weiteren Nachteil, dass so Erschütterungen ausgelöst werden können. Diese führen beispielsweise dazu, dass eine sich auf einer Halterung befindende Kugel von ebensolcher fällt. Zusammenfassend wird aufgrund der genannten Nachteile im weiteren Verlauf nur die Halterung mittels Stativs verwendet.

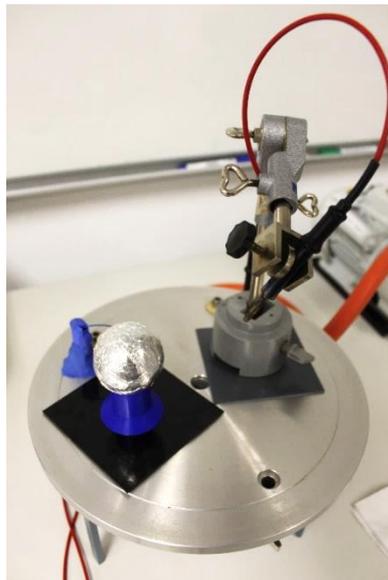


Abb. 15: Detailaufnahme des Aufbaus in der Vakuumkammer. [Eigene Abbildung]

Im letzten Schritt vor dem Starten des Experiments muss darauf geachtet werden, dass alle offenliegenden leitenden Stellen möglichst gut isoliert sind, damit im Folgenden die Elektronen möglichst nur zwischen der Kugeloberfläche und der Elektrode wandern und nicht über andere Wege abfließen. Da der Boden der Vakuumglocke hier aus Metall besteht, gilt es, diesen gegenüber allen Verbindungsstellen zu isolieren.

Zunächst wurde dazu der Bananenstecker bis auf die beabsichtigte Kontaktstelle komplett mit Knetmasse ausgekleidet. Weiter wurden die Verbindungsstellen zwischen den Buchsen der Bodenplatte und den gesteckten Kabeln so mit Knetmasse ummantelt, dass kein Metall der Verbindungsstelle mehr sichtbar war. Da das Stativ für die Elektrode ebenfalls aus Metall besteht, gilt es, einerseits darauf zu achten, dass die Elektrode einen genügend großen Abstand zum unisolierten Teil des Stativs besitzt und andererseits auch der Stativfuß gegenüber der Bodenplatte isoliert sein muss. Da sich gezeigt hat, dass sich bei hohen Spannungen teilweise kleine Ströme durch die Isolierung der Verbindungslitze hindurch zur Bodenplatte ausbilden, empfiehlt es sich auch die Litze gegenüber der Platte zusätzlich zu isolieren. Beides wird dadurch

erreicht, dass zwischen Bodenplatte und Stativ bzw. zwischen Bodenplatte und Standfuß/ Verbindungsleiste der Kugel, eine Kunststoffplatte gelegt wird. Hier gilt es zu beachten, dass diese Platten nicht die Ansaugöffnung der Vakuumpumpe bedecken.

Sind diese Vorbereitungen getroffen, kann mit der eigentlichen Durchführung des Experiments begonnen werden. Dabei lassen sich vor allem zwei bei der Entstehung des Polarlichts auftretende Phänomene beobachten: Die Ausbildung eines Aurora-Ovals und der Van-Allen-Gürtel der Erde. Zusätzlich lässt sich ein Ringstrom an Elektronen um die Sonne herum und ein Zurückfallen des Sonnenwinds mit Aurora um den Sonnenpol erzeugen.

## 4.2 Konstellation 1 – Aurora-Oval

Der Aufbau ist identisch zu Abbildung 12. Die Kugel ist dabei mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbunden und die Elektrode mit dem Minuspol.

Für diese Konstellation ist kein besonders starkes Magnetfeld der Kugel notwendig. Die hier verwendete Kugel hat einen Durchmesser von 50 mm und einen Stabmagneten im Inneren, welcher eine Magnetfeldstärke von  $B \approx 150 \text{ mT}$  an der Kugeloberfläche besitzt.

### 4.2.1 Durchführung

Die Vakuumkammer wird im Rahmen der Messgenauigkeit auf einen Druck von  $< 1 \text{ mbar}$  evakuiert und die Spannungsquelle auf die maximale Spannung eingestellt. Ist der Druck in der Vakuumkammer noch zu hoch, so stellt sich eine Spannung  $U > 1 \text{ kV}$  ein und es sind noch keine Leuchterscheinungen zu sehen. Je weiter die Kammer evakuiert wird, desto geringer wird die von der Spannungsquelle abgegebene Spannung, bis sich eine Spannung  $U \approx 0,6 \text{ kV} - 0,7 \text{ kV}$  einstellt.

Ist der Druck in der Kammer niedrig genug, so stellt sich in der Nähe des magnetischen Pols ein leuchtendes Oval ein.

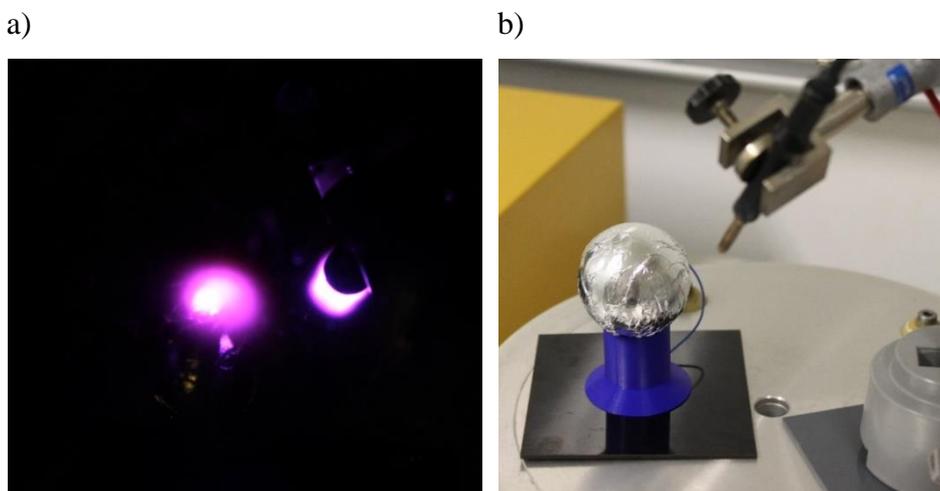


Abb. 16: a) Aurora-Oval bei evakuierter Kammer und verdunkeltem Raum.  
b) Aufbau bei erhelltem Raum. [Eigene Abbildung]

In Abbildung 16 a) ist in der rechten Bildhälfte das Leuchten der Elektrode und in der linken das Leuchten um den Nordpol der Kugel zu sehen. Zur Orientierung ist dieselbe Anordnung nochmals in Abbildung 16 b) bei beleuchtetem Raum fotografiert worden. Hierbei ist die Elektrode perspektivisch näher an der Kamera platziert. Der Abstand zwischen Elektrode und Kugel ist größer, als es das Bild vermuten lässt und beträgt ca. 10 cm.

Die Orientierung der Kugel spielt für die Leuchterscheinung nur untergeordnet eine Rolle. Es lässt sich beobachten, dass sich nur um einen der Pole das Leuchten ausbildet. Bei diesem handelt es sich nur um den Pol, der sich am nächsten zur Elektrode befindet. Zudem ist die leuchtende Fläche leicht in Richtung der Elektrode verschoben und daher nicht direkt zentral über dem Pol.

#### 4.2.2 Erklärung

Ähnlich zur auf der Erde bekannten Aurora-Erscheinung werden hier durch die anliegende Spannung zwischen Kugel und Elektrode Elektronen zur Kugel hin beschleunigt. Dort treffen diese auf das Magnetfeld der Kugel und werden von diesem zu einem der Pole entlang der Magnetfeldlinien gelenkt. Dort interagieren sie mit den noch vorhandenen Atomen der Luft und es kommt zu einem violetten Leuchten. (Jeanjacquot P. und Lilensten J. 2013, S. 34 f.)

Dieses violette Leuchten entspricht der experimentellen Erwartung, da der Hauptbestandteil der Luft auf Meereshöhe aus Stickstoff besteht, welcher bei Anregung violett leuchtet. Im Gegensatz dazu wird bei Polarlichtern, wie schon oben beschrieben, nicht nur Stickstoff angeregt, sondern auch Sauerstoff. Dieser ist hier, verglichen mit der Zusammensetzung der Atmosphäre in einigen 100 km Höhe, in einem geringeren Anteil vorhanden und trägt nicht sichtbar zu Leuchterscheinung bei.

Die hier verwendete Spannungsquelle gibt einen maximalen Strom von  $I_{max} = 3 \text{ mA}$  ab, was bedeutet, dass dies der begrenzende Parameter ist und die Spannung dementsprechend angepasst wird, damit die maximale abgegebene Leistung nicht überschritten wird. Verringert sich der Druck in der Kammer, so sinkt die anliegende Spannung, da eine zunehmende Gasentladung stattfindet. Die Elektronen können also über die noch vorhandene Luft geleitet werden, weshalb der maximale Strom der Spannungsquelle erreicht wird und sich eine Spannung  $U \approx 0,6 \text{ kV} - 0,7 \text{ kV}$  einstellt.

### 4.3 Konstellation 2 – Ringstrom

Der Aufbau ist identisch zu Konstellation 1 bzw. Abbildung 12. Im Unterschied zu Konstellation 1 wird die Polung hier umgekehrt. Die Kugel ist dabei mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden und die Elektrode mit dem Pluspol.

#### 4.3.1 Durchführung

Das Vorgehen zur Evakuierung und zum Anlegen der Spannung ist ebenfalls identisch zur vorherigen Konstellation. Die hier verwendete Kugel besitzt ebenfalls einen Durchmesser von 50 mm, jedoch einen leicht stärkeren Magneten mit einer Feldstärke von  $B \approx 250$  mT. Da die Polung umgekehrt ist, stellt sich hier eine andere Leuchterscheinung ein, bei der sich um den magnetischen Äquator der Kugel herum ein leuchtender Ring ausbildet, wie in Abbildung 17 erkennbar ist.

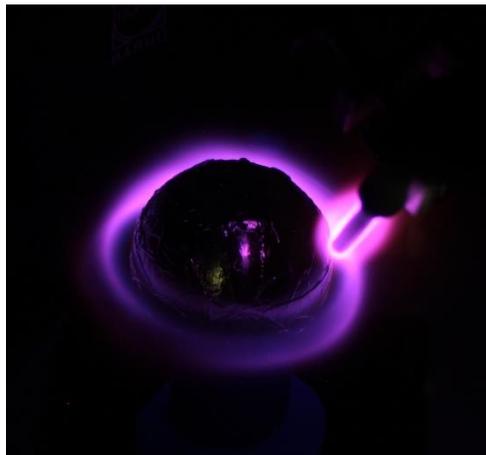


Abb. 17: Ringstrom um Kugel. [Eigene Abbildung]

#### 4.3.2 Erklärung

Durch die Polung entsteht von der Kugeloberfläche in Richtung der Elektrode ein elektrisches Feld, in welchem die von der Kugel emittierten Elektronen weg beschleunigt werden. Diese bewegen sich unter dem Einfluss des Magnetfeldes der Kugel, sodass die Elektronen durch die Lorentzkraft auf eine Kreisbahn um den magnetischen Äquator der Kugel herum gezwungen werden. Auf dieser Kreisbahn kollidieren die Elektronen mit der noch vorhandenen Luft und bringen diese zum Leuchten. (Jeanjacquot P. und Lilensten J. 2013, S. 35)

## 4.4 Konstellation 3 – Aurora auf der Sonne

Der Aufbau und die Polung sind identisch zu Konstellation 2, mit dem Unterschied, dass die Kugel mit dem schwächeren Magnetfeld aus Konstellation 1 verwendet wird.

### 4.4.1 Durchführung

Die Durchführung erfolgt ebenfalls analog zu Konstellation 2.

Diesmal stellt sich ein Band auf der oberen Halbkugel um den magnetischen Pol ein (Abb. 18).

Diese Erscheinung ist verglichen mit den anderen Konstellationen recht lichtschwach und kann nur bei absoluter Dunkelheit gut beobachtet werden.

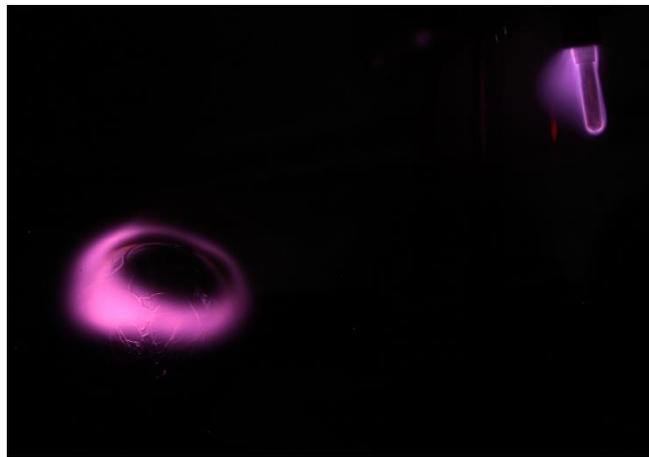


Abb. 18: Lichtband um den Nordpol der Kugel mit schwachem Magnetfeld. [Eigene Abbildung]

### 4.4.2 Erklärung

Ein Teil der Elektronen, die von der Kugeloberfläche emittiert werden, bewegen sich entlang der Magnetfeldlinien zurück zur Kugel und bilden einen leuchtenden Ring um den magnetischen Pol der Kugel. (Jeanjacquot P. und Liliensten J. 2013, S. 35)

Da es sich dabei nur um einen Teil der emittierten Elektronen handelt, ist die Intensität der Leuchterscheinung geringer als bei den vorherigen Telexperimenten.

### 4.4.3 Anmerkung

Im Unterschied zur herangezogenen Quelle (Jeanjacquot P. und Liliensten J. 2013) hat sich bei einem stärkeren Magnetfeld ( $B \approx 750$  mT), wie in Abbildung 19 erkennbar, auch ein Band ausgebildet, welches zwar nicht der in Konstellation 2 erzeugte Ringstrom ist, sich jedoch nur

leicht oberhalb des Äquators befindet. Dies lässt sich nur bei genauerem Hinsehen unterscheiden und wird deshalb hier nur zur Vollständigkeit angeführt.

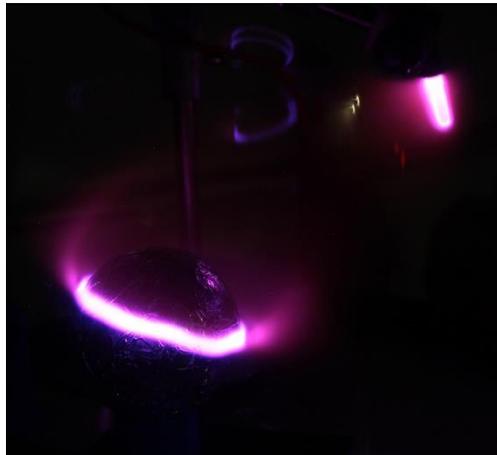


Abb. 19: Lichtband um den Nordpol der Kugel mit starkem Magnetfeld. [Eigene Abbildung]

## 4.5 Konstellation 4 – zwei Kugeln, Erde – Sonne

Für die letzte Konstellation wird die Elektrode durch eine Kugel mit Magnet im Inneren getauscht und wie in Abbildung 20 gezeigt aufgebaut. Hier wurde eine Kugel mit 60 mm Durchmesser und einer Magnetfeldstärke  $B \approx 750$  mT verwendet, die die Sonne repräsentieren soll und mit dem Minuspol verbunden wurde. Daneben wurde eine Kugel mit 50 mm Durchmesser und einer Magnetfeldstärke von  $B \approx 250$  mT verwendet, die die Erde verkörpert und mit dem Pluspol verbunden ist. Die beiden Kugeln stehen in einem Abstand von 15 cm (Mittelpunktsabstand) zueinander.

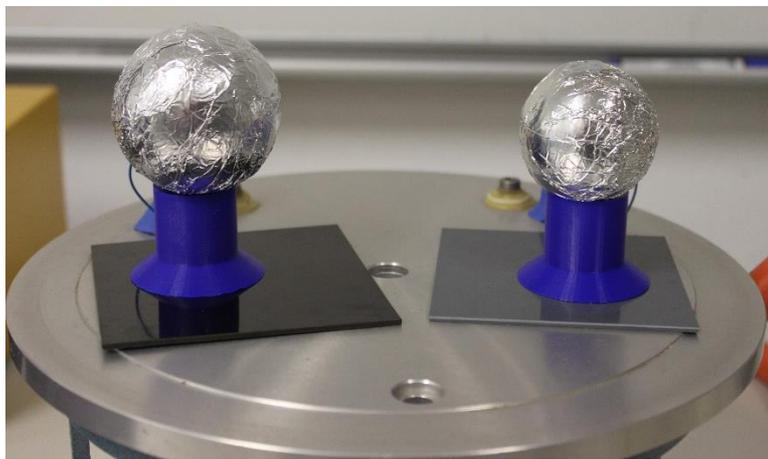


Abb. 20: Aufbau von zwei Kugeln im Abstand 15 cm. [Eigene Abbildung]

### 4.5.1 Durchführung

Analog zu den vorherigen Konstellationen wird die Vakuumkammer evakuiert und eine Spannung zwischen den beiden Kugeln angelegt. Auch hier stellt sich eine Spannung  $U \approx 0,7$  kV ein.

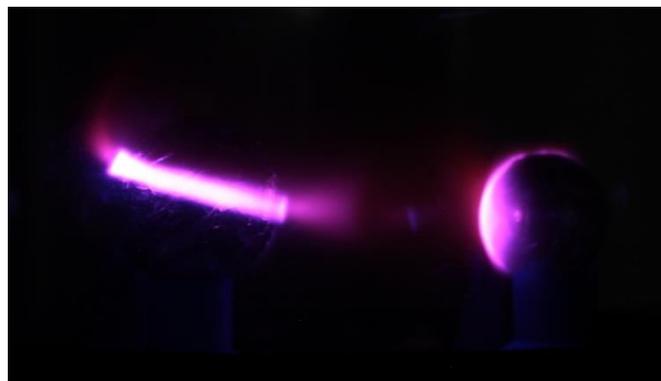


Abb. 21: Leuchten der Konstellation 4 Sonne-Erde. [Eigene Abbildung]

Analog zur Durchführung der Konstellation 3 bildet sich bei der großen Kugel ein Ring leicht oberhalb des Äquators aus (siehe Abb. 21). Bei der kleinen Kugel hingegen bildet sich vor allem an der zur großen Kugel zugewandten Seite eine leuchtende Kugelschicht aus. Um die magnetischen Pole entstehen nicht-leuchtende Zonen, die Kugelkappen ähneln.

Die besten Ergebnisse lassen sich hierbei erzielen, wenn die beiden Magnetfelder der Kugeln antiparallel ausgerichtet sind.

#### **4.5.2 Erklärung**

Diese leuchtende Kugelschicht beschreibt den Van-Allen-Gürtel, also eine Zone, in der die Elektronen im Bauch der magnetischen Flasche des Magnetfelds der kleinen Kugel gefangen sind. In diesem Bereich interagieren die Elektronen mit dem vorhandenen Gas und bringen dieses zum Leuchten. (Jeanjacquot P. und Lilensten J. 2013, S. 36)

## 4.6 Allgemeine Hinweise zur Durchführung

Die Vakuumpumpe kann ein niedrigeres Vakuum erzeugen, als hier für die Durchführung notwendig ist. Daher empfiehlt es sich die Pumpe zwar dauerhaft arbeiten zu lassen, doch sobald die Leuchterscheinungen schwächer werden oder sich verändern, wieder etwas Luft in die Kammer zu lassen, damit der Druck leicht steigt. Zudem ist es hilfreich die Spannungsquelle zu regeln, sodass der fließende Strom reduziert wird. Diese beiden Stellschrauben helfen sehr, um die gewünschten Effekte eintreten zu lassen oder besser sichtbar zu machen.

Eine große Rolle spielt auch die Gleichmäßigkeit der Kugeloberfläche. Sind die Falten, die die Aluminiumfolie beim Bespannen der Kugel wirft zu groß, können sich durch die hohen elektrischen Feldstärken lokal sehr unterschiedliche elektrische Felder bilden, die dann beispielsweise zu einem Funkenüberschlag zwischen Kugel und Elektrode führen.

Auch gilt es zu beachten, dass der hier auftretende Strom nicht zu groß ist. Wird eine Spannungsquelle mit einem höheren Maximalstrom, z. B.  $I_{max} = 50$  mA verwendet, treten häufig Überschläge auf, welche sowohl die Kugeloberfläche, die Elektrode oder auch andere verwendete Bauteile beschädigen können.

Der Abstand zwischen Elektrode und Kugel spielt eine weniger wichtige Rolle, da der Platz innerhalb der Vakuumglocke begrenzt ist. Es sollte darauf geachtet werden, dass diese nicht zu nah aneinander platziert sind, da so die Gefahr von Überschlägen größer wird. Bei einer zu weit entfernten Platzierung kann es passieren, dass es trotz Isolationsmaßnahmen zu Überschlägen zwischen der Elektrode und den sonstigen Bauteilen kommen kann. Ein Abstand von ca. 10 cm hat sich im Versuchsaufbau als ideal herausgestellt.

Es sollte beachtet werden, dass es sich bei den verwendeten Magneten um teilweise sehr starke Magnete handelt. Es kann also leicht passieren, dass die Kugeln trotz der Stützen auf die Metallplatte der Vakuumkammer fallen und an dieser magnetisch haften. Dies kann auch bei sonstigen ferromagnetischen Gegenständen oder anderen vorbereiteten Kugeln zur Gefahr werden. So wird die empfindliche Aluminiumfolie leicht durch solche Unachtsamkeiten beschädigt.

## 4.7 Vergleich mit Realbedingungen

Diese hier beschriebenen Experimente stellen vereinfacht jeweils einen Teil der Realität bzw. einen dort vorkommenden Effekt dar. Doch ein Vergleich der hier auftretenden Bedingungen mit denen in der Realität ist unabdingbar. Zunächst soll ein Vergleich der Druckverhältnisse erfolgen.

Da das hier verwendete Druckmessgerät für diese Verhältnisse nicht genau genug ist (Genauigkeit auf einige mbar geschätzt), wird das Datenblatt der verwendeten Vakuumpumpe hinzugezogen. Dadurch handelt es sich um eine Abschätzung, die das Experiment auf Plausibilität prüfen soll. Laut Datenblatt erreicht die Pumpe einen Endpartialdruck von  $p_{end} = 3,0 \cdot 10^{-2}$  mbar. (Leybold GmbH 2023)

Dies entspricht in etwa dem Luftdruck in einer Höhe von 75 km, welcher schon recht nahe an die 100 km Höhe herankommt, ab welcher Auroras in der Realität auftreten. (Klose und Klose 2016, S. 109)

Die Zusammensetzung der Luft unterscheidet sich, da im Experiment die Luftzusammensetzung der Erdoberfläche vorherrscht, welche in der Vakuumglocke zwar deutlich dünner, allerdings in der gleichen Komposition vorkommt. Wie oben schon erwähnt, erklärt dies das violette Leuchten im Experiment, während die häufigste Farbe von auftretenden Polarlichtern grün ist. In den Experimenten werden ausschließlich Elektronen beschleunigt, wohingegen im Sonnenwind überwiegend Protonen vorkommen. Da für die Stoßanregung die Art der Teilchen weniger wichtig ist als die vorliegenden Energien, lohnt es diese zu vergleichen.

Die elektrische potentielle Energie, die die Elektronen durch eine Potentialdifferenz von hier  $U_B = 700$  V erhalten, beträgt:

$$|E_{pot,el}| = |q \cdot U_B| = e \cdot 700 \text{ V} \approx 1,12 \cdot 10^{-16} \text{ J} \quad (11)$$

Wird diese Energie mit der kinetischen Energie von Protonen verglichen, die auf die Erde mit dem Sonnenwind treffen, so ergibt sich für die Protonen eine Geschwindigkeit von:

$$|v| = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{pot,el}}{m_p}} \approx 366 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

In der Literatur wird für die Protonen aus dem Sonnenwind eine Strömungsgeschwindigkeit von  $300 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  bis  $800 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  angegeben. (Schlegel 2011, S. 154)

Die im Experiment erzeugten Elektronen haben also Bewegungsenergien in der gleichen Größenordnung wie die Protonen des Sonnenwinds.

In Konstellation 2 ist experimentell ein Ringstrom um die Kugel mit dem größeren Magnetfeld, welche auf die Realität übertragen der Sonne entspricht, zu beobachten. Dies trifft in unserem Sonnensystem auf die Sonne nicht zu, da deren Magnetfeld hierfür zu schwach ist. Es wird vermutet, dass sich dieses Phänomen bei Sternen mit stärkeren Magnetfeldern einstellen könnte. Allerdings gestaltet sich die Beobachtung dessen schwierig, da das Leuchten des Ringstroms deutlich schwächer als der Stern selbst sein wird.

Dasselbe gilt für Konstellation 3, bei der ein Teil der ausgesendeten Elektronen zur Kugel zurückfällt. Auch dieses Leuchten ist theoretisch möglich, wird jedoch in der Realität schwer festzustellen sein, da die Helligkeit der Sonne bzw. des Sterns selbst um ein Vielfaches höher ist. (Jeanjacquot P. und Lilensten J. 2013, S. 35)

Konstellation 4 zeigt hingegen durch das Leuchten der Kugelschicht ein Phänomen, von dem durch Messungen bekannt ist, dass dieses um die Erde existiert, hingegen optisch nicht zu sehen ist, da sich im Van-Allen-Gürtel keine bzw. zu wenige anzuregende Atome und Moleküle befinden. (Johnston et al. 1975, S. 106 ff.)

Auf die Realsituation übertragen repräsentiert die große Kugel die Sonne und die kleinere die Erde. Anzumerken gilt, dass das Größenverhältnis der verwendeten Kugeln zwar stark von dem zwischen Sonne und Erde abweicht, dennoch den realen Verlauf des Sonnenwindes im Rahmen des Experiments gut nachbildet.

## **4.8 Ausblick und Optimierung**

Dieses hier beschriebene Experiment kann noch variiert und erweitert werden. So ließe sich wie in Birkelands Originalversuch der Permanentmagnet im Inneren der Kugeln durch einen Elektromagneten ersetzen, der so eine Veränderung der Magnetfeldstärke zulässt, ohne dass das Vakuum gebrochen werden muss.

Weiter wäre auch eine Materialveränderung der Kugel denkbar. Statt einer mit Aluminiumfolie umwickelten Holzkugel bietet sich auch eine massive Aluminiumkugel mit Bohrung für einen Magneten an. Diese hätte den Vorteil, dass die Oberfläche der Kugel deutlich gleichmäßiger ist als es von Hand mit Folie möglich ist. Darüber hinaus eignen sich auch Christbaumkugeln, die mit einer leitenden Schicht versehen sind. Diese haben den Vorteil, dass sie wesentlich günstiger als eine Aluminiumvollkugel und auch einfacher zu erwerben sind. Nachteilig ist anzumerken, dass diese deutlich fragiler und somit umständlicher in der Handhabung sind.

Auch ist es denkbar die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Orientierungen der Magnetfelder zu ändern. Dies ist durch die hier gewählte Art der Halterung und Kontaktierung problemlos möglich, da die Kugeln beliebig positionierbar sind. So ließen sich auch die Magnetfelder von anderen Planeten des Sonnensystems simulieren.

Zuletzt kann auch die Zusammensetzung der in der Vakuumkammer vorkommenden Gase verändert werden. Dazu lässt sich die zuvor evakuierte Kammer mit einem anderen Gas befüllen und anschließend vakuumieren. Dadurch ist nicht Stickstoff der Hauptbestandteil, sondern das verwendete Gas, was zu andersfarbigen Leuchterscheinungen führt.

#### **4.9 Gefährdungsbeurteilung**

Auf Grund des hier verwendeten Netzteils und den auftretenden Spannungen handelt es sich um ein Experiment mit berührungsgefährlicher Spannung. Nach I – 11.1 und I – 11.5 der Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht ist dieses Experiment somit nicht von Schülerinnen und Schülern selbst durchzuführen, da es nicht zwingend von Nöten ist, dass diese das Experiment selbst durchführen, um das Lernziel zu erreichen. Daher empfiehlt es sich, dass die Lehrkraft dieses vorführt. (Bezler 2019, S. 69 f.)

Zwar ist die maximale Stromstärke in diesem Fall vom Netzteil entsprechend begrenzt und bietet einen Schutz bei versehentlicher Berührung, jedoch sollte darauf geachtet werden, dass keine freien Kontaktstellen, über die evtl. ein Strom fließen könnte, zugänglich sind. Letzteres ist auch durch die Bauart der Bodenplatte der Vakuumglocke mit entsprechenden Anschlüssen vorgegeben. Alle frei erreichbaren Anschlusspunkte (Nest für Kugel und Elektrode) befinden sich innerhalb der Vakuumkammer und sind bei Betrieb somit nicht von außen zu erreichen.

Vor der Durchführung des Experiments gilt es auch den Zustand der Vakuumkammer bzw. -glocke zu überprüfen. Da in der Kammer während der Durchführung ein Druck  $< 1$  mbar vorherrscht, ist die Gefahr einer Implosion bei einem Defekt der Kammer gegeben.

Die verwendeten Magnete besitzen eine Feldstärke von bis zu  $B \approx 750$  mT und können daher bei unsachgemäßer Handhabung, zum Beispiel bei einer Näherung an einen ferromagnetischen Gegenstand, zu Verletzungen führen.

## 5 Simulation des Magnetfelds einer Kugel in Newton II

Das (Plane-)Terrella-Experiment lässt sich auch in einem Computerprogramm zur schrittweisen Berechnung von mechanischen Bewegungen simulieren. Hierzu wird im Folgenden das Programm „Newton II“ von Dr. Stephan Lück (Universität Würzburg) verwendet.

### 5.1 Kurzeinführung Newton II

Die genaue Nutzung dieses Programms wurde bereits in anderen Zulassungsarbeiten ausführlich beleuchtet, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird. Exemplarisch sei hier die Arbeit von Simon Weigel „Einsatz mathematischer Modellbildungssoftware im Physikunterricht am Beispiel von Newton-II“ erwähnt. Diese enthält eine Einführung und bespricht diverse Einsatzmöglichkeiten. (Weigel 2019)

Allgemein lässt sich sagen, dass hier mit dem zweiten Newtonschen Axiom

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{v}' = m \cdot \vec{r}'' \quad (12)$$

gearbeitet wird, wobei  $\vec{F}$  die wirkende Kraft,  $m$  die Masse des (Probe-)Körpers und  $\vec{a}$  die Beschleunigung dessen bezeichnet.

Da die Beschleunigung die zeitliche Ableitung der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  an einem Ort und die Geschwindigkeit wiederum die zeitliche Ableitung des Ortes  $\vec{r}$  ist, werden vom Programm für jeden Zeitschritt alle Parameter (Position und die daraus resultierenden Ableitungen) berechnet und diese dienen als Startwert für die Berechnung für den nächsten Zeitschritt.

### 5.2 Simulation in Newton II

Werden Elektronen betrachtet, wie sie im (Plane-)Terrella-Experiment verwendet werden, so lautet die komponentenweise Darstellung der Beschleunigung durch Umstellen des zweiten Newtonschen Axioms (12):

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} F_x/m_e \\ F_y/m_e \\ F_z/m_e \end{pmatrix} \quad (13)$$

mit Elektronenmasse  $m_e$ .

Hier und im Folgenden bezeichnet ein tiefgestelltes  $x$ ,  $y$  oder  $z$  die entsprechende Komponente des Vektors in der jeweiligen Raumrichtung.

Als nächstes muss die wirkende Kraft  $\vec{F}$  definiert werden. Da es sich hier um Elektronen handelt, die sich in einem Magnetfeld befinden, wirkt auf diese die Lorentzkraft (3) in vektorieller Form:

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

mit der Elektronenladung  $e$ .

Diese gilt es komponentenweise darzustellen

$$\vec{F} = e \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = e \cdot \begin{pmatrix} v_y \cdot B_z - v_z \cdot B_y \\ v_z \cdot B_x - v_x \cdot B_z \\ v_x \cdot B_y - v_y \cdot B_x \end{pmatrix} \quad (14)$$

und so in Newton II einzutragen:

$$F_x = e \cdot (v_y \cdot B_z - v_z \cdot B_y)$$

$$F_y = e \cdot (v_z \cdot B_x - v_x \cdot B_z)$$

$$F_z = e \cdot (v_x \cdot B_y - v_y \cdot B_x)$$

Anschließend wird das vorherrschende Magnetfeld  $\vec{B}$  definiert. In der Kugel befindet sich ein Stabmagnet, dessen Feld vereinfacht als ein magnetisches Dipolfeld angenommen werden kann. Dieses Feld wird durch

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left( \frac{3(\vec{r} \circ \vec{m})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right) \quad (15)$$

beschrieben, wobei  $\vec{r}$  der Ortsvektor zum Mittelpunkt des Magneten ist,  $\vec{m}$  das magnetische Moment des Magneten und  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante. (Nolting 2007, S. 183)

Zur Vereinfachung wird der Mittelpunkt des Magneten im Ursprung angenommen, weshalb sich der Vektor  $\vec{r}$  zum normalen Ortsvektor im Koordinatensystem vereinfacht. Weiter verläuft das magnetische Moment nur entlang der Längsachse des Magneten, die hier in z-Richtung festgelegt wurde.

Mit

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ und } \vec{m} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ m \end{pmatrix}$$

vereinfacht sich (15) zu

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left( \frac{3(z \cdot m)}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^5} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \frac{1}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^3} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ m \end{pmatrix} \right) \quad (16)$$

In Komponentenschreibweise wie folgt:

$$\begin{aligned}
 B_x &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3(z \cdot m) \cdot x}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^5} \\
 B_y &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{3(z \cdot m) \cdot y}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^5} \\
 B_z &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left( \frac{3(z \cdot m) \cdot z}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^5} - \frac{m}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^3} \right) \quad (17)
 \end{aligned}$$

Danach müssen die Startbedingungen (Ort und Geschwindigkeit) festgelegt werden. Dabei hilft der Blick zurück auf das Experiment. Die Elektronen werden mit Hilfe einer Beschleunigungsspannung von  $U_B \approx 700 \text{ V}$  hin zur Kugel beschleunigt. Nahe an der Kugeloberfläche haben diese also ihre Endgeschwindigkeit fast erreicht. Deshalb wird als Startpunkt ein Ort wenige Zentimeter über der Kugeloberfläche gewählt. Zur Vereinfachung startet das zu untersuchende Elektron in der x-z-Ebene, besitzt daher keinen y-Anteil im Ort, und startet mit dieser Geschwindigkeit in Richtung Koordinatenursprung. Als Startpunkt wird:

$$x = z = 0,07; y = 0$$

gewählt.

Mit der Formel der kinetischen Energie und der elektrischen Energie wird die Geschwindigkeit der Elektronen nach der Beschleunigung:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} m_e |v|^2 &= e \cdot U_B \\
 |v| &= \sqrt{\frac{2eU_B}{m_e}} \approx 15,7 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

berechnet.

Dies entspricht ca. 5 % der Lichtgeschwindigkeit, weshalb der klassische Ansatz hier noch gerechtfertigt ist.

Da es sich oben um den Betrag der Geschwindigkeit handelt, muss diese komponentenweise festgelegt werden. Aus den Annahmen ergibt sich, dass die Geschwindigkeit gleichmäßig in die x- und z- Richtung aufgeteilt wird. Das führt zu:

$$v_x = v_z = -11,1 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} ; v_y = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Das negative Vorzeichen resultiert daraus, dass sich das Elektron zum Ursprung hinbewegt. Zuletzt muss ein Wert für das magnetische Moment gewählt werden. Da das Datenblatt des

Magneten diese Information nicht bereithält, wird diese grob durch eine Messung der magnetischen Flussdichte in kurzem Abstand abgeschätzt. Bewegt man sich nur entlang der z-Achse des Magneten (x- und y-Komponenten sind 0), so vereinfacht sich (17) zu

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot m}{2\pi \cdot z^3} \quad (18)$$

und nach  $m$  umgestellt zu

$$m(z) = \frac{B_z \cdot 2\pi \cdot z^3}{\mu_0} \quad (19)$$

Die Messung der magnetischen Flussdichte ergibt einen Messwert von ca.  $B \approx 0,7$  T in einem Abstand von wenigen Zentimetern. Da sowohl die Bauart des Messgerätes als auch die Platzierung der Magnete in der Kugel keine genaue Messung des Abstandes zwischen Magnetende und Messgerät zulassen, wird diese auf ca. 3 cm – 4 cm geschätzt. Dies wiederum führt zu einer Abschätzung von  $m(3 \text{ cm}) \approx 95 \text{ Am}^2$  bzw.  $m(4 \text{ cm}) \approx 224 \text{ Am}^2$ . Dies soll dazu dienen, eine Größenordnung anzugeben und erhebt keinen Anspruch auf Genauigkeit. Für die Simulation wird mit dem Wert  $m = 200 \text{ Am}^2$  gearbeitet.

Wird die Simulation mit den oben festgelegten Werten und einer Anpassung der Gesamtzeit und den Zeitabständen zwischen den Berechnungspunkten gestartet, so ergibt sich für eine Gesamtzeit  $\Delta t = 4 \mu\text{s}$  und Zeitabstand  $dt = 0,4 \text{ ns}$  folgende Abbildung.

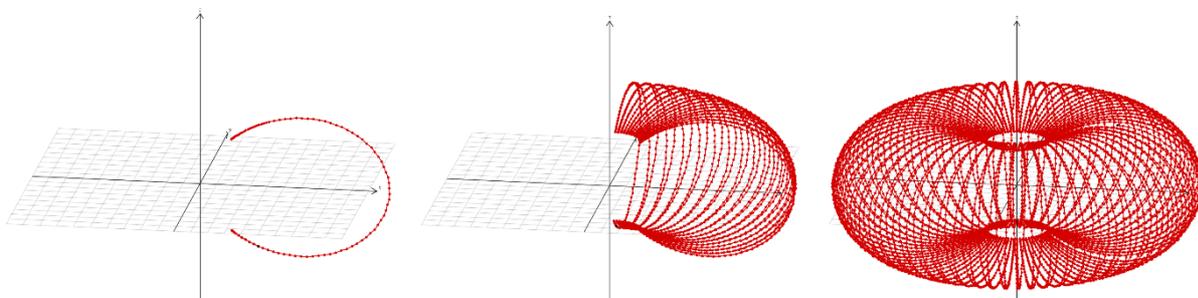


Abb. 22: Zeitlicher Verlauf einer Probeladung im Magnetfeld der Kugel. [Eigene Abbildung]

In Abbildung 22 ist von links nach rechts ein zeitlicher Verlauf zu sehen, wobei gilt  $t_{links} < t_{mitte} < t_{rechts}$ .

Schnell lassen sich einige grundlegende Eigenschaften der Bewegung der Elektronen ablesen. Das Elektron beschreibt eine Bewegung entlang der Magnetfeldlinien des Stabmagneten und wird dabei, wie in einer magnetischen Flasche, in der Nähe der Pole, reflektiert und bewegt sich in Richtung des anderen Pols. Gleichzeitig findet eine Rotation dieser Schleifenbahn um die Achse des Magneten bzw. um die Achse des magnetischen Moments statt. Das untersuchte

Elektron ist also im Magnetfeld des Stabmagneten gefangen und führt bei einer längeren Simulation diese Bewegung (Nord-Südpol-Schleifenbahn und Rotation um die Magnetachse) weiter fort.

Als Nächstes empfiehlt es sich, eine dieser Schleifenbahnen detaillierter zu betrachten. Hierzu wird die Gesamtzeit  $\Delta t = 40 \text{ ns}$  und der Zeitabstand  $dt = 10 \text{ ps}$  gewählt.

In der 3D-Ansicht des Programmes (Abb. 23) ist bei der genaueren zeitlichen Auflösung zu erkennen, dass das Elektron, während es sich auf dieser Schleifenbahn bewegt, zusätzlich eine spiralförmige Bewegung um die Magnetfeldlinien herum beschreibt. Der Durchmesser der Spiralen wird einerseits zu den Polen hin kleiner, da hier das Magnetfeld stärker wird, andererseits sind die Spiralen an den Polen nicht so lang gestreckt wie in der Nähe des „Äquators“. Letzteres kommt daher, dass die Geschwindigkeit entlang der Magnetfeldlinien abnimmt und diese schlussendlich ihre Richtung ändert.

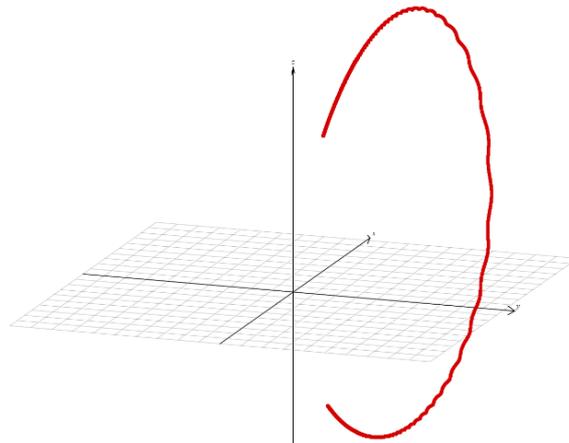


Abb. 23: Genauere zeitliche Auflösung einer Schleifenbahn. [Eigene Abbildung]

Zum besseren Verständnis des Verlaufs des Magnetfeldes empfiehlt es sich, (16) als Vektorplot mittels eines Programmes, wie z. B. Mathematica, anzeigen zu lassen.

Dabei ist in Abbildung 24 die Quelle des Magnetfeldes ebenfalls im Ursprung gewählt, wobei dessen Orientierung identisch zu den Visualisierungen mittels Newton II ist.

Auf der Website der Didaktik der Universität Würzburg wird die Datei des Newton-II-Projekts zum Download angeboten.

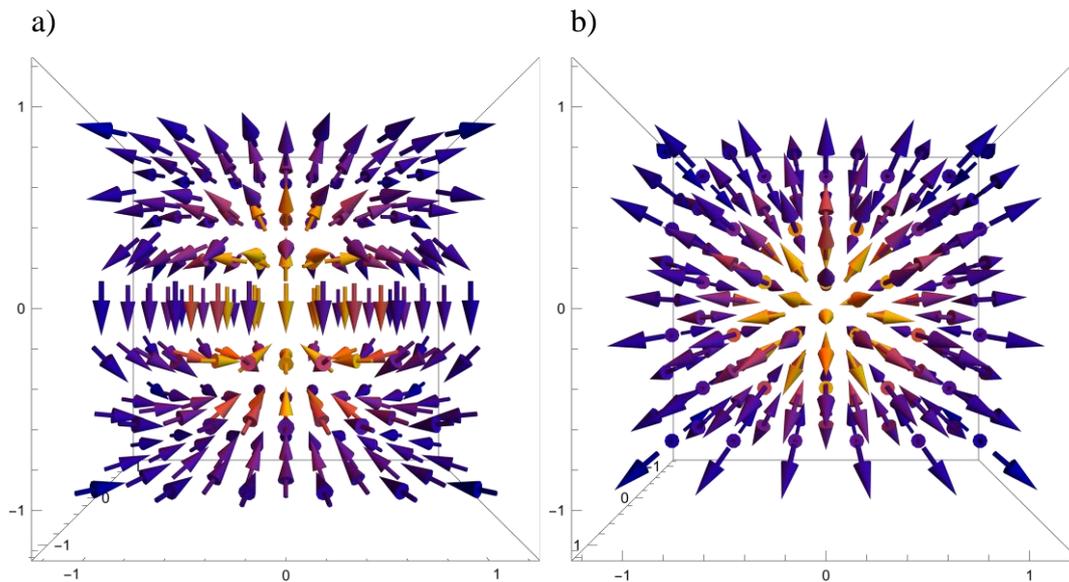


Abb. 24: Vektorplot des Magnetfeldes a) Seitenansicht. b) Sicht von oben. [Eigene Abbildung]

### 5.3 Vergleich der Simulation mit der Realität

Wird nur die x-z-Ebene betrachtet und zusätzlich die Kugel als Kreis (da 2D) eingeblendet, lässt sich besser erkennen, dass sich das Elektron der Kugeloberfläche annähert, umkehrt und dann dasselbe in der Nähe des anderen Pols vollführt. Diese Betrachtungsweise ist legitim, da sich bei der ersten Schleifenbahn das Elektron nahezu nur in dieser aufhält.

Der Kreis wurde in Newton II durch die Hinzunahme zweier Funktionen im Feld „Vergleichsfunktion“ realisiert. Diese lauten

$$z(x) = \sqrt{0,0025 - x^2} \text{ und } z(x) = -\sqrt{0,0025 - x^2}$$

und beschreiben einen oberen bzw. unteren Halbkreis mit Radius 5 cm.

Um diese Simulation schlussendlich mit der Aurora-Erscheinung auf der Erde zu vergleichen, stellt sich zusätzlich die Frage, auf welchen Breitengraden ein Beobachter auf der Kugel diese sehen würde. Da sich die Erscheinungen an den Umkehrpunkten der Schleifenbahn abspielen, wird eine parametrisierte lineare Funktion durch den Ursprung gelegt, die mit Hilfe eines Schiebereglers für den Neigungswinkel  $\alpha$  bezüglich der x-Achse angepasst werden kann.

$$z(x) = \tan\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) \cdot x$$

Hier gibt der Schieberegler den Wert für  $\alpha$  in Grad an.

Durch Variation dieser Geraden ergibt sich ein Steigungswinkel von  $\alpha = 56,7^\circ$ , siehe Abbildung 25.

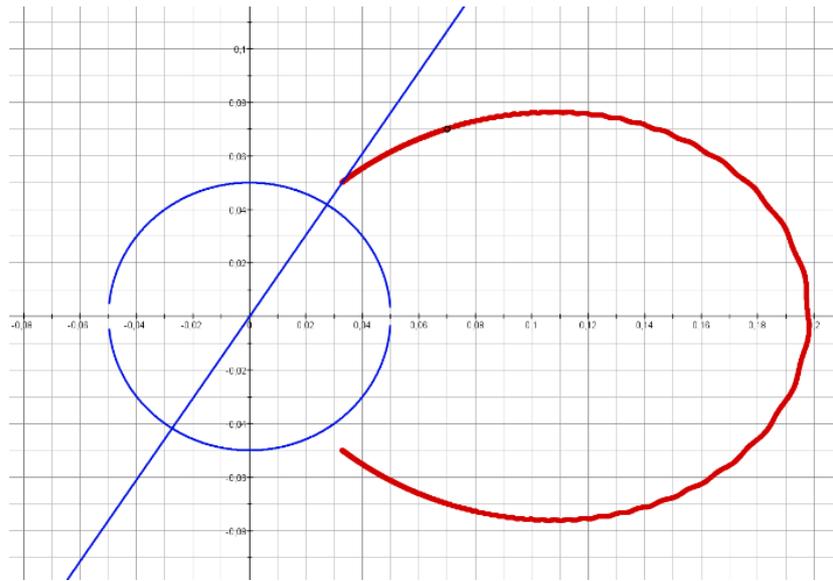


Abb. 25: Schleifenbahn mit eingeblendeter Kugel und Vergleichsfunktion. [Eigene Abbildung]

Wird diese Erkenntnis aus der Simulation der Kugel auf die Erde übertragen, lässt sich analog sagen, dass sich diese Umkehrpunkte oberhalb des 57. Breitengrades befinden. „Oberhalb“ hier im Sinne eines Beobachters, der sich auf der Kugeloberfläche auf dem 57. Breitengrad befindet und senkrecht zur Kugeloberfläche nach oben schaut. Dieser 57. Breitengrad verläuft in Europa durch Norddänemark bzw. Südschweden. (Diercke-Weltatlas 2006, S. 64 f.)

Wird eine Karte herangezogen, die die Wahrscheinlichkeit für Polarlichter in Europa in Abhängigkeit des KP-Index zeigt, so lässt sich erkennen, dass Polarlichter in diesen Breiten zwar möglich, allerdings eher selten sind (siehe Abb. 26).

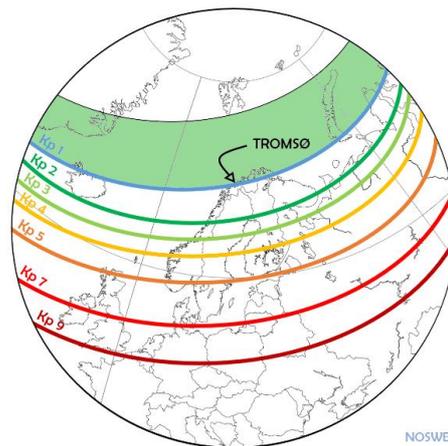


Abb. 26: Polarlichtwahrscheinlichkeit in Europa abhängig vom KP-Index  
[entnommen von (NOSWE 2023)]

Der KP-Index beschreibt die geomagnetische Aktivität, was vereinfacht angibt, wie viel Sonnenwind mit hoher Energie auf die Erde trifft und ihr Magnetfeld verformt. Ein niedriger KP-

Index bedeutet ein schwacher Sonnenwind (Dichte und Energie gering), ein hoher hingegen einen Sonnensturm (Dichte und Energie hoch). (NOSWE 2023)

Allerdings liegen der geomagnetische Nordpol und der geographische Nordpol nicht am selben Ort. Der geomagnetische Nordpol befindet sich 2023 an den Koordinaten  $80,8^\circ N, 72,7^\circ W$ . (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto 2020)

Dies hat aus europäischer Sicht zur Folge, dass sich der geomagnetische Nordpol in Verlängerung zum geographischen Nordpol ca.  $10^\circ$  hinter diesem befindet. Somit verschiebt sich dieser Breitengrad für Europa um ca.  $10^\circ$  nach Norden. Wird diese Verschiebung zum oben ermittelten  $57.$  Breitengrad hinzugefügt, so ergibt sich der  $67.$  Breitengrad, welcher in der Graphik mittig zwischen der KP 1 und KP 2 Linie verläuft. (Diercke-Weltatlas 2006, S. 64 f.) Somit kommt die Position der aus der Simulation ermittelten Umkehrpunkte sehr nahe an die Tatsächlichen heran.

In die Simulation gehen einige stark vereinfachende Annahmen ein: für das magnetische Moment  $m$  wurde ein Wert abgeschätzt und das Elektron interagiert nicht mit Materie. Zusätzlich wird in der Simulation von einem einfachen Dipolfeld ausgegangen, ohne dass der Magnet, der dieses erzeugt, selbst eine Ausdehnung besitzt. Das Erdmagnetfeld ist in der Realität deutlich komplexer aufgebaut und zusätzlich findet eine Interaktion zwischen dem interplanetaren und dem irdischen Magnetfeld statt, sodass dieses sich lokal stark von einem reinen Dipolfeld unterscheidet. Zu Demonstrationszwecken, wie sich die Elektronen im Magnetfeld einer Kugel mit einem Stabmagneten verhalten, sind diese Annahmen ausreichend.

## 5.4 Variation der Simulationsparameter

Zuletzt bietet sich die Simulation auch dazu an, die oben festgesetzten Parameter zu verändern und die Effekte dieser Veränderung zu studieren.

Wird das Vorzeichen der Startgeschwindigkeit verändert, was bedeutet, dass sich das Elektron mit dieser Geschwindigkeit von der Kugeloberfläche wegbewegt, so ergibt sich, dass es sich in der gleichen Bewegungsart um die Kugel herumbewegt. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit bewirkt lediglich, dass sich das Elektron in weniger Schleifen um die  $z$ -Achse herumbewegt, also schneller die  $z$ -Achse umrundet. Bei gleichbleibendem Startpunkt verändert sich durch die Variation der Geschwindigkeit der Ort der Umkehrpunkte nicht.

Bei einer Veränderung des magnetischen Moments  $m$ , also vereinfacht gesagt der Stärke des Magneten, lässt sich feststellen, dass sich bei gleichbleibenden Startbedingungen (Ort und Geschwindigkeit) zwei Dinge verändern: Bei kleiner werdendem  $m$  werden einerseits die

Schrauben um die Magnetfeldlinien größer, andererseits verringert sich die Anzahl der Schleifen pro Umdrehung um die z-Achse. Bei einer Vergrößerung von  $m$  werden die Schrauben kleiner und die Anzahl der Schleifen vergrößert sich. Interessant zu beobachten ist, dass sich bei zu kleinen Werten von  $m$  die oben gezeigte Schleifenform und Umkreisung der z-Achse nichtmehr einstellt. Dies bedeutet, dass das Elektron nach einer Umkehr entlang der Magnetfeldlinien aus der magnetischen Flasche entkommen konnte, da das Magnetfeld am Bauch der Flasche zu schwach ist, um das Elektron mit der gegebenen Geschwindigkeit in Richtung Pol zu lenken.

Die Variation des Startpunktes, bei gleichbleibendem Magnetfeld und Geschwindigkeit, führt zu unterschiedlich großen Schleifen. Je weiter entfernt der Startpunkt vom Magneten gewählt wird, desto größer ist der Durchmesser der beschriebenen Schleife. Auffällig ist, dass die Umkehrpunkte unabhängig von der Wahl des Startortes nach wie vor auf der in Abbildung 25 gezogenen Ursprungsgerade liegen. Lediglich der Abstand zur Kugeloberfläche wird größer bzw. kleiner bei einer Positionierung weiter weg vom bzw. näher am Magneten.

Eine Vereinfachung, die hier noch keine Beachtung gefunden hat, ist die Tatsache, dass sich das Realexperiment unter dem Einfluss des Erdmagnetfeldes befindet. In der Simulation wird dies vernachlässigt und das vom Magneten erzeugte Dipolfeld ist alleinstehend. Wird die Feldstärke des Magneten mit dem Erdmagnetfeld verglichen, ist leicht festzustellen, dass das Erdmagnetfeld viel schwächer ist und daher keinen nennenswerten Einfluss auf das Experiment darstellt. Zur Bestätigung wird abgeschätzt, in welcher Entfernung die Feldstärke des Magneten so weit abgefallen ist, dass dieses die gleiche Größenordnung wie das Erdmagnetfeld besitzt. Dazu wird Gleichung (19) nach  $z$  umgestellt:

$$z = \sqrt[3]{\frac{\mu_0 \cdot m}{2\pi \cdot B_z}}$$

In Deutschland beträgt die Feldstärke des Erdmagnetfeldes total  $B_{Erde,D} \approx 50 \mu\text{T}$  bei einer Inklination von ca.  $67^\circ$ . (Harcken 2016)

Für die Abschätzung wird angenommen, dass das Erdmagnetfeld parallel zur z-Achse des Magneten verläuft und berechnet, in welchem Abstand die Feldstärke des Magneten auf  $B_{z,Magnet} = 100 \mu\text{T}$  abgefallen ist, sodass diese sich bei entgegengesetzter Orientierung ausgleichen. Für wie oben angenommen  $m = 200 \text{ Am}^2$  ergibt sich, dass der Magnet in einer Entfernung von  $z \approx 70 \text{ cm}$  eine Feldstärke von ca.  $100 \mu\text{T}$  besitzt. Selbst wenn mit

$m = 50 \text{ Am}^2$  das magnetische Moment deutlich niedriger angesetzt wird, ergibt sich eine Entfernung von  $z \approx 45 \text{ cm}$ . Da die Feldstärke  $\sim \frac{1}{r^3}$  abfällt und das Experiment sich auf einige Zentimeter um die Kugel herum beschränkt, kann das Erdmagnetfeld hier vernachlässigt werden. Abschließend lässt sich sagen, dass die Simulation anhand der oben getroffenen und begründeten Annahmen die Realität des (Planet-)Terrella-Experiment und die Gegebenheiten im Erdmagnetfeld ausreichend gut darstellt.

## 6 Aktuelle Behandlung von Polarlichtern in der Schule

Allgemein werden atmosphärische Phänomene kaum bzw. nur vereinzelt im aktuellen LehrplanPLUS in Bayern behandelt (Stand September 2023). Daher soll in diesem Kapitel der Lehrplan genauer daraufhin untersucht und mit dem Inhalt von entsprechenden Schulbüchern verglichen werden.

### 6.1 Lehrplanverortung (LehrplanPLUS Bayern)

Es gibt kein spezifisches Thema des aktuellen LehrplanPLUS in Bayern, das sich allein mit atmosphärischen Phänomenen beschäftigt. Jedoch können und werden diese als Anwendungsbeispiel für verschiedene physikalische Phänomene verwendet. Der Regenbogen lässt sich als bekanntestes Alltagsbeispiel des Themas Lichtbrechung bzw. Prisma anführen.

Wird das Phänomen der Aurora betrachtet, so lässt sich feststellen, dass dort viele verschiedene physikalische Themenbereiche Anwendung finden. Man muss sich als Lehrkraft die Frage stellen, ob einzelne Teilschritte als Anwendungsbeispiel für ein bestimmtes Themengebiet gewählt werden können oder erst wenn alle Bereiche im Schulkontext behandelt wurden, die Aurora als themenübergreifendes Gesamtphänomen behandelt wird.

Die wichtigsten Themengebiete hierfür sind zunächst die Entstehung des Sonnenwinds, die Bewegung geladener Teilchen im Magnetfeld und die Anregung von Atomen/ Molekülen. Bei genauerer Untersuchung des Lehrplans stellt sich heraus, dass einige dieser Phänomene schon in der Mittelstufe angerissen, indes nicht vollständig behandelt werden bzw. nicht in der hier zum Verständnis benötigten Tiefe.

So ist Schülerinnen und Schülern (SuS) in der 9. Klasse im Lernbereich 2 bekannt, dass Atome Energie in Form von Photonen aufnehmen und diese wieder in Form von Photonen abgeben können. Dabei wird auch das Absorptionsspektrum der Erdatmosphäre besprochen, welches dadurch zustande kommt, dass Photonen der Sonne von Gasen der Atmosphäre absorbiert werden.

Die für das Leuchten der Aurora verantwortliche Stoßanregung von Atomen wird erst in der 13. Klasse im Lernbereich 2 (vertreten in beiden Anforderungsniveaus) behandelt. Dort lernen SuS, dass Atome nicht nur durch Photonen, sondern auch durch Stoßprozesse mit anderen Partnern, wie z. B. Atomen oder Elektronen, angeregt werden können und diese Energie wieder in Form von Photonen abgeben. Dies wird laut Lehrplan durch den Franck-Hertz-Versuch demonstriert.

Das Thema „Ladungen in Feldern“ wird in zwei Jahrgangsstufen behandelt. So findet sich in der 10. Klasse Lernbereich 1 die Lorentzkraft auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld wieder. Hierbei wird die Drei-Finger-Regel eingeführt, um bei bekannter Strom- und Magnetfeldrichtung die daraus resultierende Richtung der Kraft zu ermitteln.

Dies reicht noch nicht komplett für das Verständnis aus, wie sich geladene Teilchen (hier Sonnenwind) im Magnetfeld bewegen. Dies wird erst zwei Jahre später in der 12. Klasse Lernbereich 1 (beide Anforderungsniveaus) behandelt. Dort lernen SuS, dass die Lorentzkraft nicht nur auf stromdurchflossene Leiter in einem Magnetfeld wirkt, sondern allgemein auf geladene Teilchen, die sich in einem Magnetfeld bewegen. Genau genommen steckt dieses Prinzip schon in der Thematik der 10. Klasse. Allerdings ist hier der Bewegungsverlauf der einzelnen Elektronen nichtmehr in einem Leiter vorgegeben. Somit fällt diese Einschränkung komplett weg und wird verallgemeinert. Die Kreisbewegung geladener Teilchen in einem homogenen Magnetfeld wird hier auch experimentell durchgeführt. Durch eine leichte Veränderung des Winkels zwischen Elektronenstrahl und Magnetfeld, sodass diese nicht senkrecht aufeinander stehen, lässt sich den SuS leicht demonstrieren, dass diese Kreisbewegung in eine Schraubenbahn um die Magnetfeldlinien herum übergeht.

Ein für die Entstehung der Leuchterscheinungen wichtiges Phänomen, die magnetische Flasche, wird in der Schule nicht behandelt. Hier müsste man als Lehrkraft über den vorgegebenen Stoff hinaus dieses Phänomen erklären.

Bisher wurde noch nicht die Quelle der Polarlichter beleuchtet - der Sonnenwind bzw. dessen Entstehung. Dies findet sich in der 13. Klasse Astrophysik im Lernbereich 3 wieder. Dort wird die Sonne in ihrer Ganzheit untersucht, wobei die Entstehung des Sonnenwinds, dessen Ausbreitung, bekannt als Weltraumwetter, und auch die Überwachung dessen behandelt wird. Hier bietet sich als Anwendungsbeispiel der Überwachung des Weltraumwetters die Vorhersage der Auftretswahrscheinlichkeit von Polarlichtern an.

Gleichzeitig muss hier angeführt werden, dass die SuS, die Astrophysik gewählt haben, laut Lehrplan nicht über das Wissen der 13. Klasse Physik, unabhängig vom Anforderungsniveau, verfügen. Somit ist diesen die Stoßanregung nicht bekannt, welche für das Verständnis der Leuchterscheinungen nachgereicht werden müsste. Dies sollte verhältnismäßig einfach sein, da das Prinzip der Anregung von Atomen zumindest mit Photonen aus der 10. Klasse bekannt ist. (ISB Bayern 2023)

Allgemein lässt sich sagen, dass es zwar aufwändig, jedoch nicht unmöglich ist, SuS das Phänomen der Polarlichter in ihrer Ganzheit näher zu bringen. Mit dem geringsten zusätzlichen Aufwand wird dies bei SuS gelingen, die Astrophysik gewählt haben. Hier ist das Auftreten der

Aurora direkt mit dem besprochenen Sonnenwind verbunden und die zu ergänzenden Erklärungen halten sich in Grenzen.

Wird die Erscheinung didaktisch so reduziert, dass man den Ursprung des Sonnenwindes nicht behandelt und einfach von geladenen Teilchen spricht, die ins Erdmagnetfeld eindringen, so lässt sich das Thema auch in der 13. Klasse Physik als Anwendung der Stoßanregung verwenden.

Letztendlich kann das Polarlicht auch in der 12. Klasse als Anwendung der Lorentzkraft auf den Sonnenwind im Magnetfeld eingesetzt werden, jedoch ist hier fraglich, ob die didaktische Reduktion nicht zu groß wäre oder ob es sinnvoll ist, die Stoßanregung der 13. Klasse schon vorzuziehen.

## **6.2 Polarlichter in Schulbüchern**

Zur Unterrichtsvorbereitung orientieren sich Lehrkräfte an Schulbüchern. Daher lohnt es sich, diese auf die Behandlung von Polarlichtern zu untersuchen.

Auffällig ist bei den G8-Schulbüchern „Galileo 9“ des Oldenbourg Schulbuchverlags für die neunte und „Physik 11“ des Duden Schulbuchverlags für die elfte Jahrgangsstufe, dass Polarlichter die Buchdeckel zieren. In beiden Büchern werden Polarlichter im Anschluss an die Behandlung der Lorentzkraft auf einer Seite didaktisch reduziert behandelt, wobei kenntlich ist, dass dies über den vorgesehenen Schulstoff hinausgeht. In beiden Büchern liegt der Fokus allein auf der Lorentzkraft, die auf die Sonnenwindteilchen wirkt. Somit sind Polarlichter einzig als Alltagsbeispiel für die Lorentzkraft angeführt. (Deger 2007, Buchdeckel, S. 33; Meyer et al. 2009, Buchdeckel, S. 78)

In „Physik 11“ wird die magnetische Flasche als ein Phänomen außerhalb des Lehrplans in einer Aufgabe zum Selbststudium behandelt. (Meyer et al. 2009, S. 90)

Im Gegensatz dazu, finden sich Polarlichter in den neuen Schulbüchern für die zehnte Jahrgangsstufe des Westermann und C.C. Buchner Schulbuchverlags, die den Vorgaben des LehrplanPLUS entsprechen, nicht wieder. (Gleixner, Christian, Dr. 2022; Dietrich et al. 2022)

Lediglich in „Physik 10“ des Duden Schulbuchverlags werden Polarlichter als Motivation im einleitenden Absatz zur Lorentzkraft erwähnt. (Hermann-Rottmair et al. 2022, S. 30)

Da, Stand September 2023, noch keine Schulbücher für den Physikunterricht der Oberstufe veröffentlicht wurden, muss ein Vergleich der Oberstufenschulbücher ausbleiben.

Es lässt sich vermuten, dass Polarlichter aus dem Fokus der Schulbuchautoren gefallen sind und diese selbst auf weiterführenden Themenseiten nicht behandelt werden.

## 7 Beobachtung von Polarlichtern

Nachdem die physikalischen Hintergründe der Polarlichter und die dazugehörigen Phänomene ausführlich untersucht wurden, soll es gegen Ende dieser Arbeit um das optische Erlebnis einer Polarlichtsichtung gehen. Wie in der Einleitung bereits erwähnt, handelt es sich beim Erleben eines Polarlichts um eine faszinierende Erfahrung, die u. a. auch die Tourismusbranche für sich entdeckt hat. Allerdings hat sich aus persönlicher Erfahrung gezeigt, dass vier Faktoren eine bedeutende Rolle bei der Chance einer Polarlichtsichtung spielen: die Position, die eigene Geduld, das Wetter und letztendlich Glück.

Da es sich hier um ein Naturereignis handelt, ist dessen Auftreten und Position nie exakt vorherzusagen und man muss mit Auftrittswahrscheinlichkeiten Vorlieb nehmen.

### 7.1 KP-Index

Der am einfachsten zu verstehende Wahrscheinlichkeitsparameter ist der so genannte KP-Index. Wie in Kapitel 5.3 bereits angerissen, handelt es sich hierbei um eine leicht verständliche Kennzahl, die viele Parameter wie Teilchendichte, Strömungsgeschwindigkeit, Informationen über das Magnetfeld des Sonnenwindes und die daraus resultierende Auswirkung auf das irdische Magnetfeld zusammenfasst und in einen Wert zwischen 0 (schwach) und 9 (stark) übersetzt. Je höher dieser ist, desto wahrscheinlicher wird es, dass eine Polarlichtsichtung möglich ist. Für gewöhnlich befindet sich der KP-Index durch die Schwankungen des normalen Sonnenwinds in Bereichen zwischen 0 und 2, was einerseits für eine geringe Auftrittswahrscheinlichkeit sorgt, andererseits befinden sich gleichzeitig die Bereiche, in denen ein Auftreten möglich ist, sehr weit im Norden (vergleiche Abb. 26). Kommt es in Folge einer erhöhten Sonnenaktivität, wie beispielsweise bei koronalen Massenauswürfen, zu einer Intensivierung des Sonnenwindes, so steigt der KP-Index an. Dies führt dazu, dass ein Auftreten wahrscheinlicher wird und das Gebiet der möglichen Sichtungen weiter nach Süden wandert.

Wie in Kapitel 2.3.2 diskutiert, spielen die Sonnenflecken eine große Rolle für die Vorhersage des Weltraumwetters. Je mehr es von diesen auf der Sonne gibt, desto mehr Plasma kann die Sonnenoberfläche verlassen und begibt sich in den interplanetaren Raum. Auch steigt bei zunehmender Verformung der Flussröhren die Wahrscheinlichkeit, dass diese Plasmaschleifen aufreißen und es zu koronalen Massenauswürfen kommt. Je nachdem, wie die Position der Erde

zum koronalen Massenauswurf war, sieht sich das Erdmagnetfeld im Anschluss einem deutlich stärkeren Sonnenwind oder auch Sonnensturm ausgesetzt.

Da der Sonnenwind als Plasma auch das Magnetfeld der Sonne mit zur Erde transportiert, wird das irdische Magnetfeld bei einem Sonnensturm besonders stark verformt. Diese Verformung ist der Grund dafür, dass der Sichtungsbereich weiter in Richtung Süden wandert, je höher der KP-Index ist. Zudem sind bei höheren Energien der Sonnenwindteilchen auch andere Anregungsniveaus und somit Farben möglich, welche gleichzeitig durch den höheren Teilchenstrom auch noch intensiver zu sehen sind. (NOSWE 2023)

## 7.2 Beobachtung

Typischerweise sind Polarlichtsichtungen in einem donut-förmigen Oval, dem so genannten Aurora-Oval (siehe Abb. 27), um die magnetischen Pole möglich.

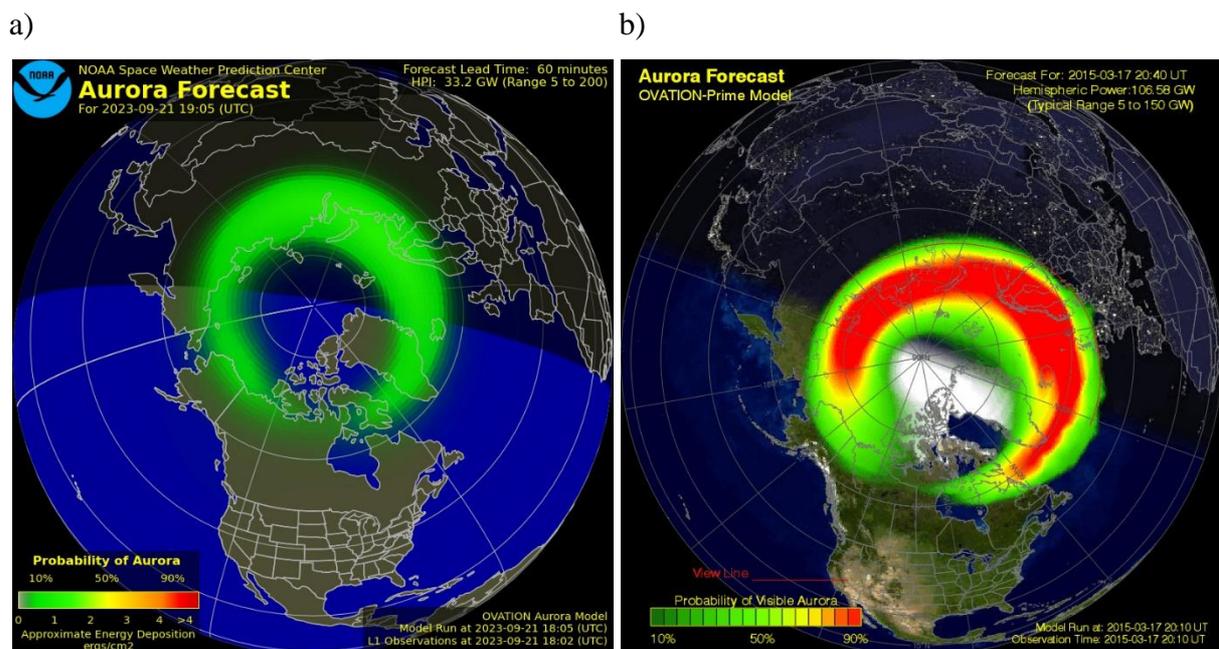


Abb. 27: Aurora-Oval Vorhersagen a) 21.09.2023 mit geringer Sonnenaktivität  
b) 13.10.2016 mit hoher Sonnenaktivität [entnommen von (NOAA 2023)]

Als Person, die sich für Polarlichter interessiert, sollte man sich dementsprechend in Skandinavien aufhalten. Dabei bieten sich die Wintermonate an, da in diesen die Nächte lang und Polarlichtsichtungen bei Tag kaum möglich sind. Weiter gilt es sowohl die KP-Index-Vorhersage im Auge zu behalten, die entweder im Internet aufgerufen werden kann oder auch von zahlreichen Apps gebündelt mit weiteren Informationen bereitgestellt wird. Da es sich um Eintrittswahrscheinlichkeiten handelt, spielen bei der Beobachtung auch Geduld und Glück eine Rolle. So

kann man trotz geringer Vorhersagewahrscheinlichkeiten von Polarlichtern überrascht werden oder auch bei guter Prognose lange vergeblich warten.

Zu guter Letzt gilt es, auch den Wetterbericht zu analysieren, da trotz hoher Polarlichtchancen ein wolkenverhangener Himmel die Sicht auf die Leuchterscheinungen trüben kann oder unmöglich macht.

Sind alle oben genannten Faktoren erfüllt und man hat die Gelegenheit, Polarlichter zu beobachten, so lässt sich feststellen, dass diese nicht nur in unterschiedlichen Farben vorkommen können, sondern auch in vielen verschiedenen Formen und Verhaltensweisen (siehe Abbildungen 28, 29 und 30).

So wird zwischen einem Glühen, einem Bogen, der sich über den Nachthimmel erstreckt, einem geschwungenen Band (auch mehrere Bänder parallel möglich) und Strahlen, die senkrecht über dem Beobachter erscheinen, unterschieden. Weiter können diese Formen beständig sein oder sich schnell verändern. (Hannula 2019)

Es ist nicht leicht, Polarlichter als Amateur selbst fotografisch festzuhalten. Mit gängigen Smartphone-Kameras ist oft nur ein grüner Schimmer, falls überhaupt, auf den aufgenommenen Bildern zu sehen. Um aussagekräftige Fotos schießen zu können, werden in der Regel ein Stativ und eine Kamera, mit der Langzeitaufnahmen möglich sind, benötigt. Je eher die Kamera mit schwachen Lichtverhältnissen zurechtkommt, desto besser.

Allgemein lässt sich sagen, dass die Polarlichter mit den Augen klar und deutlich wahrgenommen werden können und die fotografischen Probleme wahrscheinlich denen der Astrofotografie ähneln. Zudem sind die Polarlichter besser zu sehen, je dunkler die Umgebung ist. Von daher bieten sich Orte entfernt von größeren Städten zur Beobachtung an.

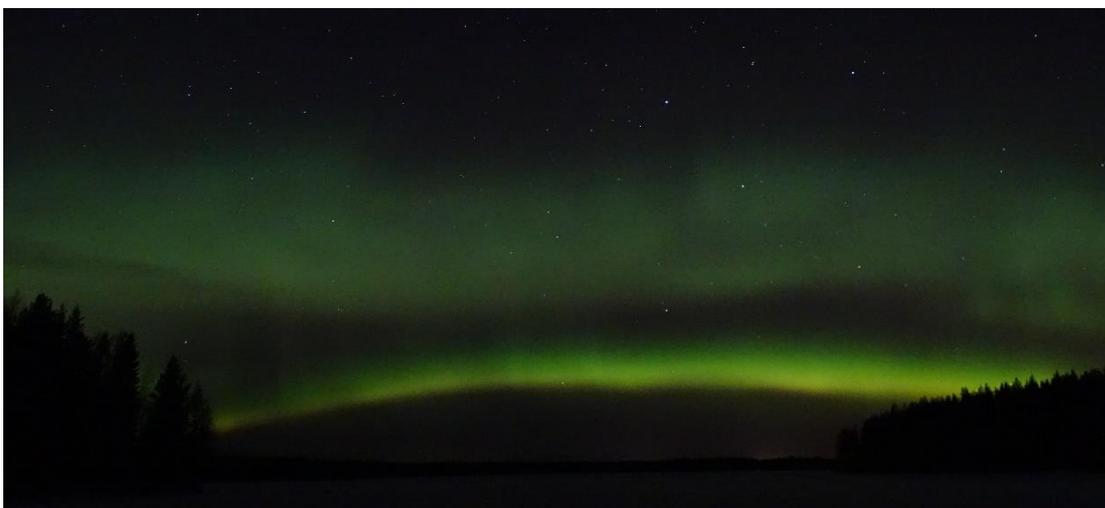


Abb. 28: Polarlicht in Form eines Bogens und eines Glühens über dem Bäcksjön, Schweden.  
[Selbst aufgenommen am 28.02.2019]



Abb. 29: Polarlicht in Strahlenform. Aufgenommen am 14.03.2022 in Norsjö, Schweden.  
[Zur Verfügung gestellt von Fabio König]



Abb. 30: Polarlicht in Form eines leicht geschwungenen Strahlen-Bandes.  
Aufgenommen am 12.09.2023 in Norsjö, Schweden. [Zur Verfügung gestellt von Fabio König]

### **7.3 Vorkommen in Deutschland**

Die Sonne unterliegt einem ca. 11-jährigen Aktivitätszyklus, an dessen Höhepunkt die meisten Sonnenflecken und damit auch die häufigsten Sonnenstürme zu beobachten sind. Aktuell befinden wir uns im Jahr 2023 kurz vor einem solchen Maximum, was bedeutet, dass Polarlichtsichtungen in naher Zukunft sowohl häufiger als auch intensiver vorkommen können. (Demtröder 2017b, S. 311)

Aufgrund des intensiveren Sonnenwindes sind in solchen Phasen auch Polarlichtsichtungen von Deutschland aus möglich, wobei hier eher diffusere Erscheinungsbilder üblich sind. (Poppendieck 2023)

### **7.4 Sonnensturm – Gefahr und Schönheit zugleich**

Natürlich sind Polarlichtsichtungen in südlicheren Regionen ein spektakuläres und zugleich seltenes Ereignis. Allerdings können diese auch Begleiterscheinung einer ernstesten Gefahr sein. Damit in Mittel- oder sogar Südeuropa Polarlichtsichtungen möglich sind, benötigt es einen (schweren) Sonnensturm, der neben Leuchterscheinungen in der Atmosphäre auch hohe Ströme auf der Erdoberfläche induzieren kann.

Das bekannteste Ereignis dieser Art stellt das Carrington-Event dar. Bei diesem sorgte der bisher größte beobachtete koronale Massenauswurf 1859 einerseits dafür, dass über Tage hinweg der Nachthimmel über Europa hell erleuchtet war. Andererseits wurde durch die induzierten Ströme das damalige Telegrafennetz schwer beschädigt.

Im Vergleich zu 1859 leben wir heutzutage in einer hochtechnisierten Welt, die auf eine Vielzahl von elektronischen Geräten angewiesen ist und selbst ein Teilausfall des Kommunikationsnetzes verheerende Folgen hätte. Auch sind Satelliten, die aufgrund ihrer Entfernung weniger vom Erdmagnetfeld vor solchen Sonnenstürmen geschützt sind, anfällig durch solche Ereignisse beschädigt zu werden oder auszufallen. (Reinboth 2009)

Wie bereits erwähnt, findet ein solches Ereignis selten statt. Jedoch wurde zuletzt 2012 ein koronaler Massenauswurf beobachtet, der eine ähnliche Intensität wie das Carrington-Event besaß und die Erde nur knapp verfehlte. (Baker et al. 2013)

## 8 Fazit

Abschließend lässt sich sagen, dass Polarlichter aus vielen Blickwinkeln betrachtet ein interessantes und spannendes Phänomen sind, welches sich gut im Physikunterricht der Oberstufe behandeln lässt. So bedarf die Erklärung dieser Erscheinung eines Zusammenspiels mehrerer Teilgebiete der Physik. Zudem lassen sich einzelne Effekte auch realexperimentell oder durch eine Simulation darstellen.

Wenngleich Polarlichter bisher kein Bestandteil des aktuellen Lehrplans sind, lohnt es sich dennoch diese zu behandeln. Ausgelöst durch schöne Bilder oder sogar persönliche Erfahrungen von Schülerinnen oder Schülern lässt sich eine Begeisterung für das Thema wecken, die auch auf die hier vorkommenden Themengebiete der Atomphysik oder Elektrodynamik überspringen kann.

Außerdem sollte ein Bewusstsein über die mögliche Gefahr von Sonnenstürmen und dessen technischen und sozialen Auswirkungen in einer technisierten Welt zur Allgemeinbildung gehören, welches somit im Physikunterricht geschaffen werden kann.

Zuletzt lässt sich das eigene Erleben von Polarlichtern leider nicht in dem Maße experimentell nachstellen, wie sie sich in der Natur zeigen. Daher bleibt allen, die diese einmal mit eigenen Augen sehen wollen, nur zu wünschen, dass sich mit Vorbereitung und ein wenig Glück die Gelegenheit für ein einmaliges Erlebnis bietet, das sicher nicht so schnell in Vergessenheit gerät.



## 9 Literaturverzeichnis

- Baker, D. N.; Li, X.; Pulkkinen, A.; Ngwira, C. M.; Mays, M. L.; Galvin, A. B.; Simunac, K. D. C. (2013): *A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios. In: Space Weather 11 (10), S. 585–591. DOI: 10.1002/swe.20097.*
- Bezler, Hans Joachim (2019): *Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht. Online verfügbar unter [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1994/1994\\_09\\_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf).*
- Brundtland, Terje (1998): *Sphæra: the Newsletter of the Museum of the History of Science, Oxford. Online verfügbar unter <http://www.mhs.ox.ac.uk/sphaera/index.htm?issue7/articl6>, zuletzt aktualisiert am 15.09.2023, zuletzt geprüft am 15.09.2023.*
- Brundtland, Terje (2017): *The northern lights unveiled - Kristian Birkeland's Terrella experiment recreated. Hg. v. Norsk Teknisk Museum. Online verfügbar unter [https://www.youtube.com/watch?v=B-YFRdZWz-U&ab\\_channel=NorskTekniskMuseum](https://www.youtube.com/watch?v=B-YFRdZWz-U&ab_channel=NorskTekniskMuseum), zuletzt aktualisiert am 15.09.2023, zuletzt geprüft am 15.09.2023.*
- Clauser, Christoph (2015): *Einführung in die Geophysik. Globale physikalische Felder und Prozesse in der Erde. 2. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.*
- Deger, Herrmann (2007): *Galileo. Das anschauliche Physikbuch: 9. Jahrgangsstufe. Ausgabe für das G8 in Bayern. 1. Aufl. [Ausg. für das G8 in Bayern]. München: Oldenbourg.*
- Demtröder, Wolfgang (2016): *Atome, Moleküle und Festkörper. 5., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch, 3).*
- Demtröder, Wolfgang (2017a): *Elektrizität und Optik. 7., korrigierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch, 2).*
- Demtröder, Wolfgang (2017b): *Kern-, Teilchen- und Astrophysik. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch, 4).*
- Det Norske Videnskaps-Akademi (2019): *Birkelands berømte Terrella-eksperiment gjenskapes på Teknisk Museum. Online verfügbar unter <https://dnva.no/detskjer/2014/09/birkelands-beromte-terrella-eksperiment-gjenskapes-pa-teknisk-museum>, zuletzt aktualisiert am 15.09.2023, zuletzt geprüft am 15.09.2023.*
- Diercke-Weltatlas (2006). *Braunschweig: Westermann.*
- Dietrich, Rainer; Finkenber, Frank; Janner, Rüdiger; Schalk, Martin (2022): *Physik 10. 1. Aufl. Bamberg: Buchner.*
- ESA. Parker spiral (2019). *Online verfügbar unter [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2019/03/Parker\\_spiral](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/03/Parker_spiral), zuletzt aktualisiert am 21.09.2023, zuletzt geprüft am 21.09.2023.*
- Gleixner, Christian, Dr. (2022): *Dorn Bader - Natur und Technik, Schwerpunkt Physik. Druck A. Braunschweig: Schroedel westermann.*

Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl (Hg.) (2009): *Physik. 2., überarb. u. ergänzte Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.*

Hannula, Irma (2019): *Aurora Borealis - Measuring the magnetic field.* Online verfügbar unter <https://eaae-astronomy.org/workshops/aurora-borealis-measuring-the-magnetic-field>, zuletzt aktualisiert am 22.04.2019, zuletzt geprüft am 22.09.2023.

Harcken, Hans (2016): *Messung des Erdmagnetfeldes in der PTB - PTB.de.* Online verfügbar unter <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-251/live-daten-erdmagnetfeldmessung.html>, zuletzt aktualisiert am 15.09.2023, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Hermann-Rottmair, Ferdinand; Huber, Ludwig; Neumann, Ulrich; Renner, Andrea; Ried, Claudia (2022): *Duden Physik - Gymnasium Bayern - Neubearbeitung - 10. Jahrgangsstufe. Schülerbuch. Berlin: Duden Schulbuch (Duden Physik).*

Hoffmann, Lore; Häussler, Peter; Lehrke, Manfred (1998): *Die IPN-Interessenstudie Physik. Kiel: IPN (IPN, 158).*

Horneffer, Katja (2022): *Was sind Polarlichter? ZDF.* Online verfügbar unter <https://www.zdf.de/nachrichten/heute-journal/videos/gv-wetter-horneffer-nordlichter-100.html>, zuletzt aktualisiert am 16.09.2023, zuletzt geprüft am 16.09.2023.

Icelandair. Pauschalreisen (2023). Online verfügbar unter <https://www.icelandair.com/de-de/urlaub/nordlicht/>, zuletzt aktualisiert am 21.09.2023, zuletzt geprüft am 21.09.2023.

ISB Bayern (2023): *LehrplanPLUS - Gymnasium - Physik - Fachlehrpläne.* Online verfügbar unter <https://www.lehrplanplus.bayern.de/schulart/gymnasium/fach/physik/inhalt/fachlehrplaene>, zuletzt aktualisiert am 15.09.2023, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Jeanjacquot P.; Lilensten J. (2013): *Casting light on solar wind: simulating aurorae at school.* In: *Science in School* (26), S. 32–37. Online verfügbar unter [https://www.scienceinschool.org/wp-content/uploads/2014/11/issue26\\_aurorae.pdf](https://www.scienceinschool.org/wp-content/uploads/2014/11/issue26_aurorae.pdf).

Johnston, Richard S.; Dietlein, Lawrence F.; Berry, Charles A. (Hg.) (1975): *Biomedical Results of Apollo. NASA: Scientific and Technical Information Office.*

Klecker, Berndt (2007): *Sterne und Weltraum Spezial 01/07, Unsere Sonne – Motor des Weltraumwetters.*

Klose, Brigitte; Klose, Heinz (2016): *Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch).*

Leybold GmbH (2023): *Datenblatt Kleine Kompakt Pumpe S 1,5 | Leybold.* Online verfügbar unter [https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/77/9a/1f/TD\\_10101\\_DE.pdf](https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/77/9a/1f/TD_10101_DE.pdf), zuletzt aktualisiert am 21.09.2023, zuletzt geprüft am 21.09.2023.

Lilensten, Jean; Barthélemy, Mathieu; Simon, Cyril; Jeanjacquot, Philippe; Gronoff, Guillaume (2009): *The Planetterella, a pedagogic experiment in planetology and plasma physics.* In: *Acta Geophysica* 57 (1), S. 220–235. DOI: 10.2478/s11600-008-0079-x.

Mathematische Formeln und Definitionen (2004). 8., überarb. Aufl. München: Bayerischer Schulbuchverl.; J. Lindauer Verl.

Meyer, Lothar; Schwarz, Oliver; Hoche, Detlef (2009): *Physik. Sekundarstufe II - Bayern - 11. Schuljahr. 1. Aufl., 1. Dr.* Berlin, Mannheim: Duden-Schulbuchverl.

NASA (2016): 24204469670\_22435fdeab\_o.jpg. Online verfügbar unter [https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/24204469670\\_22435fdeab\\_o.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/24204469670_22435fdeab_o.jpg), zuletzt aktualisiert am 20.01.2016, zuletzt geprüft am 21.09.2023.

NOAA (2023): *Aurora - 30 Minute Forecast* / NOAA / NWS Space Weather Prediction Center. Online verfügbar unter <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>, zuletzt aktualisiert am 21.09.2023, zuletzt geprüft am 22.09.2023.

Nolting, Wolfgang (2007): *Elektrodynamik. Mit 94 Aufgaben mit vollständigen Lösungen.* 8. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch, 3).

NOSWE (2023): *Northern Lights / Aurora Borealis – Norwegian Centre for Space Weather (NOSWE).* Online verfügbar unter <https://site.uit.no/spaceweather/aurora-borealis/>, zuletzt aktualisiert am 15.09.2023, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

Poppendieck, Jörg (2023): *Seltenes Polarlicht-Spektakel in Deutschland.* In: *tagesschau.de*, 27.02.2023. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/inland/polarlicht-deutschland-101.html>, zuletzt geprüft am 22.09.2023.

Raith, Wilhelm; Bergmann, Ludwig (Hg.) (2001): *Erde und Planeten. 2., aktualisierte Aufl.* Berlin: de Gruyter (Lehrbuch der Experimentalphysik, Schaefer).

Reinboth, Christian (2009): *Wie gefährlich sind koronale Massenauswürfe? Ein Rückblick auf das Carrington-Event von 1859.* Online verfügbar unter <https://scienceblogs.de/frischer-wind/2009/04/30/wie-gefaehrlich-sind-koronale-masseauswurfe-ein-rueckblick-auf-das-carringtonevent-von-1859/>, zuletzt aktualisiert am 30.04.2009, zuletzt geprüft am 22.09.2023.

Schlegel, Birgit (2011): *Polarlichter zwischen Wunder und Wirklichkeit. Kulturgeschichte und Physik einer Himmelserscheinung.* Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. (Spektrum-Akademischer-Verlag-Sachbuch).

Weigel, Simon (2019): *Einsatz mathematischer Modellbildungssoftware im Physikunterricht am Beispiel von Newton-II.* Online verfügbar unter [https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11010700/ZU-LAs/HA\\_Newton2\\_Weigel\\_Simon.pdf](https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11010700/ZU-LAs/HA_Newton2_Weigel_Simon.pdf).

Wiebke (2022): *Wissenstexte – Polarlichter.* Hg. v. Wiebke Salzmann. Online verfügbar unter <https://physik.wissenstexte.de/polarlicht.html>, zuletzt aktualisiert am 11.01.2022, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (2020): *Magnetic North, Geomagnetic and Magnetic Poles.* Online verfügbar unter <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2020, zuletzt geprüft am 15.09.2023.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Geladenes Teilchen im Magnetfeld: a) $v_0$ ohne z-Komponente. b) $v_0$ mit z-Komponente. [eigene Abbildung]	11
Abb. 2: Magnetische Flasche [entnommen von (Halliday et al. 2009, S. 847)]	12
Abb. 3: Schematische Darstellung der Verformung der Magnetfeldlinien der Sonne [entnommen von (Demtröder 2017b, S. 314)]	16
Abb. 4: Visualisierung der Parker Spirale. [entnommen von (ESA 2019)]	17
Abb. 5: Schematische Darstellung der Magnetosphäre im Sonnenwind. [entnommen von (Wiebke 2022) mit eigenständigen Ergänzungen]	18
Abb. 6: Berechnung der Entfernung des Erdmagnetfeldes mit Feldstärke von $4\text{ nT}$ und $10\text{ nT}$ in Abhängigkeit zur magnetischen Breite. $R$ entspricht dabei $R_e$ . [Eigene Abbildung]	19
Abb. 7: Skizzenartige Darstellung der gekrümmten Flasche entlang des Erdmagnetfeldes. [Eigene Abbildung]	20
Abb. 8: Aufnahme eines Polarlichts aus der ISS. [entnommen von (NASA 2016)]	22
Abb. 9: Emissionsspektren von Sauerstoff und Stickstoff. [entnommen von (Schlegel 2011, S. 137)]	22
Abb. 10: Birkeland neben der von ihm gebauten Terrella in Betrieb. [entnommen von (Brundtland 1998)]	25
Abb. 11: Versuchsaufbau der Planeterrella. [entnommen von (Lilensten et al. 2009, S. 222)]	26
Abb. 12: Versuchsaufbau Aurora-Experiment. [Eigene Abbildung]	27
Abb. 13: Präparierte Holzkugel a) Magnete werden in die Öffnung der Kugel eingelassen. b) Die verbleibende Öffnung ist mit Knete verschlossen. [Eigene Abbildung]	28
Abb. 14: Verschiedene Stützen zur Kontaktierung der Kugel. [Eigene Abbildung]	29
Abb. 15: Detailaufnahme des Aufbaus in der Vakuumkammer. [Eigene Abbildung]	30
Abb. 16: a) Aurora-Oval bei evakuierter Kammer und verdunkeltem Raum. b) Aufbau bei erhelltem Raum. [Eigene Abbildung]	32
Abb. 17: Ringstrom um Kugel. [Eigene Abbildung]	34
Abb. 18: Lichtband um den Nordpol der Kugel mit schwachem Magnetfeld. [Eigene Abbildung]	35
Abb. 19: Lichtband um den Nordpol der Kugel mit starkem Magnetfeld. [Eigene Abbildung]	36
Abb. 20: Aufbau von zwei Kugeln im Abstand $15\text{ cm}$ . [Eigene Abbildung]	37
Abb. 21: Leuchten der Konstellation 4 Sonne-Erde. [Eigene Abbildung]	37
Abb. 22: Zeitlicher Verlauf einer Probeladung im Magnetfeld der Kugel. [Eigene Abbildung]	46
Abb. 23: Genauere zeitliche Auflösung einer Schleifenbahn. [Eigene Abbildung]	47
Abb. 24: Vektorplot des Magnetfeldes a) Seitenansicht. b) Sicht von oben. [Eigene Abbildung]	48
Abb. 25: Schleifenbahn mit eingeblendeter Kugel und Vergleichsfunktion. [Eigene Abbildung]	49
Abb. 26: Polarlichtwahrscheinlichkeit in Europa abhängig vom KP-Index [entnommen von (NOSWE 2023)]	49
Abb. 27: Aurora-Oval Vorhersagen a) 21.09.2023 mit geringer Sonnenaktivität b) 13.10.2016 mit hoher Sonnenaktivität [entnommen von (NOAA 2023)]	57
Abb. 28: Polarlicht in Form eines Bogens und eines Glühens über dem Bäcksjön, Schweden. [Selbst aufgenommen am 28.02.2019]	58
Abb. 29: Polarlicht in Strahlenform. Aufgenommen am 14.03.2022 in Norsjö, Schweden. [Zur Verfügung gestellt von Fabio König]	59
Abb. 30: Polarlicht in Form eines leicht geschwungenen Strahlen-Bandes. Aufgenommen am 12.09.2023 in Norsjö, Schweden. [Zur Verfügung gestellt von Fabio König]	59

## Danksagung

Am Ende dieser Arbeit möchte ich mich bei allen bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit zur Seite gestanden haben.

Zunächst gilt mein Dank Herrn Dr. Stephan Lück für die Betreuung dieser Arbeit und Unterstützung bei der Erstellung ebensolcher.

Weiter möchte ich mich bei allen bedanken, die mir durch konstruktive Gespräche ihre Kritiken und Verbesserungsvorschläge haben zukommen lassen. Namentlich möchte ich an dieser Stelle besonders E. Baume, F. Beisler, K. Ecker, J. Grothaus, S. Herold, L. Köhler, J. Sassen und M. Werner erwähnen.

Auch möchte ich mich bei Fabio König bedanken, der mir freundlicherweise zwei seiner Polarlichtaufnahmen für diese Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Zu guter Letzt gilt mein Dank besonders meinen Eltern, die mir ein Studium und somit die Erstellung dieser Arbeit erst ermöglicht haben.



## **A Erklärung nach §29 LPO-I**

Ich versichere an Eides statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich, annähernd wörtlich oder dem Sinn nach aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Des Weiteren erkläre ich, dass ich mich keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe. Diese Versicherung gilt auch für Abbildungen, Tabellen und ähnliches.

Die vorliegende Arbeit wurde in dieser oder ähnlicher Form an keiner weiteren Prüfungsstelle eingereicht.

Würzburg, den