

---

# FASZINATION POLARLICHT

---

Experiment und Expedition



David Messmer

6. JANUAR 2020  
KANTONSSCHULE KÜSNACHT 6D  
Referenz Elisabeth Germann

## Vorwort

Schon anfangs meiner Gymnasiumszeit staunte ich über das Phänomen des Polarlichts. Die Internetbilder allein genügten, um mich in einen magischen Bann zu ziehen. Da auch mein Vater schon jahrelang davon träumte, eines Tages das Nordlicht zu sehen, entschlossen wir, das Jagen des Polarlichts zu einem gemeinsamen Lebensziel zu machen. Wegen unserer grossen Leidenschaft für die Fotografie war bereits damals schon klar, dass wir dieses wundervolle Licht nicht nur sehen, sondern auch mit unseren eigenen Kameras einfangen wollten.

Da im Laufe meiner Schulzeit in mir ein immer stärkeres Interesse für das Verständnis von Sachverhalten wuchs, genügte es mir schon bald nicht mehr, ein Phänomen nur zu bestaunen. Der Gedanke, es zusätzlich auch noch wissenschaftlich erklären zu können, erfüllte mich ungemein. Zum Zeitpunkt der Themenwahl für die Maturaarbeit erkannte ich die riesige Chance, meine beiden Wünsche zu verwirklichen. Dankenswerterweise unterstützte mich dabei als Referentin Frau Elisabeth Germann aus der Fachschaft Physik.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	4
1.1	Leitfragen .....	4
2	Polarlichttheorie .....	5
2.1	Geschichte des Polarlichts .....	5
2.2	Sonne als Ursprung des Polarlichts .....	5
2.2.1	Sonnenwind .....	5
2.3	Weg des Sonnenwinds .....	7
2.3.1	Kontakt mit dem Magnetfeld .....	7
2.4	Eintritt in die Erdatmosphäre .....	11
2.5	Von der Erde aus gesehen .....	12
2.5.1	Verschiedene Faktoren .....	12
2.5.2	Farbe des Polarlichts .....	14
2.5.3	Form des Polarlichts .....	16
2.5.4	Helligkeit des Polarlichts .....	18
3	Experiment .....	19
3.1	Ziel des Experiments .....	19
3.2	Prinzip und Aufbau .....	20
3.3	Vorbereitungen .....	21
3.4	Durchführungen .....	22
3.4.1	Erste Versuche .....	23
3.4.2	Definitives Experiment .....	26
3.5	Auswertung der Ergebnisse .....	28
3.5.1	Haupterkennntnis .....	28
3.5.2	Nebenerkennntnisse .....	29
3.6	Vergleich zur Theorie .....	30
3.6.1	Sonnenwind – Elektronenfluss .....	30
3.6.2	Thermosphäre – Vakuumkammer .....	30
3.6.3	Erde – Terrella .....	31
4	Expedition .....	32
4.1	Planung und Vorbereitung .....	32
4.1.1	Erste Rahmenbedingungen .....	32
4.1.2	Konkrete Reiseplanung .....	32
4.1.3	Materialvorbereitung .....	34
4.1.4	Mentale Vorbereitung .....	34
4.2	Reise in den Norden .....	34
4.3	Museumsbesuch .....	36
4.4	Jagd nach dem Polarlicht .....	38
4.4.1	Kameraeinstellungen .....	38
4.4.2	Strategien .....	39
4.4.3	Erlebnisbericht .....	40

4.5	Analyse und Verarbeitung .....	42
4.5.1	Interpretation des Erlebten .....	42
4.5.2	Vergleich zu der Theorie und dem Experiment .....	43
4.5.3	Fotoalbum.....	44
5	Schlussteil.....	46
5.1	Antworten auf meine Leitfragen .....	46
5.2	Selbstreflexion.....	46
5.3	Danksagung .....	47
Anhang	.....	48
	Fotoalbum .....	48
	Literaturverzeichnis .....	48
	Abbildungsverzeichnis .....	50

# 1 Einleitung

Im Rahmen meiner Arbeit setzte ich mir das Ziel, das Polarlicht so gut es geht zu erfassen und allgemeinverständlich erläutern zu können. Man soll es aber nicht nur im theoretischen Sinne begreifen, sondern auch in der Anwendung der Theorie den Durchblick haben. Hierfür gibt es wohl nichts Besseres als die Durchführung eines Experiments. Zu guter Letzt kommen die essenziellen Eindrücke aus der Realität. Diese Perspektive macht einen aussergewöhnlich vertraut mit dem Naturwunder.

In einem ersten Teil beschreibe ich also die Geschichte und vor allem die Entstehung des Polarlichts. Dafür recherchierte ich in vielen verschiedenen Quellen und trug die Theorien so zusammen, dass sie auch für Leser, die nicht vom Fach sind, nachvollziehbar sind. Da sich bei einzelnen Details des Polarlichts nicht alle Quellen einig sind, versuchte ich mich nach einem für mich sinnvollen, möglichst logisch nachvollziehbaren „Mittelmass“ auszurichten.

Als Nächstes wendete ich die Theorie in einem Experiment an, in dem das Herstellen eines künstlichen Polarlichts das Ziel war. Ich erläutere in der Arbeit sowohl die ursprüngliche Idee des Experiments als auch mein eigenes Vorgehen. Darauf folgt die Analyse der Versuche. Diese zeigt die wichtigsten Faktoren der Entstehung des Polarlichts auf und vergleicht das Experiment mit der Theorie.

Um das Polarlicht nicht nur im Labor, sondern auch in der Realität zu erleben, plante ich eine Expedition nach Tromsø in Norwegen. Die Vorbereitung und die Durchführung werden beide in dieser Arbeit beschrieben. Um das Verständnis des Polarlichts noch weiter zu festigen, verglich ich die Eindrücke der Expedition mit der Theorie und meinem Experiment. Zudem erkläre ich, wie man das Polarlicht mit einer Kamera am besten fotografisch festhalten kann. So kriegt der Leser einen umfassenden Einblick in die Erlebnisse einer solchen Expedition und könnte sie gegebenenfalls sogar selber durchführen – es lohnt sich!

## 1.1 Leitfragen

Während dem Prozess der Arbeit konzentrierte ich mich darauf, auf folgende Leitfragen eine schlüssige Antwort zu finden:

- Wie entsteht das Polarlicht?
- Wie kann ich das Polarlicht im Modell nachstellen? Geht dies an der Kantonschule Küsnacht?
- Was erfordert es, das Polarlicht selber zu suchen, zu erleben und künstlerisch einzufangen?

## 2 Polarlichttheorie

Im ersten Teil dieser Arbeit ist es mein Ziel, das Phänomen des Polarlichts möglichst umfassend und dennoch leicht verständlich zu erläutern.

### 2.1 Geschichte des Polarlichts<sup>1</sup>

Seit weit über 2000 Jahren beobachtet der Mensch das Polarlicht und versucht eine Erklärung dafür zu finden. Die ersten Berichte, die uns bekannt sind, basieren ausschliesslich auf Sagen und Legenden. Wie sonst sollte man ohne moderne Technologien eine solch pompöse Erscheinung deuten? Da liegt die Erklärung, dass dies Phänomen etwas Göttliches sei, sehr nahe. Erst im 18. Jahrhundert wurden die Spekulationen ansatzweise wissenschaftlich. Zu Beginn wurde dieses Licht nur als eine Reflexion des Sonnenlichts gesehen. Im Verlaufe der Zeit erkannten Wissenschaftler aber einen Zusammenhang mit dem Magnetfeld der Erde, der Atmosphäre und später überdies mit dem Sonnenwind. Heute glaubt man die Entstehung des Lichtes sogar auf atomarer Ebene zu verstehen. Trotzdem gibt es noch keine Theorie, die in allen Aspekten mit der Realität übereinstimmt. Das Polarlicht wird noch immer weiter erforscht werden müssen. Für meine Maturaarbeit stütze ich mich auf die am weitesten verbreitete Theorie, welche meiner Meinung nach auch am meisten Sinn ergibt.

### 2.2 Sonne als Ursprung des Polarlichts

Die Entstehung des Polarlichts beginnt bei unserer Sonne. Diese ist im Grunde genommen nichts anderes als eine dichte Ansammlung von heissen Gasteilchen; in anderen Worten also: eine bestimmte Art von Plasma. Denn Plasma (oft spricht man auch vom vierten Aggregatzustand) ist im physikalischen Kontext als eine geladene Teilchenmenge mit bestimmten Eigenschaften definiert. So kann sich das eine Plasma vom anderen in Dichte, Druck, Temperatur und Ionisationsgrad unterscheiden. Dabei wird der Ionisationsgrad in Prozent angegeben und sagt aus, wie viele der vorhandenen Teilchen ionisiert, also geladen sind. Damit die Ionisation stattfinden kann, also neutrale Teilchen positiv oder negativ geladen werden können, werden riesige Mengen an Energie benötigt; und solch grosse Energie wird durch die Kernfusion in der Sonne freigesetzt. Dies bedeutet, dass sich durch das Laden neutraler Atome oder Moleküle ein Plasma bildet, das nur wieder in einen neutralen Zustand zurückgeführt werden kann, wenn der Energieverlust *aus* ihm grösser ist als die Energiezufuhr *zu* ihm. Diesen Vorgang würde man dann „Rekombination“ nennen.<sup>2</sup>

#### 2.2.1 Sonnenwind

Nun ist die Sonne aber weitaus komplexer beschaffen als nur eine Kugel aus Plasma. So besitzt sie etwa, ähnlich wie die Erde, ein Magnetfeld. Dasjenige der Sonne zeigt sich im Vergleich zu unserem jedoch sehr kompliziert und unruhig. Darum kann es zu schleifenartigen Ausbuchtungen des Magnetfelds kommen. Zu sehen sind diese als dunkle Flecken auf der Oberfläche der Sonne, auch „Sonnenflecken“ genannt. Grund dafür sind die Magnetfeldlinien, die bei der Sonne aus- oder eintreten. An diesen Stellen kommen die Hitze und das Licht der Sonne weniger stark nach aussen.

---

<sup>1</sup> (Nilssen 2006)

<sup>2</sup> (Podbregar 2019)

Dementsprechend wirken diese Flecken für uns, als wären sie dunkel oder sogar schwarz. Wenn sich solch eine Schlaufe genügend ausdehnt, können sich Magnetfeldlinien neu verknüpfen. Bildlich gesehen ist es wie ein Gummiband, das reißt und zwei einzelne Systeme von Magnetfeldlinien bildet. Dabei wird die ganze Plasmamasse, welche sich zu dieser Zeit in der Schleife befand, von der Sonne weg in das Weltall hinausgeschleudert. Der Fachbegriff dafür lautet „koronaler Massenauswurf“.<sup>3</sup>

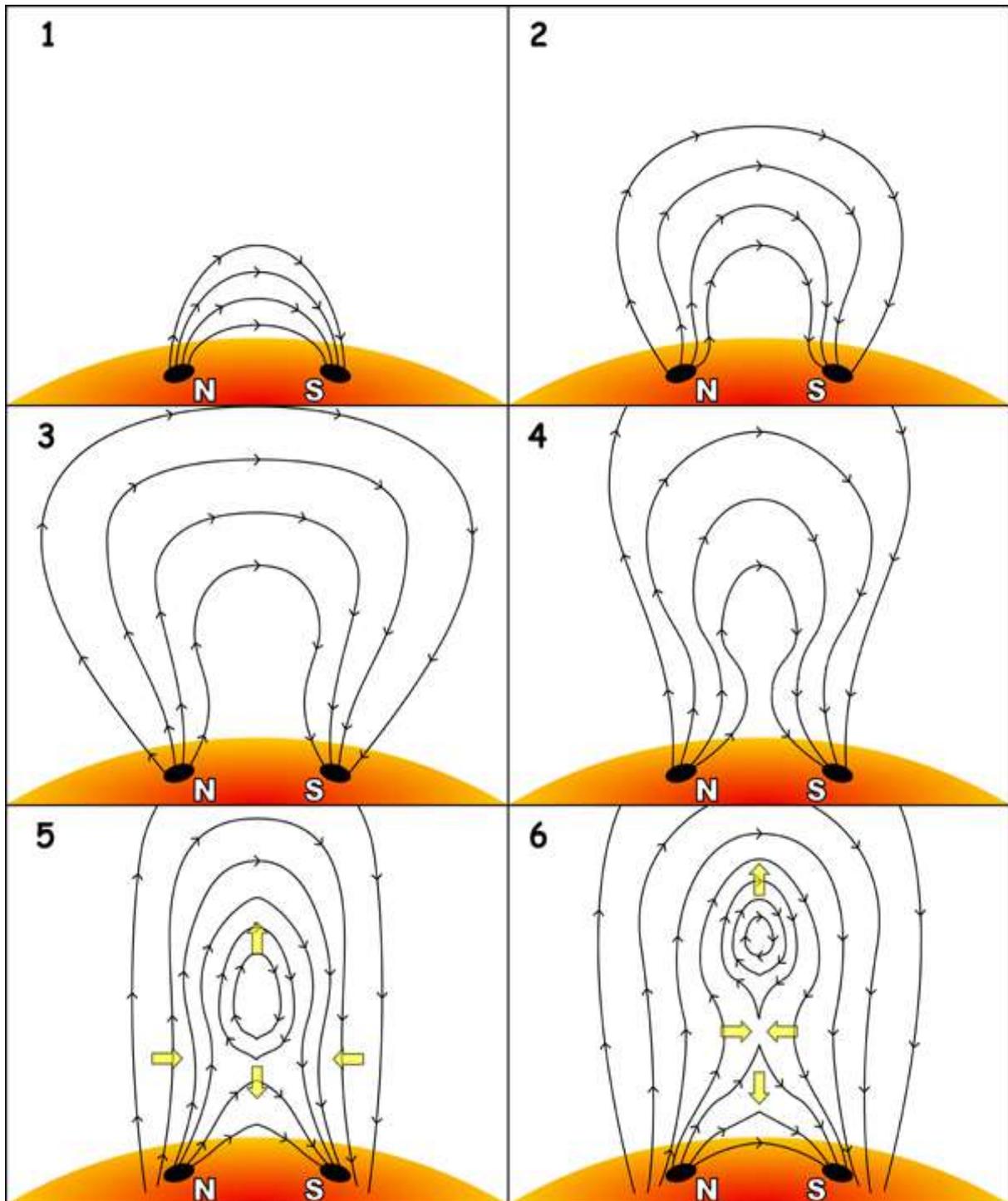


Abbildung 1: Koronaler Massenauswurf (Exploring Magnetism 2005)

<sup>3</sup> (Bayerischer Rundfunk 2019)

Dieser ist sowohl der massenreichste als auch der schnellste und somit für das Polarlicht der ausschlaggebende Teil des sonst stetigen Teilchenstroms der Sonne – der sogenannte „Sonnenwind“. Durch diesen verliert die Sonne pro Sekunde insgesamt eine Million Tonnen ihrer Masse.<sup>4</sup> Dies tönt nach enorm viel; ist es auch – aber nicht im Vergleich zur gesamten Masse der Sonne. Denn diese würde genügen, den Sonnenwind weitere 63 Billionen Jahre aufrecht zu erhalten; wobei diese Rechnung nur in der Theorie aufgeht, da alle anderen Faktoren, welche die Lebensdauer der Sonne beeinflussen, ignoriert wurden. Bei unserer Sonne setzt sich dieser Teilchenstrom hauptsächlich aus ionisiertem Wasserstoff (Protonen und Elektronen) zusammen.<sup>5</sup> Der Ionisationsgrad des Sonnenwinds liegt folglich nahe bei 100 Prozent.

Für das Polarlicht entscheidend sind die Häufigkeit und die Intensität dieser Massenauswürfe. Wissenschaftler konnten mittels gesammelter Daten einen Sonnenaktivitätszyklus von elf Jahren feststellen.<sup>6</sup> Alle elf Jahre gibt es somit einen Höhepunkt, bei welchem es zu hunderten von Sonnenflecken pro Monat kommen kann. Beim Tiefpunkt hingegen kann es manchmal mehrere Monate lang keinen einzigen Sonnenfleck geben.<sup>7</sup> Die theoretische Grundregel lautet: Je mehr Sonnenflecken sich vorfinden, desto eher beziehungsweise häufiger entsteht das Polarlicht.

### 2.3 Weg des Sonnenwinds

Das Plasma der Sonne wurde nun also durch die Massenauswürfe in das Weltall kapultiert und fliegt in allen möglichen Richtungen von der Sonne weg. In diesem Kontext spricht man auch vom „schnellen Sonnenwind“. Analog zu dem ist der stetige Sonnenwind der langsame. Im Rahmen meiner Arbeit werde ich mich auf den schnellen fokussieren, da dieser für die Polarlichter eine wichtigere Rolle spielt; weshalb dies so ist, wird später noch erklärt. Der schnelle Sonnenwind bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 500 bis 800 Kilometer pro Sekunde.<sup>8</sup> Sprich: er durchquert die Schweiz zwei- bis dreimal in nur einer Sekunde. Verglichen mit dem Licht, welches in der gleichen Zeit siebeneinhalb Mal die Erde umkreist, ist der Sonnenwind aber sehr langsam. Folglich hat er von der Sonne bis zur Erde auch zwei bis vier Tage – und nicht nur acht Minuten wie das Licht. Diese ungewisse Reisezeit erschwert die Prognose der Polarlichter enorm. Wissenschaftler sehen zwar, wie viele Sonnenflecken die Sonne zurzeit gerade aufweist, können daraus aber nicht exakt berechnen, wann genau uns das Plasma erreichen wird. Die Prognose stimmt demnach nur auf plus minus ein paar Tage genau. Für die Erforschung des Sonnenzyklus ist dies nicht weiter tragisch – es sind eher die Touristen, die darunter leiden, da sie unmöglich eine aussagekräftige Prognose für ein ersehntes Spektakel am Himmel erhalten.

#### 2.3.1 Kontakt mit dem Magnetfeld

Wirklich spannend wird es für uns, wenn der Sonnenwind auf das Magnetfeld der Erde trifft. Jenes dient uns nämlich als Schutzschild vor dem nicht ungefährlichen

---

<sup>4</sup> (Wang 2010)

<sup>5</sup> (Wissenschaft 2017)

<sup>6</sup> (Bayerischer Rundfunk 2019)

<sup>7</sup> (Weltraumwetter 2019)

<sup>8</sup> (Neitram 2019)

Sonnenwind: Hätte unsere Erde nämlich kein Magnetfeld, so würden uns die geladenen Teilchen ungehindert treffen und ein Überleben unmöglich machen. Die energie-reichen Teilchen würden nicht nur unser ganzes Netzwerk von Elektrizität lahmlegen, sondern auch genetische Schäden bis hin zu Krebs beim Menschen verursachen. Erstere Auswirkungen bekommen wir bei enormen koronalen Massenauswürfen sogar trotz des Schutzes durch das Magnetfeld zu spüren. So kann es hin und wieder dazu kommen, dass Stromnetze von ganzen Kontinenten geschwächt werden oder sogar für kurze Zeit zusammenbrechen.<sup>9</sup> Die Plasmamasse hat solch eine Kraft, dass unser Magnetfeld wortwörtlich verformt wird. Bei dem schnellen Sonnenwind geschieht diese Verformung im Vergleich zum langsamen Sonnenwind extrem stark und reicht somit aus für das Phänomen des Polarlichts.<sup>10</sup> Konkret heisst das also, dass auf jener Seite der Erde, die Tag hat, das Magnetfeld zusammengestaucht, auf der anderen Seite dafür in die Länge gezogen wird. Bildlich kann man sich den Sonnenwind als einen Fluss mit starkem Zug vorstellen. Die Erde mit ihrem Magnetfeld wäre dann wie ein fester Stein mitten in diesem Fluss. Das Plasma umströmt die Erde wie das Wasser den Stein. Folglich bildet sich zwischen Magnetfeld und Sonnenwind eine sogenannte „Bugstosswelle“, an welcher die meisten Teilchen abprallen und so an der Erde vorbeiziehen.<sup>11</sup>

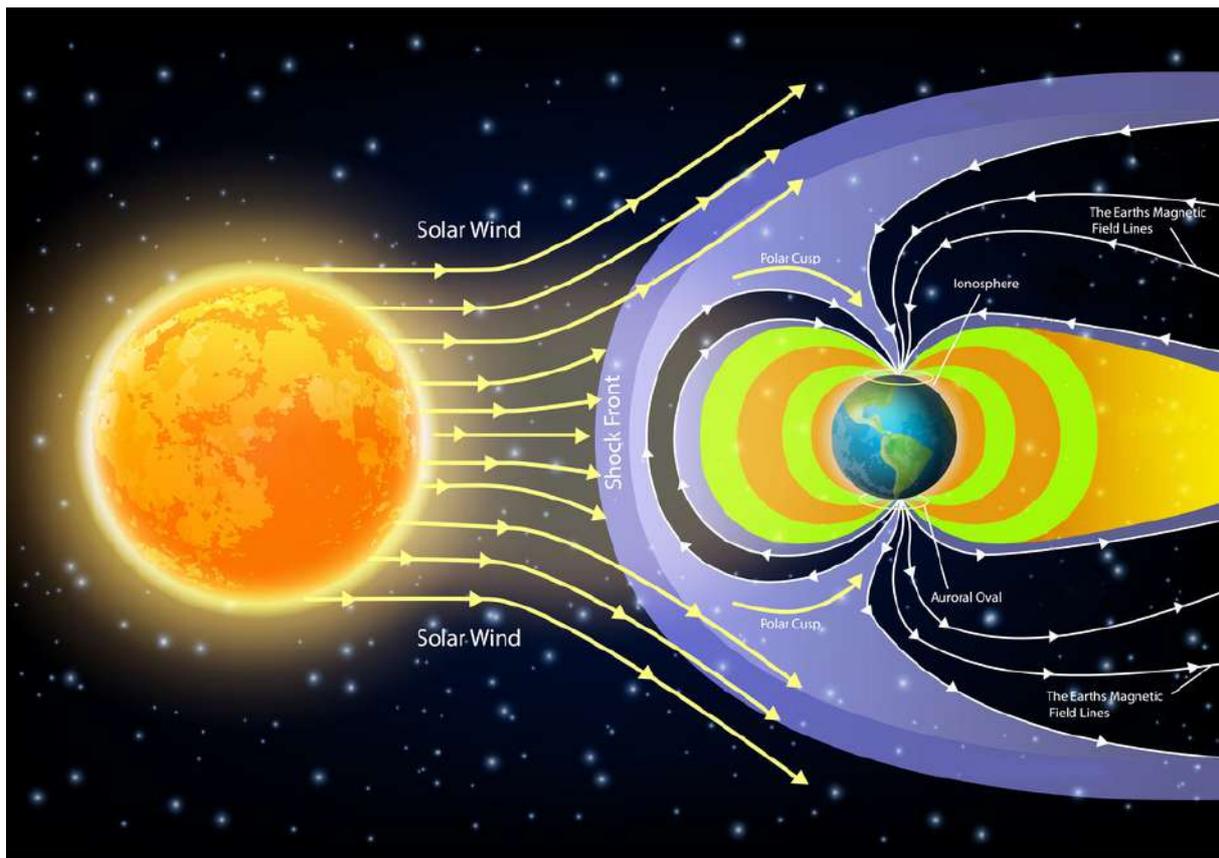


Abbildung 2: Sonnenwind trifft auf Magnetfeld (Siberianart 2019)

<sup>9</sup> (Merkel 2010)

<sup>10</sup> (Weltraumwetter 2019)

<sup>11</sup> (Specktor 2018)

Nun ist es wichtig zu verstehen, dass der Sonnenwind vor allem aus positiv oder negativ geladenen Teilchen besteht. Wenn also ein Teilchen des Sonnenwinds auf ein Magnetfeld trifft, erzeugt dies eine Kraft. Die Richtung dieser Kraft lässt sich mit der „Linken-Hand-Regel“ von Fleming relativ einfach bestimmen.<sup>12</sup> Hierbei werden Dau-

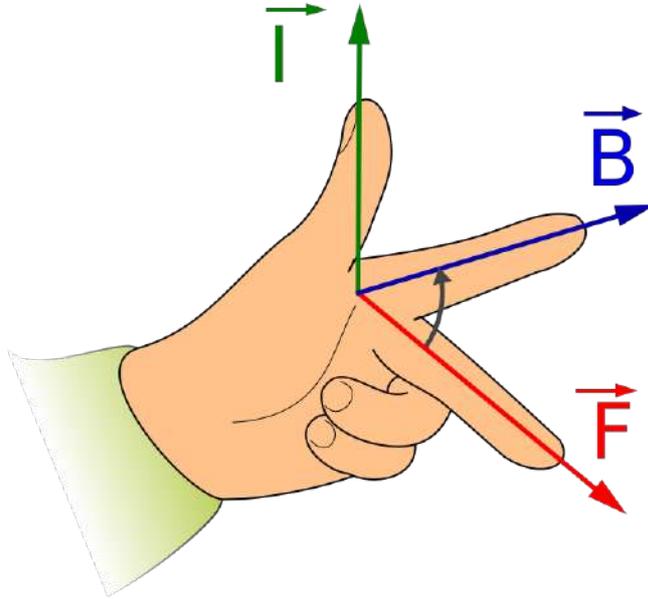


Abbildung 3: Linke-Hand-Regel (Wikipedia 2011)

men, Zeige- und Mittelfinger der linken Hand wie in einem dreidimensionalen Koordinatensystem gehalten. Man stelle sich vor, man wäre ein Teilchen des Sonnenwinds, das kurz vor dem Magnetfeld ist und zur Erde schaut. Nun zeigt der Daumen die Richtung des Stroms ( $\vec{I}$ ) an. Das wäre im Fall der negativ geladenen Teilchen von der Sonne zur Erde und bei den positiv geladenen genau umgekehrt. Der Zeigefinger korrespondiert der Richtung der Magnetfeldlinien ( $\vec{B}$ ). Diese bewegen sich vom magnetischen Nordpol zum magnetischen Südpol. Aber der magnetische *Nord*pol befindet sich im geografischen *Süden*. Nord und Süd ist also gewissermassen vertauscht.

Der Zeigefinger muss ergo zum geografischen Norden zeigen. Sobald man zwei Richtungen fixiert hat, ist die dritte auch klar: Der Mittelfinger, welcher die Kraft ( $\vec{F}$ ) darstellt, zeigt also nach links bei negativen Teilchen und nach rechts bei positiven. Daraus lässt sich schliessen, dass die meisten Teilchen des Plasmas nach dieser Umleitung links beziehungsweise rechts an der Erde vorbeiziehen.

Es gibt jedoch noch eine zweite Regel in Bezug auf Strom und Magnetfeld; die „Rechte-Daumen-Regel“: Diesmal wird der Daumen der rechten Hand ausgestreckt,

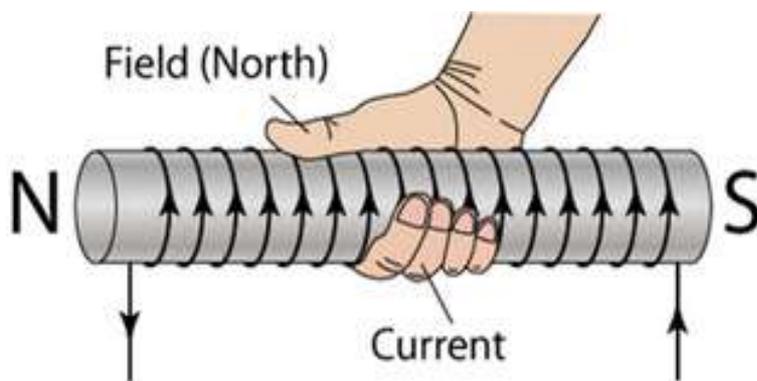


Abbildung 4: Rechte-Daumen-Regel (12PHY College 2017)

und die restlichen Finger umklammern einen imaginären Stab. Nun zeigt der Daumen die Richtung der Magnetfeldlinien an, während alle anderen Finger die Drehrichtung des Stroms symbolisieren.<sup>13</sup> Somit ist zu erkennen: es besteht ein Potenzial dafür, dass die geladenen Teilchen beginnen, sich um die Feldlinien zu kreisen.

Genau dies machen die einen auch; zwar nur eine Minderheit, aber es genügt für die Entstehung der Polarlichter: Einige Teilchen des Plasmas werden also sozusagen von unserem Magnetfeld eingefangen und nicht mehr losgelassen. Diese bewegen sich

<sup>12</sup> (Keith Johnson 2015)

<sup>13</sup> (Keith Johnson 2015)

dann spiralförmig entlang den Magnetfeldlinien, welche näher bei der Sonne liegen, auf die Pole der Erde zu. Währenddessen werden einige dieser Magnetfeldlinien aber von der Kraft des Sonnenwinds aufgebrochen; man könnte sagen, dass sie vom Teilchenstrom verdrängt werden und sich deshalb auf die Schattenseite der Erde verschieben müssen. Dies sieht auf den meisten wissenschaftlichen Animationen so aus, als würden sich die einzelnen Magnetfeldlinien um die Erde herum falten. Nicht länger vom Sonnenwind gestört, können sie sich auf der Schattenseite der Erde dann wieder verbinden. Die eingefangenen Teilchen, welche um die Magnetfeldlinien kreisen, machen diese Faltbewegung mit. Folglich können sie sowohl von der Seite, welche der Sonne zugewandt ist, als auch von jener, die von ihr abgewandt ist, auf die Erde zurasen. Dabei werden sie zusätzlich durch die magnetischen Kräfte und durch die Gravitation der Erde beschleunigt. Je näher sie nun den Polen kommen, desto dichter beieinander sind sie, weil die einzelnen Feldlinien zu den Polen hin ja immer näher zueinander zu liegen kommen.

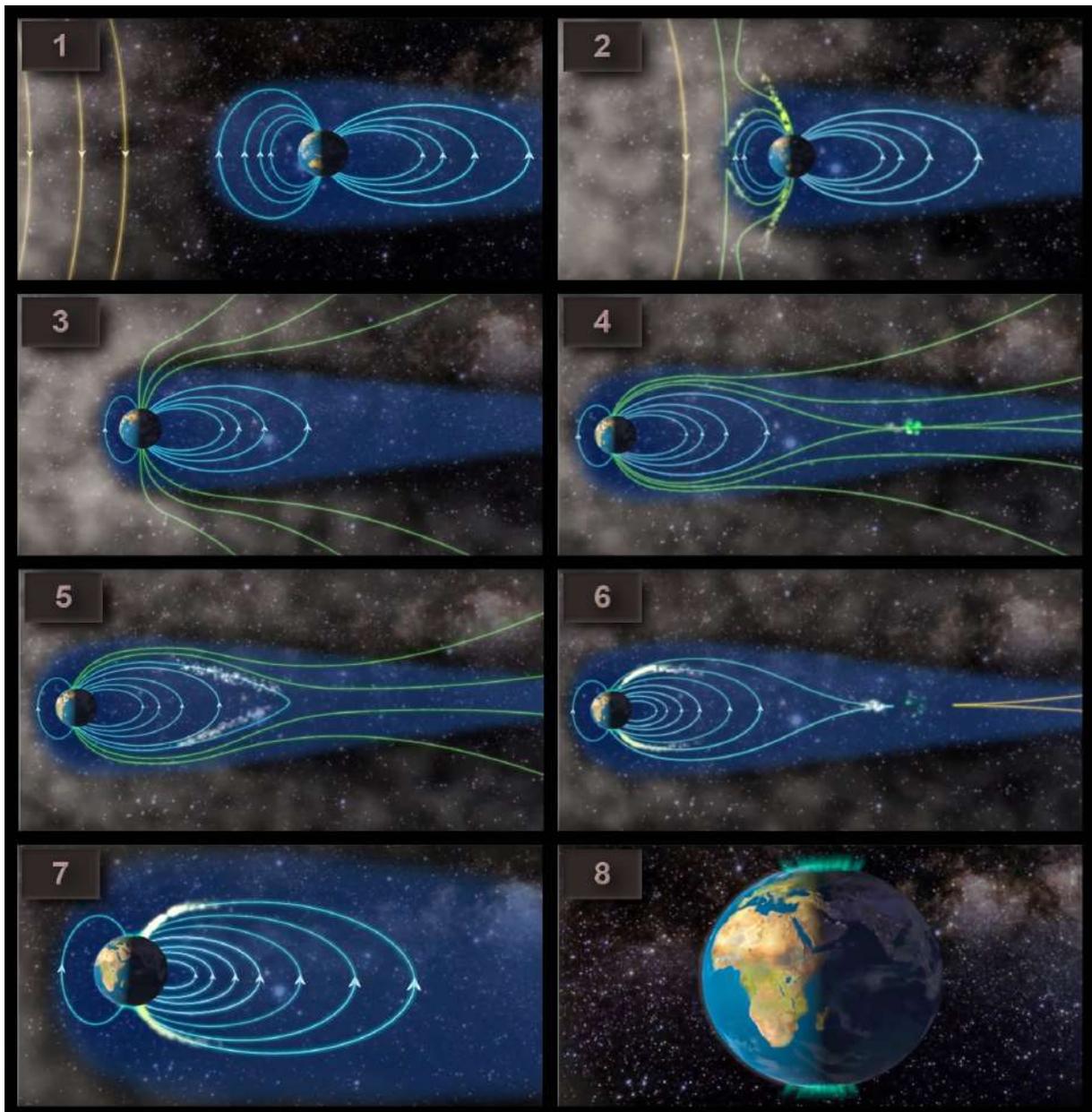


Abbildung 5: Brechende Magnetfeldlinien (Youtube 2013)

## 2.4 Eintritt in die Erdatmosphäre

Bevor die eingefangenen Plasmateilchen aber die Erdoberfläche treffen, geraten sie in Kontakt mit dem zweiten Schutzschild der Erde: die Atmosphäre. Auf der Höhe des Polarkreises tritt der Sonnenwind in die zweitoberste Schicht der Erdatmosphäre ein. Die oberste Schicht, die Exosphäre, ist nicht von grosser Bedeutung, da die Dichte der Gase viel zu niedrig ist. Erst in der Thermosphäre fangen die Teilchen der Sonne an, mit den Atomen der Atmosphäre zu reagieren. Denn in dieser Schicht ist die Dichte genau so tief, dass für die Beschleunigung einzelner Teilchen noch genügend Raum bleibt, und genau so hoch, dass die beschleunigten Teilchen auf ein anderes Atom treffen, ehe sie noch weiter in die Erdatmosphäre eindringen. Sobald ein Plasmateilchen mit genügend Geschwindigkeit auf ein Atom – in unserer Atmosphäre hauptsächlich Stickstoff- oder Sauerstoffatom – trifft, kommt es zur so genannten „Stossanregung“ des Atoms. Wenn man vom Prozess der Anregung spricht, verwendet man für die beteiligten Atome oft auch die Begriffe „Projektil“ und „Target“.<sup>14</sup>

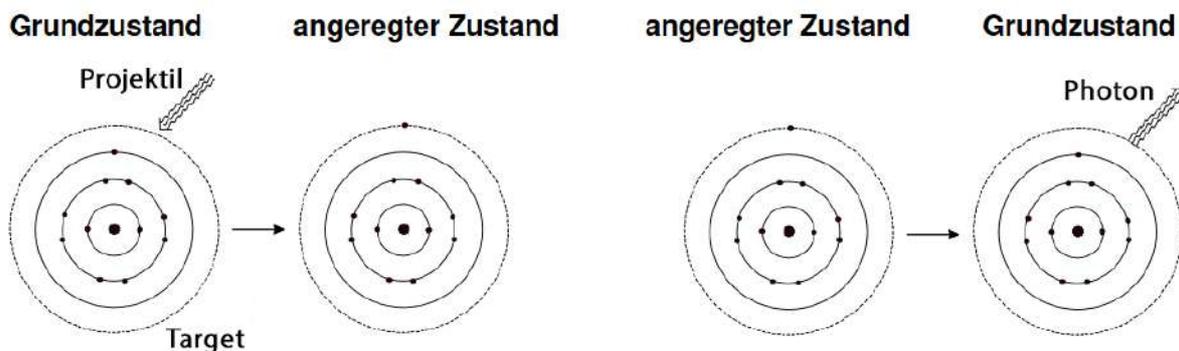


Abbildung 6: Stossanregung / Abregung (Landesbildungsserver 2019)

In Bezug auf die erste Reaktion wäre also das Teilchen aus dem Sonnenwind das Projektil und das Stickstoff- beziehungsweise Sauerstoffatom das Target. Bei einer solchen Anregung wird nun die Energie des Projektils verwendet, um beim Target ein bestimmtes Elektron um eine Elektronenschale weiter nach *aussen* zu bewegen. Mit anderen Worten: das Target befindet sich dann in einem angeregten Zustand, in einem Eigenzustand höherer Energie. Jene Energie kann wiederum auf ein Elektron der äusseren Schale übertragen werden, was zur Folge hat, dass dieses eine Schale nach *innen* fällt. Dieser Prozess heisst „Abregung“ oder auch „Stoss zweiter Art“. Im Zusammenhang mit diesem Übergang des Energielevels des Atoms wird immer Energie an die Umgebung abgegeben. Nicht selten ist diese Energie in der Form eines Photons.<sup>15</sup> Wenn nun genügend Photonen zusammen einen Strom bilden, so entsteht Licht; in diesem speziellen Beispiel eben: das Polarlicht.<sup>16</sup>

Nun gibt es aber noch weitere mögliche Reaktionen zwischen Projektil und Target: Bei einem sehr energiereichen Projektil kann es anstelle der Stossanregung zu einer *Stossionisation* kommen. Das betroffene Elektron wird hierbei nicht nur eine Schale nach aussen bewegt, sondern verlässt das Atom vollständig. Das zurückgebliebene Atom

<sup>14</sup> (Barnert 1998)

<sup>15</sup> (Bleck-Neuhaus 1992)

<sup>16</sup> (Lern Helfer 2010)

befindet sich dann in ionisiertem und nicht in angeregtem Zustand. Aber auch in diesem Fall kommt es dazu, dass ein Elektron eine Schicht nach innen wandert, da es den Platz des herausgeschlagenen Elektrons ersetzen muss. Somit ist die Emission (Freisetzung, Ausstoss) eines Photons nicht ausgeschlossen. Zusätzlich bekommt das zuvor herausgeschlagene Elektron nun die Funktion eines Projektils. Das Ganze ist also eine Kettenreaktion, in der immer mehr Teilchen die Atome der Thermosphäre anregen. Eine weitere mögliche Reaktion ist der „Auger-Effekt“.<sup>4</sup> Die Energie der Abregung kann nämlich auch durch die Emission eines Elektrons der äussersten Schale freigesetzt werden. Dieses Elektron, auch „Auger-Elektron“ genannt, ersetzt sozusagen das Photon. Dafür stellt nun aber auch dieses Elektron ein neues Projektil dar, welches imstande ist, in einem anderen Atom ein Photon freizusetzen. Als Fazit lässt sich sagen, dass jede Reaktion zwischen Sonnenwindteilchen und Atom der Thermosphäre direkt oder indirekt, sofort oder nach einer Kettenreaktion, zur Emission eines Photons – sprich zur Entstehung des Polarlichts – führen kann.

## 2.5 Von der Erde aus gesehen

In einem nächsten Schritt will man natürlich verstehen, wie eine solche Emission von Photonen überhaupt aussieht, wenn man es von der Erde aus betrachtet. Hierbei ist wichtig zu verstehen, dass es alles andere als selbstverständlich ist, jemals ein Polarlicht erleben zu dürfen, da für ein Spektakel dieser Art viele Faktoren zusammenpassen müssen.

### 2.5.1 Verschiedene Faktoren

Die Sonne muss, wie bereits erwähnt, genügend aktiv sein, was den Sonnenwind angeht.<sup>17</sup> Je niedriger die Sonnenaktivität, desto unwahrscheinlicher das Polarlicht, da die Teilchen entweder zu wenig dicht oder zu langsam sind. Da die Aktivität viel mehr durch den Elf-Jahres-Zyklus bestimmt wird und sich weniger von Tag zu Tag ändert, kann man auf einer Reise während einer inaktiven Phase schlecht auf eine aktive warten. Logischer wäre, wenn man seine Ferien viele Jahre im Voraus schon planen würde; dies macht aber kaum jemand. Deshalb bleibt es dabei, dass viele Leute, die das Polarlicht sehen wollen, einfach auf eine genügend hohe Aktivität hoffen. Denn in einem Tiefpunkt des Zyklus ist es lediglich unwahrscheinlicher, das Polarlicht zu sehen, nicht aber unmöglich.

Wesentlich entscheidender sind jedoch rein erdbezogene Faktoren. In den meisten Fällen von enttäuschten Touristen waren es die Umstände der Umgebung, die eine Sicht auf das Spektakel verhinderten. Der geografische Ort ist die erste Bedingung, die vorteilhaft gewählt werden muss. Je nach Intensität des Magnetfelds der Erde ist das Polarlicht auf unterschiedlichen Breitengraden sichtbar. Bei einem aktiveren Magnetfeld verschiebt sich das Polarlichtoval – die Region in Form eines Bandes um die Pole, wo man Polarlichter erwarten kann – in Richtung Äquator. Am allerhäufigsten befindet sich dieses Oval auf Breitengraden in der Nähe der Polarkreise.

---

<sup>17</sup> 2.2.1 Sonnenwind

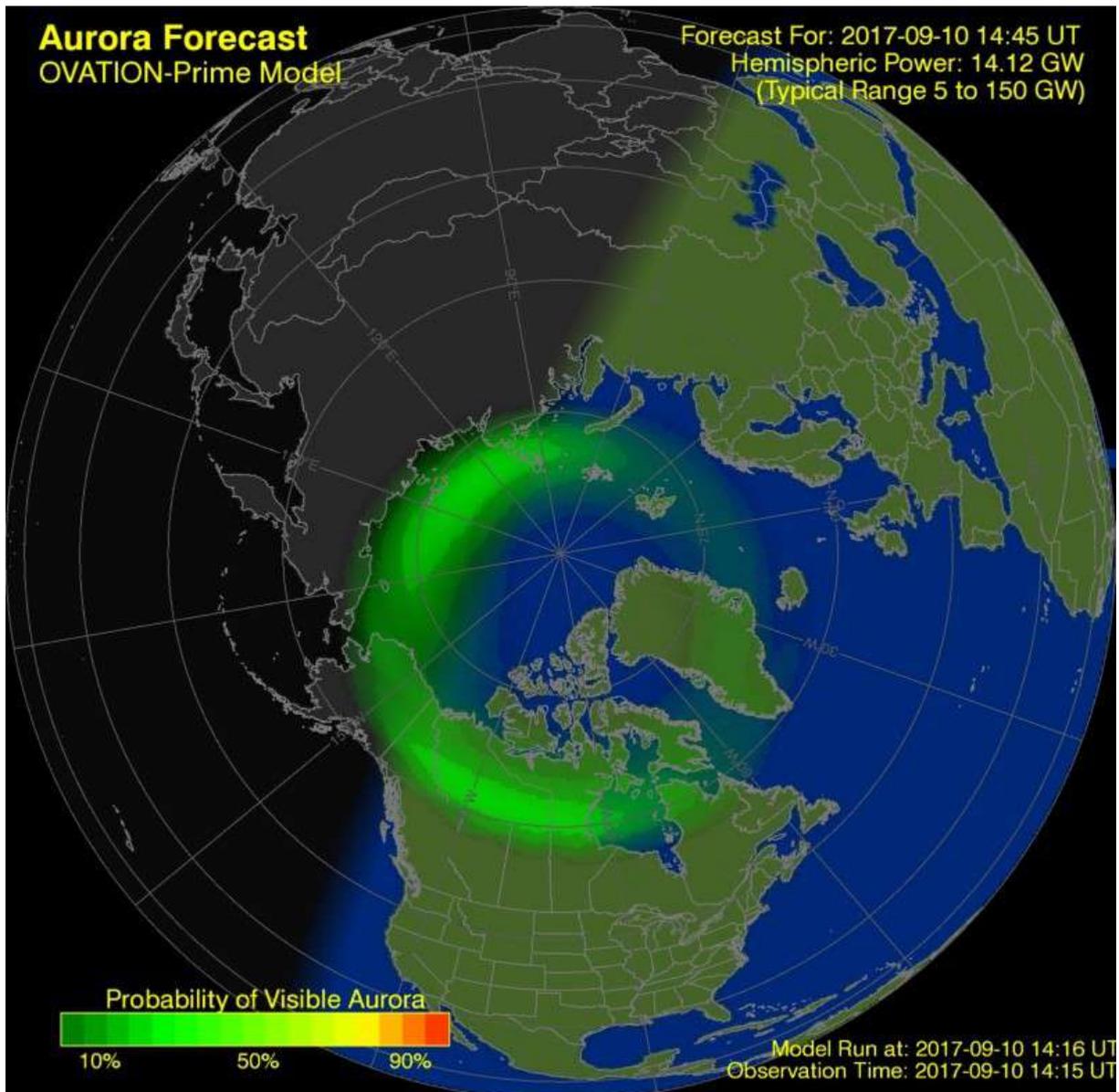


Abbildung 7: Polarlichtoval (Astronomie 2017)

Dies hat zur Folge, dass auch die Jahreszeit von Bedeutung ist. Denn ab diesen Breitengraden gegen die Pole hin hat man im Sommer mindestens einen ganzen Tag lang Sonnenlicht (die Sonne geht nie ganz unter). Generell wird es im Sommer also kaum richtig dunkel. Da das Polarlicht ein eher schwaches Licht ist, sieht man es unmöglich bei Dämmerung, geschweige denn bei Tageslicht. Somit kann der Mensch das Polarlicht nur im Winterhalbjahr erblicken.

Nun kann aber nicht nur das Licht der Sonne, sondern auch jenes von Städten, Schiffshäfen, Strassenlaternen etc. einen riesigen Störfaktor darstellen und sollte deshalb für das Beobachten des Polarlichts vermieden werden.

Zudem herrscht in Regionen des nördlichen Polarkreises nicht selten bewölktetes Wetter. Offensichtlich spielt sich das Polarlicht *oberhalb* der Wolken ab und wäre somit bei solchem Wetter nicht sichtbar.

Beim südlichen Polarkreis ist das Problem, dass es kaum Land in den entsprechenden Breitengraden gibt; dort befindet sich überwiegend Meer. Dies ist auch der Grund,

weshalb das Nordlicht (Aurora borealis) um einiges berühmter ist als das Südlicht (Aurora australis).

Ein weiterer Faktor ist die Dauer der Polarlicht-Schauspiele. In der Regel dauern sie zwischen 10 und 20 Minuten; im Ausnahmefall über eine Stunde. Dementsprechend müssen Polarlicht-Jäger viel Geduld haben und unter Umständen stundenlang auf ein verhältnismässig kurzes Ereignis warten.

Wenn aber alle Faktoren vorteilhaft zusammenspielen und sorgfältig berücksichtigt werden, ist die Wahrscheinlichkeit für eine Sicht auf das Polarlicht relativ hoch. So hoch sogar, dass einige Leute, die in polarkreisnahen Breitengraden leben, nicht mehr wirklich über dieses Wunder staunen; und dies obwohl das Polarlicht ganz verschiedene Farben, Formen und Helligkeiten hat und ein wahres Wunderwerk in den Himmel zaubern kann.

### 2.5.2 Farbe des Polarlichts

Für die Farbe ist entscheidend, welches Atom der Atmosphäre das Photon emittiert. Ähnlich zum Aufbau der Luft, die wir einatmen, dominieren auch in der Thermosphäre die Stickstoff- und Sauerstoffatome. Deshalb sind praktisch in allen Fällen des Polarlichts das eine oder das andere Atom Teil der Reaktion. Bei der Ionisation von Stickstoffatomen kann es nun zu blauem und violetterem Licht kommen. Dabei hat das blaue Licht eine Wellenlänge von 391,4nm und das violette von 427,8nm.<sup>18</sup> Die Sauerstoffatome hingegen sind für das grüne und das rote Polarlicht verantwortlich. Diese Lichter sind mit einer Wellenlänge von 557,7nm und 630,3nm um einiges kurzwelliger.



Abbildung 8: Blaues und violettes Polarlicht (Fotointern 2019)

---

<sup>18</sup> (Barth 1999)



Abbildung 9: Grünes, rotes und gelbes Polarlicht (D. Messmer 2019)

Die grünen Polarlichter kommen mit Abstand am häufigsten vor. Dies hängt mit dem Prozess der Ionisation zusammen, nämlich wie folgt: Je nach Farbe des Polarlichts dauert die oben geschilderte Reaktion unterschiedlich lang: Der Prozess von der Ionisation bis zur Photonenfreigabe dauert bei zum Beispiel grünem Licht nur eine Sekunde, bei rotem Licht hingegen knapp zwei Minuten.<sup>19</sup> Da ein Atom während dieser Reaktion nicht gestört, also nicht von einem weiteren Atom getroffen werden darf, ist die Entstehung von grünem Polarlicht deutlich wahrscheinlicher als jene von rotem Polarlicht. Die Prozessdauer ist zugleich auch das Kriterium für die Höhe eines jeweiligen Lichts. Das grüne Licht ist in einer Höhe von 120 bis 140km über dem Erdboden am intensivsten. Das rote Licht hingegen spielt sich vor allem in einer Höhe von knapp über 200km ab, da es dort wegen der geringeren Dichte der Luftteilchen weniger gestört wird.<sup>20</sup> Aus diesem Grund sind starke Polarlichter, die bis in die tieferen Breitengraden sichtbar sind, meistens rot, weil die Sonnenwindteilchen bei einem hochaktiven Erdmagnetfeld (was Voraussetzung ist für tief-breitengradige Polarlichter) weniger weit in die Atmosphäre eindringen können.

Im Ausnahmefall gibt es auch gelbes Polarlicht, welches eine additive Mischung der anderen Farben ist. Für das menschliche Auge wirkt dieses hellgelbe Licht tendenziell aber eher weiss. Wo ganz genau sich das blaue und violette Polarlicht der Stickstoffatome abspielt – und weshalb es noch seltener als das rote ist – dies scheint mir, aufgrund von starken Abweichungen zwischen den verschiedenen Quellen, noch ungenügend erforscht zu sein.

<sup>19</sup> (Pfooser 2018)

<sup>20</sup> (Schlegel 2001)

### 2.5.3 Form des Polarlichts

Unabhängig von der Farbe werden alle Polarlichter vier verschiedenen Formen zugeteilt. Bei ruhigeren, statischen Erscheinungen spricht man von einem „Bogen“. In dieser Form bewegt sich das Polarlicht kaum und ist oftmals nur als einzelner Streifen sichtbar. (Abbildung 10)

Bei etwas mehr Aktivität kann eine komplexere Struktur entstehen; es entwickeln sich sogenannte „Bänder“. Diese erstrecken sich unter Umständen über den ganzen Nachthimmel und wechseln ihre Farbe und ihr Muster relativ schnell. Die „Spiralen“ und „Wellen“ sind wesentlich spannender als ein Polarlichtbogen. (Abbildung 11)

Auch sehr eindrücklich sind die „Vorhänge“. Anders als bei den ersten beiden Formen richtet sich das Polarlicht in diesem Fall vertikal und nicht horizontal aus. Man nennt diese Form „Vorhang“, weil eine wellige und sanft flatternde Bewegung zu erkennen ist. (Abbildung 12)

Die spektakulärste Form ist die „Korona“. Grundsätzlich zeigt die Korona nicht eine eigene Form, sondern nur eine andere Perspektive auf einen Polarlichtvorhang. Per Definition erscheint die Korona direkt über dem Betrachter und bewegt sich logischerweise wie der Vorhang auch sehr aktiv. (Abbildung 13)

Eine Ausnahme sind die „Flecken“, welche man üblicherweise am Anfang oder am Ende eines Schauspiels sehen kann. Das Polarlicht ist zu diesem Zeitpunkt extrem schwach und sieht aus wie eine grünliche Wolke am Horizont. Je nach Quelle gelten Flecken gar nicht als eine eigene Form. (Abbildung 14)



Abbildung 10: Polarlichtform: "Bogen" (D. Messmer 2019)



*Abbildung 11: Polarlichtform: "Bänder" (D. Messmer 2019)*



*Abbildung 12: Polarlichtform: "Vorhang" (M. Messmer 2019)*



Abbildung 13: Polarlichtform: "Korona" (D. Messmer 2019)



Abbildung 14: Polarlichtform: "Flecken" (D. Messmer 2019)

#### 2.5.4 Helligkeit des Polarlichts

Obwohl das Polarlicht meistens ein sehr schwaches Licht ist, kann es in extremen Umständen so hell wie der Vollmond werden. Wissenschaftler kategorisieren die Helligkeit mit dem IBC (International Brightness Coefficient). Die erste Stufe IBC 1 ist nur etwa so hell wie die Milchstrasse. IBC 2 und IBC 3 werden verglichen mit verschiedenen Arten von Wolken, die vom Mond beschienen werden. Bei der vierten und letzten Stufe IBC 4 ist das Polarlicht, wie bereits gesagt, ähnlich hell wie der Vollmond.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> (Schlegel 2001)

### 3 Experiment

Da meine Arbeit zum Gebiet der Physik gehört, war es naheliegend, ein thematisches Experiment durchzuführen. Meine Referentin zeigte mir auf dem Internet eine Anleitung zum Aufbau eines Polarlicht-Modells.<sup>22</sup> So entschied ich mich, gemäss dieser Anleitung ein solches Modell experimentell nachzubauen.

#### 3.1 Ziel des Experiments

Mit diesem Experiment wird das Polarlicht in einer Vakuumkammer möglichst genau nachgestellt. William Gilbert war der erste Mensch, der sich mit einem ähnlichen Experiment befasste, welches das Modell – er nannte es „Terrella“ – der Erde beinhaltete. Er untersuchte zu dieser Zeit (um das Jahr 1600) jedoch ausschliesslich das Magnetfeld der Erde. Erst als der norwegische Physiker Kristian Birkeland das Experiment im Jahr 1895 weiterführte, wurde das Polarlicht zum Hauptthema. Sein Ziel war es, durch das Modell das Polarlicht besser zu verstehen sowie die Bahn der Sonnenwindteilchen zu berechnen.<sup>23</sup>

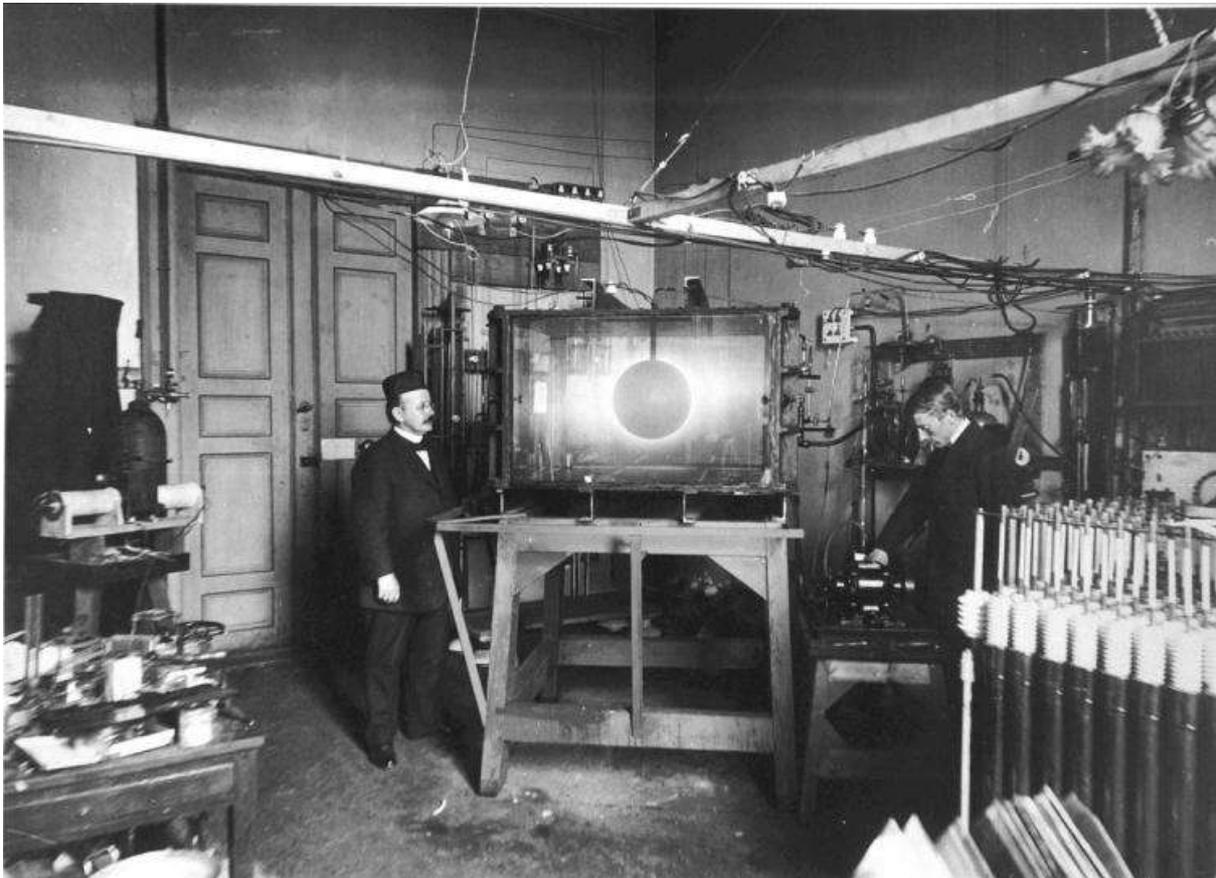


Abbildung 15: Experiment von Kristian Birkeland (links) (Lynnebakken 2017)

Das Experiment, welches ich nach der moderneren Anleitung<sup>24</sup> durchführte, beschäftigt sich vor allem mit dem Darstellen des Polarlichts und nicht mit dem Berechnen. So wurde es auch zu meinem Ziel, das Polarlicht so gut es geht zu simulieren; und zwar

<sup>22</sup> (Jeanjacquot, Science in School 2014)

<sup>23</sup> (Plasma-Universe 2018)

<sup>24</sup> (Jeanjacquot, Science in School 2013)

an der Kantonsschule Küsnacht selbst. Denn die meisten Materialien, die für das Modell benötigt werden, benutzen wir auch schon im Physikunterricht. Die Vorstellung, an meiner eigenen Schule – durch das Kombinieren von mir bereits bekannten Gegenständen – einer meiner Lebensträume im Modell zu verwirklichen, war sehr motivierend.

### 3.2 Prinzip und Aufbau<sup>25</sup>

Die Idee hinter dem Experiment ist sehr einfach: man versucht, an der Oberfläche einer kleinen Kugel, welche die Erde symbolisiert, das Polarlicht hervorzurufen. Damit die Repräsentation die Eigenschaften der Erde wahrheitsgetreu widerspiegeln kann, muss die Kugel elektrisch leitfähig sein und ein Magnetfeld um sich herum aufweisen. Dies erreicht man, indem man zum Beispiel eine hohle Messingkugel verwendet und in deren Mitte einen Magneten platziert. Zusätzlich muss sich das Modell der Erde in einer Umgebung befinden, die ähnlich ist wie jene der Thermosphäre, da sich die Polarlichter ja nur dort abspielen können. Um ein System mit so einem tiefen Luftdruck herstellen zu können, benötigt man eine Vakuumpumpe und eine Vakuumkammer, wie die folgende Abbildung es darstellt.

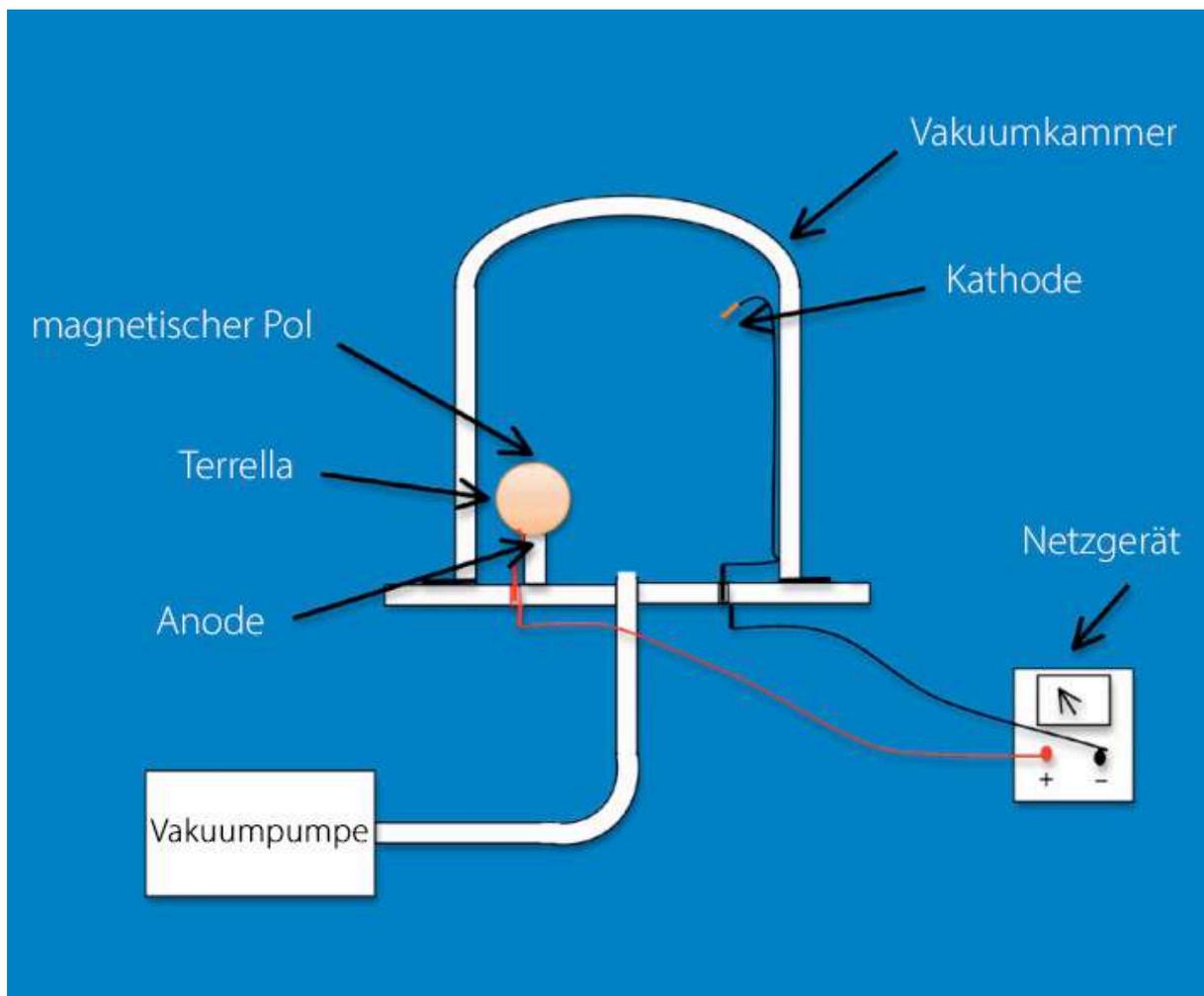


Abbildung 16: Schema zum Experimentaufbau (Jeanjacquot, Science in School 2013) (bearbeitet)

<sup>25</sup> (Jeanjacquot, Science in School 2013)

Wenn man das Experiment nicht in einer Vakuumkammer, sondern unter offenem Himmel durchführen würde, wäre der Luftdruck so hoch, dass die geladenen Teilchen zu wenig Raum hätten, um sich auf das benötigte Tempo zu beschleunigen beziehungsweise ungestört den Prozess der Ionisation durchzulaufen. Logischerweise hat man in der Thermosphäre kein Vakuum. Genauso hat man aber auch in keiner Vakuumkammer ein absolutes Vakuum. Dieser Fakt kommt einem bei diesem Experiment also gerade gelegen.

Um den benötigten Luftdruck – laut Anleitung etwas weniger als 10 Pascal – genau einzustellen, kann man ein Nadelventil gebrauchen.<sup>26</sup> Idealerweise pumpt man demnach so viel Luft aus der Vakuumkammer, wie es nur geht und nähert sich dem Zustand der Thermosphäre dann, indem man in ganz kleinen Portionen Luft zurück in das System fließen lässt. Somit hat man die Terrella und die angepasste Umgebung; was nun noch fehlt, ist ein geladener Teilchenstrom, welcher den Sonnenwind darstellt. Ein solcher Strom lässt sich mit zwei Experimentierkabeln und einem Netzgerät relativ einfach herstellen. Vorab steckt man jeweils das eine Ende eines Kabels in die positive respektive die negative Buchse des Netzgerätes. Nun könnte man den Kreislauf schliessen, indem man auch die anderen beiden Enden verknüpft und hätte, sobald man das Netzgerät in Betrieb setzt, einen Stromfluss vom Minus- zum Pluspol: von der Kathode zur Anode.<sup>27</sup> Der Stromfluss kann bei genügend Volt – die Anleitung rät, 800V zu verwenden – aber auch entstehen, ohne dass die zweiten Kabelenden miteinander verknüpft werden. Sobald und solange die beiden Elektroden genügend nahe beieinander sind, beginnen die Elektronen, von der Kathode zur Anode zu springen. Dieses Phänomen wird in diesem Experiment als Sonnenwind eingesetzt. Dafür muss die Kathode an der Innenseite der Vakuumglocke angeklebt werden. Danach wird die leitfähige Kugel mit der Anode verbunden und so ausgerichtet, dass Kathode, Kugel und Anode eine gerade Linie bilden. Somit übernimmt die Kathode die Funktion der Sonne und die mit der Anode verbundene Kugel jene der Erde. Denn die Elektronen des Stromflusses fliegen – genau wie einige geladene Teilchen des Sonnenwinds – direkt von der Kathode (Sonne) zur Anode (Erde). Dort werden sie kraft des Magnets zu den magnetischen Polen der Kugel geleitet, reagieren mit den Atomen in der Luft und verursachen so ein Leuchten, welches das Polarlicht darzustellen vermag. Da dieses Licht, gleich wie in der Realität, eher schwach ist, empfiehlt es sich, das Experiment in Dunkelheit durchzuführen.

### 3.3 Vorbereitungen

Damit dieses Experiment funktionieren kann, bedarf es einer sorgfältigen Vorbereitung. Ohne klare Konzepte und genau durchdachtem Aufbau wird man, wenn überhaupt, nur schwerlich zu erfolgreichen Resultaten kommen. Sobald man jedoch geeignete Instrumente und eine brauchbare Basis hat, kann man mit dem Experimentieren beginnen. In meinem Beispiel konnte ich den diffizilen Aufbau zum Glück recht detailliert der Anleitung entnehmen.

---

<sup>26</sup> (Gantert 2019)

<sup>27</sup> (Freiholz 2019)

Meine erste Vorbereitung bestand also darin, das nötige Material zu beschaffen. Das Allermeiste hatte die Kantonsschule Küsnacht selbst. Nur die hohle, leitfähige Kugel musste ich selber organisieren. Um während dem Experiment möglichst flexibel zu sein, wollte ich mir beide Ideen der Anleitung beschaffen. Also bemalte ich eine Christbaumkugel mit im Internet bestellter, leitfähiger Farbe und liess eine neu gekaufte, hohle Stahlkugel auftrennen, so dass man einen Magnet darin platzieren kann.



Abbildung 17: Christbaumkugel / Stahlkugel (M. Messmer 2019)

Da ich bezüglich der Stabilität der zweiten Kugel etwas skeptisch war, bestellte ich zur Absicherung noch zwei Edelstahlkugeln, die sich ebenfalls öffnen lassen, dazu. Zusätzlich musste ich testen, ob die Vakuumpumpe vor Ort genügend stark war, um einen Luftdruck von weniger als 10 Pascal herzustellen. Dies war um einiges schwieriger als gedacht. Denn meine Schule war nicht im Besitz eines Messgeräts, das einen dermassen tiefen Luftdruck anzeigen kann. Folglich wendete ich mich an den Laborassistenten der Kantonsschule Limmattal, Lukas Gantert. Er war so nett, mir das Prinzip eines Pirani-Druckmessers zu erklären und mir einen solchen samt Nadelventil und zusätzlicher Ausrüstung auszuleihen. Darüber hinaus verriet er mir anhand eines sehr ähnlichen Experiments etliche nützliche Tipps für die Anwendung der ausgeliehenen Geräte. Damit konnte ich dann auch die benötigten Druckmessungen an der Vakuumanlage der Kantonsschule Küsnacht durchführen. Zwar gab es einige Probleme, weil die Verschlüsse des Pirani-Gerätes und der Vakuumpumpe nicht zueinander passten, diese konnten jedoch durch ein wenig Bastelarbeit umgangen werden. Obwohl die Vakuumpumpe in Theorie genügend stark sein sollte, waren die gemessenen Werte um die 400 Pascal und somit noch deutlich zu hoch. Da ich keine Chance hatte, das Problem in vernünftiger Zeit zu identifizieren und selber zu beheben, übernahmen Frau Germann und Herr Rupp diese Aufgabe verdankenswerterweise. Zusammen schafften sie es, die Anlage so einzurichten, dass sich der definitive Luftdruck zwischen 7 und 14 Pascal bewegte. Dies schien mir gut genug, um einen ersten Versuch zu wagen.

### 3.4 Durchführungen

Beim Zeitpunkt meines ersten Experiments war ich wegen den erschwerten Vorbereitungen bereits im Verzug. Dazu kam, wie erwartet, dass nicht alles auf Anhieb funktionierte. Somit brauchte ich zahlreiche Anläufe, bis ich das gewünschte Endresultat erreichte.

### 3.4.1 Erste Versuche

Zu Beginn stellte ich das System mit der Hilfe von Frau Germann möglichst eins zu eins so auf, wie es in der Anleitung beschrieben wird.



Abbildung 18: Aufbau des Experiments (D. Messmer 2019)

Einzig das Pirani-Gerät und die Druckanzeige hatte ich noch zusätzlich zur Beschreibung aus dem Internet, da ich überprüfen wollte, ob die Vakuumpumpe die erwartete Leistung erbringen kann. Nach einigen Minuten Luftabsaugens waren die Verhältnisse gut, der Raum abgedunkelt, und ich erhöhte die Spannung beim Netzgerät. Aufgrund von mangelhafter Isolierung entlud sich diese Spannung aber wider meinen Willen an verschiedenen metallischen Halterungen, die ich für den Aufbau benötigte. (Abbildung 19) So musste ich das System kurzerhand anpassen und abwägen, wo am ehesten die Fehlerquellen lagen. Da ich mit Experimenten in der Vakuumkammer nur beschränkte Erfahrungen hatte, musste ich das Problem empirisch tüftelnd angehen. Mit einigen Ratschlägen meiner Referentin gelang es mir dann, die Einrichtung zu optimieren. Jedoch war das Klebeband als Isolation eher eine Notlösung als denn ein wissenschaftliches Vorgehen. Daher wagte ich auch nicht, diesem System mein volles Vertrauen zu schenken. Es blieb aber dabei, dass ich keine andere Wahl hatte, als – auszuprobieren.

Bei einem späteren Versuch entlud sich die Spannung in Form eines Blitzes zwischen der Kathode und der Kugel. (Abbildung 20) Hier war der Ansatz zur Problemlösung, eine andere Kugel zu verwenden, denn die Christbaumkugel war kleiner als die zuvor benützte Stahlkugel und erschwerte dadurch eine unerwünschte Blitzentladung. Tatsächlich schaffte ich es so, eine Entladung zu verhindern. Trotzdem wollte das Experiment noch nicht funktionieren. Weitere Modifikationen wurden benötigt; nur wusste

ich nicht wo und wie. So stellte ich das System weiter um, und mehr oder weniger per Zufall erschien bei manchen Konstellationen ein sanftes Licht nahe der Kugeloberfläche. Selbst das beste Resultat war aber nicht zufriedenstellend, da dieses Licht am falschen, nicht erwarteten Ort erschien. Laut Theorie sollte es ja in den Polregionen entstehen. Bei mir schien es sich aber in Richtung Kathode auszurichten. Deshalb konnte ich nicht ausschliessen, dass es sich nur um eine *Lichtreflexion* handelte. (Abbildung 21) Nachdem ich sogar die Pole der Elektroden umkehrte, dachte ich, alle Varianten ausprobiert zu haben. Nur der Magnet und dessen Einfluss auf das Experiment konnte ich infolge Zeitmangels noch nicht untersuchen. So entschied ich mich, die Versuche an dieser Stelle zu unterbrechen und plante, sie in einem zweiten Anlauf weiterzuführen. In der Zwischenzeit konnte ich die ersten Versuche analysieren und anhand dieser weitere Modifikationsideen sammeln.



Abbildung 19: Entladung an Halterungen (D. Messmer 2019)

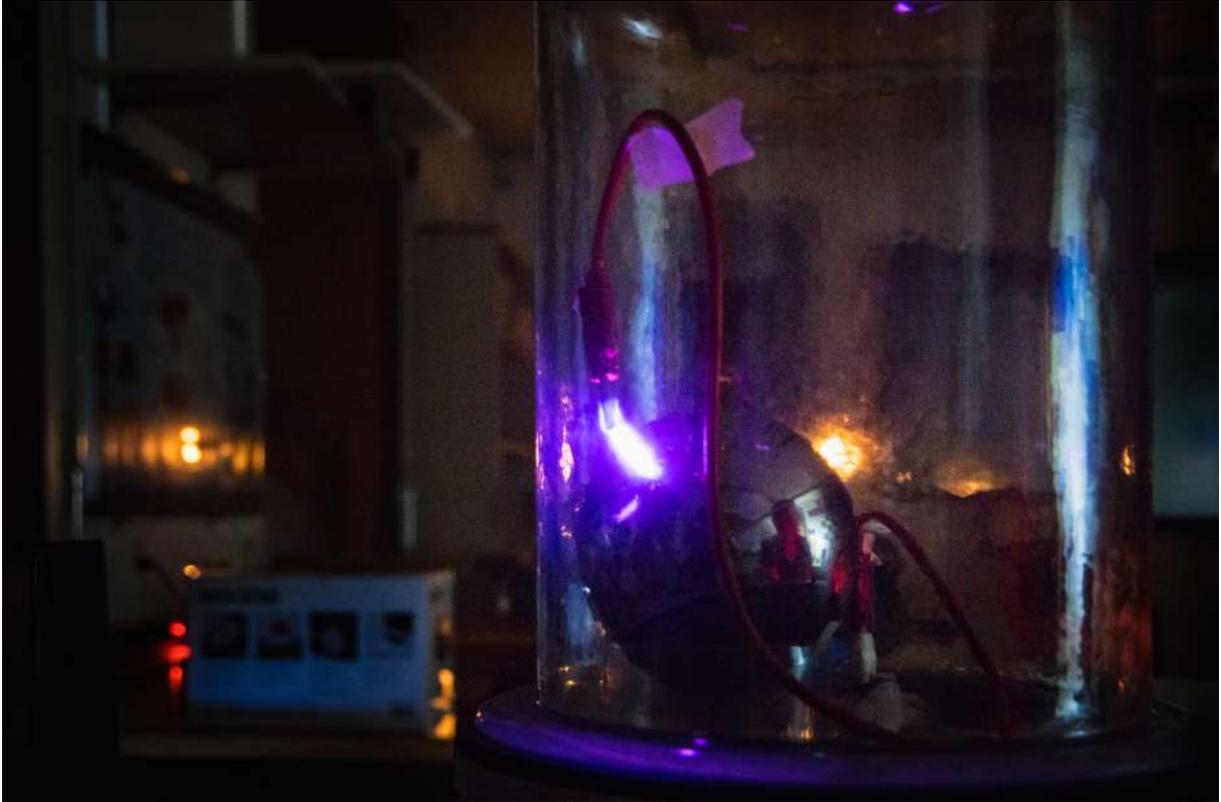


Abbildung 20: Blitzentladung (D. Messmer 2019)

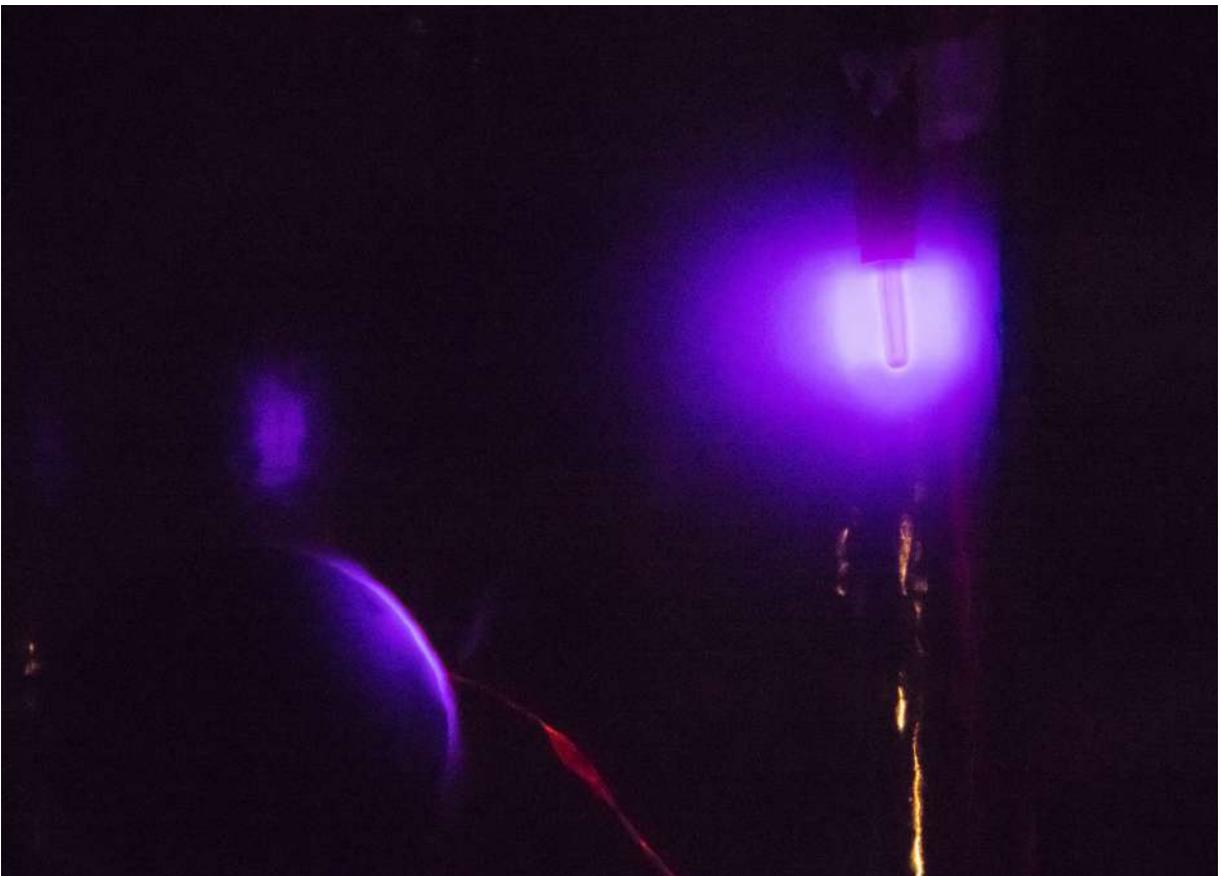


Abbildung 21: Zur Kathode ausgerichtete Entladung (D. Messmer 2019)

### 3.4.2 Definitives Experiment

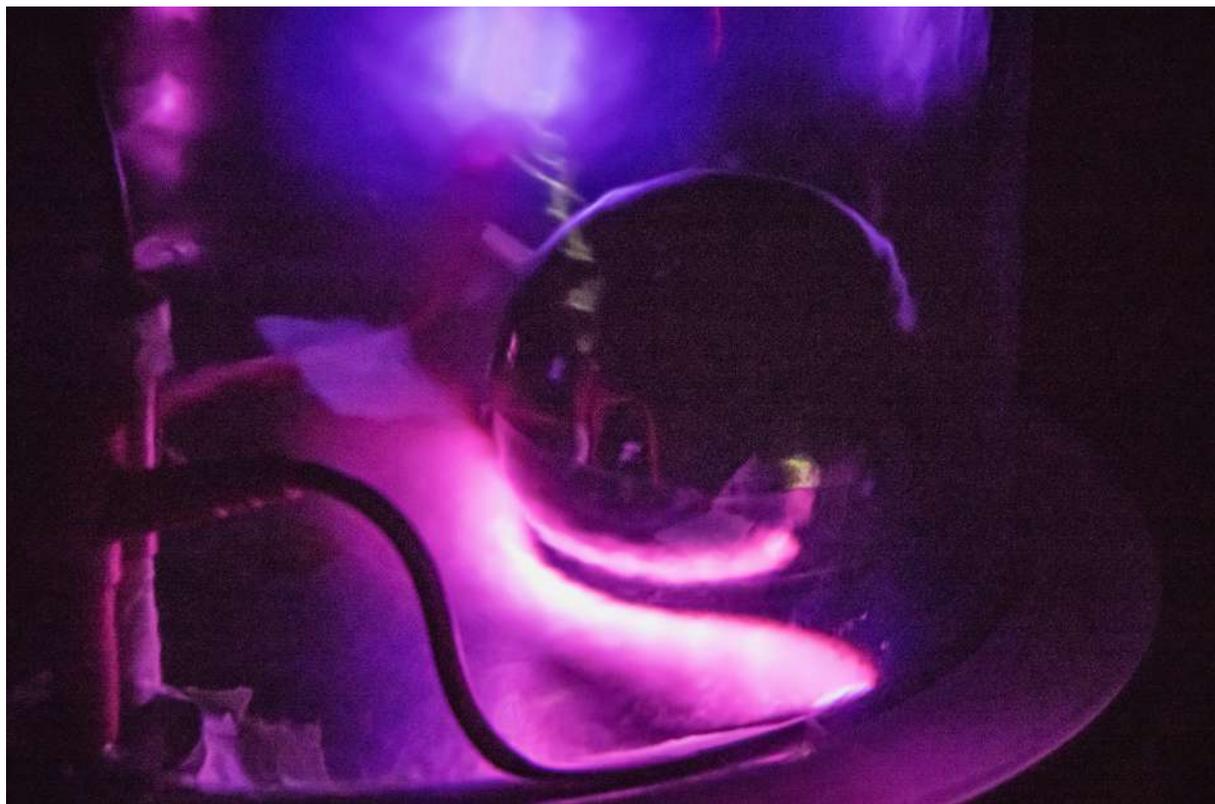
Um beim zweiten Anlauf möglichst schnell zu klaren Ergebnissen zu kommen, strukturierte ich die einzelnen Versuche etwas übersichtlicher als zuvor. Diesmal wollte ich mit dem Ausschussverfahren arbeiten. Das heisst: ich änderte pro Durchlauf nur einen einzigen Faktor, um ganz genau zu sehen, was dieser für einen Einfluss auf das Resultat hatte. Generell kam ich viel schneller voran, da ich sowohl beim Aufbauen als auch beim Modifizieren bereits eine gewisse Übung hatte. Als erstes wollte ich den Faktor „Magnet“ untersuchen. Um zu überprüfen, ob er bei den ersten Versuchen überhaupt eine entscheidende Rolle gespielt hatte, führte ich das gleiche Experiment *ohne* Magneten durch. Wie bereits vermutet, entstand das exakt gleiche Licht wie bei den ersten Versuchen. Nun war mir klar, dass der Magnet zu schwach war. Da es an meiner Schule aber nicht wesentlich stärkere gab, erhöhte ich einfach die *Anzahl* der Magnete. Und dies – war der entscheidende Schritt zum Erfolg!

Der abstehende, leuchtende Ring, den ich in diesem System kreieren konnte, war zwar noch nicht jenes künstliche Polarlicht, wie ich es haben wollte – aber es ging zum ersten Mal in die erwünschte Richtung.



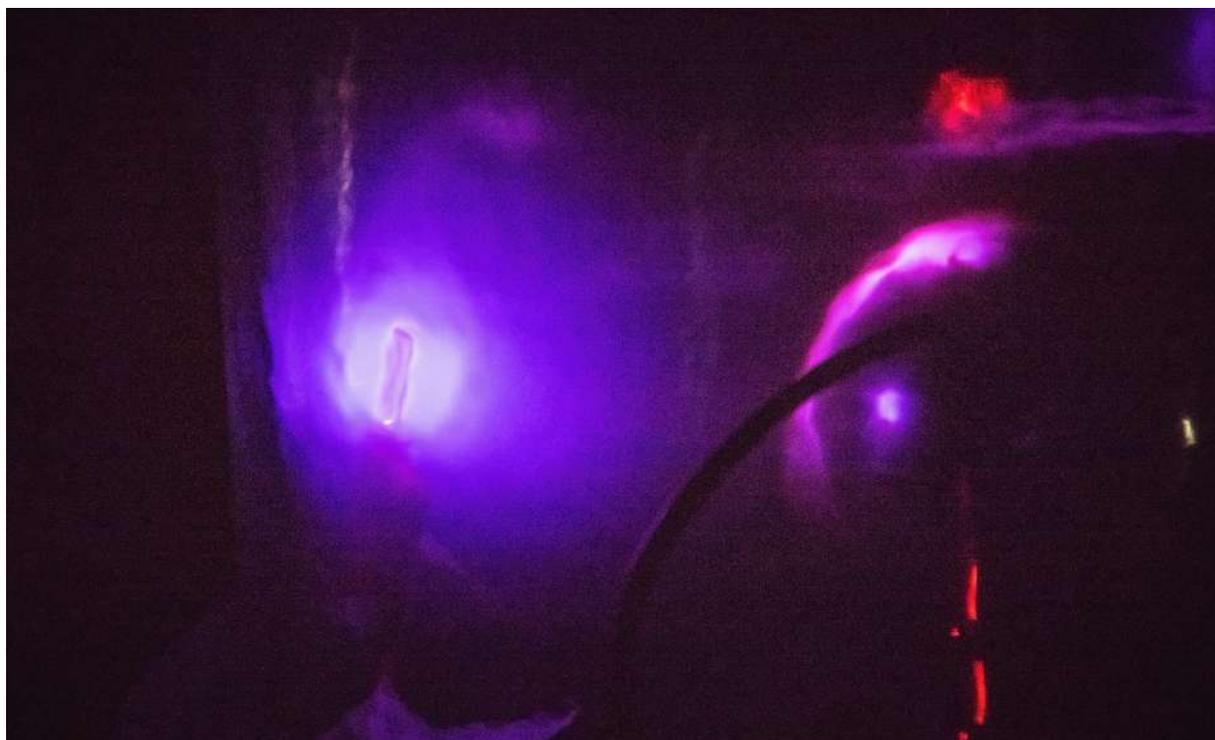
Abbildung 22: Abstehender, leuchtender Ring (D. Messmer 2019)

Denn in diesem System spielten nun alle relevanten Faktoren zusammen, welche auch in der Realität für das Entstehen des Polarlichts verantwortlich sind. Also musste ich nur noch das richtige Verhältnis von Druck, Spannung und Distanzen zwischen Kathode, Kugel und Anode finden. Vor allem mit der Distanz zwischen der Kugel und der Anode liess sich noch einiges verändern und verbessern. Bei grösserer Distanz war das Lichtband länger und bildete fast schon eine S-Form.



*Abbildung 23: Lichtband in S-Form (D. Messmer 2019)*

Wenn sich die Kugel und die Anode berührten, verschwand diese Form; dafür entstand eine kreisförmige, leuchtende Fläche, und zwar direkt über dem Pol der Kugel.



*Abbildung 24: Leuchtende Fläche über dem Pol (D. Messmer 2019)*

Nach dem Vergleichen mit den Beispielbildern der Anleitung kam ich zum Schluss, dass dieses Licht – endlich – das Modell eines Polarlichts war.



Abbildung 25: Bild von Anleitung (Jeanjacquot, Science in School 2014)

Es befand sich am richtigen, erhofften Ort, stand deutlich von der Kugel ab – war also nicht nur eine Reflexion des Lichts – und leuchtete nur unter genau den zwingend vorgegebenen Bedingungen für eine solche Erscheinung. Sobald ich etwa zu viel Luft in das System einlies oder die Spannung zu stark verringerte, verschwand das Licht. Somit konnte ich das Experiment mit gutem Gefühl, erfolgreich und glücklich, beenden.

### 3.5 Auswertung der Ergebnisse

Beim Auswerten der Versuche legte ich den Fokus darauf, die einzelnen Teile des Experiments und deren Funktion genau zu verstehen. Darüber hinaus wollte ich Verknüpfungen schaffen, um die Relation verschiedener Faktoren zu durchschauen.

#### 3.5.1 Haupterkenntnis

Die wichtigste Erkenntnis, die ich durch die Analyse erlangte, war, dass der Weg der Elektronen entscheidend ist. Je nach Aufstellung der Apparatur wählten sie ein anderes Ziel. Bei den unerwünschten Entladungen folgten sie dem Weg des kleinsten Widerstands. So entluden sich die Elektronen direkt an den Elektroden oder, wenn sie genug nahe waren, als Blitz an der Kugel. Erst dann, als dieser Weg der Isolation der Metalle und der korrekten Distanz zur Kugel wegen nicht mehr gewählt werden konnte, flogen die Elektronen über die Kugel hinweg zur Anode. Nun war interessant, wie stark die Elektronen auf ihrem Weg kraft des Magnetfeldes der Kugel abgelenkt wurden. Ohne (beziehungsweise mit zu schwachem) Magnetfeld dominierte die Kraft der Anode, welche die Elektronen anzog. So entluden sich die Elektronen an jenem Ort auf der Kugeloberfläche, der sich auf der Geraden zwischen Kathode und Anode befand. Sobald der Magnet aber stark genug war, folgten die Elektronen den

Magnetfeldlinien und bewegten sich somit nicht mehr in einer geraden Linie auf die Kugel zu; das Magnetfeld veränderte den Weg der Elektronen in eine Bogenform. Im Beispiel, wo die Kugel die Anode nicht berührt, ignorierten sie die Kugel aber vollständig, da diese nicht mehr Teil des Stromflusses war. Als ich die Kugel und die Anode dann aber miteinander verband, blieb den Elektronen gar nichts anderes übrig, als sich vollkommen vom Magnetfeld lenken zu lassen und so auf die Kugel zu treffen. Hier schien das Magnetfeld also eindeutig zu dominieren, da sich die Elektronen am magnetischen Pol ansammelten. Es handelte sich demzufolge im ganzen Experiment lediglich um die Frage, ob das Magnetfeld die Elektronen einfangen kann, sie nur umleitet oder gar nicht beeinflusst. Letztere beide Optionen brachten zwar schöne Lichter zum Vorschein, sie waren jedoch nicht das Modell des Polarlichts. Nur wenn das Magnetfeld dominierte, kam es zur gewünschten Erscheinung.

### 3.5.2 Nebenerkenntnisse

Logischerweise hängt das Gelingen des Experiments von weitaus mehr Faktoren ab als nur vom Weg der Elektronen. So stellte ich fest, dass die Lichtintensität von der Spannung abhing. Zwischen 0.8 bis 1.2 Kilovolt beobachtete ich die schönsten Lichter. Zu höheren Spannungen habe ich mich nicht vorgewagt, da die Elektroden schon bei 1.2 Kilovolt beängstigend stark leuchteten. Wenn ich die Spannung aber langsam senkte, wurde das Licht schrittweise schwächer, bis das System bei etwa 0.4 Kilovolt schliesslich in sich zusammenbrach: die Elektronen wurden dann zu wenig von der Anode angezogen und sprangen demnach nicht mehr durch die Vakuumkammer. Interessant war bei solchen Zusammenbrüchen, dass das Licht ganz wild wurde und über die Kugeloberfläche zur Anode raste. Man kann sich die Bewegungsweise ähnlich vorstellen wie bei einem gefüllten Luftballon, den man unverknotet durch den Raum sausen lässt. Danach war das System dunkel und fing nur dann wieder an zu leuchten, wenn ich die Spannung auf gut 0.8 Kilovolt erhöhte. Es brauchte also eine höhere Spannung, um das Modell des Sonnenwinds zu starten, als es nach diesem Starten dann nur aufrecht zu erhalten.

Auch beim verändern des Drucks merkte ich, wie empfindlich das ganze System ist: Schon bei einer minimalen Luftzufuhr verschwand das Licht vollständig. Was passiert wäre, wenn ich den Druck weiter gesenkt hätte, konnte ich nicht testen, da die Vakuumpumpe keinen Luftdruck schaffte, der wesentlich tiefer gewesen wäre als fürs Experiment benötigt. Insofern war der Druck eigentlich gar nie gänzlich optimal, sondern nur genügend nahe am Optimum, so, wie es das System mir erlaubte. Mit einer stärkeren Vakuumpumpe könnte man dem System also die Luft so stark entziehen, dass ein Entstehen eines Lichts verunmöglicht würde – und in einem zweiten Schritt dann durch ein Ventil kontrolliert wieder dazugeben. So könnte man wunderbar beobachten, bei welchem Druck das Licht am stärksten leuchtet beziehungsweise die schönste Form hat.

Natürlich hatten auch Ausmasse und Konstellationen der einzelnen Experimentkomponenten einen entscheidenden Einfluss aufs Gelingen des Versuchs. Je nach Kugel, je nach Distanz, je nach Ausrichtung veränderte sich das Endresultat. Alles musste auf irgendeine Art und Weise zusammenpassen. Leider hatte ich zu diesen Faktoren weder in der Anleitung noch in meinem eigenen Experiment genaue Massangaben.

Die Distanzen zum Beispiel konnte ich unmöglich messen, da sich das Experiment ja in der Vakuumkammer befinden musste und die Kathode an der Vakuumblocke, welche ich zum Modifizieren immer anheben musste, befestigt war. So veränderten sich Distanzen von Versuch zu Versuch unumgänglich. Auch die Ausrichtung der Kathode konnte ich nur bedingt bestimmen, da sie mit Klebeband gesichert war, welches sich von Mal zu Mal weiter löste. Somit musste ich schlicht darauf hoffen, dass diese Faktoren möglichst oft genügend optimal zusammenspielen. Da ich aber in allen Versuchen ein Licht erzielen konnte, solange Magnet, Spannung und Druck geeignet gewählt waren, nehme ich an, dass die Konstellation etwas mehr Abweichung erlaubt als die zuvor genannten Faktoren, welche deutlich weniger Spielraum aufwiesen.

### 3.6 Vergleich zur Theorie

Durch die Analyse aller meiner Versuche erreichte ich ein weitaus breiteres Verständnis über das Polarlicht als nur durch die einschlägige Theorie. Jedoch stiess ich dabei auf mehrere Ungleichheiten oder sogar auf Widersprüche zwischen Experiment und Theorie. Da ich nicht alle Unvereinbarkeiten nachvollziehen konnte, notierte ich sie, in der Hoffnung, später von einem Experten Antworten zu bekommen.

#### 3.6.1 Sonnenwind – Elektronenfluss

Schon der Ursprung des Polarlichts unterscheidet sich von der Theorie zum Experiment. Einerseits existiert der Sonnenwind, der aus geladenen Teilchen besteht – und andererseits der Elektronenfluss zwischen Kathode und Anode. Im Experiment hat man also nur negativ und nicht auch noch positiv geladene Teilchen. Dies ist von Bedeutung, wenn man den Kontakt mit dem Magnetfeld betrachtet. Denn da werden die Teilchen ja – je nach Ladung – nach links oder nach rechts abgeleitet. Wenn nun ausschliesslich Elektronen auf das Magnetfeld treffen, sollten alle in die gleiche Richtung abgelenkt werden. Dies wäre auch eine mögliche Erklärung dafür, weshalb bei den einen Versuchen nur auf einer Seite der Kugel ein Lichtbogen entstand.

Ein zweiter Unterschied liegt darin, dass der Elektronenfluss, anders als der Sonnenwind, ein definiertes Ziel hat. Die Elektronen wollen zur Anode wandern und haben demzufolge eine ganz bestimmte Richtung. Der Sonnenwind aber wird von der Sonne in alle Richtungen abgegeben und fliegt durch das All, bis ihn etwas (zum Beispiel das Magnetfeld eines Planeten) ablenkt – oder bis er irgendwo aufprallt und so aufgehalten wird. Somit trifft der Sonnenwind das Magnetfeld der Erde an allen Stellen ziemlich gleichmässig. Der Elektronenfluss hingegen trifft das Magnetfeld der Terrella an einem einzigen Ort. Sobald also die Kathode, die Kugel und die Anode nicht in einer perfekten, geraden Linie zueinanderstehen, ist der Kontakt von Elektronenfluss und Magnetfeld nicht zentriert. Dies wäre eine zweite Erklärung für das einseitige Licht im Modell.

#### 3.6.2 Thermosphäre – Vakuumkammer

Im Modell ist aber nicht nur der Kontakt mit dem Magnetfeld, sondern auch jener mit der Atmosphäre etwas anderes. Der Druck in der Vakuumkammer soll laut Anleitung bei weniger als 10 Pascal liegen. Die Atmosphäre der Erde hat in 100 Kilometer Höhe – dort, wo sich die Polarlichter häufig abspielen – jedoch nur noch einen Druck von

0,27 Pascal.<sup>28</sup> In der Theorie müsste das Modell also auch bei viel tieferem Druck funktionieren. Wie bereits erwähnt konnte ich diesen Bereich im Rahmen meiner Maturaarbeit leider nicht abdecken.

Da das Licht im Modell eine andere Farbe hatte als das natürliche Polarlicht, ging ich davon aus, dass andere Atome und Moleküle Teil der Reaktion waren. Dies war etwas seltsam, da die Vakuumpumpe ja nur den Druck verringern und nicht den Anteil der einzelnen Teilchen verändern sollte. Mit den Mitteln, die mir an meiner Schule zur Verfügung standen, konnte ich aber unmöglich die Zusammensetzung der Luft in der Vakuumkammer eruieren. Deshalb blieb mir der Grund für die pinke Farbe ein Rätsel. Mein Modell war aber nicht das einzige mit dieser Farbe. Auch die Beispielbilder der Anleitung und das erste Terrella-Experiment, welches in Tromsø nachgebaut wurde, haben ein solch pinkes Licht. Also hoffte ich darauf, dass es Experten gibt, die mir dieses Phänomen erklären könnten.

Zusätzlich stellte sich die Frage, weshalb die Elektronen im Modell nicht über ihren ganzen Weg verteilt leuchteten; denn in der Vakuumkammer war ja überall etwas Luft – und nicht nur nahe der Kugeloberfläche. Somit hätte auch schon zwischen Kathode und Kugel ein Licht entstehen sollen. Zu dieser Frage allerdings fand ich die Antwort: Dies hängt mit dem Prozess der Ionisation und der Konzentration der Elektronen zusammen. Denn auf dem Weg zur Kugel bewegen sich die Elektronen relativ schnell und können deshalb nicht ungestört eine Ionisation vollenden. Zusätzlich müssen die Elektronen an einem Ort dicht angesammelt werden, damit die abgegebenen Photonen als Licht erkennbar sind. Diese Ansammlung geschieht erst durch das Magnetfeld und somit nur nahe der Kugeloberfläche.

### 3.6.3 Erde – Terrella

Der wohl offensichtlichste Unterschied der beiden Systeme zeigt sich im Verhältnis der Grösse der Erde zur Distanz von der Sonne zur Erde. Das Modell entspricht nicht einmal annähernd den Proportionen in Natura. Um diesen Unterschied zu eliminieren, müsste man entweder eine dermassen kleine Kugel wählen, dass ein menschliches Auge das winzige Polarlicht auf ihr gar nicht mehr sehen könnte – oder eine Vakuumkammer besitzen, die über einen Kilometer lang wäre ... Dementsprechend sind diese Proportionen der Realität im Modell unweigerlich zu vernachlässigen. Dies sollte aber keinen verheerenden Störfaktor darstellen, da das physikalische Prinzip hinter beiden Vorgängen das gleiche ist.

---

<sup>28</sup> (Saperaud 2019)

## 4 Expedition

Als Höhepunkt meiner Maturaarbeit setzte ich mir das Ziel, das Polarlicht zu jagen, bis ich es mit eigenen Augen sehe – respektive mit meiner eigenen Kamera einfange. Von Anfang an war klar, dass mein Vater, Martin Messmer, mich auf dieser Expedition begleiten würde, weil es bereits seit Jahren unser gemeinsamer Traum war, die Polarlichter zu erleben. Die genaue Umsetzung musste ich aber während meiner Arbeit noch entwerfen.

### 4.1 Planung und Vorbereitung

Für das Gelingen der Expedition war eine frühe und detaillierte Planung nötig. Jedoch bestand auch bei perfekter Organisation ein gewisses Risiko, das Polarlicht nie bestaunen zu können, da es letztlich ja weitgehend von der nicht beliebig berechenbaren Natur abhängt. Dieses Risiko waren mein Vater und ich jedoch sehr wohl gewollt, einzugehen.

#### 4.1.1 Erste Rahmenbedingungen

In der zeitlichen Planung war ich vollständig eingeschränkt. Aus der Theorie wusste ich, dass sich nur die Monate von September bis März eignen.<sup>29</sup> Die Herbstferien waren also die einzige Möglichkeit, das Polarlicht noch vor Abgabe der Arbeit zu erleben. Theoretisch gesehen waren diese zwei Oktoberwochen ein optimaler Zeitpunkt für unser Vorhaben; nur die Dauer war ein Problem. Im Normalfall reichen zwei Wochen gut, um das Polarlicht aufzusuchen. Jedoch schränkte ich mich mit der Entscheidung, nicht mit dem Flugzeug zu reisen, weiter ein. Denn nur mit Zug, Bus und Auto erfordert eine Reise von der Schweiz bis zum nördlichen Polarkreis und zurück mindestens eine Woche; also die Hälfte der Herbstferien. Ohne eine andere Wahl zu haben, musste ich mich also damit abfinden, dass sich unsere Chancen, das Polarlicht zu entdecken, infolge umweltschonender Absichten verkleinern würden.

Um die Reise aber per se planen zu können, brauchte ich einen bestimmten, geeigneten Zielort. Die erste und auch die naheliegendste Entscheidung beinhaltete, in den Norden zu reisen, da sich die Schweiz auf der Nordhalbkugel befindet und im Süden das Polarlicht bekanntlich nur sehr erschwert auffindbar ist. Länder wie Island, Alaska oder Grönland, die alle in fürs Nordlicht günstigen Breitengraden liegen, kamen ebensowenig in Frage, da ich über das Land reisen wollte. Nordskandinavien war definitiv attraktiver als Sibirien und somit auch mein Favorit. Nach etwas Recherche entschied ich mich, nach Tromsø, in den Norden Norwegens zu reisen, da diese Stadt für die Polarlichter berühmt war und in einem Museum das gleiche Experiment ausstellte, welches ich in meiner Arbeit durchführte.<sup>30</sup>

#### 4.1.2 Konkrete Reiseplanung

Da der Aufenthaltsort für unsere Jagd nun feststand, konnte ich die Reise, das Hotel und eine geführte Polarlichttour, welche ich zur Absicherung machen wollte (um die Chance zu steigern, dieses Licht auch tatsächlich zu sehen), buchen. Bei dem Hotel und der Tour hatte ich keinerlei Probleme, da ich im Vergleich zu anderen Reisenden

---

<sup>29</sup> (Polarlichter - Aurora Borealis 2017)

<sup>30</sup> (Nylund 2016)

früh buchte und es in Tromsø auch sehr viele solche Hotel- und Tour-Angebote gab. Nur die Reise bereitete mir ein wenig Sorgen, da es auf der Strecke von Zürich nach Tromsø so gut wie keine sinnvollen Verbindungen gab. So plante ich, die erste Hälfte bis nach Oslo mit dem Flixbus zu bewältigen und ab dort die Reise mit einem Mietwagen fortzusetzen. Das Problem dabei war, dass die Autofahrt von Oslo nach Tromsø über 22 Stunden dauert und einzig mein Vater Auto fahren konnte – die zweite Hälfte musste also auf mindestens zwei Tage verteilt werden.

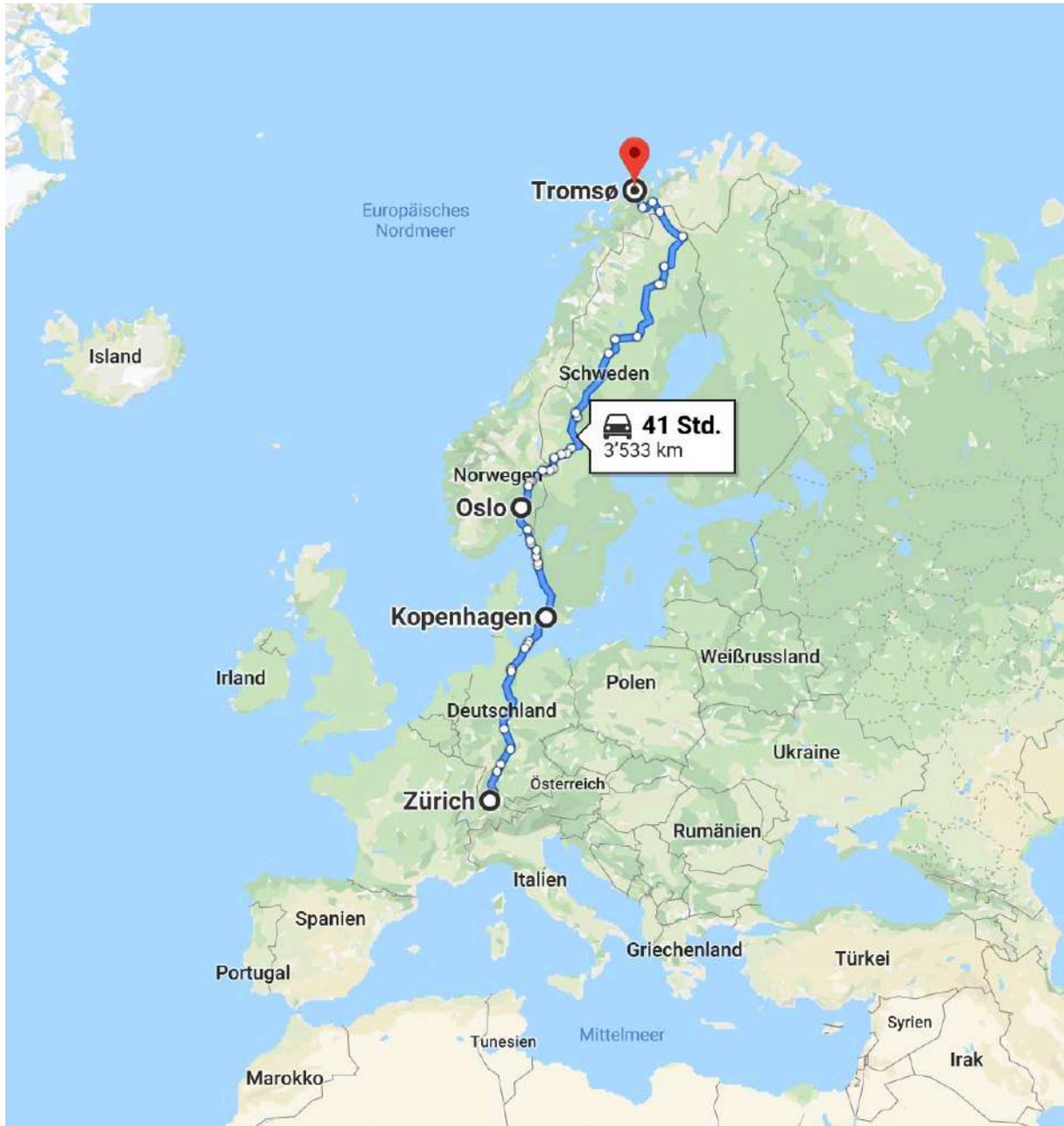


Abbildung 26: Strecke Zürich-Tromsø (Google Maps 2019)

Glücklicherweise konnte ich von der Schule aus bereits am Donnerstagabend abreisen und gewann so etwas Zeit. Alles in allem sah mein Reiseplan so aus, dass mein Vater und ich etwa 72 Stunden bis nach Tromsø unterwegs sein würden. Ohne Verspätungen wären wir dann schon am ersten Sonntagabend der Herbstferien vor Ort und hätten genügend Zeit, um das Polarlicht zu suchen.

Bei der Rückreise wollte ich möglichst flexibel bleiben, um bei Bedarf während der Zeit in Tromsø noch Änderungen vornehmen zu können. Nur die Flixbus-Tickets von Oslo zurück nach Zürich musste ich frühzeitig kaufen.

#### 4.1.3 Materialvorbereitung

Nebst einer geplanten Reise wollten mein Vater und ich selbstverständlich auch eine passende Ausrüstung haben. Da wir in der Freizeit beide leidenschaftliche Fotografen sind, hatten wir in diesem Bereich bereits professionelle Ausrüstungen. Mein Vater besitzt die Fujifilm X-T3 (mit dem Objektiv 16mm, f/1.4) und ich die Pentax K-3 (mit dem Objektiv 10 – 20mm, f/3.5 – 5.6) als Hauptkamera. Einzig auf die Umstände in Tromsø mussten wir uns gut vorbereiten. Bei tiefen Temperaturen zu fotografieren kann sehr unangenehm sein; vor allem wenn man stundenlang bangend auf sein erhofftes Sujet warten muss. Deshalb kauften wir uns warme Kleider. Weitere Gegenstände, die wir für nötig hielten, waren gute Winterschuhe und leistungsstarke Taschenlampen, da man das Polarlicht nicht vom Hotelzimmer, sondern von abgelegenen, dunklen Orten aus am besten betrachten kann.

#### 4.1.4 Mentale Vorbereitung

Normalerweise kann man sich in Ferien ausruhen. Vor unserer Expedition merkten wir aber, dass, je näher sie kam, wir uns mental stärker als im Vorfeld vermutet darauf einstellen mussten. Einerseits ist es nicht ganz ungefährlich, zwei Tage hintereinander je 12 Stunden Auto zu fahren. Andererseits belastete uns auch die Vorstellung, ohne Bild eines Polarlichts zurück zu kommen. Hierbei half es enorm, mit Leuten zu reden, die schon auf solchen Expeditionen waren, um besser einschätzen zu können, wie unsere Chancen standen. Theoretisch betrachtet waren unsere Chancen nicht hervorragend gut, aber auch nicht gerade miserabel. Der Sonnenaktivitätszyklus befand sich nämlich kurz vor einem Tief, was bedeutet: man braucht, wenn nur etwas mehr als eine Woche für die Polarlicht-Jagd zur Verfügung steht, relativ viel Glück dafür, dass die Sonne genau während dem Aufenthalt aktiv ist. Dafür wählte ich mit Tromsø aber einen der besten Standorte für Polarlichter, da sich diese Stadt fast jede Nacht im Polarlichtoval befindet.

### 4.2 Reise in den Norden

Mit diesem Vorwissen und dieser Vorbereitung wagten mein Vater und ich uns dann auf die Reise. Mit erstaunlich wenig Verspätung kamen wir am Samstagmorgen mit dem Flixbus in Oslo an und mieteten ein Hybrid-Auto. [Abbildung 27 (M. Messmer 2019)] Dies war wie gemacht für unsere Absichten, da viele Automaten zur Verfügung standen – zum Beispiel fürs Tempo und die Regelung des Scheinwerfer-Lichts, was meinem Vater das Fahren erleichterte. Da wir von einem Hybrid-Motor angetrieben wurden, verbrauchten wir sehr wenig Benzin, so dass wir trotz nur wenigen Tankstellen nie das Problem hatten, einen leeren Tank befürchten zu müssen. Das Durchhalten und Wachbleiben während der Fahrt war somit die grösste Herausforderung. Speziell mein Vater konnte sich hinter dem Steuer keine Fehler oder gar einen Sekundenschlaf erlauben. Die stetige Konzentration machte einen schnell so müde, dass auch kurze Essenspausen und Power naps nicht mehr hinreichende Erholung bescherten. Um Mitternacht suchten wir einen Ort zum Übernachten, waren jedoch zu spät.

Also mussten wir im Auto schlafen. Dies kühlte sich während zwei Stunden aber so stark ab, dass wir der tiefen Temperatur wegen aufwachten und unsere Reise fortsetzen mussten.



*Abbildung 27: Ich mit Hybrid-Auto (M. Messmer 2019)*

Die Müdigkeit verschwand aber sofort, als wir bemerkten, dass wir uns schon in dem Polarlichtoval befanden. Da es noch immer Nacht war, bestand eine kleine Chance, das Polarlicht schon während dem Autofahren zu sehen. Somit fotografierten wir jede uns merkwürdig vorkommende Wolke und tatsächlich – unsere Kameras entdeckten, noch ehe es unsere Augen sehen konnten, das Polarlicht!



*Abbildung 28: Erstgesichtetes Polarlicht, Flecken (M. Messmer 2019)*

Es war für den Nachthimmel eine etwas zu helle Stelle, die unser Auge als Wolke interpretierte. Da die Kameras aber aufzeigten, dass das feine Leuchten eindeutig grünlich war, konnten wir uns sicher sein, dass unser lang ersehnter Wunsch in diesem Augenblick in Erfüllung ging. Leider verschwand mit der Morgendämmerung auch die Möglichkeit, das Polarlicht weiterhin zu sehen. Jedoch gab uns dieses Erlebnis genügend Motivation, um noch vor dem nächsten Sonnenuntergang Tromsø zu erreichen. Aufgrund der Erschöpfung infolge unseres intensiven Reisens und infolge schlechten Wetters entschieden wir uns, erst ab der zweiten Nacht in Tromsø auf Polarlichtsuche zu gehen und erstmal ein wenig Schlaf nachzuholen.

### 4.3 Museumsbesuch

Da mein Vater und ich am Tag keine Polarlichter suchen konnten, nutzten wir die Zeit, um das Universitätsmuseum zu besuchen. In diesem Museum konnten wir in der historischen Vorgänger-Apparatur meines Experiments per Knopfdruck künstliches Polarlicht erzeugen. (Abbildung 29) Zusätzlich wollten wir einem Experten noch einige Fragen stellen. Dafür meldeten wir uns für eine Führung durch die Polarlichtausstellung an. Da wir an diesem Tag die einzigen Interessierten waren, wurde es zu einer luxuriösen Privatführung. Bedauerlicherweise war unser Guide Geologe und somit nicht Fachspezialist. Dennoch führte er uns gekonnt durch das Museum und wusste ein paar wenige Details zu unseren Fragen zu erklären.

Die pinke Farbe erschien laut unserem Guide aufgrund eines speziellen Gases, das sie benutzten, um die Experiment-Apparatur länger sauber zu halten. Bei Gebrauch von Sauerstoff müssten sie die Vakuumkammer, weil sich gewisse Ablagerungen an die Innenwand der Kammer anhefteten, täglich putzen. Mit ihrem Gas geschehe dies weniger oft. Über die Zusammensetzung dieses Gases sowie über den Grund der Ablagerungen wusste der Guide leider nicht Bescheid. Merkwürdig fand ich, dass das Licht auch in meinem Experiment pinkfarben war, obwohl ich nie ein zusätzliches, spezielles Gas verwendete. Somit vermute ich, dass die Farbe des Lichts im Experiment durch noch andere Faktoren als einzig durch die Atome bestimmt wird.

Bei der Frage, weshalb das Experiment im Museum im Vergleich zu meinem eine so perfekte Form habe, äusserte der Guide dieselbe Annahme, die auch ich schon hatte: Da das System in Tromsø viel präziser aufgebaut wurde, bekommt man eine Repräsentation, die dem natürlichen Phänomen ähnlicher ist. Deshalb hat man etwa bei *beiden* Polen ein Polarlicht in der Form und Position des Polarlichtovals. Bei meinem Experiment erschien das Licht nur an einem einzigen Pol; und zwar als eine Fläche. Eine Verbesserung wäre wohl möglich, indem man die Kathode und die Anode präziser platziert.



Abbildung 29: Polarlichtapparatur im Museum (M. Messmer 2019)

Zum Schluss informierte der Geologe uns über einen sehr spannenden Widerspruch zwischen der Theorie des Polarlichts und der Realität. Laut Theorie sollte man das Polarlicht in Tromsø sehen, sobald es dafür genügend dunkel ist. Sprich: im Winter, wenn es auch tagsüber dunkel ist, sollte man das Polarlicht theoretisch den ganzen Tag lang beobachten können. Der Guide selbst habe es in seinen über 15 Jahren, die er nun schon in Tromsø lebt, aber noch nie am Tag gesehen. Man könne das Spektakel praktisch nur zwischen 8 Uhr abends und 2 Uhr morgens beobachten. Daraus schloss ich, dass die Theorie des Polarlichts noch nicht vollständig erforscht worden ist. Ein Faktor – oder höchstwahrscheinlich mehrere Kriterien, welche das Entstehen des Polarlichts ermöglichen, sind dem Menschen offenbar noch unbekannt.

#### 4.4 Jagd nach dem Polarlicht

Jeweils ein paar Stunden vor der Dämmerung begaben mein Vater und ich uns auf die Suche nach dem Polarlicht. Auf diese Weise hatten wir genügend Zeit, um uns auf das Fotografieren vorzubereiten, bevor dieses geheimnisvolle Licht entstand. Zudem konnten wir frühzeitig wunderschöne Orte aussuchen, die uns einen tollen Vordergrund fürs Bild bescherten – und wir fotografierten die ebenso traumhafte Landschaft, ohne Polarlicht im Himmel, gerne auch bei Tageslicht sowie bei beginnender Dämmerung ...

##### 4.4.1 Kameraeinstellungen<sup>31</sup>

Etwas vom Wichtigsten für das Gelingen der Fotos samt Nordlicht sind die Einstellungen der Kamera. Sowohl bei der Soft- als auch bei der Hardware müssen einige Tricks beherrscht werden, um das Polarlicht aussagekräftig einzufangen.

Da sich das Polarlicht tendenziell eher schwach zeigt, ist vorzugsweise eine relativ lange Verschlusszeit zu wählen. Unter Umständen fängt so die Öffnung der Kamera, auch Blende genannt, für eine akkurate Bildbelichtung das Licht für ein einziges Foto mehrere Sekunden lang ein. Die genaue Anzahl Sekunden variiert je nach Intensität des Polarlichts. Wenn das Licht genügend hell ist, kann eine Verschlusszeit von einer Sekunde bereits genügen. Bei dieser kürzeren Verschlusszeit hat man zudem den Vorteil, dass im Bild die Form des Polarlichts besser erhalten bleibt, weil weniger Bewegungsunschärfe existiert. Sobald die Zeit auf 10 bis sogar 15 Sekunden erhöht wird, fängt das Polarlicht auf dem Bild an, zu zerfließen. Noch längere Verschlusszeiten wählt man in der Regel besser nicht, da sonst die Sterne, die wegen der Erdrotation nicht an Ort und Stelle bleiben, als Striche und somit unscharf abgebildet würden.

Um bei so langen Verschlusszeiten den Vordergrund scharf zu behalten, ist unbedingt ein Stativ zu verwenden. So vermeidet man jegliche Verwacklungen, die ansonsten wegen unruhiger Hände entstehen würden. Bei starkem Wind kann man sich zwischen Wind und Stativ platzieren, so dass sich das Stativ keinesfalls verschiebt. Nur schon das manuelle Auslösen kann die Kamera ein wenig bewegen. Aus diesem Grund aktiviert man den Selbstauslöser (2s). Auf diese Weise bleibt die Kamera während der ganzen Aufnahmezeit unberührt. Optional kann man den Selbstauslöser auch mit einem Fernauslöser ersetzen, damit man ohne Verzögerung das Bild auslösen kann.

---

<sup>31</sup> (Westphalen 2016)

Für ein scharfes Foto muss zwingend auch der Fokus stimmen. Da der Autofokus in der Nacht kaum funktioniert, muss der manuelle Fokus verwendet werden. Den Fokus stellt man auf unendlich ( $\infty$ ), damit die Sterne scharf werden – wobei am besten am Tageslicht geprüft wird, bis wohin das Fokusrad am Objektiv gedreht werden soll, damit der weiteste Hintergrund tatsächlich fokussiert wird. Diese Stellung liegt normalerweise nämlich etwas *vor* dem  $\infty$ -Zeichen.

Weitere Einstellungen betreffen die Blenden- und die ISO-Zahl. Je tiefer die Blendenzahl, desto grösser ist die Öffnung der Blende; und je tiefer die ISO-Zahl, desto lichtunempfindlicher ist der Sensor der Kamera. Die Blendenzahl wählt man so tief wie es nur immer geht, da man vom schwachen Polarlicht möglichst viele Photonen einfangen will. Auch die ISO-Zahl will man möglichst tief halten, um ein störendes Bildrauschen zu vermeiden. Jedoch muss man bei sehr schwachen Lichtern etwas nachhelfen, indem man die Sensor-Empfindlichkeit erhöht. Ab einer ISO-Zahl von 3200 oder mehr wird das Rauschen bei APS-C-Sensoren leider oftmals schon fast inakzeptabel und kaum befriedigend mittels eines Bildbearbeitungsprogramms nachzubessern.

Schliesslich muss der richtige Ort und eine durchwegs kunstvolle Bildkomposition gewählt werden. Um das Polarlicht hervorzuheben, ist eine lichtarme Umgebung von wichtiger Bedeutung. Zusätzlich sucht man häufig einen interessanten Vordergrund, der mit dem Polarlicht interagiert, um dem Bild eine höhere Spannung sowie eine stärkere, künstlerische Aussagekraft zu verleihen. Bäume (Unterteilungen und schöne Silhouetten) oder glatte Wasseroberflächen (Spiegelungen) eignen sich hervorragend für eine gelungene Bildkomposition. Es empfiehlt sich zudem unbedingt, ein Weitwinkelobjektiv zu verwenden, da sich das Polarlicht nicht selten über den ganzen Himmel ausdehnt und sich somit unmöglich mit einem Normal- oder gar einem Teleobjektiv imposant einfangen lässt. Im Übrigen ist ratsam, im RAW-Format zu fotografieren: der Dynamikumfang bleibt maximal, und der Weissabgleich ist in der Nachbearbeitung des Bildes mühelos anpassbar. Das Histogramm hilft – zusammen mit zeitenweisen Kontrollen der geschossenen Bilder auf dem Display – Unter- und insbesondere Überbelichtungen zu vermeiden. *Nota bene* ist es unsäglich wichtig, die Bilder eines jeden Tages mehrfach zu sichern, sie etwa auf eine externe Festplatte zu speichern; denn nichts ist schlimmer, als solche Bilder durch Unachtsamkeit irreversibel zu verlieren.

#### 4.4.2 Strategien

Technisch gesehen waren mein Vater und ich mit diesen Kameraeinstellungen bereit für das Einfangen des Polarlichts. Nun mussten wir nur noch zur richtigen Zeit am richtigen Ort sein – und etwas Glück haben. Den Ort bestimmten wir bereits tagsüber mithilfe einer Website, die uns prädestinierte Standorte samt Beispielbildern verriet.<sup>32</sup> Die meisten dieser Bilder im Internet wurden im Umkreis von ca. 60 Kilometer um Tromsø herum aufgenommen und waren somit in gut einer Stunde Autofahrt erreichbar. Fast immer fuhren wir nach Westen an die Küste beziehungsweise in die verschiedenen Fjorde. Dort fotografierten wir Landschaften, sahen uns um und installierten schliesslich unsere Kameras am ausgewählten, geplanten Ort und warteten auf das Polarlicht. Um besser abschätzen zu können, wann wir mit dem Polarlicht rechnen

---

<sup>32</sup> (Locationscout 2019)

mussten, benutzten wir verschiedene Prognose-Apps. Diese beinhalteten meistens eine Karte des Polarlichtovals sowie diverse Angaben zum Magnetfeld und zum Sonnenwind. Zusätzlich konnten wir mithilfe einer Wetterprognose unsere Lage nach Bedarf verändern, so dass wir möglichst wenig störende Wolken am Himmel hatten. All diese Prognosen waren jedoch nur sehr grobe Angaben und nicht immer gleich zutreffend. Schliesslich war der Schlüssel zum Erfolg, Geduld und Durchhaltewillen zu haben, denn diese Wartezeiten konnten unter Umständen bis zu mehreren Stunden andauern. In dieser Zeit mussten wir uns warmhalten, verpflegen und beschäftigen. Auf der geführten Polarlicht-Tour erlebten wir, dass ein Feuer und eine Gesellschaft viel ausmachen können, um die Situation angenehmer und bequemer zu machen. Für das Fotografieren war die Tour aber nicht von Vorteil, da das Feuer ein weiteres Störlicht war und einem die Leute nicht selten mitten ins Bild standen. Mein Vater und ich bevorzugten deshalb, künftig nur allein unterwegs zu sein. Für das Überstehen der Kälte hüllten wir uns in Kleidern ein und bewegten uns vor Ort; natürlich half auch das Adrenalin infolge aller Aufregung des Polarlichts wegen. Essen und Unterhaltung hatten wir immer genug, da wir uns gut organisierten und viel miteinander diskutierten – nicht selten mit viel Humor.

#### 4.4.3 Erlebnisbericht

Mit diesen Vorbereitungen und Vorgehensweisen hatten wir enormen, ja, unglaublichen Erfolg: Bereits am ersten Abend, an dem wir auf die Suche gingen, erlebten wir ein riesen Spektakel. Ein Polarlicht, so gross, dass wir kaum wussten, in welche Richtung wir fotografieren sollten. Es erschien in allen möglichen Farben und Formen. Wir konnten unser Glück nicht fassen.



Abbildung 30: Ich unter dem Polarlicht (M. Messmer 2019)

Auch an den Folgetagen erlebten wir das Polarlicht; zwar nie mehr so intensiv wie am ersten Abend, aber dafür entdeckten wir schlichte und elegante Formen.



Abbildung 31: Elegantes Polarlicht, Vorhang (D. Messmer 2019)

Zudem fühlten wir uns befreiter, da die Angst, ohne Polarlichtbild nach Hause zu gehen, komplett verschwunden war. Insgesamt sahen wir das Polarlicht in 7 von 8 Jagdnächten. Folglich kamen wir zum Schluss, dass man nicht zwingend auf eine geführte Polarlicht-Tour gehen muss, sofern man sich genügend vorbereitet hat. Von der Theorie des Polarlichts wussten wir sogar mehr als unser Guide – nur die praktische Erfahrung fehlte uns. Ein gutes Stück davon sammelten wir jedoch durch all diese wundervollen Tage in Tromsø. In den meisten Fällen erkannten wir das Polarlicht eine bis zwei Stunden nach Sonnenuntergang. Zuerst war es immer eine nur schwach leuchtende Wolke am Horizont, sehr unscheinbar. Im Verlauf der Zeit vergrösserte es sich und bildete einen Bogen. Dieser befand sich plus/minus zwischen den Sternbildern des kleinen und des grossen Wagens (auch „kleiner und grosser Bär“ genannt); für uns konkret also zwischen Nordosten und Nordwesten. Nur vereinzelt wurde das Polarlicht so riesig, dass es sich in alle Himmelsrichtungen ausdehnte und sich sogar direkt über uns abspielte. Dies waren auch die einzigen Polarlichter, die sich wirklich rapide in Form und Farbe veränderten. Alle anderen bewegten sich sehr ruhig und gleichmässig – oder blieben gar statisch. Mein Vater und ich konnten jedoch nicht festlegen, was uns besser gefiel. Jedes Polarlicht, ganz gleichgültig welche Form, Farbe und Helligkeit, hatte etwas enorm Faszinierendes. Die Expedition war aufregend, eindrücklich und ... bleibt unvergessen.

#### 4.5 Analyse und Verarbeitung

Noch immer wie verzaubert von den zahlreichen Polarlichtern machte ich mir auf dem Heimweg, der in kleinen Etappen viel erträglicher war als der Hinweg, Gedanken dazu, was ich mit allem Erlebten anfangen wollte. Ziemlich schnell wurde mir klar, dass ich die Expedition sowohl im wissenschaftlichen als auch im künstlerischen Kontext verarbeiten wollte. Also fing ich an, das Gesehene zu analysieren und kam unter anderem auf die Idee, ein Fotoalbum zu erstellen.

##### 4.5.1 Interpretation des Erlebten

Was mich an der Expedition am meisten verwunderte, war unser Glück. Viele Bekannte erzählten uns vor unserer Reise, dass sie auch schon auf der Suche waren, jedoch ohne Erfolg. So hofften wir, wenigstens an *einem* Abend das Polarlicht zu sehen. Stattdessen sahen wir es über eine Woche lang fast jede Nacht. Natürlich muss man bemerken, dass das Wetter wie geschaffen war für uns. Normalerweise ist es im Oktober in Tromsø oft bewölkt und regnerisch. Bei unserer Expedition hatten wir aber meistens einen klaren Sternenhimmel. Dies war definitiv ein wichtiger Faktor für unseren Erfolg. Da es in der Nacht, in der wir das Polarlicht nicht sahen, aber auch wolkenlos war, bestätigte sich der Fakt, dass das Wetter nicht allein entscheidend ist, ob man das Polarlicht sehen kann oder nicht. In dieser Nacht war das Magnetfeld der Erde beispielsweise sehr schwach. Demnach war das Polarlichtoval so schmal, dass unser Strandort nicht darin lag.

Die Häufigkeit des Polarlichts war aber nicht das einzig Aussergewöhnliche. Auch die Länge und die Intensität der einzelnen Schauspiele waren extrem. So erlebten wir mehrmals ein Spektakel, das sich über mehr als eine Stunde lang abspielte. Unser Guide vor Ort berichtete uns, dass er dies wundersame Licht meistens nur über wenige Minuten beobachten kann. Das Sichten der roten Farbe verglich er sogar mit einem

Jackpot im Lotto. Insgesamt hatten mein Vater und ich also ein unvorstellbar riesiges Glück, da wir in nur einer Woche all dies erlebten. Denn der vielen Berichten über Misserfolge wegen, die ich über das Internet oder über Bekannte aufgenommen hatte, blieb mein Fazit dabei, dass es nicht selbstverständlich war, auch nur ein einziges, bescheidenes Polarlicht zu sehen.

#### 4.5.2 Vergleich zu der Theorie und dem Experiment

Wenn man unsere Expedition mit der Theorie vergleicht, so fällt auf, dass das Polarlicht bei uns viel öfter als erwartet entstand. Denn laut Theorie dürfte das Polarlicht in einem Tief des Sonnenaktivitätszyklus nur wenige Male pro Monat entstehen, da die Sonnenflecken in dieser Zeit relativ selten sind. Tatsächlich waren sie dies während unserer Zeit in Tromsø auch, wie ich über das Internet herausfand.<sup>33</sup> Fast immer sagte der Bericht über die Sonne, dass sie momentan keine Sonnenflecken besass. Trotzdem konnten wir an diesen Tagen ein wunderschönes Polarlicht beobachten. Somit wage ich zu behaupten, dass es für das Polarlicht nicht zwingend einen koronalen Massenauswurf benötigt. Der stetige Sonnenwind scheint für ein mittelgrosses Polarlicht offensichtlich zu reichen. Folglich denke ich, wäre es angebracht, die Theorie ein wenig anzupassen: die Massenauswürfe machen das Polarlicht lediglich intensiver, sind aber nicht eine notwendige Bedingung. Diese Formulierung basiert jedoch nur auf meinen Erfahrungen und ist in keiner Hinsicht wissenschaftlich hinterlegt. Es könnte durchaus auch sein, dass unser Erlebnis eine Ausnahme war, die man sich noch nicht schlüssig erklären kann. Auf alle Fälle zeigt dieses Beispiel, dass man das Polarlicht noch weiter erforschen muss, bis man es denn – vielleicht – vollständig durchschauen kann.

Eine weitere Unklarheit fand ich in Bezug auf die Tageszeit, zu welcher man die Polarlichter beobachten kann. Anders als die Theorie mir versprach, konnten wir das Schauspiel ausschliesslich zwischen 8 Uhr abends und 2 Uhr morgens entdecken. Es gab also immer eine Zeit vor Sonnenaufgang, in der, trotz eigentlich hinreichender Dunkelheit, kein Polarlicht am Himmel zu sehen war. Hier spielten offenbar weitere Faktoren mit, die nie in der Theorie genannt wurden. Ich könnte mir vorstellen, dass der Winkel, in welchem der Sonnenwind auf die Erde trifft, einer dieser Faktoren ist. Dann würde nämlich nicht nur die Jahres-, sondern auch die Tageszeit eine Rolle spielen. Diese Behauptung zu beweisen lag jedoch nicht im Bereich meiner Möglichkeiten, weil mir die wissenschaftlichen Mittel dafür nicht zur Verfügung standen.

Zusätzlich bemerkte ich, dass die rote Farbe auf gleicher Höhe wie die grüne Farbe zu leuchten schien. Dies ist aber einfach zu erklären, wenn man sich meiner Perspektive bewusst ist: Direkt unter dem Polarlicht kann das menschliche Auge natürlich schlecht erkennen, wie weit es von der Erde entfernt ist. Die Verteilung der Farben wird viel deutlicher, wenn man das Polarlicht aus der Perspektive des Weltalls betrachtet. Hier flackern die grünen Lichter offensichtlich näher an der Erdoberfläche als die roten Lichter.

---

<sup>33</sup> (SpaceWeatherLive 2019)



Abbildung 32: Polarlicht vom All aus gesehen (NASA 2011)

Natürlich gibt es auch bei den Formen Unterschiede zwischen der Theorie und der Realität. Denn unsere Erfahrung zeigt, dass meistens mehrere Formen gleichzeitig ineinanderfließen. So ist es nicht immer trivial, ein eindeutiges Muster zu identifizieren. Grundsätzlich lässt sich aber sagen, dass die Formen der Theorie meistens alle im Himmels-Spektakel vorkommen.

Im Vergleich zum Experiment fiel der Unterschied der Farbe auf, den ich in einem früheren Abschnitt bereits erklärte.<sup>34</sup> Ausserdem war jeweils der Anfang und das Ende eines Lichts beziehungsweise eines Polarlichts verschieden. Im Experiment hatte ich entweder ein volles Licht oder dann gar keines. Zwar gab es je nach Spannung kleine Änderungen der Helligkeit, aber diese waren niemals so stark wie jene in der Realität. Das echte, natürliche Polarlicht baut sich über mehrere Minuten auf und verändert sich laufend in der Intensität. Beim Experiment hat das Licht eine viel deutlichere Grenze zwischen Leuchten und Nicht-Leuchten. Dies macht auch Sinn, da der Elektronenfluss genau bis zu einer bestimmten Spannung besteht und unterhalb dieses Bereichs dann abbricht. Der Sonnenwind hingegen besteht ununterbrochen. Wenngleich er ständig in seiner Stärke variiert, so bricht er doch nie gänzlich ab.

#### 4.5.3 Fotoalbum

Da ich die Expedition zu einem grossen Teil meiner Faszination für das Polarlicht wegen durchführte, wollte ich die Ergebnisse auch künstlerisch darstellen. Da mein Vater genau das Gleiche im Sinn hatte, entschieden wir uns, ein gemeinsames Fotoalbum zu gestalten. Dies hiess: wir mussten in einem ersten Schritt von unseren etwa 5'000 Fotos die besonders gelungenen auswählen und bearbeiten. Eine Bearbeitung war

<sup>34</sup> 3.6.2 Thermosphäre – Vakuumkammer

nötig, da die Kameras in diesen extremen Lichtverhältnissen die Realität nicht so aufnahmen, wie wir sie tatsächlich erlebten. So passten wir den Farbton, den Kontrast und die Helligkeit etwas an; bei Bedarf reduzierten wir dazu noch das Rauschen, welches durch hoch gewählte ISO-Werte entstand. Ziel der Bearbeitung war es, die Bilder möglichst nah an die Realität, an *unsere* Realität zu bringen. Danach entschieden wir uns unter allen bearbeiteten Fotos für die 50 besten, die wir mithilfe einer Webseite<sup>35</sup> in einem Album zusammenstellten. Die Idee hinter dem Album war, mit möglichst wenig Text, dafür mit grösseren, wohlangeordneten Bildern einen mehr oder weniger chronologischen Ablauf der Expedition abzubilden.

---

<sup>35</sup> (Bookfactory 2019)

## 5 Schlussteil

Im letzten Teil meiner Maturaarbeit möchte ich die wichtigsten Aspekte nochmals auf den Punkt bringen, indem ich meine Leitfragen konkret beantworte. Ausserdem will ich durch eine Selbstreflexion einen Einblick in den Prozess der ganzen Arbeit geben. Zum Schluss füge ich noch – für alle Personen, die mich in meiner Arbeit besonders unterstützt haben – eine Danksagung hinzu.

### 5.1 Antworten auf meine Leitfragen

Das Polarlicht kann nur dank dem Sonnenwind entstehen. Dieser Strom von geladenen Teilchen kommt von der Sonne her und trifft auf seinem Weg das Magnetfeld der Erde. Dort werden die Teilchen entscheidend abgelenkt und zum Teil auch eingefangen. Somit nähern sie sich der Erdatmosphäre, in welcher sie mit rasender Geschwindigkeit vor allem auf Sauerstoff- und Stickstoffatome treffen. Dies löst unter Umständen eine Reaktion aus, bei der Photonen freigesetzt werden. Falls sich genügend Photonen ansammeln, werden diese für den Menschen sichtbar – als wundervolles Polarlicht.

Ein solches Polarlicht lässt sich vom Prinzip her relativ einfach in einem Modell nachstellen. Mit einigem Aufwand gelang mir dies sogar an meiner eigenen Schule. Ich benötigte dafür ein Hochspannungsnetzgerät, eine Vakuumkammer und eine Edelstahlkugel. Diese und ein paar weitere Hilfsmittel (wie etwa ein starker Magnet) ermöglichten es mir, ein System mit dem Sonnenwind, der Atmosphäre und der Erde nachzubauen, in dem ich ein künstliches Polarlicht erzeugen konnte.

Um aber das echte Polarlicht zu erleben, benötigte ich wesentlich mehr Aufwand. So plante ich eine Expedition in den hohen Norden, auf der mich mein Vater begleitete. Gemeinsam bewältigten wir die anspruchsvolle Reise und suchten anschliessend sowohl mit als auch ohne Guide nach dem Polarlicht. Dank guter Vorbereitung und immensem Glück fanden wir es auch – oder es fand uns. Auf alle Fälle fiel uns das künstlerische Einfangen, dank unserer professionellen Kameraausrüstung und einigem fotografischem Wissen, dann nicht mehr schwer.

### 5.2 Selbstreflexion

Während der meisten Zeit meiner Arbeit war ich sehr motiviert. Natürlich hatte ich auch das Glück, ein Thema behandeln zu dürfen, das mich schon im privaten Leben faszinierte. Dass ich dazu ein Experiment durchführen musste, war mir zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht bewusst gewesen. Dennoch bereitete mir auch dieser Teil der Arbeit grosse Freude, ganz besonders, als der Versuch funktionierte. Einzig die Vorbereitung auf das Experiment, welche infolge von Unvorhergesehenem deutlich länger dauerte als geplant, machte mir etwas zu schaffen. Ich konnte generell einige Vorgaben meines Zeitplans nicht einhalten. So zum Beispiel auch das Verfassen der Polarlichttheorie. Dies war jedoch nicht weiter tragisch, da ich mir im Verlauf der Arbeit ganz automatisch immer mehr Wissen aneignete und schliesslich einen Theorieteil schreiben konnte, der gut zum Rest der Arbeit passt. Als Höhepunkt klappte sogar die Expedition, welche ich hauptsächlich selber organisierte, obschon ich während der Reise und auch während dem Fotografieren mehrmals Momente hatte, in denen mir unklar war, wie lange ich noch durchhalten würde. Die Müdigkeit beziehungsweise die Kälte

machten die Situationen teilweise sehr unangenehm. Dies erwartete ich jedoch schon beim Planen der Expedition und sah es als aufregende Herausforderungen. Somit lässt sich als Fazit sagen, dass mir ausnehmend viel gelungen ist. Dies hängt aber nicht nur mit mir, sondern insbesondere auch mit meinem Glück zusammen. Sowohl das Experiment als auch die Expedition hätten sehr wohl schief gehen können. In diesem Fall hätte ich keinerlei vorzeigewürdige Ergebnisse gehabt und wäre wohl stark enttäuscht gewesen, wodurch mir dann auch das Schreiben der Arbeit schwerer gefallen wäre. Solche Art von Risiken gehört aber zum Leben und sollte meiner Meinung nach nicht vermieden werden.

### 5.3 Danksagung

Als erstes möchte ich mich aufrichtig bei meiner Referentin bedanken. Elisabeth Ger-  
mann hat mich während dem ganzen Prozess engagiert und wegweisend unterstützt. Sie war immer offen für Fragen und scheute nicht davor zurück, ihre Freizeit in meine Arbeit zu investieren. Viele Aspekte in meiner Arbeit wären ohne ihre Hilfe nicht so ring umsetzbar gewesen.

Genauso will ich mich bei meinem Vater, Martin Messmer, bedanken. Er war die Per-  
son, die mir die Expedition ermöglichte. Da er ebenfalls eine Faszination für Polarlichter hat, konnte er mich in vielen Momenten der Arbeit unterstützen. So gab er mir auch bedeutungsvolle Hinweise bezüglich des Fotografierens und der Bearbeitung der Fo-  
tos.

Den Laborassistenten, Lukas Ganternt und Max Rupp, habe ich zu verdanken, dass  
mein Experiment funktionierte. Beide halfen mir dabei, zum benötigten Material zu kommen und dieses auch richtig einzusetzen.

## Anhang

### Fotoalbum

Das Fotoalbum dient der Veranschaulichung des auf der Expedition Erlebten.

### Literaturverzeichnis

2017. *12PHY College*. 28. Juli. Zugriff am 12. November 2019.  
<https://12phytnt2017.wordpress.com/2017/07/28/right-hand-grip-rule-for-solenoids/>.
2017. *Astronomie*. 9. Oktober. Zugriff am 22. Dezember 2019.  
<https://www.astronomie.de/astronomische-fachgebiete/atmosphaerische-erscheinungen/ueber-das-polarlicht/>.
- Barnert, Silvia. 1998. *Spektrum*. Zugriff am 11. November 2019.  
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/stossanregung/13933>.
- Barth, Roland. 1999. *Spektrum*. Zugriff am 14. November 2019.  
<https://www.spektrum.de/lexikon/optik/polarlicht/2632>.
2019. *Bayerischer Rundfunk*. 10. Oktober. Zugriff am 18. November 2019.  
<https://www.br.de/themen/wissen/sonnensturm-sonnenwind-sonneneruption-100.html>.
- Bleck-Neuhaus, Jörn. 1992. *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. 4. Berlin.
2019. *Bookfactory*. Dezember. Zugriff am 21. Dezember 2019.  
<https://www.bookfactory.ch/>.
2012. *Polarlichter*. Regie: Wolfgang Dr. Würker. Produzent: FWU Institut für Film und Bild.
2005. *Exploring Magnetism*. Zugriff am 4. Dezember 2019.  
[http://cse.ssl.berkeley.edu/SegwayEd/lessons/exploring\\_magnetism/in\\_Solar\\_Flares/s4.html](http://cse.ssl.berkeley.edu/SegwayEd/lessons/exploring_magnetism/in_Solar_Flares/s4.html).
2019. *Fotointern*. Zugriff am 6. Dezember 2019.  
<https://www.fotointern.ch/archiv/2011/11/09/reisetipp-mit-dionys-moser-zu-den-polarlichtern/>.
- Freiholz, Harald. 2019. *Grundwissen-Elektrotherapie*. 18. September. Zugriff am 27. Dezember 2019. <http://www.grundwissen-elektrotherapie.de/html/physik.html>.
- Gantert, Lukas. 2019. (24. Mai).
2019. *Google Maps*. 30. Dezember. Zugriff am 28. Dezember 2019.  
<https://www.google.com/maps/dir/Z%C3%BCrich/Kopenhagen,+D%C3%A4ne-mark/Oslo,+Norwegen/Troms%C3%B8,+Norwegen/@57.6182401,-9.2564545,3.44z/data=!4m2!4m2!5!1m1!1s0x47900b9749bea219:0xe66e8df1e71fdc03!2m2!1d8.541694!2d47.3768866!1m5!1m1!1s0x4652533c5c803d2>.
- Jeanjacquot, Philippe. 2013. „Science in School.“ Zugriff am 10. Juli 2019.  
[https://www.scienceinschool.org/sites/default/files/teaserMaterial/issue26\\_aurorae\\_instructions\\_german.pdf](https://www.scienceinschool.org/sites/default/files/teaserMaterial/issue26_aurorae_instructions_german.pdf).
- . 2014. *Science in School*. 18. Juli. Zugriff am 10. Juli 2019.  
<https://www.scienceinschool.org/de/2013/issue26/aurorae>.

- Keith Johnson, Simone Hewett, Sue Holt, John Miller. 2015. *Advanced Physics For You*. Bd. 2. Oxford University Press.
2019. *Landesbildungsserver*. Zugriff am 3. Dezember 2019. [https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/berufliche-bildung/ernaehrungslehre/unterrichtsmaterialien/handreichungen/handreichung\\_ernaehrung\\_und\\_chemie/eingangsklasse/lpe3/lpe\\_0303](https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/berufliche-bildung/ernaehrungslehre/unterrichtsmaterialien/handreichungen/handreichung_ernaehrung_und_chemie/eingangsklasse/lpe3/lpe_0303).
2010. *Lern Helfer*. Zugriff am 11. November 2019. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/photonen>.
2019. *Locationscout*. Zugriff am 23. Oktober 2019. <https://www.locationscout.net/locations/901-tromsc3b8/spots>.
- Lynnebakken, Hilde. 2017. *Titan*. 6. Juni. Zugriff am 13. Dezember 2019. <https://titan.uio.no/node/2349>.
- Merkel, Wolfgang W. 2010. *Welt*. 19. August. Zugriff am 2. November 2019. <https://www.welt.de/wissenschaft/article9090079/Was-passiert-wenn-das-Erdmagnetfeld-kollabiert.html>.
- Messmer, David. 2019. Tromsø.
- Messmer, David. 2019. Küsnacht.
- Messmer, Martin. 2019. Tromsø.
- Messmer, Martin. 2019. Stäfa.
2011. *NASA*. 17. September. Zugriff am 23. Dezember 2019. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/52287/fire-in-the-sky-and-on-the-ground>.
- Neitram. 2019. *Wikipedia*. 13. September. Zugriff am 25. November 2019. <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenwind>.
- Nilssen, Arne C. 2006. *Arctic Lights*. Übersetzung: Rob Barrett. Tromsø: Lundblad Media.
- Nylund, Per Helge. 2016. *The Arctic University of Norway*. 3. Februar. Zugriff am 12. Dezember 2019. [https://en.uit.no/tmu/aktuell?p\\_document\\_id=451575](https://en.uit.no/tmu/aktuell?p_document_id=451575).
- Pfoser, Andreas. 2018. *Aurora Borealis*. 26. Februar. Zugriff am 6. November 2019. <http://www.auroraborealis.at/polarlichter/>.
2018. *Plasma-Universe*. September. Zugriff am 15. Dezember 2019. <https://www.plasma-universe.com/terrella/>.
- Podbregar, Nadja. 2019. *Scinexx*. 1. Februar. Zugriff am 11. November 2019. <https://www.scinexx.de/dossier/plasma-der-vierte-zustand-der-materie/>.
2017. *Polarlichter - Aurora Borealis*. Zugriff am 25. Dezember 2019. <http://www.polarlichter.info/wann.htm>.
- Saperaud. 2019. *Wikipedia*. 13. Dezember. Zugriff am 8. Dezember 2019. <https://de.wikipedia.org/wiki/Luftdruck>.
- Schlegel, Kristian. 2001. *Vom Regenbogen zum Polarlicht*. 2. Auflage. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Siberianart. 2019. *VectorStock*. Zugriff am 19. November 2019. <https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/solar-wind-diagram-vector-21409409>.
2019. *SpaceWeatherLive*. 23. Oktober. Zugriff am 23. Oktober 2019. <https://www.spaceweatherlive.com/de/sonnenaktivitat>.

- Specktor, Brandon. 2018. *LiveScience*. 4. Juni. Zugriff am 8. November 2019.  
<https://www.livescience.com/62734-bow-shock-thwarts-solar-wind.html>.
- Walker, Andreas. 1997. *Zeichen am Himmel*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Wang, Y.-M. 2010. „On the Relative Constancy of the Solar Wind Mass Flux at 1 AU.“ *The Astrophysical Journal Letters*, 10. Mai.
2019. *Weltraumwetter*. 10. November. Zugriff am 10. November 2019.  
<https://sonnen-sturm.info/sonnenzyklus>.
2019. *Weltraumwetter*. 10. November. Zugriff am 10. November 2019.  
<https://sonnen-sturm.info/lexikon/sonnensturm>.
- Westphalen, Christian. 2016. *Die große Fotoschule*. 3. Auflage. Bonn: Rheinwerk Verlag.
2011. *Wikipedia*. 16. Januar. Zugriff am 15. November 2019.  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Linke-Hand-Regel.svg>.
2017. *Wissenschaft*. 30. Januar. Zugriff am 26. November 2019.  
<https://www.wissenschaft.de/astronomie-physik/irdischer-bio-sauerstoff-trifft-den-mond/>.
2013. *Youtube*. 18. Oktober. Zugriff am 30. Dezember 2019.  
<https://www.youtube.com/watch?v=dSQ71ovozBs>.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Koronaler Massenauswurf (Exploring Magnetism 2005).....	6
Abbildung 2: Sonnenwind trifft auf Magnetfeld (Siberianart 2019) .....	8
Abbildung 3: Linke-Hand-Regel (Wikipedia 2011).....	9
Abbildung 4: Rechte-Daumen-Regel (12PHY College 2017).....	9
Abbildung 5: Brechende Magnetfeldlinien (Youtube 2013) .....	10
Abbildung 6: Stossanregung / Abregung (Landesbildungsserver 2019) .....	11
Abbildung 7: Polarlichtoval (Astronomie 2017).....	13
Abbildung 8: Blaues und violettes Polarlicht (Fotointern 2019).....	14
Abbildung 9: Grünes, rotes und gelbes Polarlicht (D. Messmer 2019).....	15
Abbildung 10: Polarlichtform: "Bogen" (D. Messmer 2019).....	16
Abbildung 11: Polarlichtform: "Bänder" (D. Messmer 2019).....	17
Abbildung 12: Polarlichtform: "Vorhang" (M. Messmer 2019) .....	17
Abbildung 13: Polarlichtform: "Korona" (D. Messmer 2019).....	18
Abbildung 14: Polarlichtform: "Flecken" (D. Messmer 2019).....	18
Abbildung 15: Experiment von Kristian Birkeland (links) (Lynnebakken 2017) .....	19
Abbildung 16: Schema zum Experimentaufbau (Jeanjacquot, Science in School 2013) (bearbeitet) .....	20
Abbildung 17: Christbaumkugel / Stahlkugel (M. Messmer 2019).....	22
Abbildung 18: Aufbau des Experiments (D. Messmer 2019).....	23
Abbildung 19: Entladung an Halterungen (D. Messmer 2019).....	24
Abbildung 20: Blitzentladung (D. Messmer 2019) .....	25
Abbildung 21: Zur Kathode ausgerichtete Entladung (D. Messmer 2019) .....	25
Abbildung 22: Abstehender, leuchtender Ring (D. Messmer 2019) .....	26
Abbildung 23: Lichtband in S-Form (D. Messmer 2019) .....	27

Abbildung 24: Leuchtende Fläche über dem Pol (D. Messmer 2019).....	27
Abbildung 25: Bild von Anleitung (Jeanjacquot, Science in School 2014) .....	28
Abbildung 26: Strecke Zürich-Tromsø (Google Maps 2019).....	33
Abbildung 27: Ich mit Hybrid-Auto (M. Messmer 2019).....	35
Abbildung 28: Erstgesichtetes Polarlicht, Flecken (D. Messmer 2019).....	35
Abbildung 29: Polarlichtapparatur im Museum (M. Messmer 2019).....	37
Abbildung 30: Ich unter dem Polarlicht (M. Messmer 2019).....	40
Abbildung 31: Elegantes Polarlicht, Vorhang (D. Messmer 2019) .....	41
Abbildung 32: Polarlicht vom All aus gesehen (NASA 2011) .....	44