

# Wie wird das Weltraumwetter morgen? Sonnenaktivität und ihre Auswirkungen



Dr. Marina Battaglia

Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Data Science  
marina.battaglia@fhnw.ch

29. Juni 2018

## Kurzzusammenfassung

Die Sonne ist unser nächster Stern. Sie spendet uns Licht und Wärme und beeinflusst die Erde kurzfristig und langfristig auf vielfältige Weise. Sie verändert sich ständig und zeigt unterschiedliche Aktivitätserscheinungen. Es ist schon länger bekannt, dass die Sonnenaktivität direkte, kurzfristige Auswirkungen auf die Erde hat. Heute bezeichnet man dies als Weltraumwetter. Der vorliegende Text soll interessierten Laien eine Einführung in die Thematik Sonnenaktivität und Weltraumwetter bieten. Lesende sollen einen Eindruck davon bekommen, welche Aktivitätsphänomene der Sonne für das Weltraumwetter verantwortlich sind und wie die moderne Forschung ihre Entstehung erklärt. Weiter werden einige Auswirkungen der Sonnenaktivität auf die Erde und mögliche Konsequenzen für die Gesellschaft beleuchtet werden. In einem dritten Abschnitt wird auf die technischen Möglichkeiten der Beobachtung von Sonnenaktivität, welche wir heute haben, eingegangen sowie die ESA Mission *Solar Orbiter* kurz vorgestellt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Die vielen Gesichter der Sonne</b>	<b>2</b>
1.1 Phänomenologische Beschreibung der wichtigsten beobachteten Aktivitätsphänomene . . . . .	2
1.1.1 Sonnenflecken und der Sonnenzyklus . . . . .	2
1.1.2 Sonneneruptionen und der Sonnenwind . . . . .	2
1.2 Sonneneruptionen als Verursacher von Weltraumwetter . . . . .	3
1.3 Die Physik von Sonneneruptionen . . . . .	4
<b>2 Weltraumwetter und seine Auswirkungen auf die Erde</b>	<b>5</b>
2.1 Wie entsteht Weltraumwetter? . . . . .	5
2.2 Auswirkungen von Weltraumwetter auf die Erde . . . . .	6
2.2.1 Polarlichter . . . . .	7
2.2.2 Störungen der Kommunikation . . . . .	7
2.2.3 Stromausfälle und Schäden an Satelliten . . . . .	7
2.2.4 Strahlenbelastung . . . . .	8
2.3 Weltraumwetter: Angstmacherei oder reale Gefahr? . . . . .	8
2.3.1 Vorhersage von Weltraumwetter . . . . .	9
<b>3 Sonnenbeobachtungen mit Weltraumsatelliten</b>	<b>10</b>
3.1 Warum Sonnenbeobachtungen im Weltraum? . . . . .	10
3.2 Beobachtungen mit aktuellen Weltraumsatelliten . . . . .	11
3.2.1 RHESSI . . . . .	11
3.2.2 SDO . . . . .	12
3.3 Die ESA Mission <i>Solar Orbiter</i> . . . . .	13
3.3.1 Missionsbeschreibung . . . . .	14
3.3.2 Ein Stück Schweiz auf dem Weg zur Sonne: STIX . . . . .	15
<b>4 Schlusswort</b>	<b>17</b>
<b>A Liste der Akronyme</b>	<b>18</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>19</b>

Titelbild: Aufnahme der Ultraviolettstrahlung der Sonne (NASA/SDO)

## 1 Die vielen Gesichter der Sonne

Wird die Sonne im sichtbaren Licht von der Erde aus betrachtet, so erscheint sie uns als weisslich-gelbliche Scheibe. Projiziert man die Sonnenscheibe auf ein weisses Blatt Papier oder betrachtet sie durch ein Teleskop, so fallen schwarze 'Flecken' auf der Sonnenscheibe auf. Betrachtet man dagegen Bilder, die die Ultraviolettstrahlung (UV-Strahlung) der Sonne zeigen, so zeigt sich ein völlig anderes Muster. Man erkennt ausgedehnte dunkle Gebiete, sowie hell leuchtende Regionen, wobei Letztere an derselben Stelle erscheinen wie die dunklen Flecken in der Weisslichtaufnahme.

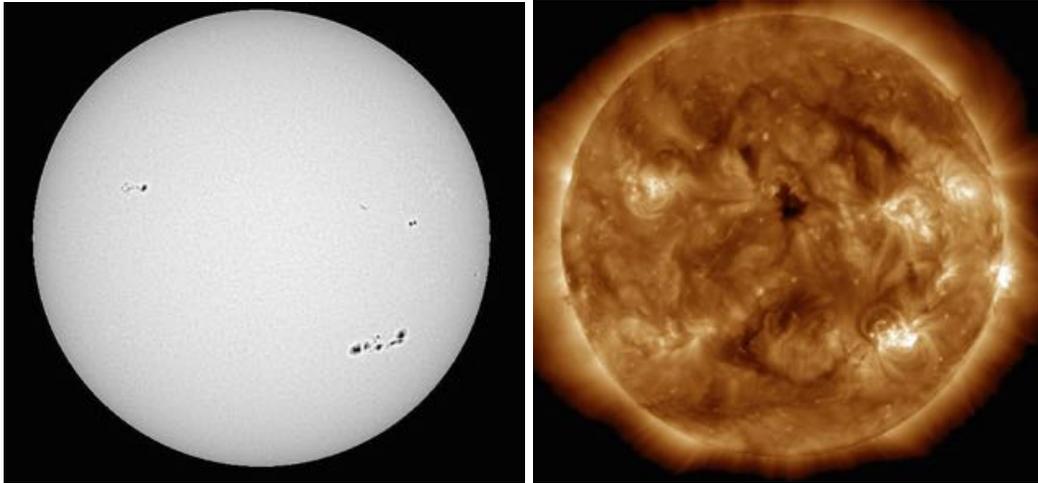


Abbildung 1: Zwei Bilder der Sonne aufgenommen zum selben Zeitpunkt mit dem NASA Solar Dynamic Observatory. Links ein Bilder der Sonne im sichtbaren Licht, rechts ein Bild der UV-Strahlung. Den dunklen Flecken im sichtbaren Licht entsprechen hell erleuchtete Gebiete in der UV-Aufnahme (NASA).

### 1.1 Phänomenologische Beschreibung der wichtigsten beobachteten Aktivitätsphänomene

#### 1.1.1 Sonnenflecken und der Sonnenzyklus

Die dunklen Flecken in der Weisslichtaufnahme von Abbildung 1 sind schon seit Jahrhunderten bekannt und werden Sonnenflecken genannt. Es sind Gebiete auf der Oberfläche der Sonne wo der Wärmetransport durch Konvektion aus dem Sonneninneren eingeschränkt ist, weshalb die Temperatur dort niedriger ist als auf der übrigen Sonnenoberfläche (ca. 3000-4000°C verglichen mit 5500°C). Deshalb erscheinen sie dunkler. Sonnenflecken werden seit den Zeiten von Galileo Galilei systematisch beobachtet und gezählt und sind somit die älteste und am besten dokumentierte Aktivitätserscheinung der Sonne. Betrachtet man die Sonnenfleckenanzahl über einen längeren Zeitraum so stellt man fest, dass sie periodisch schwankt mit einem Maximum ca. alle 11 Jahre. Die Sonnenaktivität zeigt also einen Zyklus von 11 Jahren. Das letzte solare Maximum war im Jahr 2013, wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist. Zur Zeit befinden wir uns also im Sonnenminimum.

#### 1.1.2 Sonneneruptionen und der Sonnenwind

Nicht nur die Sonnenfleckenanzahl verändert sich periodisch, sondern auch eine Reihe weiterer Phänomene. Mit Beginn des Weltraumzeitalters wurde es möglich, die Sonne aus dem Weltraum zu beobachten. Dadurch wurde eine Vielzahl weiterer Aktivitätserscheinungen gefunden, welche nicht mit einfachen Mitteln von der Erdoberfläche aus beobachtet werden können. Darunter sind Sonneneruptionen sicher die spektakulärsten. Der deutsche Begriff "Sonneneruption" wird oft synonym verwendet für zwei Arten von Eruptionen, welche aber grundsätzlich verschieden sind. Man unterscheidet zwischen solaren Flares und koronalen Massenauswürfen. Ein solarer Flare ist

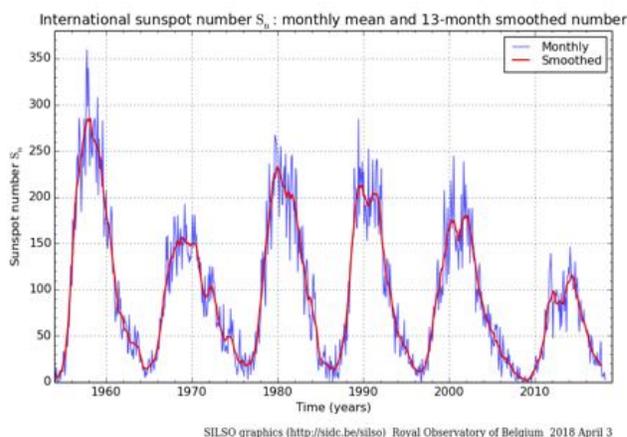


Abbildung 2: Die gemittelte Sonnenfleckenanzahl der letzten 60 Jahre zeigt eine periodische Veränderung über ca. 11 Jahre. Das letzte solare Maximum war in 2013 (SILSO data/image, Royal Observatory of Belgium, Brussels [2]).

gekennzeichnet durch ein Aufleuchten eines Gebiets auf der Sonne und geladene Teilchen (Protonen, Elektronen), welche bis auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Ein koronaler Massenauswurf ist der Ausstoss von grösseren Mengen an geladenen Teilchen als eine Art Teilchenwolke, welche sich mit mehreren hundert km pro Sekunde von der Sonne entfernt. Man sieht diese sehr schön in Aufnahmen mit Weltraumsatelliten, solange die Sonne selber durch eine Scheibe abgedeckt ist, wie in Abbildung 3 gezeigt. Die Häufigkeit von Sonneneruptionen unterliegt demselben Zyklus wie die Sonnenfleckenzahl. Daneben gibt es einen konstanten Strom von geladenen Teilchen, welche von der Sonne ausgestossen werden, auch während Perioden mit geringer Sonnenaktivität. Auch dieser sogenannte Sonnenwind trägt zum Weltraumwetter bei. Im Folgenden soll aber die Rolle von Sonneneruptionen bei der Entstehung von Weltraumwetter etwas ausführlicher beschrieben werden.

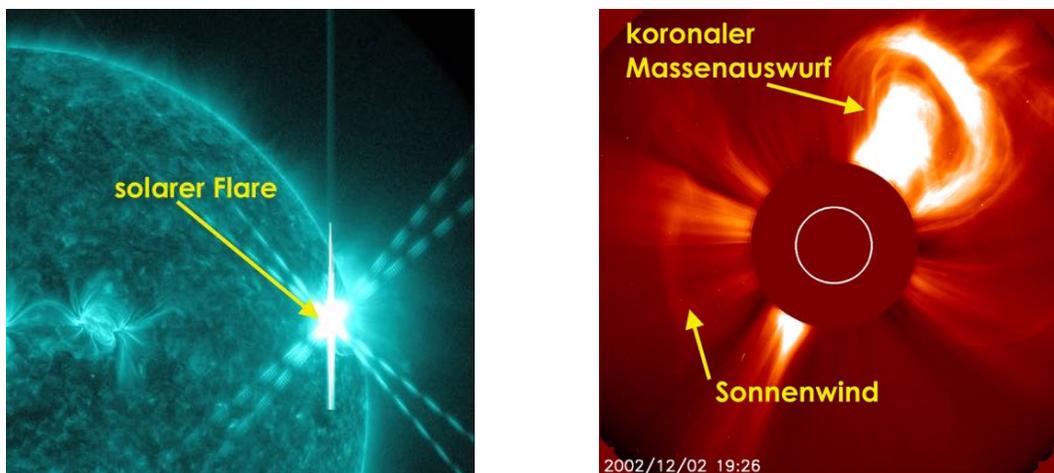


Abbildung 3: Abbildungen von Sonneneruptionen. Die linke Abbildung zeigt einen solaren Flare, aufgenommen mit dem NASA Solar Dynamics Observatory (NASA/SDO [3]). Er war so intensiv, dass der Kamerasensor gesättigt war<sup>1</sup>. Die rechte Abbildung zeigt einen koronalen Massenauswurf, aufgenommen mit dem NASA/ESA Satelliten SOHO/Lasco (SOHO/ESA & NASA [4]). Die schwarze Scheibe in der Bildmitte ist ein sogenannter Koronagraph, der die Sonne abdeckt. Die Grösse der Sonne ist durch den weissen Kreis angedeutet.

## 1.2 Sonneneruptionen als Verursacher von Weltraumwetter

Erste Hinweise darauf, dass die Aktivität der Sonne einen Einfluss auf die Erde haben könnte wurden schon im 19ten Jahrhundert gefunden. Auf die erste Beobachtung eines solaren Flares von Carrington 1859 [5] folgten

<sup>1</sup>Animation: [https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/gallery/movies/Flare\\_AugX7\\_best2.mov](https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/gallery/movies/Flare_AugX7_best2.mov)

messbare Veränderungen des Erdmagnetfeldes auf der Oberfläche, sowie Polarlichter, welche bis nahe des Äquators beobachtet werden konnten. Während Carrington selber noch nicht voreilig einen Zusammenhang zwischen seiner Beobachtung und den Effekten auf der Erde herstellen wollte, so wurde in zunehmenden Beobachtungen über die folgenden Jahre klar, dass Sonneneruptionen einen direkten, kurzfristigen Einfluss (innerhalb von Minuten bis Tagen) auf die Erde haben. Die Geschichte dieser Entwicklung inklusive historischer Berichte ist im Buch von Sten Odenwald 'Solar Storms. 2000 years of human calamity' ausführlich beschrieben [6].

### 1.3 Die Physik von Sonneneruptionen

Die Ursache von Sonneneruptionen liegt in Veränderungen des Magnetfelds der Sonne. Während des Aktivitätsminimums entspricht dieses einem Dipolfeld. Im Verlauf der nächsten 11 Jahre wird es allerdings stark verändert. Der Grund liegt in der Eigenrotation der Sonne, in ihrem Aufbau und der Plasmaphysik. Die Sonne dreht sich in 27 Tagen einmal um die eigene Achse. Sie besteht aus Plasma (ionisiertem Gas, hauptsächlich Wasserstoff, gefolgt von Helium und schwereren Elementen) und somit ist weder ihr Inneres noch ihre Oberfläche fest. Das führt dazu, dass Gebiete am Äquator etwas schneller rotieren als gegen die Pole hin (sogenannte differentielle Rotation). Die Plasmaphysik beschreibt wie unter gewissen Bedingungen ein Magnetfeld in einem Plasma 'eingefroren' ist. Bewegt sich die Materie, so wird das Magnetfeld mitgeschleift. Auf der Sonne führt dies dazu, dass sich das Magnetfeld über die Jahre zunehmend aufwickelt und dadurch gespannt wird, wie ein gespanntes Gummiband. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt.

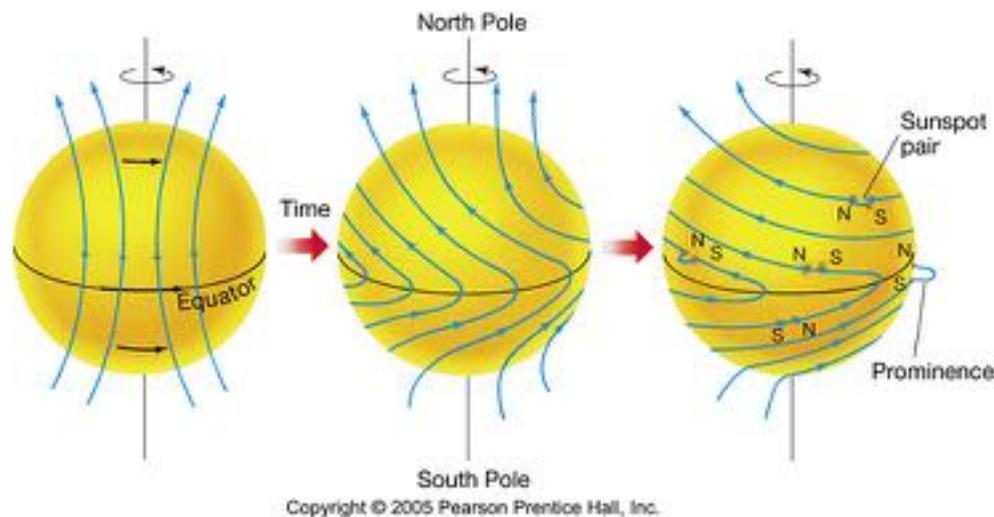


Abbildung 4: Illustration der differentiellen Rotation der Sonne und wie sich als Folge davon das Magnetfeld während des Sonnenzyklus verändert (aus [7])<sup>2</sup>.

Wird die Spannung zu gross, entstehen viele Gebiete mit starken Magnetfeldern an der Oberfläche der Sonne; die Sonnenflecken. In der Folge wird das Magnetfeld umgepolt und der Zyklus beginnt von Neuem. Die Sonnenfleckengebiete sind jeweils dipolar, dh. entsprechen dem Nord- bzw. Südpol eines Magneten, verbunden mit Magnetfeldlinien über der Sonnenoberfläche. Da Magnetfelder und elektrisch geladene Teilchen aneinander gekoppelt sind, sind diese magnetischen Bögen oft gefüllt mit leuchtendem Plasma, wie in Abbildung 5 illustriert.

Sonneneruptionen sind die Folge der Freisetzung von magnetischer Energie. Dabei wird diese umgewandelt in beschleunigte Teilchen und elektromagnetische Strahlung. Die Energiemenge, die in einem solaren Flare freigesetzt wird, kann bis zu  $10^{25}$  Joule betragen. Das sind ca. 2 Milliarden Megatonnen TNT und würde reichen um den Weltenergiebedarf für 20000 Jahre zu decken! Gleichzeitig werden Teilchen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Der ganze Prozess dauert jedoch nur einige Minuten. Während dem Sonnenmaximum kann es über

<sup>2</sup>Animation: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/Movies/dynamo/dynamo.mpg>

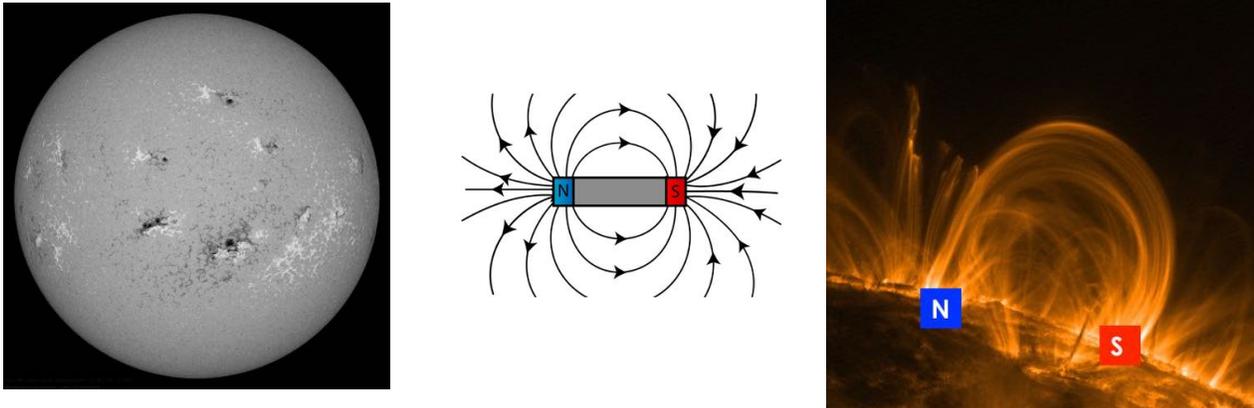


Abbildung 5: Links: Aufnahme der Magnetfelder an der Oberfläche der Sonne (NASA/SDO [3]). Weisse und schwarze Gebiete zeigen die beiden Polaritäten. Sie sind jeweils mit Magnetfeldlinien verbunden, ähnlich wie bei bekannten Stabmagneten (Bild in der Mitte [8]). Rechts: Magnetische Bögen, gefüllt mit leuchtendem Plasma, aufgenommen mit dem NASA Satelliten Trace (M. Aschwanden, NASA/Trace, [9])

mehrere Wochen fast täglich relative grosse Flares geben. Während dem Sonnenminimum vergehen auch einmal Monate mit sehr wenigen, kleineren Flares oder auch gar keinen.

Koronale Massenauswürfe haben dieselben Ursachen wie solare Flares und treten oft gleichzeitig auf, aber nicht immer. Es ist eine offene Forschungsfrage, ob durch einen solaren Flare ein koronaler Massenauswurf ausgelöst wird oder umgekehrt.

#### Sonnenaktivität: Was wir wissen

- Die Sonne ist ständig aktiv
- Die Stärke der Aktivität unterliegt einem 11-Jahreszyklus
- Sonneneruptionen (solare Flares und koronale Massenauswürfe) sind die spektakulärsten Erscheinungen. Sie setzen innert Sekunden bis Minuten ein zehntausendfaches des weltweiten jährlichen Energiebedarfs frei und beschleunigen Teilchen auf relativistische Geschwindigkeiten
- Grundlage für Sonnenaktivität sind Magnetfelder

#### Sonnenaktivität: Was wir nicht wissen

- Warum ist der Zyklus gerade 11 Jahre?
- Wie genau werden Sonneneruptionen verursacht?
- Wie werden Teilchen so effizient beschleunigt?
- Wann genau passiert eine Sonneneruption? Wie können wir sie besser vorhersagen?

## 2 Weltraumwetter und seine Auswirkungen auf die Erde

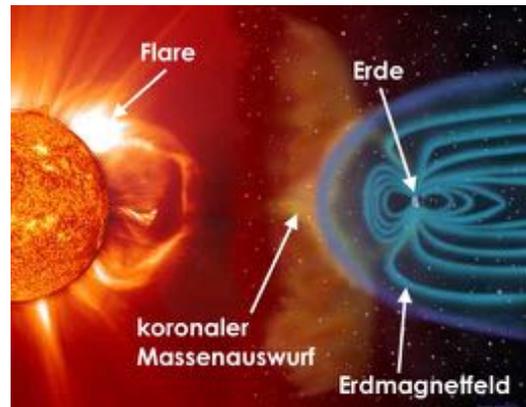
Polarlichter und Veränderungen des Erdmagnetfelds sind nur zwei einer Reihe von Auswirkungen, die die Sonnenaktivität auf die Erde hat. Die oben vorgestellten Vorgänge auf der Sonne und ihre Auswirkungen auf die Erde werden als Weltraumwetter bezeichnet.

### 2.1 Wie entsteht Weltraumwetter?

Der von Carrington in 1859 beobachtete solar Flare und der darauf folgende koronale Massenauswurf waren die grössten erdgerichteten Sonneneruptionen der Neuzeit. Aber auch kleinere Eruptionen können weitreichende

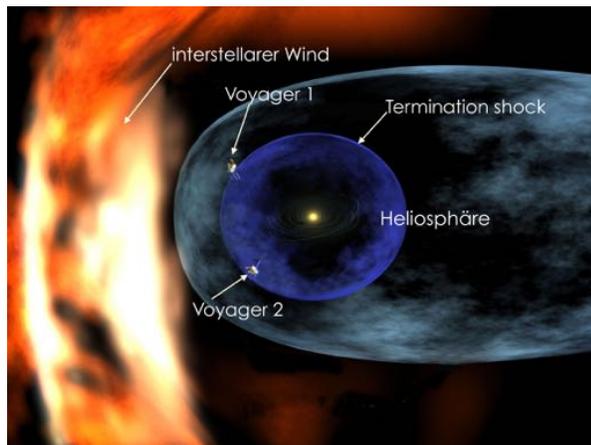
Konsequenzen haben, wenn sie genau auf die Erde treffen. Das Zusammenspiel zwischen einer Sonneneruption und der Erde ist in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Künstlerische Darstellung der Beeinflussung des Erdmagnetfelds durch die Sonne<sup>3</sup>. Die Skalen sind nicht massstäblich! (NASA/Steele Hill [10])



Das Erdmagnetfeld wirkt wie eine Art Schutzschild und lenkt einen grossen Anteil der einfallenden geladenen Teilchen um die Erde herum. Man erkennt in der Abbildung auch schön, dass das Erdmagnetfeld nicht ein idealer Dipol ist, sondern durch den Sonnenwind und auftreffende koronale Massenauswürfe verformt wird. Trotz dieser Schutzwirkung können aber viele Teilchen sehr nahe zur Erde vordringen, wo sie entlang der Magnetfeldlinien bis in die dichteren Atmosphärenschichten propagieren. In Anlehnung an die Begriffe des irdischen Wetters werden diese Störungen des Erdmagnetfelds und ihre Auswirkungen geomagnetische Stürme oder auch Sonnenstürme genannt.

### Wo ist die Grenze des Sonnensystems?



Der Einfluss der Sonne reicht weit über die Umlaufbahn der Erde, ja weit über die Umlaufbahn von Pluto hinaus. Diesen Einflussbereich nennt man die Heliosphäre. Während die Sonne und mit ihr das Sonnensystem durch den Weltraum fliegt, trifft die Heliosphäre auf den interstellaren Wind. Dadurch entsteht eine Art Bugwelle, ähnlich wie bei einem Schiff, das über den Ozean pflügt. Am Termination shock wird der Druck von diesem interstellaren Wind so gross, dass er den Sonnenwind stark abbremst. Dies kann man als eigentliche Grenze des Sonnensystems betrachten. Die beiden Voyager Sonden der NASA tragen Instrumente zur Messung von geladenen Teilchen aus dem Sonnenwind und Magnetfeldern auf sich. Voyager 1 befindet sich nun schon in der Region hinter dem Termination shock. Man kann sagen, es ist das erste Raumschiff, welches unser Sonnensystem verlassen hat und sich nun im interstellaren Raum bewegt (NASA [24]).

## 2.2 Auswirkungen von Weltraumwetter auf die Erde

Die Auswirkungen von Sonnenstürmen auf die Erde und unsere Technologien sind vielfältig und können unangenehme Konsequenzen haben. Sie reichen von Polarlichtern über Störungen der Kommunikation bis zu Stromausfällen. Eine Übersicht ist in Abbildung 7 gegeben. Einige davon werden hier kurz beschrieben. Die Webseite

<sup>3</sup>Animation: <http://svs.gsfc.nasa.gov/20057>

der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, [12]) liefert ausführlichere Erklärungen und weiterführendes Material.



Abbildung 7: Übersicht über die wichtigsten Effekte von Sonnenstürmen auf der Erde: Erhöhte Strahlungsbelastung für Astronautinnen und Astronauten sowie Flugpersonal, Beschädigung von Satelliten, Polarlichter, Störungen von Kurzwellenkommunikation und GPS, Auswirkungen auf die Stromversorgung (NOAA [11]).

### 2.2.1 Polarlichter

Polarlichter sind sicher die schönsten Auswirkungen von Weltraumwetter. Sie werden verursacht durch geladene Teilchen, welche in den oberen Atmosphärenschichten mit Sauerstoff - und Stickstoffmolekülen zusammenstossen und diese dadurch zum Leuchten anregen. Aufgrund der Form des Erdmagnetfeldes gelangen diese Teilchen in der Nähe beider Pole einfacher und tiefer in die Atmosphäre, weshalb das Phänomen öfter an den Polen beobachtet werden kann. Während sehr starken Sonnenstürmen werden genügend Teilchen in niedrigere geomagnetische Breiten verfrachtet wodurch Polarlichter mitunter auch in Mitteleuropa beobachtbar sind.

### 2.2.2 Störungen der Kommunikation

Funkverkehr zwischen weit entfernten Standorten auf der Erde ohne Sichtverbindung ist möglich durch Reflexion von Radiowellen an der Ionosphäre. Röntgenstrahlung von solaren Flares und geladene Teilchen von koronalen Massenauswürfen und dem Sonnenwind verändern die Eigenschaften der Ionosphäre, sodass die Ausbreitung der Radiowellen gestört wird. Dies hat Konsequenzen für die Luftfahrt. Insbesondere in der Nähe der Pole kann die Kommunikation unterbrochen werden, was Flugverbindungen zwischen Europa und Nordamerika sowie Nordamerika und Asien betrifft. Während eines geomagnetischen Sturms müssen Flugzeuge auf südlichere Routen ausweichen, was zu Anpassungen des Flugplans und, durch die längere Flugzeit, erhöhtem Treibstoffverbrauch führt. Aus den gleichen Gründen kann auch die Kommunikation mit Satelliten gestört sein. Dadurch kann die Verbindung zu einzelnen GPS Satelliten ganz abreißen aber auch die Genauigkeit der Positionsbestimmung nachlassen.

### 2.2.3 Stromausfälle und Schäden an Satelliten

Durch das sich zeitlich verändernde Erdmagnetfeld nahe der Oberfläche können auf Hochspannungsleitungen elektrische Ströme induziert werden. Dies wiederum kann zu Überlastung von Transformatoren in Elektrizitätswerken und im Extremfall zu Stromausfällen führen, wie zum Beispiel 1989 in Quebec in Kanada. Ein genügend grosser Strom von geladenen Teilchen kann auch die Elektronik von Weltraumsatelliten stören oder sogar so schwer beschädigen, dass der Satellit unbrauchbar wird.

### 2.2.4 Strahlenbelastung

Weitere Konsequenzen von Sonnenstürmen sind erhöhte Strahlenbelastung für Flugpersonal und Astronauten bzw. Astronautinnen durch hochenergetische Teilchen, insbesondere bei Langstreckenflügen in der Nähe der Pole. Solange man sich innerhalb des Erdmagnetfelds befindet, ist man immerhin vor den stärksten Auswirkungen abgeschirmt. Dies gilt z.B. auch für die Internationale Raumstation. Verlässt man allerdings das schützende Erdmagnetfeld auf einem Flug zum Mond oder Mars, kann die Strahlenbelastung unter Umständen gefährlich gross werden. Zum Beispiel gab es zwischen den Apollo Missionen 16 und 17, im August 1972, eine grössere Sonneneruption. Wäre zu diesem Zeitpunkt gerade eine bemannte Mission zum Mond unterwegs gewesen, hätte für die Astronauten Lebensgefahr bestanden [13].

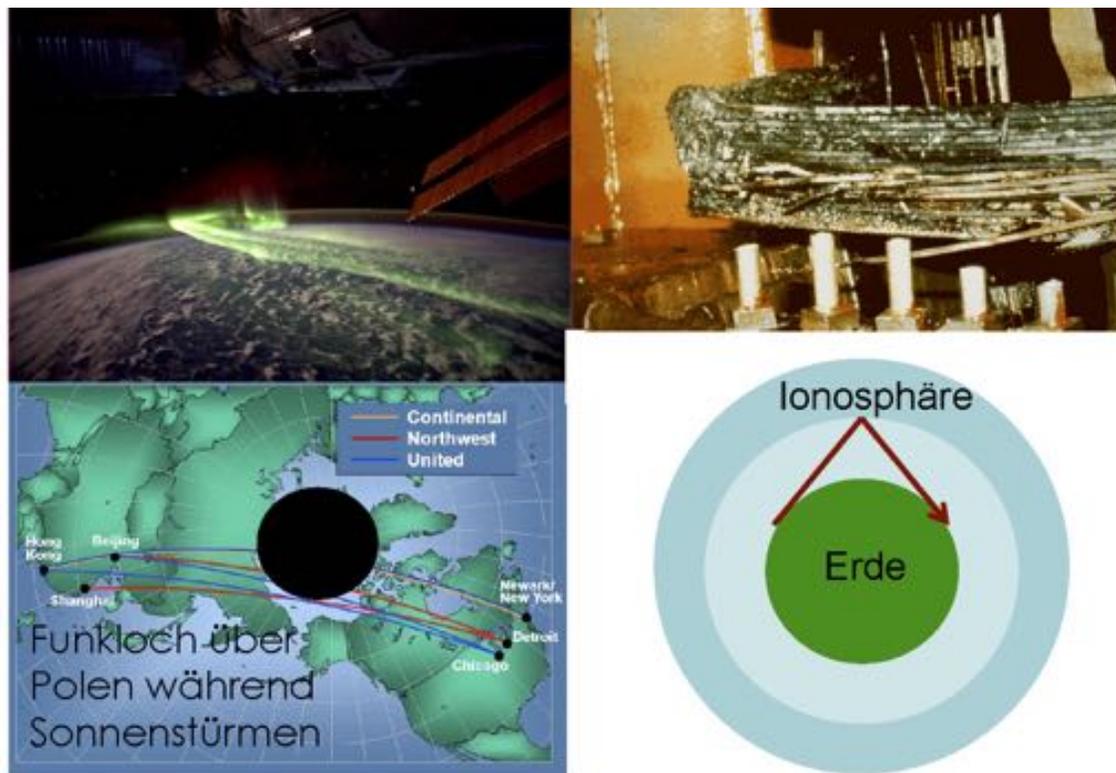


Abbildung 8: Verschiedene Auswirkungen von Sonnenstürmen. Links oben: Polarlichter über der Südhalbkugel, aufgenommen von der Internationalen Raumstation aus (ESA/NASA [14]). Rechts oben: Zertörter Transformator 1989 in Quebec [15]. Unten: Polarlinien Nordamerika-Asien verschiedener Airlines, für welche während Sonnenstürmen Funklöcher möglich sind [16]. Die Ionosphäre reflektiert Radiowellen, wodurch Funkverbindungen auch ohne direkten Sichtkontakt über grosse Distanzen hergestellt werden können. Diese Ausbreitung wird durch Veränderungen der Ionosphäre während Sonnenstürmen gestört.

### 2.3 Weltraumwetter: Angstmacherei oder reale Gefahr?

Die oben beschriebenen Auswirkungen klingen teilweise dramatisch und sobald die Sonne etwas aktiver wird machen oft regelrechte Schreckensszenarien die Runde im Internet. Bei der Beurteilung, wie gross die Bedrohung durch Sonnenstürme tatsächlich ist, müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden:

1. Mit welcher Häufigkeit treten grosse Sonneneruptionen, vergleichbar mit der von Carrington 1859 beobachteten, auf?
2. Was für eine Auswirkung hätte eine Sonneneruption dieser Grösse auf die Erde des 21. Jahrhunderts?



und <http://www.spaceweather.com/> abgerufen werden. Dort wird u.a. die Wahrscheinlichkeit, dass sich in den nächsten 24 Stunden ein grösserer solarer Flare ereignet, publiziert. Mit wachsender Zahl von Beobachtungen, besserem Verständnis der grundlegenden Physik von Sonneneruptionen sowie neuen Methoden zur Datenauswertung, wie z.B. Machine Learning und automatische Mustererkennung können wir erwarten, dass diese Prognosen in Zukunft immer genauer werden.

**Weltraumwetter - wenn es auf der Sonne stürmt**

- Als Weltraumwetter werden Sonneneruptionen und ihre Effekte auf der Erde in Form von geomagnetischen Stürmen bezeichnet
- Auswirkungen auf die Erde beinhalten Polarlichter, Störungen der Kommunikation, Stromausfälle sowie erhöhte Strahlenbelastung von Flugpersonal
- Auch wenn diese Auswirkungen teilweise dramatisch klingen, so ist die Wahrscheinlichkeit eines extremen Sonnensturms mit weitreichenden Auswirkungen relativ klein
- Die moderne Forschung und neue Methoden zur Datenanalyse erlauben immer genauere Vorhersagen von Sonnenstürmen in Form eines Weltraumwetterberichts

### 3 Sonnenbeobachtungen mit Weltraumsatelliten

Um die Ursache und den Ablauf von Sonneneruptionen besser zu verstehen und sie vorhersagen zu können, muss man sie im Detail studieren und interpretieren. Seit Beginn des Raumfahrtzeitalters können wir die Sonne aus dem Weltraum beobachten. Dies hat die moderne Sonnenforschung überhaupt erst möglich gemacht. Heutzutage steht eine Vielzahl von Weltraumsatelliten zur Sonnenbeobachtung zur Verfügung.

#### 3.1 Warum Sonnenbeobachtungen im Weltraum?

Es gibt zwei Gründe, warum die Erforschung von Sonneneruptionen aus dem Weltraum nötig ist:

- Die Wellenlängen, in denen Sonneneruptionen Strahlung emittieren
- Die atmosphärische Absorption auf der Erde

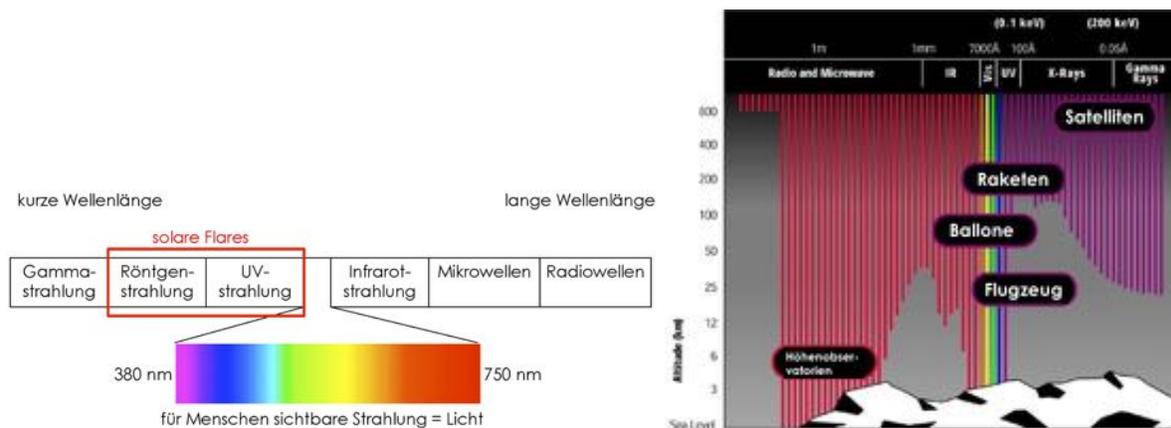


Abbildung 10: Das sichtbare Licht ist nur ein kleiner Bestandteil des elektromagnetischen Spektrums, zu welchem auch Radio- und Mikrowellen sowie UV- und Röntgenstrahlung gehören. Die Sonne strahlt am intensivsten im sichtbaren Licht. Sonneneruptionen produzieren starke UV- und Röntgenstrahlung. Um Sonneneruptionen beobachten zu können, muss man also Raketen oder Weltraumsatelliten bauen, da ihre Strahlung von der Erdatmosphäre absorbiert wird. Die Abbildung zeigt, wie weit in die Atmosphäre die verschiedenen Strahlungsarten vordringen können und mit welchen Methoden sie trotzdem beobachtet werden können [20].

Die Sonne emittiert elektromagnetische Strahlung im gesamten Spektralbereich. Das Maximum der Strahlung ist im sichtbaren Licht. Die Auswirkungen der UV-Strahlung bemerken wir nach einem Tag in der Sonne ohne Sonnenschutz. Sonneneruptionen verursachen zusätzliche Strahlung. Sie strahlen jedoch am intensivsten in Röntgenstrahlung und UV. Sichtbare Strahlung von solaren Flares ist in der Regel schwierig und nur für grössere Flares zu beobachten, da die Sonnenscheibe so hell ist. Die Röntgenstrahlung und UV-Strahlung der Sonne ist jedoch viel schwächer, wodurch solare Flares in diesen Wellenlängen auch einfacher zu beobachten sind. Allerdings wird der überwiegende Teil dieser Strahlung von der Erdatmosphäre absorbiert. Was gut ist für das Leben auf der Erde, ist von Nachteil für die Wissenschaft. Koronale Massenauswürfe, welche sich von der Sonne wegbewegen, werden auch im sichtbaren Licht beobachtet, allerdings braucht man dafür einen Koronagraphen, um die Sonnenscheibe abzudecken und keine störende Streuung in der Erdatmosphäre. Man muss also zur Beobachtung beider Phänomene Weltraumteleskope bauen.

### 3.2 Beobachtungen mit aktuellen Weltraumsatelliten

Heutzutage haben wir eine ganze Flotte von Weltraumsatelliten, welche speziell zur Beobachtung der Sonne und ihrer Aktivität gebaut wurde. Zwei davon werden hier kurz vorgestellt und es wird gezeigt, was die Forschung aus den von ihnen gesammelten Daten lernen kann.

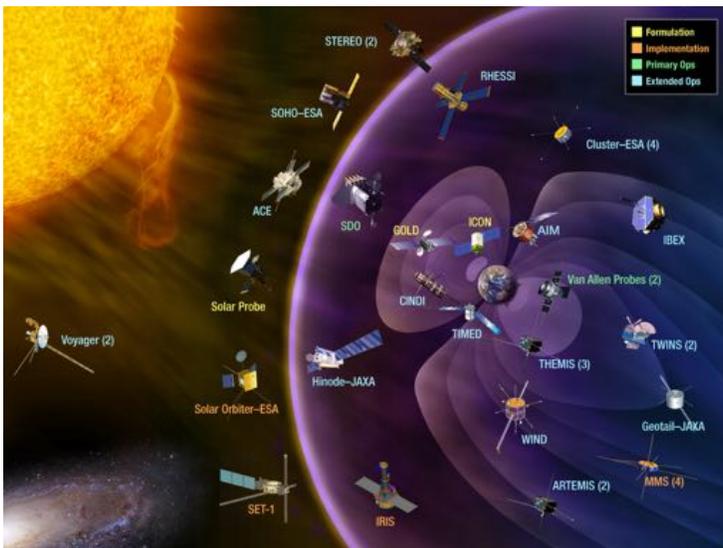


Abbildung 11: Flotte von Weltraumsatelliten zur Beobachtung der Sonne und ihrer Effekte auf die Erde. Die meisten befinden sich in einem erdnahen Orbit. Die beiden Stereosatelliten bewegen sich auf einer eigenen Umlaufbahn um die Sonne, die etwa der Umlaufbahn der Erde entspricht. SOHO und ACE befinden sich im sogenannten Lagrange-Punkt L1, dem Punkt zwischen Sonne und Erde, an welchem die Anziehungskräfte dieser beiden Himmelskörper sich gerade aufheben. Solar Probe (jetzt Parker Solar Probe genannt) SET-1, und *Solar Orbiter* sind im Bau und werden in 2018, bzw. 2020 (*Solar Orbiter*) gestartet. (NASA [21])

#### 3.2.1 RHESSI

Der Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) ist eine NASA Mission mit Beteiligung der ESA. Im Jahr 2002 gestartet, war die ursprüngliche Missionsdauer auf 3 Jahre ausgelegt. Das Instrument hat jedoch alle Erwartungen übertroffen und funktioniert zum jetzigen Zeitpunkt immer noch. Allerdings befindet es sich nun wirklich am Ende seiner Lebensdauer und es wird erwartet, dass es im Verlauf von 2018 abgeschaltet wird. In ein paar Jahren wird es in die Erdatmosphäre eintreten und verglühen. Mit RHESSI wird die Röntgenstrahlung der Sonne untersucht. Es werden Spektren aufgenommen (Energie der auftreffenden Röntgenstrahlung als Funktion ihrer Intensität) und es ist möglich, Bilder zu machen. Wie in Abschnitt 1.3 erwähnt, beschleunigen solare Flares Teilchen auf sehr grosse Geschwindigkeiten. Gleichzeitig heizen sie auch die umgebende Sonnenatmosphäre, die sogenannte Korona, auf. Die Beobachtungen von RHESSI ermöglichen es, folgenden Fragen nachzugehen:

- Wo und wie werden Teilchen beschleunigt?
- Wie viel Energie steckt in den beschleunigten Teilchen?
- Wohin und wie bewegen sie sich nachdem sie beschleunigt wurden?
- Auf welche Temperatur wird die umgebende Sonnenatmosphäre aufgeheizt?

Abbildung 12 zeigt ein Beispiel aus einer Fachpublikation, in welcher durch Kombination von RHESSI-Beobachtungen und UV-Daten gefolgert wurde, dass die Hauptbeschleunigungsregion über dem magnetischen Bogen liegt.

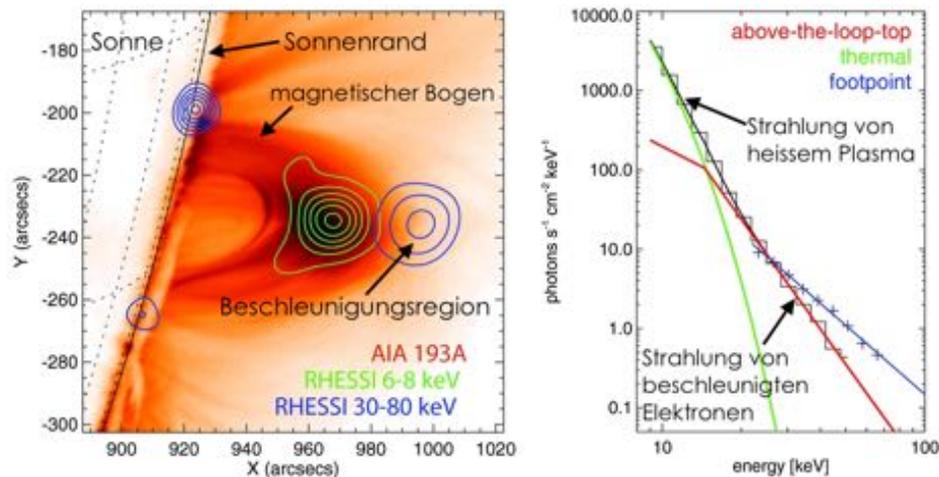


Abbildung 12: Links: UV-Bild eines Ausschnitts der Sonnenatmosphäre, direkt über dem Sonnenrand. Die farbigen Kontouren geben den Ort an, von welchem Röntgenstrahlung mit dem RHESSI Satelliten gemessen wurde. Die rechte Abbildung zeigt die Intensität der Röntgenstrahlung von diesen Regionen als Funktion der Strahlungsenergie. Daraus kann z.B. die Temperatur des Plasmas und die Anzahl und Geschwindigkeiten der beschleunigten Teilchen bestimmt werden, indem man Modelle (grüne, rote und blaue Linien) mit den Daten vergleicht ([22]).

### 3.2.2 SDO

Das Solar Dynamics Observatory (SDO) ist eine NASA Mission. Es beobachtet die Sonne seit 2010 rund um die Uhr und hat in dieser Zeit einige spektakuläre Bilder geliefert. SDO umfasst drei Instrumente zur Beobachtung der Magnetfelder und der UV-Strahlung der Sonne. Das Atmospheric Imaging Assembly (AIA) macht alle 12 Sekunden ein Bild der Sonne in 9 verschiedenen UV-Wellenlängen mit einer Grösse von 4096x4096 Pixel. Auf einem normalen Computermonitor können diese Bilder also gar nicht in ihrer wahren Auflösung dargestellt werden! Die beobachtete Strahlung stammt von verschiedenen Atomen, unter anderem Eisen und Magnesium, welche in Spuren auf der Sonne vorhanden sind und durch die hohen Temperaturen zum Leuchten angeregt werden. Die Wellenlänge der Strahlung hängt einerseits vom Atom ab, vor allem aber von der herrschenden Temperatur. Jeder der beobachteten Wellenlängen entspricht also eine Temperatur. Dadurch kann man den Temperaturverlauf in der Sonnenatmosphäre und in Sonneneruptionen untersuchen.

#### Das Coronal Heating Problem oder Wieso wird es heisser, wenn man sich von der Sonnenoberfläche entfernt?

Betrachtet man die SDO Bilder in Abbildung 13 sieht man, dass in der Sonnenatmosphäre (Korona) sehr hohe Temperaturen bis mehrere Millionen Grad herrschen, verglichen mit den 5500°C auf der Oberfläche. Dies widerspricht nicht nur der Alltagserfahrung, dass die Temperatur abnimmt wenn man sich von einem heissen Gegenstand entfernt, sondern auch der Physik. Es muss also irgendeinen Mechanismus geben, der die Korona aufheizt. Wie das genau funktioniert, darüber herrscht seit Entdeckung des Phänomens vor mehreren Jahrzehnten eine grosse Debatte. Eine Möglichkeit sind ständig auftretende solare Flares, die so klein sind, dass man sie mit modernen Instrumenten nicht detektieren kann, aber so häufig, dass sie genügend Energie freisetzen würden, um die Korona aufzuheizen. Eine abschliessende, allseits anerkannte Erklärung steht immer noch aus, weshalb das Coronal Heating Problem als eines der grossen ungelösten Rätsel der Sonnenphysik gilt.

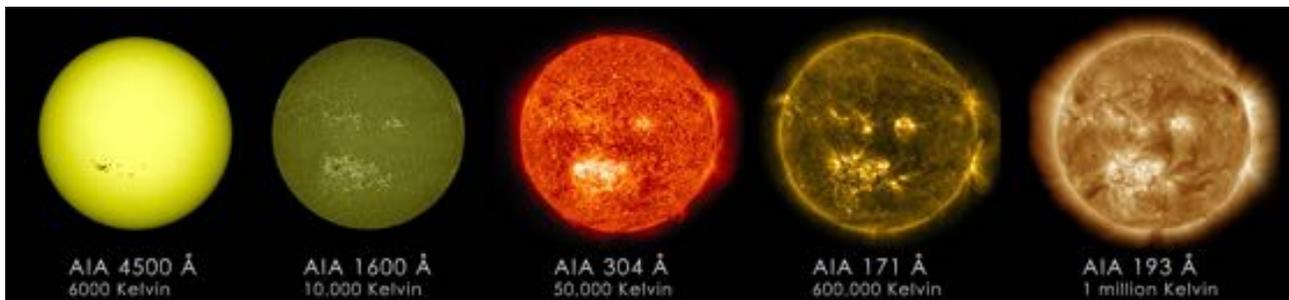


Abbildung 13: Bilder der Sonne von SDO/AIA in verschiedenen Wellenlängen des UV und im sichtbaren Licht (ganz links). Jede Wellenlänge entspricht einer Temperatur. Die Farben der Bilder sind natürlich nicht 'echt', da das menschliche Auge UV-Strahlung nicht wahrnehmen kann. In der Regel wird bei jedem neuen Instrument einer Wellenlänge eine Farbe zugewiesen, in welcher die entsprechenden Bilder eingefärbt werden. So können Forschende anhand der Farbe eines Bildes erkennen, welche Wellenlänge es zeigt. (NASA/SDO [3])

### 3.3 Die ESA Mission *Solar Orbiter*

Die vergangenen und aktuellen Weltraumsatelliten befinden sich alle entweder in einer Umlaufbahn um die Erde, oder etwa im Abstand Sonne-Erde in der Ekliptik, also der Ebene, in welcher alle Planeten um die Sonne kreisen. Dadurch hat man noch nie die Pole der Sonne wirklich gesehen. Auch verändert sich die Richtung und Verteilung von beschleunigten Teilchen auf dem Weg von der Sonne zur Erde durch die interplanetaren Magnetfelder. Dadurch ist es schwierig, aus den gemessenen Teilchen auf der Erde auf ihren genauen Ursprung auf der Sonne zu schliessen. Um diese Lücken zu schliessen hat die ESA den Weltraumsatelliten *Solar Orbiter* entwickelt. *Solar Orbiter* wird bis auf weniger als einen Drittel des Abstands Sonne-Erde an die Sonne herangehen, das entspricht dem Abstand des innersten Planeten, Merkur. Gleichzeitig wird er aus der Ekliptik herausgehen auf eine exzentrische Umlaufbahn, die ihn über die Pole der Sonne führen wird.

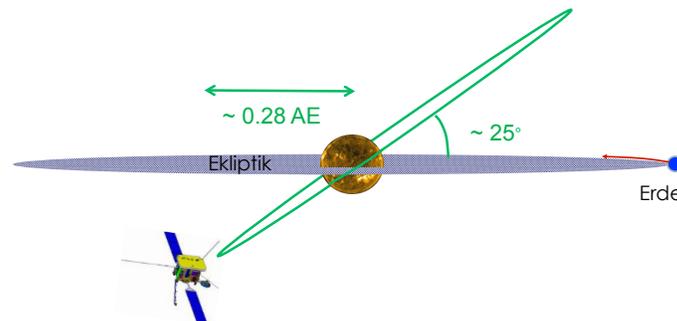


Abbildung 14: Skizze der angestrebten Umlaufbahn von *Solar Orbiter* um die Sonne. Die Ebene, in welcher sich die Planeten um die Sonne bewegen (Ekliptik) und Umlaufbahn der Erde ist angedeutet. *Solar Orbiter* wird bis auf 0.28 Astronomische Einheiten (AE), also weniger als ein Drittel des Abstandes Erde-Sonne an die Sonne heranfliegen und auf seiner Umlaufbahn auf einen Blick auf die Pole der Sonne bekommen.

Das Ziel von *Solar Orbiter* ist ein vertieftes Verständnis davon, wie die Sonne den Raum zwischen ihr und der Erde beeinflusst und wie sich Sonnenaktivität darauf auswirkt. Die vier grossen wissenschaftlichen Fragen, die *Solar Orbiter* beantworten will sind (übersetzt aus [23]):

- Was verursacht den Sonnenwind und wo ist der Ursprung des koronalen Magnetfeldes?
- Wie verursachen veränderliche Phänomene auf der Sonne die Variabilität der Heliosphäre?
- Wie produzieren Sonneneruptionen hochenergetische Teilchen, welche die Heliosphäre füllen?
- Wie funktioniert der magnetische Sonnenzyklus und wie sind die Zusammenhänge zwischen ihm und der Heliosphäre?

### 3.3.1 Missionsbeschreibung

Der Start von *Solar Orbiter* ist geplant für Februar 2020. Ab dann wird es allerdings noch 1-2 Jahre dauern, bis erste wissenschaftliche Daten gesammelt werden. So lange dauert es, bis die gewünschte Umlaufbahn erreicht ist. Dazu werden sogenannte Gravity-Assist-Maneuvers um Erde und Venus geflogen. Alle paar Monate kommt der Satellit nahe an entweder Erde oder Venus vorbei. Dann wird die Anziehungskraft dieser Planeten ausgenutzt, um dem Satelliten einen 'Kick' in die gewünschte Richtung zu geben<sup>4</sup>. Die wissenschaftlichen Beobachtungen werden dann etwa 3 Jahre dauern mit der Option auf Verlängerung um 3-4 Jahre. Diese Zahlen hängen vom genauen Zeitpunkt des Starts und den sich daraus ergebenden Vorbeiflügen an Erde und Venus ab und sind noch nicht genau bestimmt.

Das Spezielle an *Solar Orbiter*, neben der Umlaufbahn, ist, dass er 10 unterschiedliche Instrumente auf einem Satelliten vereinigen wird. Dadurch können gleichzeitig, aus derselben Perspektive, zum Beispiel UV-Bilder gemacht, Röntgenstrahlung von solaren Flares beobachtet und beschleunigte Teilchen, welche auf dem Satelliten auftreffen, gemessen werden.

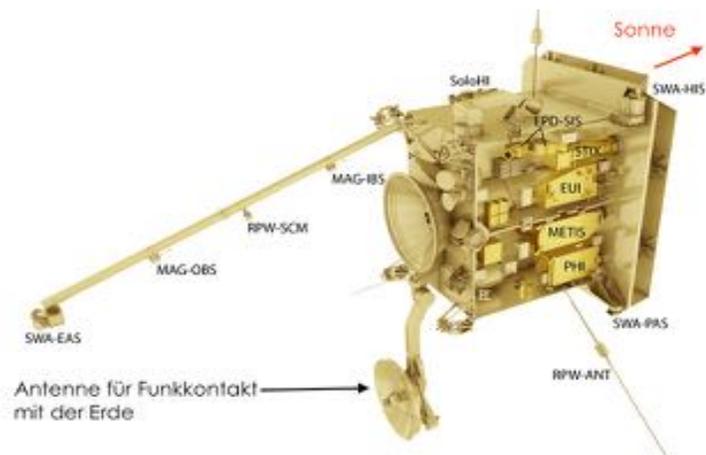
#### Instrumente zur Detektion von elektromagnetischer Strahlung und von Bildern der Sonne

- EUI (Extreme Ultraviolet Imager): UV Bilder der Sonne
- Metis: Koronagraph, ähnlich wie SOHO/Lasco
- PHI (Polarimetric and Helioseismic imager): Messung von Magnetfeldern auf der Sonne
- SoloHI (Heliospheric imager): Bilder von Sonnenwind und koronalen Massenauswürfen
- SPICE (Spectral Imaging of the Coronal environment): UV Spektren und Bilder
- STIX (Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays): Bilder und Spektren der Röntgenstrahlung von Sonneneruptionen

#### Instrumente zur Messung von Teilchen und Magnetfeldern

- EPD (Energetic Particle Detector): Messung von geladenen Teilchen
- MAG (Magnetometer): Messung von interplanetaren Magnetfeldern
- RPW (Radio and Plasma Waves): Messung von Radiostrahlung und Plasmawellen
- SWA (Solar Wind Plasma Analyser): Messung der Zusammensetzung des Sonnenwinds

Abbildung 15: Illustration von *Solar Orbiter* mit seinen 10 Instrumenten. Die Sonne wäre auf der rechten Seite. Die Instrumente, welche Bilder von der Sonne machen befinden sich neben- und untereinander auf dem Satelliten hinter dem Hitzeschild. Auf der Vorderseite des Hitzeschilds herrschen Temperaturen um 500°C, gleich dahinter tiefer als 0°C. Die Instrumente zur Messung von Teilchen und Magnetfeldern befinden sich auf drei Stangen nach hinten und zur Seite. (ESA [23])



<sup>4</sup>Animation unter <http://sci.esa.int/solar-orbiter/44993-the-solar-orbiter-mission/>

### 3.3.2 Ein Stück Schweiz auf dem Weg zur Sonne: STIX

Mit dem Instrument STIX (Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays), welches die Röntgenstrahlung von solaren Flares beobachten wird, wird auch ein Stück Schweiz mit zur Sonne fliegen. STIX wurde unter der Leitung der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) entwickelt und in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Schweizer Industrie, aus Frankreich, Deutschland, Tschechien, Polen, Österreich und Irland gebaut. In 2017 wurde das Instrument fertiggestellt und nach Stevenage UK gebracht, wo *Solar Orbiter* von der Firma Airbus zusammengebaut wird. Abbildung 16 zeigt das fertiggestellte Instrument, so wie es zur Sonne fliegen wird. Die Hauptkomponenten sind:

**Detektor - und Elektronikbox:** Dort drin sind Cadmium-Telluride (CaTe)-Detektoren, welche die Energie und den Zeitpunkt der auftreffenden Röntgenstrahlung messen. Dadurch werden Spektren wie mit RHESSI (Abbildung 12) erzeugt. Total sind 32 Detektoren mit einer Fläche von je ca.  $1 \text{ cm}^2$  (also etwa Daumnagelgrösse) verbaut. Auch in der Box befinden sich die Stromversorgung und Elektronik zur Bedienung des Instruments sowie der Datenspeicher.

**Paar von Gittern** zur Erzeugung von Bildern der Röntgenstrahlung von solaren Flares

**Aspect System:** Mit einer Linse wird ein Bild der Sonne (im sichtbaren Licht) auf eine Photodiode projiziert. Dadurch weiss man, wo genau auf der Sonne das Instrument hinzeigt.

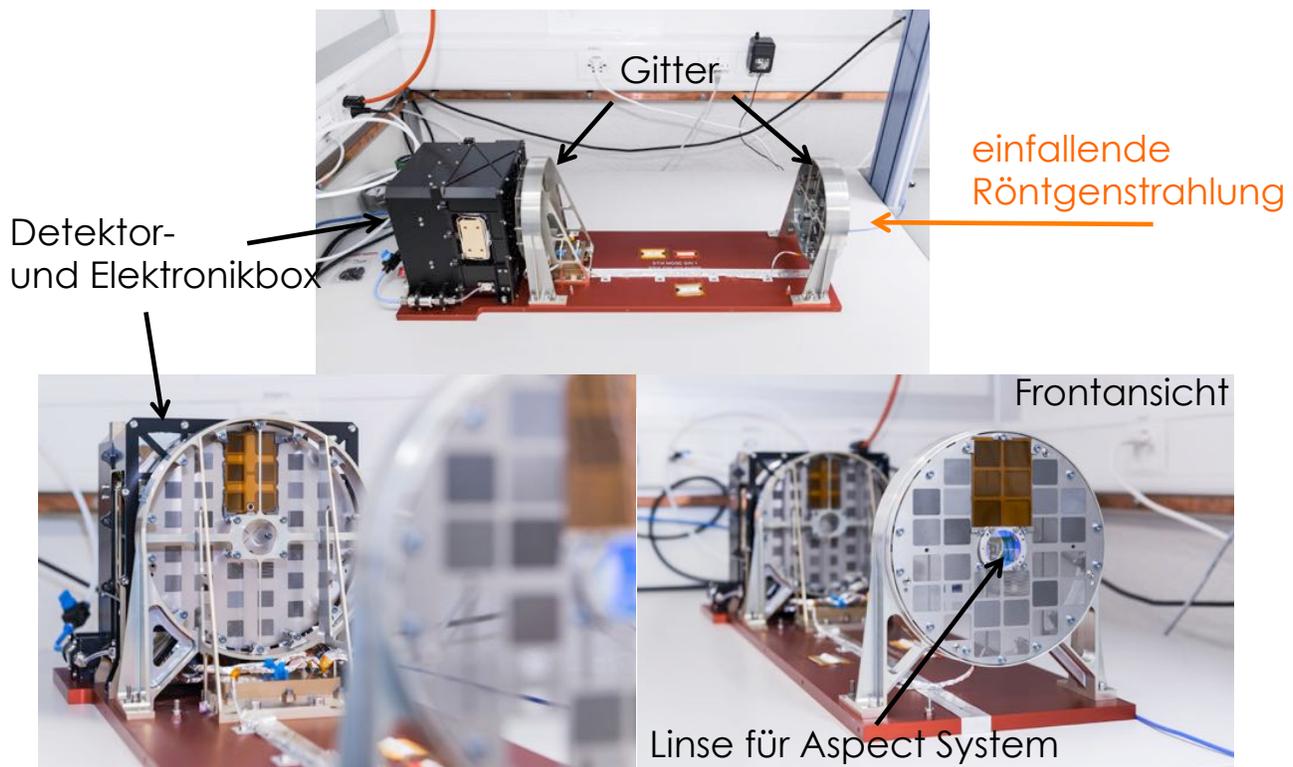


Abbildung 16: Bilder von STIX nach Fertigstellung. Das obere Bild zeigt die Ansicht von oben, die unteren die Ansicht von vorne mit Fokus auf die Detektor- und Elektronikbox, bzw. die vorderen Gitter (Institute for Data Science, FHNW)

### Wie macht man Bilder der Röntgenstrahlung von solaren Flares?

Röntgenstrahlung kann nicht wie sichtbares Licht mit Linsen oder Spiegeln fokussiert werden. Um Bilder der Röntgenstrahlung von solaren Flares zu machen, muss man andere Methoden anwenden. Eine davon ist, jeweils ein Paar von Gittern vor jedem Detektor zu platzieren. Dadurch entsteht auf dem Detektor ein charakteristisches Muster. Dieses Moiré-Muster ist kein Schatten, sondern entsteht, wenn zwei gleichmässige Masken, in diesem Fall die Gitter, übereinander platziert werden. Es kann manchmal auch auf dem Wohnzimmerboden beobachtet werden, wenn die Sonne durch passende Vorhänge scheint oder auch bei der digitalen Photographie. Für STIX wurden die Gitter so konstruiert, dass das Muster einer Sinusfunktion entspricht. Die Detektoren haben 12 Pixel (8 grosse und 4 kleine, wobei nur 4 benötigt werden, um das Muster zu charakterisieren, die anderen dienen als Redundanz). Abbildung 17 zeigt das Prinzip und wie sich das Muster verändert, je nach Grösse des beobachteten solaren Flares und seiner Position. Vor 30 der 32 Detektoren liegt ein solches Gitterpaar mit unterschiedlichem Abstand zwischen den Gitterlinien um verschieden grosse Flares abbilden zu können. Das Bild wird dann mit speziellen Algorithmen errechnet. Diese Bilder sind nicht so hochaufgelöst wie z.B. die UV-Bilder, weshalb oft nur die Kontouren der Quelle gezeigt werden wie in Abbildung 12.

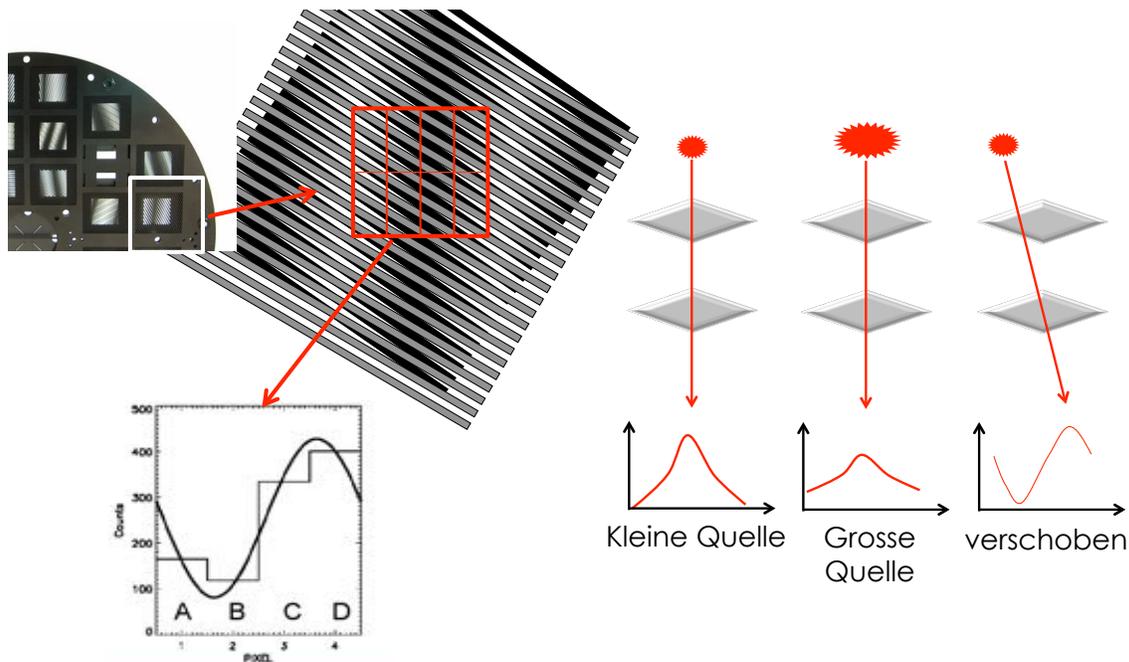


Abbildung 17: Illustration wie STIX Bilder macht. Die Gitterpaare erzeugen ein Moiré-Muster auf dem Detektor. Mit 4 Pixeln in einer Reihe ist es möglich, die charakteristischen Grössen (Amplitude, Phase) der entstehenden Sinuskurve zu bestimmen. Diese hängen von der Grösse der Quelle auf der Sonne relativ zum Abstand zwischen den Gitterlinien und dem Einfallswinkel der Strahlung ab. Aus Kombination von mehreren solcher Messungen (30 gleichzeitig für STIX) kann dann das Bild errechnet werden.

### Sonnenbeobachtungen mit Weltraumsatelliten

- Um die Physik von Sonneneruptionen zu verstehen, sind Beobachtungen ihrer Röntgen - und UV-Strahlung nötig
- Wegen der atmosphärischen Absorption muss man solche Beobachtungen aus dem Weltraum durchführen
- Heutzutage steht Forschenden eine ganze Flotte von Weltraumsatelliten, welche sämtlichen Aspekte von Sonnenaktivität und Weltraumwetter beobachten, zur Verfügung
- Um Weltraumwetter wirklich zu verstehen, braucht es neue, andere Beobachtungen
- Die ESA Mission *Solar Orbiter* wird die Sonne 'von Nahem' mit 10 unterschiedlichen Instrumenten studieren und so neue Erkenntnisse über die Ursache von Sonneneruptionen und ihre Effekte gewinnen
- Eines der zehn Instrumente, STIX, wurde unter Leitung der Fachhochschule Nordwestschweiz entwickelt und gebaut. Somit fliegt auch ein Teil der Schweiz mit zur Sonne

## 4 Schlusswort

Der vorliegende Artikel soll einen Überblick über Sonnenaktivität, Weltraumwetter und seinen Einfluss auf die Erde sowie die moderne Forschung und wie sie Daten sammelt und auswertet, geben. Jedes der angesprochenen Themen kann beliebig weiter vertieft werden. Interessierte Leser und Leserinnen finden in den im Literaturverzeichnis erwähnten Büchern und den im Text und Literaturverzeichnis verlinkten Webseiten, speziell denjenigen der NASA, ESA und NOAA, weiterführende Informationen. Für nicht Englischsprechende empfiehlt sich die von Privaten betriebene Seite <https://sonnen-sturm.info/>.

Diesen Text habe ich im Rahmen der didaktischen Ausbildung an der ETH Zürich verfasst. Ich bedanke mich beim Betreuer dieser Arbeit, Prof. A. Vaterlaus für die Unterstützung.

## A Liste der Akronyme

AE	Astronomische Einheit	mittlerer Abstand Erde-Sonne $\approx$ 150 Mio. km
ACE	Advanced Composition Explorer	NASA Satellit
AIA	Atmospheric Imaging Assembly	Instrument auf SDO
EPD	Energetic Particle Detector	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
ESA	European Space Agency	Europäische Weltraumagentur
EUI	Extreme Ultraviolet Imager	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
MAG	Magnetometer	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
NASA	National Aeronautic and Space Administration	US-Amerikanische Raumfahrtbehörde
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	US-Amerikanische Wetter-und Ozeanographiebehörde
PHI	Polarimetric and Helioseismic imager	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
RHESSI	Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager	NASA Satellit
RPW	Radio and Plasma Waves	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
SDO	Solar Dynamics Observatory	NASA Satellit
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory	NASA/ESA Satellit
SoloHI	Heliospheric imager	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
SPICE	Spectral Imaging of the Coronal environment	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
STIX	Spectrometer / Telescope for Imaging X-rays	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
SWA	Solar Wind Plasma Analyser	Instrument auf <i>Solar Orbiter</i>
UV	Ultraviolett	kurzwellige elektromagnetische Strahlung

## Literaturverzeichnis

- [1] Jürgen Banisch *Die Sonne. Eine Einführung für Hobby-Astronomen*  
Interstellarum 2014, ISBN: 978-3- 938469-68-2
- [2] Abbildung Sunspot Index  
<http://www.sidc.be/silso/monthlyssnplot> Zugriff am 1.5.2018
- [3] SDO Gallery  
<https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main> Zugriff am 1.5.2018
- [4] SOHO Gallery  
<https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/bestofsoho.html> Zugriff am 1.5.2018
- [5] Carrington, R. C. *Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859*  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1859, Vol. 20, p.13-15  
(doi:doi.org/10.1093/mnras/20.1.13)
- [6] Sten Odenwald *Solar Storms. 2000 years of human calamity*  
CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015, ISBN: 978-1-505941-46-3
- [7] Illustration von differentieller Rotation  
University of Oregon  
[http://pages.uoregon.edu/jimbrou/BrauImNew/Chap16/FG16\\_21.jpg](http://pages.uoregon.edu/jimbrou/BrauImNew/Chap16/FG16_21.jpg) Zugriff am 1.5.2018
- [8] Illustration von Magnetfeldlinien  
<http://www.justscience.in/articles/magnetic-field-and-magnetic-field-lines/2017/06/30>  
Zugriff am 1.5.2018
- [9] Bild Trace Loops <https://apod.nasa.gov/apod/ap000928.html> Zugriff am 1.5.2018
- [10] Illustration Sonnensturm  
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/hinode/solar\\_004.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/solar_004.html) Zugriff am 1.5.2018
- [11] Illustration Auswirkungen von Weltraumwetter  
<https://www.swpc.noaa.gov/content/additional-resources/#outreach> Zugriff am 2.5.2018
- [12] Space weather impacts at NOAA  
<https://www.swpc.noaa.gov/impacts> Zugriff am 2.5.2018
- [13] Effekte von Weltraumwetter  
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/spaceweather/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html) Zugriff am 2.5.2018
- [14] Photo Polarlichter von der ISS [https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2012/03/Aurora\\_Australis\\_as\\_seen\\_from\\_the\\_ISS](https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2012/03/Aurora_Australis_as_seen_from_the_ISS), Zugriff am 2.5.2018
- [15] Photo Transformator Quebec  
<https://www.swpc.noaa.gov/impacts/electric-power-transmission>, Zugriff am 2.5.2018
- [16] Abbildung Polarrouen kommerzieller Airlines <http://slideplayer.com/slide/5669874/>, Zugriff am 2.5.2018
- [17] Neuhäuser, R. & Hambaryan, V. V. *A solar super-flare as cause for the <sup>14</sup>C variation in AD 774/5 ?*  
Astronomische Nachrichten 2014, 335, 949  
(doi: doi.org/10.1002/asna.201412071)
- [18] Riley, P. et al. *Extreme space weather events: From cradle to grave* Space Science Reviews 2018, 214,21  
(doi:doi.org/10.1007/s11214-017-0456-3)

- [19] Katastrophen und Notlagen Schweiz *Technischer Risikobericht 2015*  
Bundesamt für Bevölkerungsschutz. Zu beziehen unter  
<https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/natgefaehrdanalyse.html>
- [20] Abbildung Atmosphärische Absorption [https://www-xray.ast.cam.ac.uk/xray\\_introduction/History.html](https://www-xray.ast.cam.ac.uk/xray_introduction/History.html), Zugriff am 3.5.2018
- [21] Abbildung Heliophysics Fleet [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/missions/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/missions/index.html)
- [22] S. Krucker & M. Battaglia *Particle Densities within the Acceleration Region of a Solar Flare*  
The Astrophysical Journal 2014, 780, 107  
(doi:doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/107)
- [23] *Solar Orbiter* (ESA) <http://sci.esa.int/solar-orbiter/>, Zugriff am 16.5.2018
- [24] Abbildung Die Heliosphäre [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/science/Heliosphere.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Heliosphere.html), Zugriff am 9.5.2018