

# Das Weltraumwetter im Physikunterricht

Masterarbeit  
in der Wissenschaftsdisziplin Physik

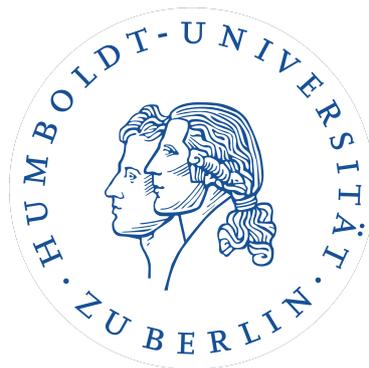
eingereicht an der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Humboldt Universität

Erstgutachter und Betreuer: apl. Prof. Dr. Carsten Denker  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Burkhard Priemer

Constanze Heibel  
geb. 17. August 1992 in Berlin

Matrikel-Nr.: 550207

16.08.2017



Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam  
An der Sternwarte 16  
14482 Potsdam



# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Hilfsmittel und Quellen genutzt habe.

---

Constanze Heibel

---

Ort, Datum



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung . . . . .	vi
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Die Sonne</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlegende Charakteristik . . . . .	5
2.2 Phänomene und Ereignisse . . . . .	12
2.3 Solar Flares (Strahlungsausbrüche) . . . . .	15
<b>3 Wechselwirkungen mit der Erde und ihre Folgen</b>	<b>19</b>
3.1 Auswirkungen der Sonne auf die Erde . . . . .	19
3.2 Folgen für Mensch und Technik . . . . .	24
<b>4 Weltraumwetter und dessen Vorhersage</b>	<b>31</b>
4.1 Die Geschichte der Beobachtung des Weltraumwetters . . . . .	31
4.2 Vorhersage von Weltraumwetter und das Space Weather Prediction Center	33
<b>5 Astrophysik in der Schule</b>	<b>37</b>
<b>6 Kompetenzen und Inhalte</b>	<b>41</b>
<b>7 Beispiel für die Verwendung in der Schule</b>	<b>47</b>
7.1 Daten des Space Weather Prediction Center . . . . .	47
7.2 Klassifizierung und Wettervorhersage . . . . .	52
7.3 Extremereignis des Jahres 2003 . . . . .	54
<b>8 Fazit und Ausblick</b>	<b>57</b>
Literaturverzeichnis . . . . .	i



## Zusammenfassung

Das Weltraumwetter bezeichnet die Auswirkungen von Ereignissen auf der Sonne auf die Erde. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die für das Weltraumwetter relevanten Grundkenntnisse zu vermitteln und darauf aufbauend einen didaktischen Vorschlag zu präsentieren, Weltraumwetter konkret in den Physikunterricht an der Schule einzubinden.

Zu diesem Zweck werden zunächst die wichtigsten physikalischen Eigenschaften und Vorgänge der Sonne thematisiert. Dazu gehören unter anderem ihre Zusammensetzung, ihr Magnetfeld, ihre Abstrahlcharakteristik und der solare Zyklus. Anschließend werden die Phänomene der aktiven Sonne wie der Sonnenwind und Sonnenflecken, aber auch eruptive Ereignisse erörtert. Der Schwerpunkt wird dabei auf Flares gelegt, wobei es sich um explosive Strahlungsausbrüche handelt, die häufig zusammen mit koronalen Massenauswürfen auftreten. Die Kombination dieser beiden Phänomene birgt die größte potentielle Gefahr für Mensch und Technik.

Im folgenden Abschnitt werden die für die Beeinflussung durch die solare Strahlung und Partikel relevanten Eigenschaften der Erde erläutert. Insbesondere werden dabei die Erdatmosphäre und das Erdmagnetfeld hervorgehoben, da ihre Veränderungen gravierende Folgen für Mensch und Technik haben. Um diesen negativen Auswirkungen entgegenzuwirken, arbeiten Einrichtungen wie das Space Weather Prediction Center daran, das Weltraumwetter besser zu verstehen, Vorhersagen zu treffen und ihre Warnungen und Erkenntnisse mit der Allgemeinheit zu teilen.

Auf dieser fachlichen Grundlage aufbauend wird ein didaktischer Vorschlag im Rahmen des Weltraumwetters entwickelt. Derartige astrophysikalische Themen bieten ein großes Spektrum an Möglichkeiten in den Physikunterricht vor allem der Oberstufe eingebunden zu werden. Anhand der Reihenfolge der vorherigen fachlichen Ausführungen werden exemplarisch thematische Highlights für den Unterricht explizit dargestellt.

Schließlich wird anhand von Originaldaten des Space Weather Prediction Center gezeigt, auf welche Weise es möglich ist, diese soweit zu reduzieren, dass Schülerinnen und Schüler mit ihnen arbeiten und eine Vorhersage erstellen können. Die Daten stammen von einem der stärksten Ereignisse der näheren Vergangenheit, als am 28.10.2003 ein starker Flare und ein darauf folgender Massenauswurf stattfanden. Die Auswirkungen auf Mensch und Technik waren jedoch nicht so gravierend, wie zuvor angenommen, was auch den rechtzeitigen Vorwarnungen und Maßnahmen geschuldet war. Anhand dieser Geschehnisse werden Vorschläge und Empfehlungen genannt, zusammen mit den Schülerinnen und Schülern das Weltraumwetter, dessen Vorhersage und Relevanz für das Leben in der Moderne zu thematisieren und zu diskutieren.



# Kapitel 1

## Einleitung und Motivation

**Welche Bedeutung hat das Weltraumwetter für den Menschen?**

**Was ist das Ziel dieser Arbeit?**

**Wie ist die vorliegende Arbeit strukturiert?**

Trotz der fortschrittlichen Technik und der Möglichkeiten, die die Raumfahrt eröffnet, scheinen die Menschen einen geringeren Bezug zu der Sonne zu haben als je zuvor.

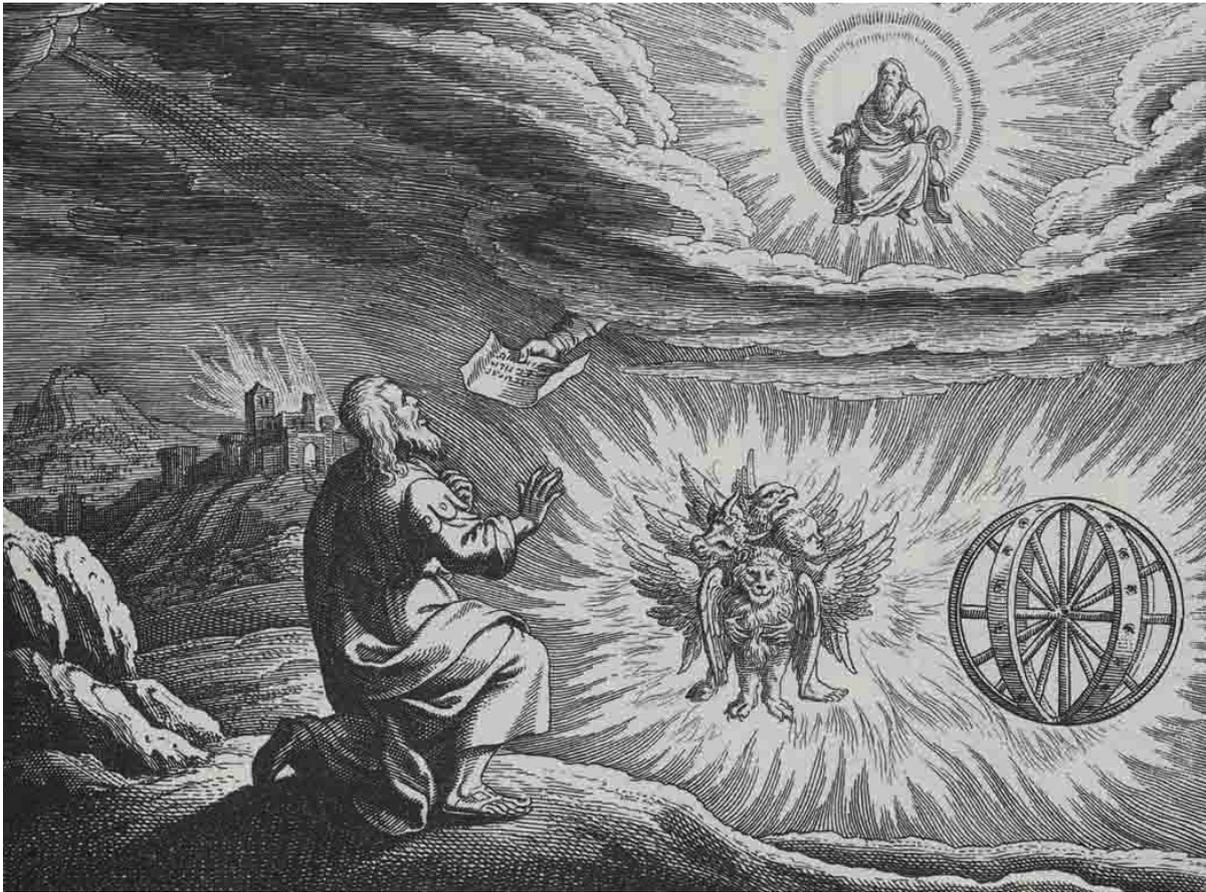
In der Antike verehrten etliche Völker die Sonne als Gottheiten, sie diente als ein Zeitmesser, entschied über Hunger oder Wohlstand bei der Ernte und legte Marktpreise fest. Heutzutage werden zwar immer mehr Geheimnisse der Sonne und der solar-terrestrischen Beziehung gelüftet, doch entstehen in mindestens genauso großer Fülle neue und komplexere Fragestellungen, sodass die Sonnenforschung nur noch einem kleinen, elitären Kreis von Wissenschaftlern zugänglich ist.

Dementsprechend wird die Sonne von den meisten Menschen nur in Bezug auf das Wetter und die wärmenden Sonnenstrahlen auf der Haut wahrgenommen. Doch führen extreme Ereignisse auf der Sonne immer wieder zu spektakulären, aber auch gefährlichen Phänomenen auf der Erde. Nicht nur die technischen Errungenschaften der Moderne sind davon betroffen, sondern bereits in der Antike konnten Ereignisse im Zusammenhang mit der Sonnenaktivität beobachtet werden. Diese wurden auf unterschiedlichste Weisen interpretiert.

So wird in der Bibel von dem Propheten Hesekiel im Alten Testament von einer Himmelserscheinung berichtet, wobei die Darstellung Parallelen zu den Polarlichtern aufweist ([Schlegel and Schlegel, 2011](#)).

Und ich sah, und siehe, es kam ein ungestümer Wind von Mitternacht her mit einer großen Wolke voll Feuer, das allenthalben umher glänzte; und mitten in dem Feuer war es lichthell. ([Die Bibel, 2016](#), AT, Hesekiel 1,4)

Ein Artikel in dem Magazin Eos – Earth & Space Science News ([Siscoe, Silverman, and Siebert, 2002](#)) beschäftigt sich ausgiebig mit der physikalischen Glaubhaftigkeit von Hesekiels Beschreibung. Die Autoren kommen dabei zu dem Schluss, dass die Sichtung eines Polarlichtes durchaus möglich gewesen ist.



**Abbildung 1.1:** Kupferstich des Künstlers Matthäus Merian (1593–1650), der die Vision des Hesekiels zeigt.  
 Zugang am 20.07.2017 über  
 → <https://commons.wikimedia.org>

Eine bedeutende Rolle spielt dabei der Breitengrad, auf dem sich Hesekiel aufgehalten haben soll (in der Nähe von Nippur,  $32^\circ$  nördlicher Breite). Aufgrund der Wanderung des magnetischen Nordpols war dieser zur Zeit Hesekiels vor circa 2600 Jahren in Richtung Babylon, das sich unweit von Nippur befindet, geneigt. Ein weiteres Hindernis für die Glaubhaftigkeit hätte der Aktivitätszyklus der Sonne sein können, da dieser sich zu dieser Zeit in einem Minimum (dem sogenannten Homerischen Minimum) hätte befinden können, doch endete dieses gut 40 Jahre vor Hesekiels Beobachtung (Siscoe, Silverman, and Siebert, 2002).

Aus astrophysikalischer Sicht erscheint es also möglich, dass es sich in der Bibel um die Beschreibung eines Polarlichts gehandelt haben könnte, doch ist es durchaus wahrscheinlicher, dass derartige Beobachtungen nur als Inspiration für die künstlerische Ausführung einer Epiphanie dienten.

Deutlich wissenschaftlichere Erörterungen finden sich ungefähr 200 Jahre später bei Aristoteles, der in seinem Traktat *Meteorologica* nicht nur eine Beschreibung eines Nordlichtes gibt, sondern zudem versucht, dieses mithilfe der Lehre über die vier Elemente zu erklären.

φαίνεται δὲ ποτε συνιστάμενα νύκτωρ αἰθρίας οὐσης πολλὰ φάσματα ἐν τῷ οὐρανῷ, οἷον χάσματα τε καὶ βόθυνοι καὶ αἱματώδη χρώματα. αἴτιον δὲ ἐπὶ τούτων τὸ αὐτό· ἐπεὶ γὰρ φανερός ἐστι συνιστάμενος ὁ ἄνω ἀήρ ὥστ' ἐκपुरοῦσθαι, καὶ τὴν ἐκπύρωσιν ὅτε μὲν τοιαύτην γίγνεσθαι ὥστε φλόγα δοκεῖν καίεσθαι [...] οὐδὲν ἄτοπον εἰ χρωματίζεται ὁ αὐτὸς οὗτος ἀήρ συνιστάμενος παντοδαπὰς χρώας.  
 (Aristoteles *Meteorologica* 342a–342b)

„Es erscheinen aber manchmal bei Nacht viele zusammenhängende Erscheinungen im Himmel bei klarem Himmel, wie Spalten, Gräben und blutrote Farben. Sie haben denselben Grund. Denn es ist offensichtlich, dass sich die Luft oben zusammenschließt, sodass sie Feuer fängt und die Verbrennung manchmal so beschaffen ist, dass sie wie eine brennende Flamme erscheint [...]. Und es ist nicht ungewöhnlich, wenn sich dieselbe Luft in verschiedenen Farben färbt, sobald sie sich zusammenschließt.“  
(Aristoteles/Ross, 1908)



**Abbildung 1.2:** Eine Aufnahme von Polarlichtern, die über Alaska am 16.02.2017 zu sehen waren.  
Quelle: NASA, Terry Zaperach, aktualisiert am: 17.04.2017, Zugang am 20.05.2017 über  
→ <https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2017/northern-lights-over-alaska-1>

Zwischen den ersten Schritten der Astronomie in der Antike und der Forschung heutzutage liegen Welten, sodass die romantische Vorstellung eines Physikers, der nachts mit bloßem Auge den Himmel beobachtet, spätestens seit der Entwicklung von Weltraumteleskopen und Hochleistungscomputern der Vergangenheit angehört. Doch trotz dieser Komplexität der Technik und der scheinbaren Unzugänglichkeit für Laien wecken astronomische Themen mehr als alle anderen Gebiete Faszination bei Schülerinnen und Schülern.

Auch wenn Astrophysik im Rahmenlehrplan keinen Platz mehr findet, erweist ihr Einsatz sich sowohl aus Gründen der Motivation als auch bezüglich der praktischen Anwendung und des Transfers bereits erworbener Kompetenzen als sehr lohnenswert. Dabei bieten sich verschiedene Möglichkeiten der Integration der Thematik, sei es nun direkt im normalen Schulalltag oder als Projektwoche, Arbeitsgemeinschaft oder sonstige außerschulische Aktivität.

Diese Arbeit soll Lehrerinnen und Lehrern einen Anreiz bieten, astronomische Themen in ihren Unterricht zu integrieren, indem an dem spannenden Thema des Weltraumwetters zunächst eine Sachanalyse vorgenommen und dann ein didaktischer Vorschlag entwickelt wird.

Am Anfang werden relevante Eigenschaften der Sonne thematisiert, wie ihre Zusammensetzung, ihr Magnetfeld, ihre Abstrahlcharakteristik und der Sonnenzyklus. Danach wird ein Überblick der solaren Phänomene der aktiven Sonne gegeben, wie Sonnenwind, koronale Massenauswürfe und Sonneneruptionen, wobei insbesondere das letztgenannte Phänomen im Fokus steht. Im Anschluss werden die Definition, die Entstehung und die Auswirkungen von Sonneneruptionen erörtert.

Im darauffolgenden Abschnitt werden die für das Weltraumwetter relevanten Charakteristika der Erde, wie Atmosphäre und Magnetfeld, thematisiert und es wird erklärt, auf welche Art Ereignisse auf der Sonne diese beeinflussen. Veränderungen der Strahlungsintensität wirken sich auf Mensch und Technik aus, wobei die Gefährdung von Astronauten und Piloten sowie die Beeinträchtigung von Satelliten, Kommunikation und Stromversorgung dargestellt werden sollen.

Der nächste Abschnitt bietet einen kurzen Überblick über die Geschichte der Beobachtung des Weltraumwetters und eine Begriffsdefinition. Des Weiteren werden die Aufgaben und Funktionen der Weltraumwettervorhersage durch das Space Weather Prediction Center (SWPC) erläutert. Dieses nimmt für das Weltraumwetter Klassifizierungen vor, die eingehender betrachtet und erklärt werden.

Der zweite große Abschnitt dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Einbindung von Themen des Weltraumwetters in der Schule. Zunächst soll dafür näher erläutert werden, welche Möglichkeiten exemplarisch bestehen, astronomische Inhalte einzubinden und welche Vorteile sich daraus ergeben. Dabei wird ein grober Überblick über die fachlichen Themen gewährt und beispielhaft einzelne didaktische Vorschläge dazu vorgestellt, die zu dem konkreten Beispiel eine Grundlage bilden. Darauf aufbauend wird ein praktisches Beispiel aufbereitet, bei dem die Schülerinnen und Schüler selbstständig Originaldaten auswerten und eine Weltraumwettervorhersage erarbeiten können. Diese Arbeit dient also zusammenfassend der Erschließung des Themas für Lehrkräfte, um Lehrerinnen und Lehrer anzuregen, astrophysikalische Themen wie das Weltraumwetter in ihren Unterricht zu integrieren, und auf dessen fachlicher und didaktischer Basis die Planung von Unterricht erfolgen kann.

# Kapitel 2

## Die Sonne

### 2.1 Grundlegende Charakteristik

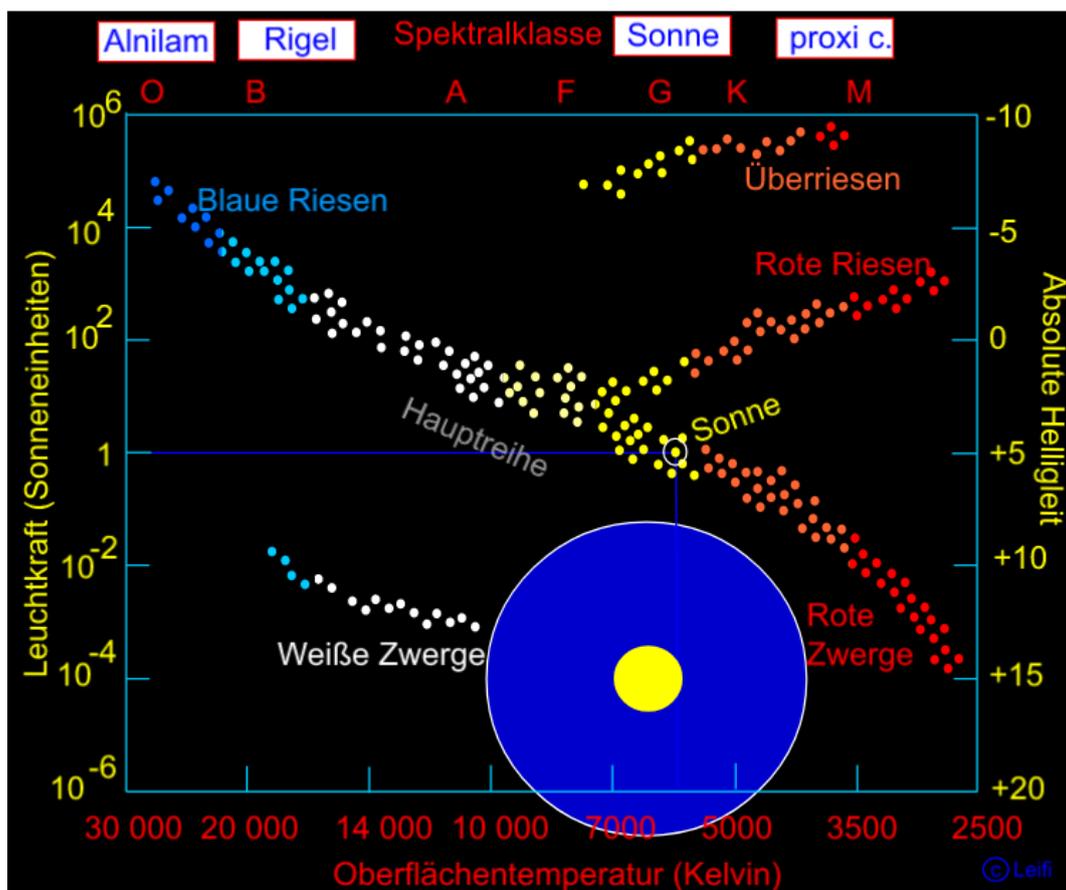
**Welche Eigenschaften und Prozesse der Sonne sind maßgeblich für das Weltraumwetter relevant (Aufbau der Sonne, Zyklen und Strahlung)?**

Betrachtet man aus astrophysikalischer Sicht ein derart komplexes Objekt wie die Sonne, ist es durchaus denkbar, von der Fülle der Informationen überfordert zu sein. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel nur die wesentlichen Eigenschaften der Sonne erläutert, sowie diejenigen Aspekte thematisiert, die maßgeblich für das grundlegende Verständnis des Weltraumwetters sind.

Ein erster Schritt besteht darin, eine Systematisierung vorzunehmen, indem man den betrachteten Stern in ein Klassifizierungssystem einordnet. Aufgrund der Beobachtung und Klassifizierung von Spektrallinien bei Sternen wurde die sogenannte Harvard-Sequenz als Grundlage für die Zuordnung der Sterne in je eine Spektralklasse (O, B, A, F, G, K oder M) verwendet. Die Spektralklasse gibt unter anderem Aufschluss über die Oberflächentemperatur des Sterns, wobei ein Stern der Klasse O mit circa 50.000 K sehr heiß und ein M-Klasse Stern mit ca. 3500 K verhältnismäßig kühl ist (Schneider, 2008, S. 419).

Wird diese Spektralklasse gegen die absolute Helligkeit des Sternes aufgetragen, so ergibt sich das sogenannte Hertzsprung-Russell-Diagramm, das etliche Informationen über die Häufigkeit der Sternklasse, deren Masse und viele weitere Eigenschaften enthält. Dabei fällt sofort auf, dass sich die meisten Sterne entlang eines dünnen Bandes diagonal im Diagramm einordnen lassen. In dieser sogenannten Hauptreihe, die sich von den sehr heißen und hellen Sternen bis zu den kühleren Sternen mit geringerer Helligkeit erstreckt, befindet sich auch die Sonne unseres Sternensystems, wobei sie der G-Spektralklasse angehört und eine effektive Temperatur von ca. 5777 K hat (Stix, 1989, S. 6).

Im Laufe ihrer Existenz durchläuft unsere Sonne eine Bahn durch das Hertzsprung-Russell-Diagramm. Aufgrund der Beobachtung von Sternen, die sich an anderen Stellen des Diagramms befinden, ist es also möglich, Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung der Sonne zu treffen und Erkenntnisse bezüglich ihrer Vergangenheit zu erlangen. Die Sonne wird derzeit als Gelber Zwerg bezeichnet, wobei dieser Zustand durch ein relatives Gleichgewicht von Abstrahlung und Radius gekennzeichnet ist (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 4).



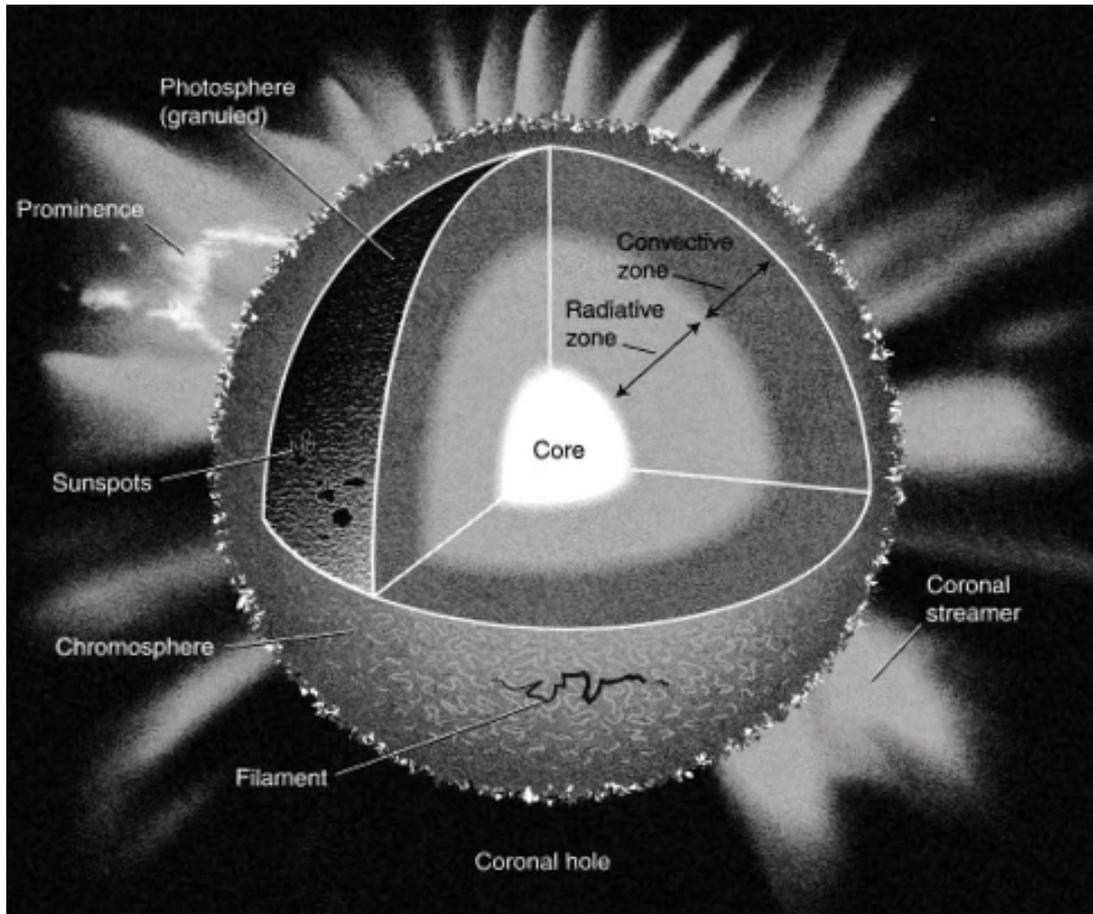
**Abbildung 2.1:** Darstellung des Hertzsprung-Russell-Diagramms. Der aktuelle Zustand der Sonne ist in der Hauptreihe markiert. Bei Betätigung der weißen Schaltflächen durchläuft die Sonne oder die Sterne Anilam, Rigel und Proxima Centauri gemäß ihrer Entwicklung das Diagramm. Der blaue Kreis stellt eine Vergrößerung der Sonne (hier in gelb) im Diagramm dar.

Quelle: mit freundlicher Genehmigung von der Joachim Herz-Stiftung, Zugang am 27.05.2017 über → <http://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/hertzsprung-russell-diagramm>

Dieses Gleichgewicht wird aufrecht erhalten aufgrund der Prozesse im Innern der Sonne, die eine entgegengesetzte Kraft zur Gravitation der Sonne selbst erzeugen. Im Kern der Sonne, in dem sich bei einem Radius von ca. 200.000 km 50–70 % der Masse befindet (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 11), herrschen so hohe Temperaturen, dass unter dem Druck von  $2 \times 10^{11}$  bar Protonen miteinander in einer sogenannten Proton-Proton-Reaktionskette fusionieren und Helium erzeugen, wobei Energie frei wird (Zirker, 2002, S. 22, zum Tunneleffekt siehe S. 20). Aufgrund dieses hohen Druckes im Innern der Sonne würde diese sich massiv und explosionsartig ausdehnen, jedoch übt die Gravitation eine Gegenkraft dazu aus. Zusätzlich wird eine übermäßige Ausdehnung von dem daraus resultierenden Sinken des Drucks und der Temperatur im Sonneninnern verhindert, da auf diese Weise die Reaktionsrate geringer wird und die Gravitation dem nach außen gerichteten Druck überwiegt.

Dieses Gleichgewicht wird wohl noch die nächsten  $5 \times 10^9$  Jahre bestehen bleiben, ehe ein Großteil des Wasserstoffs verbraucht sein wird und die Sonne zunächst zu einem Roten Riesen und dann als Weißer Zwerg das Leben auf der Erde unmöglich machen wird (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 4).

Im Gegensatz zu diesen dramatischen Ereignissen mag der aktuelle Zustand der Sonne vielleicht unspektakulär erscheinen, doch darf man sich auch zum jetzigen Zeitpunkt die Sonne keineswegs als ruhig vorstellen, sondern vielmehr als höchst turbulent. Ein treffender Vergleich findet sich bei



**Abbildung 2.2:** Modellhafte Darstellung der verschiedenen Schichten der Sonne und einiger Phänomene der aktiven Sonne.

Quelle: „Journey from the Center of the Sun“ (Zirker, 2002, S. 10)

Bornarel und Lilensten, wonach die Sonne wie ein Topf auf einer Flamme mit kochendem Wasser gefüllt sei, wobei das Feuer dem Kern entspricht und die Energie produziert und der Wassertopf die äußeren Schichten der Sonne darstellt, da in beiden Fällen Konvektionen stattfinden und von Zeit zu Zeit der Topf überkocht beziehungsweise Materie wegspritzt (ebd., S. 11).

Die Sonne kann man dem Standardmodell gemäß als sphärisch annähern und in verschiedene Zonen aufteilen, die wie die Schichten einer Zwiebel übereinander liegen. Der bereits beschriebene Kern erstreckt sich über circa 25 % des Sonnenradius. Die Strahlungszone, die den Kern beinhaltet, und darüber die Konvektionszone werden von der sogenannten Tachocline voneinander getrennt, da die beiden Zonen in Bezug auf die Sonnenrotation klar zu unterscheiden sind. Die Strahlungszone ist sehr dicht, sodass sie zusammen mit dem Kern wie ein starrer Körper rotiert. Die Konvektionszone hingegen ist weniger dicht und rotiert differentiell, sodass dort die Rotationsperiode zwischen 25 Tagen in der Äquatornähe und 31 Tagen in der Polnähe schwankt (Zirker 2002, S. 10 f. und Christensen-Dalsgaard and Thompson 2003, S. 68). Hinzu kommt auch noch eine radiale Abhängigkeit der differentiellen Rotation.

Die durch die Fusionsprozesse im Kern erzeugte Energie wird unterhalb der Tachocline mittels Strahlung transportiert, wobei die mittlere Weglänge aufgrund der hohen Dichte sehr kurz ist. Die geringere Dichte in der Konvektionszone führt dazu, dass die Energie nicht mehr mittels Strahlung, da diese Transportform nicht mehr ausreicht, sondern Konvektionen von großen Materiemengen transportiert wird (Zirker, 2002, S. 36 ff.).

Die äußeren Atmosphärenschichten der Sonne teilen sich wiederum in die Photosphäre, die Chromosphäre, die Übergangsregion und schließlich in die Korona auf. Die Photosphäre definiert oft die Oberfläche der Sonne, da ab dieser Zone sichtbares Licht abgestrahlt wird und von der Erde aus beobachtet werden kann (Weigert, Wendker, and Wisotzki, 2010, S. 171 f.). Im Gegensatz zu den relativ dünnen Schichten der Sonnenatmosphäre (Photosphäre  $r \approx 300$  km, Chromosphäre  $r \approx 2000$  km (ebd., S. 172 f.)), erstreckt sich die Korona darüber mehrere Sonnenradien weit in das All, wobei ihre Ausdehnung und Gestalt vom jeweiligen Grad der Sonnenaktivität abhängig ist (ebd., S. 175). Besonders charakteristisch für die Korona ist ihre extrem hohe Temperatur von bis zu zwei Millionen K – zum Teil im aktiven Zustand sogar darüber – sowie ihre geringere Dichte im Vergleich zu der Photosphäre und Chromosphäre (Zirker, 2002, S. 99).

Doch wie bei jedem Modell ist zu bedenken, dass die vereinfachte Darstellung gewisse Aspekte außer Acht lässt. Auch in diesem Fall bringt das Zwiebelmodell der einzelnen Sonnenschichten den Nachteil mit sich, dass die enorme Dynamik der Sonne nicht verdeutlicht wird. Die wichtigsten Ergänzungen sollen daher nun vorgenommen werden. Von besonderer Bedeutung für die meisten Ereignisse auf der Sonne und somit auch für das Weltraumwetter ist das solare Magnetfeld.

Das Magnetfeld der Sonne gehört nach wie vor aufgrund seiner Komplexität zu den wichtigsten Forschungsgebieten der Astrophysik, da es anhand der Beobachtungen der Sonne möglich ist, Erkenntnisse über weit entfernte Sterne und deren magnetische Aktivität zu erlangen.

Betrachtet man stellare Magnetfelder, sind besonders die Themengebiete der Plasmaphysik und der Magnetohydrodynamik maßgeblich von Bedeutung (Stenflo, 1994, S. xiii). Die Sonne besteht aus Plasma, wobei es sich um ionisiertes Gas handelt, was auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet wird (Kegel, 1998, S. 1 f.). In diesem Gas befinden sich freie Ladungsträger wie Protonen vom ionisierten Wasserstoff und Elektronen, sodass es in Bezug auf elektrische und magnetische Phänomene als sehr aktiv einzustufen ist.

Fügt man nun dieses Plasma in das vorherige Zwiebelmodell ein und lässt die Sonne differentiell rotieren, wird deutlich, dass zum einen an der Grenze zwischen dem starr rotierenden Kern und den differentiell rotierenden Zonen Plasma mit verschiedenen Richtungen und Geschwindigkeiten aneinander „reibt“ und zum anderen es auch innerhalb der differentiell rotierenden Zonen in Abhängigkeit vom Breitengrad zu Strömen kommt, die starke Magnetfelder induzieren. Hierbei spricht man von einem Dynamo-Effekt (Heidrich, 2009, S. 17).

Das so entstehende solare Magnetfeld ist global betrachtet aber nur sehr entfernt mit einem klassischen Dipolfeld wie bei der Erde zu vergleichen, da lokale Ereignisse, wie Sonnenflecken weitaus größere Magnetfeldstärken besitzen als das weitgehend stabile Dipolfeld der Sonne. Dies erkennt man deutlich bei der Betrachtung der Magnetfeldstärken, wobei das globale Feld gerade einmal 1–2 G beträgt, aber Protuberanzen (gewaltige Materieströme) 10–100 G und Sonnenflecken sogar bis zu 3000 G erreichen können. Im Gegensatz dazu liegt die Stärke des Erdmagnetfeldes unter einem Gauss (NASA Space Science Data Coordinated Archive/Williams).

Doch nicht nur solche Ereignisse und besonderen Phänomene auf der Sonne führen zu Änderungen des solaren Magnetfeldes, vielmehr treten sie innerhalb eines bestimmten Musters auf, sodass ihre Summe und Intensität die Aktivität der Sonne einem beobachtbaren Zyklus unterwerfen. Der bereits beschriebene enge Zusammenhang zwischen Sonnenflecken und Magnetfeld führt zur Erkenntnis, dass der solare Zyklus als Aktivitätszyklus des Magnetfeldes anerkannt werden kann.

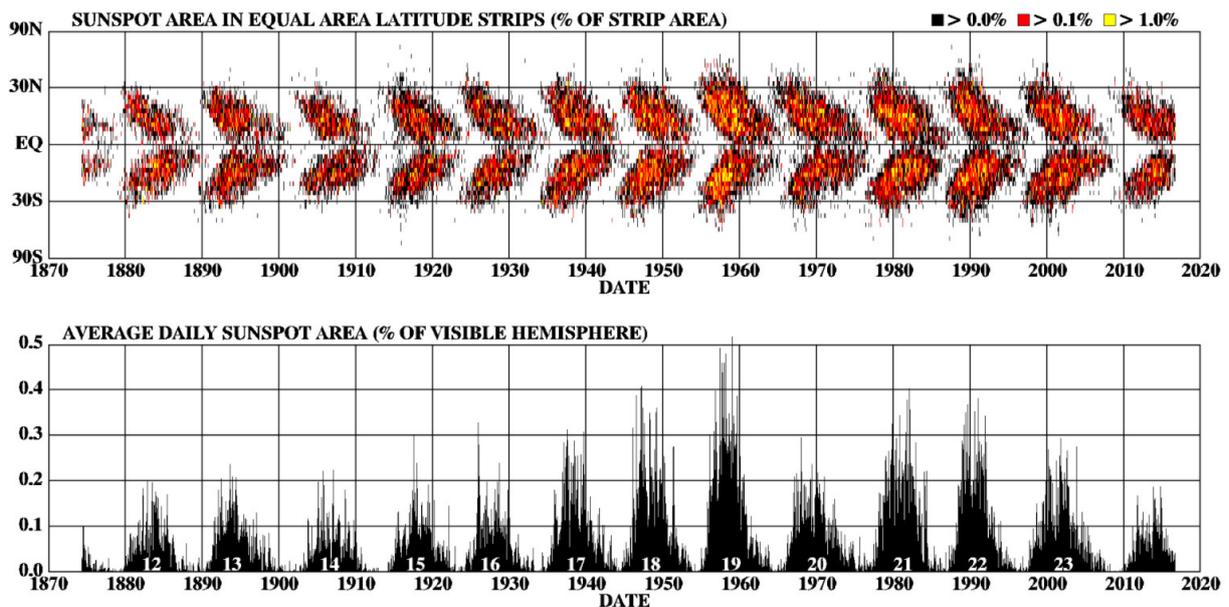


**Abbildung 2.3:** Zeichnungen von Sonnenflecken von Heinrich Samuel Schwabe vom 15.03.1858.  
Quelle: „Astronomie+Raumfahrt“ ([Hamel, 2009](#), S. 37)

Eine Periodizität der Sonnenaktivität anhand von Sonnenflecken wurde erst im Jahr 1840 von Heinrich Samuel Schwabe festgestellt, nachdem die ersten Beobachtungen von Sonnenflecken schon über 200 Jahre zuvor durchgeführt wurden ([Hamel, 2009](#), S. 37). Seine ersten Vermutungen zur Dauer des Zyklus waren eine gute Annäherung, entsprachen aber noch nicht dem heute gängigen Wert, da der Zyklus selbst Schwankungen unterworfen ist, sodass man lediglich einen durchschnittlichen Wert von 11,1 Jahren als Periode angeben kann, wobei ein Zyklus aber sowohl 12 als auch nur 9 Jahre lang sein kann (ebd., S. 38).

Betrachtet man allerdings nicht nur die Häufigkeit der Sonnenflecken, sondern auch ihre jeweiligen Polaritäten und Positionen, fällt auf, dass die Periode von 11,1 Jahren in Bezug auf die Intensität der Aktivität korrekt erscheinen mag, doch bei Einbeziehung weiterer Parameter auf die doppelte Dauer von ca. 22 Jahren erweitert werden muss. Sonnenflecken und -gruppen treten nämlich sehr häufig als bipolare Gebilde auf, was bedeutet, dass man immer paarweise magnetisch positive und negative Regionen zuordnen kann. Die Ausrichtung der bipolaren Regionen lässt sich anhand der Rotationsrichtung der Sonne bestimmen, wobei festgestellt werden konnte, dass auf der nördlichen und südlichen Hemisphäre jeweils immer entgegengesetzte Polaritäten in Rotationsrichtung ausgerichtet sind. Diese Ausrichtung vertauscht sich in etwa alle 11 Jahre, sodass letztendlich 22 Jahre vergehen, ehe die Sonnenflecken den gesamten Zyklus durchlaufen haben und sich wieder in der ursprünglichen Konfiguration befinden ([Schmidt and Schüssler, 2009](#), S. 30). Innerhalb dieser 22 Jahre erfolgt ebenfalls eine doppelte Umpolung des globalen Dipolfeldes der Sonne.

## DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



**Abbildung 2.4:** „Schmetterlings-Diagramm“. Oben: Das Auftreten von Sonnenflecken in Abhängigkeit von dem Breitengrad. Farblich gekennzeichnet ist der prozentuale Anteil der Sonnenflecken von der Sonnenoberfläche in Bezug auf den Breitengrad. Unten: Durchschnittliche, tägliche Bedeckung der sichtbaren Sonnenoberfläche durch Sonnenflecken.

Quelle: NASA/David H. Hathaway, aktualisiert am: 23.03.2017, Zugang am 09.06.2017 über

→ <https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif>

Eine weitere Auffälligkeit während des solaren Zyklus besteht in der Lage der Sonnenflecken in Bezug auf die geographische Breite, wobei diese systematische Anordnung als Spörer's Gesetz bezeichnet wird. Laut diesem erscheinen die Sonnenflecken zu Beginn eines Zyklus rund um die Breitengrade  $30^\circ - 35^\circ$  und bewegen sich im Verlauf des Zyklus immer weiter auf den Äquator zu, ehe die letzten Sonnenflecken rund um den zehnten Breitengrad auftreten (Stix, 1989, S. 302 f.). Trägt man das Erscheinen der Sonnenflecken über die Zeit als Funktion des Breitengrads auf, so erhält man das bekannte „Schmetterlings-Diagramm“.

Trotz gewissenhafter Dokumentation der Anzahl der Sonnenflecken vonseiten Schwabes und vieler Astrophysiker vor und nach ihm, ist es natürlich ebenfalls sehr interessant zu wissen, ob der solare Zyklus sich erst seit 400 Jahren auf diese Weise verhält oder dieses Muster sich auch vor 2000 Jahren finden lässt. Eine Lösung für dieses Problem liefert das Magnetfeld der Sonne selbst, da in Abhängigkeit zu dessen Stärke kosmische Strahlung mehr oder weniger abgeschirmt wird, bevor sie auf die Erde trifft. Befindet sich die Sonne beispielsweise in einem Stadium hoher Aktivität, werden viele hochenergetische Teilchen abgeschirmt, sodass weniger radioaktive Isotope wie  $^{14}\text{C}$  oder  $^{10}\text{Be}$  in der Erdatmosphäre aufgrund des Zusammenpralls mit Sauerstoff- oder Stickstoffatomen entstehen. Ein Nachweis der Konzentration der beiden Isotope ist auf zweierlei Wegen möglich. Zum einen lagert sich  $^{14}\text{C}$  zum Beispiel in Pflanzen ab, sodass eine Scheibe aus einem geeignet alten Baum Aufschluss geben kann, und zum anderen wird  $^{10}\text{Be}$  als Niederschlag aus der Atmosphäre auf die Erde transportiert, wobei es in Schichten gefrieren kann, sodass Bohrungen von antarktischen Eisschichten ebenfalls eine grobe Übersicht über die Sonnenaktivität gewähren (Schmidt and Schüssler, 2009, S. 30 f.).

Vor allem anhand der Vermessungen von Baumscheiben ist es möglich, nicht nur den solaren Zyklus über 11.000 Jahre in die Vergangenheit zu rekonstruieren, sondern dabei wurden

ebenfalls umfassendere Schwankungen in der Sonnenaktivität festgestellt, die als Minima bezeichnet werden. Die Verminderung der Aktivität in der jüngsten Vergangenheit wird als das Maunder-Minimum bezeichnet und erstreckte sich über 60 Jahre am Ende des 17. und Anfang des 18. Jahrhunderts, wobei es mit einer deutlichen Absenkung der Durchschnittstemperaturen und sehr langen und kalten Wintern in Europa und Nordamerika einherging (ebd., S. 31).

Durchschnittlich ist die Sonne aktuell zum Beginn des 21. Jahrhunderts vergleichsweise sehr aktiv, doch befinden wir uns seit dem Maximum 2012/2013 des momentanen 24. Zyklus wieder im Bezug auf den 11-Jahreszyklus nach Schwabe auf dem Weg in ein Minimum der Sonnenaktivität. Je nach Phase des 11-Jahreszyklus ist mit einer vermehrten bzw. verminderten Aktivität der Sonne und somit potentiellen Großereignissen zu rechnen, die das Leben auf der Erde beeinflussen können.

Doch ehe genauer auf die Phänomene der Sonne eingegangen wird, die das Weltraumwetter maßgeblich prägen, ist es sinnvoll, sich die grundlegenden Dimensionen der beiden Hauptenergietransportmöglichkeiten zu der Erde zu verdeutlichen, wobei es sich um elektromagnetische Strahlung und Materie handelt. Eine bedeutende Größe in diesem Kontext ist die Leuchtkraft der Sonne, die besagt, dass aufgrund der im Innern der Sonne mittels Kernfusion produzierten Energie die Sonne mit einer Kraft von  $L = 3,86 \times 10^{26}$  W strahlt. Dieser Wert ist jedoch bezüglich der Auswirkungen auf die Erde wenig aussagekräftig, sodass es sinnvoll ist, die Solarkonstante an dieser Stelle zu nennen, die  $1,367 \text{ kWh m}^{-2}$  beträgt und die Gesamtstrahlungsleistung der Sonne in Bezug auf elektromagnetische Wellen aller Frequenzen definiert (Weigert, Wendker, and Wisotzki, 2010, S. 137). Dieser Wert gibt an, welcher Strahlungsdruck bezogen auf die Erde, knapp oberhalb der Atmosphäre, auf jeden Quadratmeter wirkt. Vergleicht man diesen Wert mit einer Glühlampe mit einer Leuchtkraft von 40 Watt und tausche die Sonne gegen diese aus, so betrüge die entsprechende Solarkonstante nur  $1,4 \times 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}$ .

Der Energietransport erfolgt zum einen durch die Abstrahlung von elektromagnetischer Strahlung, die im Kern der Sonne durch Fusionsreaktionen entsteht. Diese Photonen passieren äußere und kühlere Regionen der Sonne, auf deren Weg dort befindliche Atome angeregt werden und diese je nach Übergang Photonen spezifischer Energien emittieren. Daraus folgend kann von der Erde aus ein kontinuierliches Spektrum mit für die Sonne charakteristischen Absorptionslinien, den Fraunhoferlinien, erfasst werden, von denen mittlerweile mehr als 25.000 bekannt sind. Die maximale Energie wird dabei bei einer Wellenlänge von ungefähr  $\lambda = 500 \text{ nm}$  emittiert, was im grünen Bereich des sichtbaren Lichts liegt (Weigert, Wendker, and Wisotzki, 2010, S. 171).

Bei diesen vorgestellten Werten handelt es sich um durchschnittliche Größen, doch können sich diese um ein Vielfaches erhöhen, wenn man die Sonnenaktivität und besondere Extremereignisse betrachtet, die im Folgenden eingehender erörtert werden sollen.

## 2.2 Phänomene und Ereignisse

**Welche Phänomene sind auf der aktiven Sonne zu beobachten?**

**Welche potentiellen Gefahren für die Erde gehen von diesen Erscheinungen aus?**

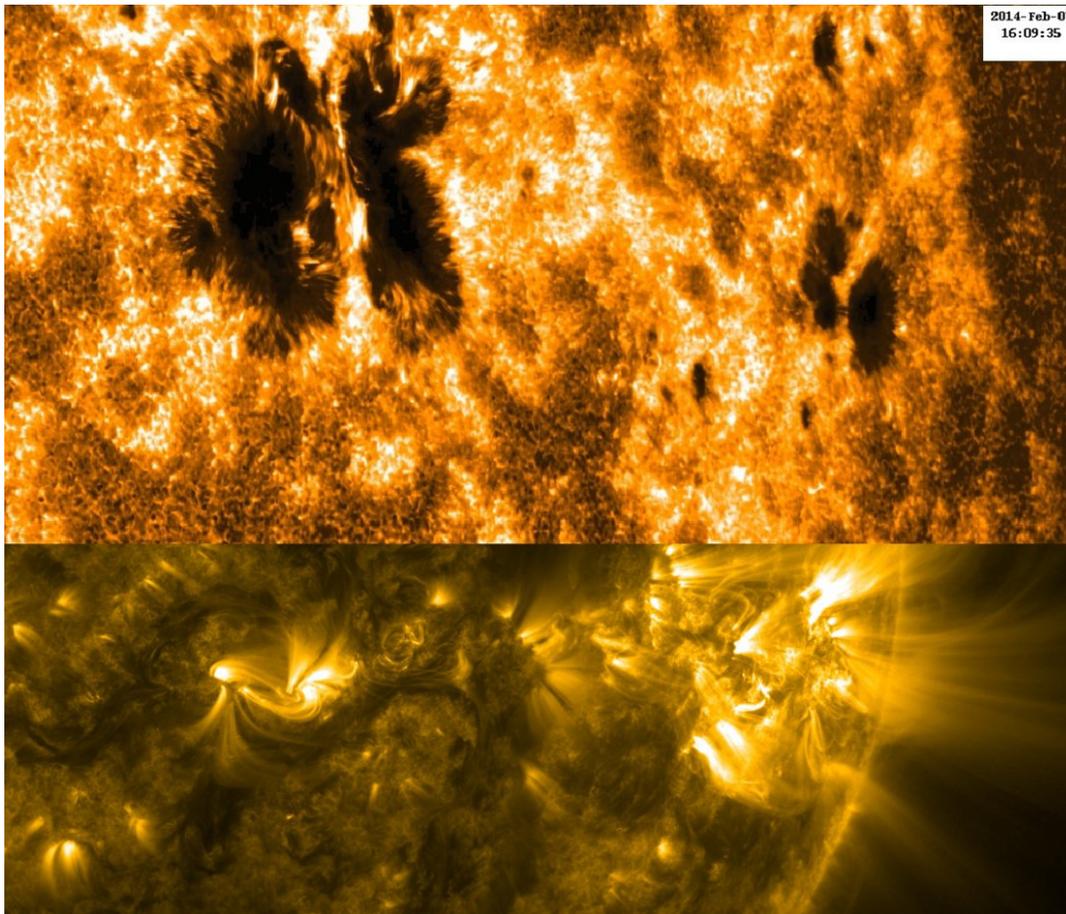
Eine der ersten beobachteten Phänomene auf der Sonne waren die Sonnenflecken, deren Auftreten und Position maßgebliche Indizien für den Grad der Sonnenaktivität und den solaren Zyklus darstellen. Bis zu der Erfindung des Teleskops wurden sie eher als Hindernis für die Sonnenbeobachtung betrachtet, da man beispielsweise bei einem Planetentransit diesen nur schwer im Vordergrund eines Sonnenflecks verfolgen konnte. Doch mit der Verbesserung der Mess- und Beobachtungsmethoden und der Entdeckung, dass Sonnenflecken durch Magnetfelder verursacht werden, sind sie ein wichtiger Gegenstand der astronomischen Forschung geworden.

Sonnenflecken haben ein gewaltiges Ausmaß und sind manchmal sogar von der Erde mit bloßem Auge sichtbar. Die Lebensdauer von Sonnenflecken schwankt stark zwischen nur einigen wenigen Tagen und mehreren Monaten (Weigert, Wendker, and Wisotzki, 2010, S. 179). Sie setzen sich aus einem dunklen Zentrum, der sogenannten Umbra, die einen Durchmesser von bis zu 50.000 km einnehmen kann, und einem etwas helleren, äußeren Ring, der Penumbra, zusammen, sodass die Erde in einen großen Fleck ganze viermal hineinpasst (Weigert, Wendker, and Wisotzki, 2010, S. 179).

Ebenso enorm wie die Größe der Flecken ist deren Magnetfeld, das bis zu 3000 Gauss erreichen kann (Choudhuri, 2003, S. 104). Allerdings werden nur Temperaturen um 4000 Kelvin gemessen, was im Vergleich zur umgebenden Photosphäre recht kühl ist (Švestka, 2003, S. 240). Diese vergleichsweise geringen Temperaturen haben ihre Ursache in dem vorherrschenden, starken Magnetfeld, das den konvektiven Energietransport behindert. Dies führt zu einer Abkühlung des Gases und somit erscheinen Sonnenflecken dunkel im Vergleich zur heißeren Umgebung (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 32 f.).

Es können auch ganze Gruppen von Sonnenflecken entstehen, in denen häufig zwei Sonnenflecken entgegengesetzter Polarität auftreten, sodass sie ein magnetisch bipolares Paar bilden, was ihren magnetischen Ursprung als aufsteigende Flussröhre verrät.

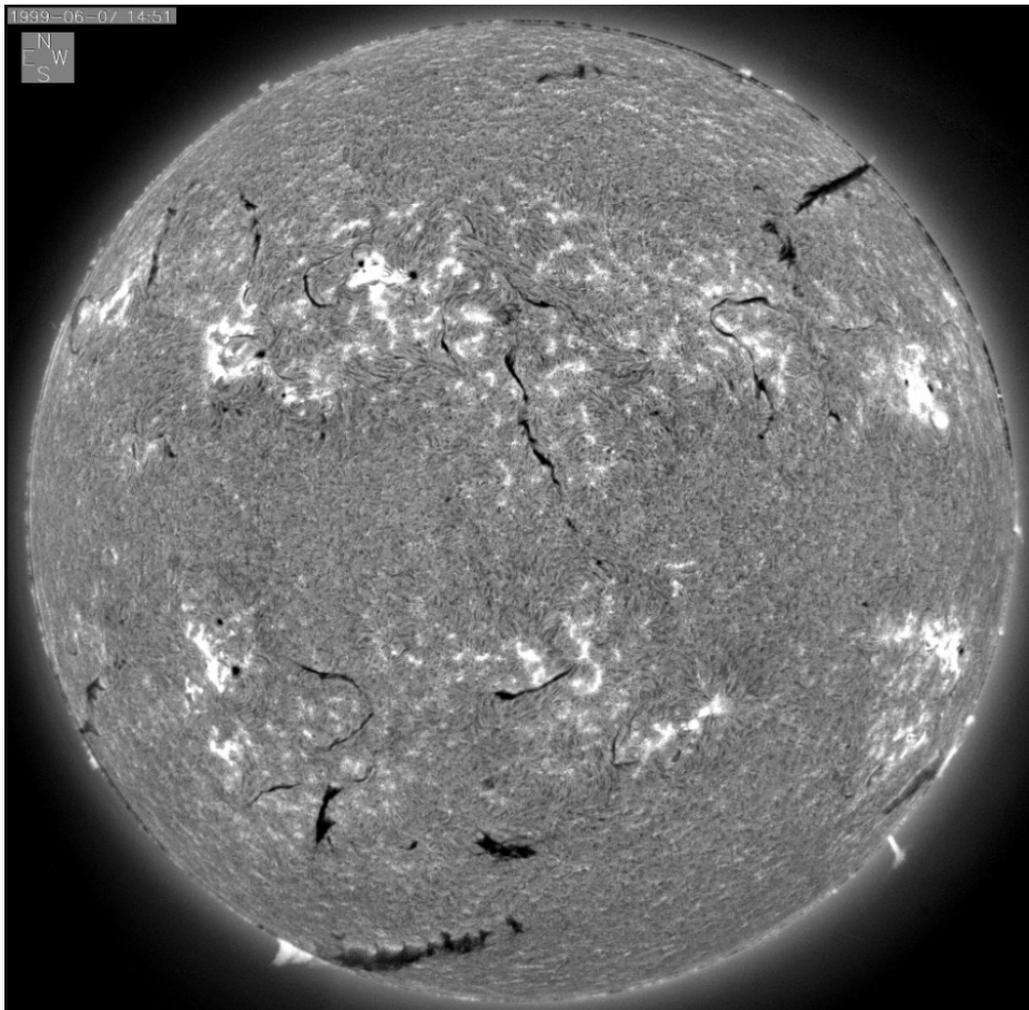
Sonnenflecken als Ereignisse auf der Sonne sind zwar interessante Indikatoren für ihre aktuelle Aktivität, doch gibt es weitere Phänomene, die im Rahmen des Weltraumwetters für die Erde eine größere Relevanz haben. Ein weniger spektakuläres, sondern eher alltägliches Phänomen ist der Sonnenwind, der trotz seiner Stetigkeit je nach Aktivität der Sonne an Intensität schwankt und für das Weltraumwetter nicht außer Acht zu lassen ist. Seine Existenz begründet sich mit der bereits vorgestellten Korona der Sonne, die sich durch ihre hohen Temperaturen von bis zu zwei Millionen Kelvin auszeichnet. Zusätzlich zu diesen extremen Temperaturen durchziehen starke, variable Magnetfelder die Korona. Entlang dieser Feldlinien bewegen sich Teilchen, die sehr hohe Geschwindigkeiten innehaben. Aus diesem Grund löst sich ein Strom von Teilchen aus der Korona, wobei es sich hauptsächlich um Protonen, Elektronen und  $\alpha$ -Teilchen handelt. Diese bewegen sich mit Geschwindigkeiten zwischen 400–700 km s<sup>-1</sup> auf die Erde zu. In Erdnähe können zwischen 10<sup>11</sup>–10<sup>12</sup> Teilchen m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> gemessen werden (Weigert, Wendker, and Wisotzki, 2010, S. 177).



**Abbildung 2.5:** Aktive Region mit einem großen Sonnenfleck. Aufgenommen von dem japanischen Weltraumteleskop Hinode in der Ca II H Linie mit 396.8 nm am 07.02.2014. Die Abbildung unten zeigt dieselbe, aktive Region am 12.02.2014 aufgenommen vom SDO (Solar Dynamics Observatory) in der Fe IX Linie mit 171 Å. Quelle: NASA, Hinode, aktualisiert am: 31.07.2015, Zugang am 05.06.2017 über → [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/hinode/multimedia/solar-flares-active-region-11967.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/multimedia/solar-flares-active-region-11967.html)

Betrachtet man Aufnahmen der Sonne, lassen sich neben den dunkel erscheinenden Sonnenflecken noch viele weitere Strukturen erkennen. Zum einen erscheint die Sonnenoberfläche nicht gleichmäßig hell, sondern weist eine körnige Struktur auf, welche sich aus dem konvektiven Energietransport ergibt. Steigt vergleichsweise heiße Materie auf, erscheint sie als heller Bereich, doch strahlt sie diese Energie stetig wieder ab, sodass die abgekühlte Zelle wieder zu sinken beginnt und dunkler erscheint, wobei sich „hell“ und „dunkel“ auf die mittlere Strahlungsintensität bezieht. Diese Zellen auf- und absteigender Materie werden als Granulen bezeichnet, haben einen durchschnittlichen Durchmesser von 1500 km und eine Lebenszeit von ungefähr 18 min (Bornarel and Lilensten, 2006, S. 15).

Doch zusätzlich zu diesen kleineren Strukturen kann man auch größere und potentiell eruptive Phänomene, die Protuberanzen genannt werden, beobachten. Oft haben diese das Aussehen von langen, schlauchförmigen Flussröhren auf der Sonnenoberfläche, die aufgrund von starken, gerichteten Magnetfeldern entstehen. Diese auch als Filamente bezeichneten Erscheinungen gehören zu dem alltäglichen Bild der aktiven Sonne, doch können sie unter bestimmten Umständen zu Extremereignissen werden. Auf der Sonnenscheibe erscheinen diese aus bereits genannten Gründen im Vergleich dunkler als ihre Umgebung. Befinden sich die Filamente aber am Rand der Sonnenscheibe, so beobachtet man, dass sie sich als hell leuchtende Bögen bis zu 10.000 Kilometer in die Korona erstrecken. Diese magnetisch hochenergetischen Strukturen sind dementsprechend von enormem Ausmaß, da sie kühles Plasma in der Korona halten, sodass bei



**Abbildung 2.6:** Aufnahme der Sonne in der H-Alpha Linie vom Big Bear Sonnenobservatorium in Kalifornien am 06.07.1999. Gut sichtbar sind Filamente auf der Sonnenscheibe und helle Protuberanzen am Rand der Sonnenscheibe. Quelle: Big Bear Solar Observatory, Zugang am 09.06.2017 über [ftp://ftp.bbso.njit.edu/pub/archive/1999/06/07/bbso\\_half\\_fr\\_19990607\\_145138.jpg](ftp://ftp.bbso.njit.edu/pub/archive/1999/06/07/bbso_half_fr_19990607_145138.jpg)

einem Stabilitätsverlust Materie und Strahlung explosionsartig in den Weltraum und manchmal in Richtung der Erde geschleudert werden können (ebd., S. 33).

Besonders in den aktiven Zeiten im Verlauf des Sonnenzyklus ereignen sich immer wieder gewaltige Explosionen auf der Sonnenoberfläche.

Diese lassen sich in die Kategorien der Flares, wobei es sich um Strahlungsausbrüche handelt, koronalen Massenauswürfe, wie der Name bereits impliziert ein Ausstoß von Materie, und Filamenteruptionen einteilen. Prinzipiell sind alle Kombinationen dieser drei Kategorien möglich, was von der Topologie der Magnetfelder und der Rekonnexionsmechanismen abhängig ist. Das Auftreten von Sonneneruptionen und koronalen Massenauswürfen ist allerdings oft miteinander korreliert, sodass nach einer strahlungsgintensiven Eruption zusätzlich Teilchen in explosiven Ereignissen ausgestoßen werden (Youssef, 2012, S. 172).

Insbesondere die Verbindung dieser beiden extremen Phänome stellt für die Menschen und ihre Technologie eine große Gefährdung dar. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt diese Ereignisse eingehender erörtert und ihr Potential für eine mögliche Bedrohung erklärt.

## 2.3 Solar Flares (Strahlungsausbrüche)

**Wie entstehen Sonneneruptionen und koronale Massenauswürfe?  
Welche Charakteristika weisen diese auf?**

Die ersten Beobachtungen von Sonneneruptionen erfolgten bereits 1859, doch handelte es sich dabei eher um zufällige Sichtungen als um geplante und vorhergesagte Observationen. Zumeist wurden diese während Untersuchungen von Sonnenfleckengruppen als vergleichbar mit diesen plötzliche und massive Intensitätserhöhung entdeckt. Bei diesem Phänomen handelte es sich um eine seltene Art von Eruptionen, die im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums ein Intensitätsmaximum aufweisen und als Weißlicht-Flares bezeichnet werden ([Gordon Emslie and Tandberg-Hanssen, 2009](#), S. 1).

Heutzutage werden derartige Ereignisse mithilfe moderner Spektroskopie unter Verwendung von Fabry-Pérot-Interferometern besonders in der Spektrallinie  $H\alpha$  untersucht, die von angeregtem Wasserstoff erzeugt wird und eine Wellenlänge von circa  $\lambda = 656 \text{ nm}$  hat. Die Raumfahrt und sich damit eröffnende technische Möglichkeiten bieten eine Gelegenheit, Sonneneruptionen unter Einbeziehung des gesamten elektromagnetischen Spektrums von den langwelligen Radiowellen bis zu der hochfrequenten  $\gamma$ -Strahlung zu erfassen.

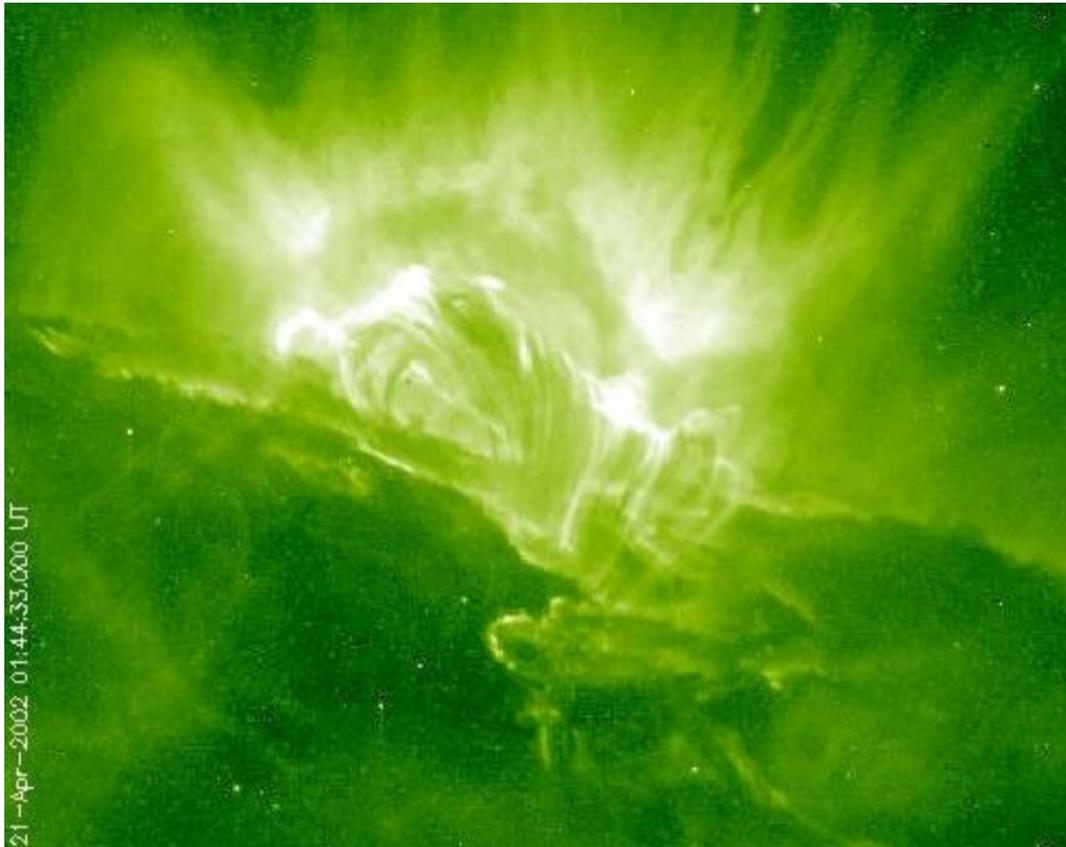
Zu den Sonneneruptionen gehören sogenannte Flares, bei denen es sich um plötzliche Strahlungsausbrüche mit einer Dauer von wenigen Minuten bis mehreren Stunden handelt. Dabei werden gewaltige Energiemengen von über  $10^{25}$  Joule frei, was einer Explosionskraft von über zwei Milliarden Wasserstoffbomben entspricht ([Warmuth, 2009](#), S. 26).

Aufgrund der Beobachtung von Flares und der Feststellung, dass diese in magnetisch aktiven Regionen auftreten, ist das solare Magnetfeld als Ursprung für derartige explosive Ereignisse zu nennen. Dabei spielen insbesondere starke lokale Magnetfelder und Scherbewegungen der Magnetfeldlinien eine entscheidende Rolle, deren Entstehung im Folgenden eingehender erläutert werden soll.

Wie bereits zuvor genannt, wird die Sonne oft als magnetischer Dynamo bezeichnet. Zwischen der Strahlungs- und der Konvektionszone innerhalb der Tachocline bewegt sich Plasma mit freien Ladungsträgern in verschiedene Richtungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Aus diesen Bewegungen geladener Teilchen entstehen zum Teil starke Magnetfelder. Diese magnetischen Flussröhren haben einen gewissen Auftrieb – der Gasdruck im Inneren ist geringer – und so steigen sie in die darüber liegenden Regionen auf ([Weigert, Wendker, and Wisotzki, 2010](#), S. 184).

Regionen mit einer großen Dichte von Magnetfeldlinien werden als aktiv betitelt, doch ist es nötig diesen Begriff näher zu definieren. Als aktiv ist in diesem Kontext nicht nur die Chromosphäre der Sonne, aus der die Flares scheinbar heraus entstehen, sondern auch tiefer liegende Schichten der Photosphäre, in der die Eruptionen ihre „Wurzeln“ ausbilden, einzuschließen ([Gordon Emslie and Tandberg-Hanssen, 2009](#), S. 129).

Doch erst die differentielle Rotation entlang der Breitengrade der Sonnenoberfläche trägt dazu bei, dass derartig starke und vor allem instabile lokale Magnetfelder entstehen können. Aufgrund von adiabatischen Konvektionsvorgängen, bei denen Flussröhren (engl. flux tubes) aufsteigen



**Abbildung 2.7:** Abbildung einer Sonneneruption vom 21.04.2002. Aufgenommen von dem TRACE Weltraumteleskop in der Fe XII Linie.

Quelle: „Flare Observation“ (Benz, 2008)

und wieder absinken, und durch die differentielle Rotation hervorgerufene „Scherkräfte“ entstehen komplexe, magnetische Strukturen. Diese befinden sich insbesondere in der Nähe von Sonnenflecken, bei denen es sich ebenfalls um magnetische Phänomene mit enormen Magnetfeldstärken handelt, sodass die Beobachtung nicht überraschend ist, dass Eruptionen zumeist in der unmittelbaren Umgebung von komplexen Sonnenfleckengruppen auftreten (ebd., S. 143).

Um eine derart große Menge Energie zu speichern, die bei einer Sonneneruption frei wird, muss vor allem das System, in dem die Energie des Magnetfeldes aufgestaut wird, und dessen Stabilität betrachtet werden. Dabei ist entscheidend, dass die Speicherung zunächst stabil erfolgen muss, da bei einer bereits anfänglichen Instabilität die Energie kontinuierlich abgegeben wird und so lediglich für die Erwärmung der Korona und der Sonnenatmosphäre verantwortlich ist. Denn erst wenn sich magnetische Energie in einem komplexen System massiv anreichern kann, ist es möglich, innerhalb einer kurzen Zeitspanne eine große Menge Energie explosionsartig freizusetzen (Stix, 1989, S. 357).

Lange Zeit wurde die Frage diskutiert, auf welche Weise die im Magnetfeld gespeicherte Energie derart schlagartig freigesetzt werden kann. Die Antwort darauf hängt mit der Struktur der magnetischen Feldlinien zusammen und funktioniert nach dem Prinzip, dass jedes System nach dem energetisch günstigsten Zustand strebt.

Man stelle sich zur Veranschaulichung eine aktive, magnetisch komplexe Region der Sonne vor. Innerhalb dieser befinden sich lang gestreckte magnetische Röhren, die ineinander verworren und verdreht sind. Diese komplexe Struktur bleibt solange stabil, bis sich eine Gelegenheit bietet,

ein System zu bilden, das energetisch günstiger ist. Dies geschieht, indem die Flussröhren in sich aufbrechen, aber sich sofort wieder mit anderen verbinden, was als magnetische Rekonnexion bezeichnet wird. Da die neuen Verbindungen deutlich weniger komplex sind, wird die zuvor benötigte Energie schlagartig frei und eine Eruption entsteht (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 183 ff.).

Derartige Sonneneruptionen treten in verschiedenen Stärken und mit unterschiedlichen Merkmalen auf. Bei den kleinsten Flares, die Mikroflares genannt werden, handelt es sich lediglich um minimale Intensitätserhöhungen im Röntgen- und UV-Bereich (Stix, 1989, S. 145). Seit den 1960er Jahren werden Sonneneruptionen nicht mehr innerhalb des sichtbaren Bereichs des elektromagnetischen Spektrums klassifiziert, sondern mit Bezug auf die gemessene Flussstärke der Röntgenstrahlung im Wellenlängenbereich 1–8 Å (Gordon Emslie and Tandberg-Hanssen, 2009, S. 5).

Die Aufteilung erfolgt mittels Großbuchstaben (von kleinen bis großen Flares A, B, C, M und X), die die Stärke des Röntgenstrahlungsflusses anzeigen. Die einzelnen Kategorien zeigen den Exponenten auf, wobei z.B.  $B = 10^{-4}$ ,  $C = 10^{-3} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  usw. entspricht. Eine nachfolgende Ziffer verdeutlicht den Multiplikationsfaktor mit der Intensität entsprechend des jeweiligen Buchstabens (ebd., S. 5). Daraus ergibt sich beispielsweise, dass die Kategorie M5 die Intensität von  $5 * 10^{-2} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  anzeigt, wobei die Einheit erg häufig in der Astrophysik für Energie verwendet wird und  $1 \text{erg} = 10^{-7} \text{J}$  entspricht. Allerdings ist auch eine Umrechnung in die gängigere Einheit  $\text{W m}^{-2}$  möglich, sodass die Aufteilung sich um den Faktor  $10^{-3}$  verschiebt ( $A = 10^{-8} \text{W m}^{-2}$ ,  $B = 10^{-7} \text{W m}^{-2}$  usw.).

Anhand dieser Zuordnung lassen sich interessante Erkenntnisse gewinnen, wie z.B. die Häufigkeit von verschiedenen Flares und deren Auftreten in Bezug auf den Sonnenzyklus. So konnten zwischen 1976 und 1985 insgesamt 17.986 Sonneneruptionen aufgezeichnet werden, von denen lediglich ein Prozent der Klasse X angehörte. Während des zweijährigen Maximums jenes Zyklus gehörten über 500 Ereignisse zur Klasse M und fast 60 zur Kategorie X, wobei im Minimum des Sonnenzyklus nur fünf M-Klasse Eruptionen beobachtet werden konnten (ebd., S. 6).

Der Verlauf einer Eruption lässt sich in mehrere Phasen einteilen. Bereits vor dem Ausbruch des Flares gibt es gewisse Anzeichen beziehungsweise Vorboten, wie unter anderem ein Anstieg der Temperatur und der Leuchtkraft in einer aktiven Region, zu denen zum Beispiel Sonnenflecken gehören (Gordon Emslie and Tandberg-Hanssen, 2009, S. 141). Während dieser Temperaturzunahme, die sich über mehrere Minuten hinziehen kann, wird zum Teil Wärmestrahlung von bis zu  $10^7 \text{K}$  detektiert (Stix, 1989, S. 353).

Sobald die gespeicherte Energie groß genug ist und das bisherige Gleichgewicht zu instabil wird, kommt es zu einer explosionsartigen Freisetzung von Energie, wobei dies sich besonders anhand einer massiven Intensitätserhöhung im Bereich von  $\gamma$ -Strahlung und harter und somit hochenergetischer Röntgenstrahlung feststellen lässt. Nun befindet sich der Flare in der impulsiven (impulsive) Phase, die meistens nur circa eine Minute dauert und mit Impulsen von jeweils wenigen Sekunden Strahlung freisetzt (ebd., S. 353).

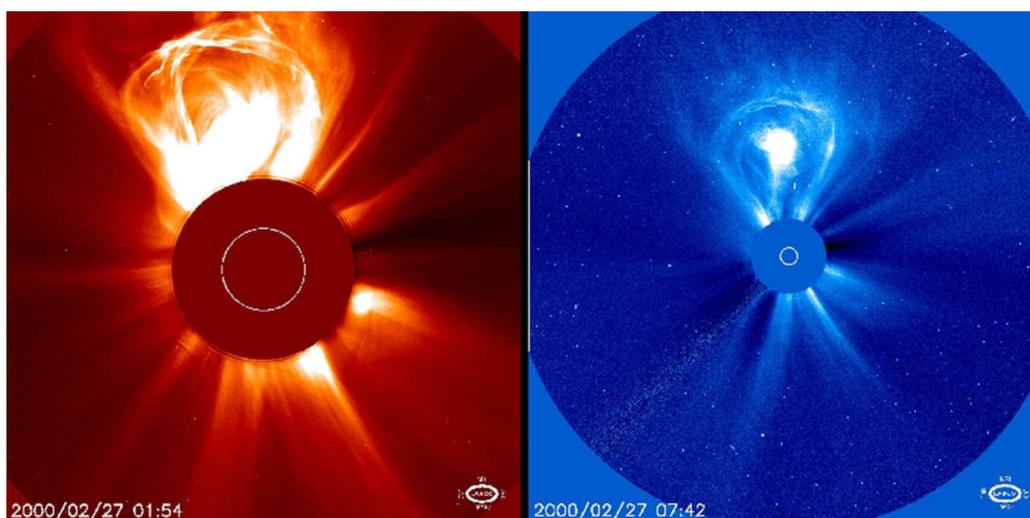
In der darauffolgenden gemäßigten Phase wird die Strahlungsintensität schwächer und breitet sich großflächiger über weite Bereiche der Sonnenatmosphäre aus. Diese Entwicklungsstufe der Sonneneruption ist gekennzeichnet von Wärme-, weicher Röntgen-, ultravioletter und sichtbarer Strahlung und kann sich über eine Zeitspanne von mehreren Stunden erstrecken (Gordon Emslie and Tandberg-Hanssen, 2009, S. 206).

Sobald ein großer Teil der zuvor angestauten Energie mittels Strahlung, Leitungsvorgängen und Teilchenbewegung freigesetzt worden ist, befindet sich das System unterhalb eines kritischen Niveaus und die Abklingphase (decay phase) beginnt, die etwa dreißig bis sechzig Minuten andauert (ebd, S. 227 f.). Dabei wird zwischen „impulsive“ und „long-duration“ Flare unterschieden. Beim Erstgenannten verläuft auch der Abstieg ähnlich schnell wie der Anstieg und beim Zweiten findet ein langsames exponentielles Abklingen statt. Zumeist kehrt die aktive Region der Eruption in einen vergleichsweise inaktiven Zustand zurück und nimmt die Eigenschaften der restlichen, ruhigen Sonnenoberfläche an, doch treten oft auch mehrere Flares verschiedener Stärke in denselben aktiven Gebieten auf, sodass eine vollständige Abkühlung nicht unbedingt stattfinden muss (Stix, 1989, S. 351).

Zwischen den Jahren 1996 und 2010 wurden 22.699 Sonneneruptionen detektiert, wovon 12.433 mit koronalen Massenauswürfen in Verbindung gebracht werden konnten (Youssef, 2012). Diese explosionsartigen Vorgänge, die durch ein Herausschleudern von Materie charakterisiert werden, stellen neben den Strahlungsausbrüchen der Flares eine weitere Bedrohung für die Erde dar.

Greift man dabei wieder auf die Vorstellung der verdrehten Flussröhren in Filamenten zurück, so wird sowohl Materie, die sich zwischen den neu verbundenen Flussröhren befand, als auch Plasma aus den darüber liegenden magnetischen Strukturen weggeschleudert (Engvold, 2015, S. 52 f.). Ein großer Teil des ausgestoßenen Materials entstammt den unteren Schichten der Korona und gelegentlich auch der Chromosphäre und umfasst eine durchschnittliche Masse von  $10^{16}$  kg pro Massenauswurf (Webb, 2015, S. 412 ff.). Unmittelbar nach einem solchen Ereignis, bei dem kinetische Energie im Bereich von  $10^{23}$  Joule frei wird, folgt auf die elektromagnetische Schockwelle eine magnetische Wolke der ausgestoßenen Teilchen, die sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu  $1800 \text{ km s}^{-1}$  auf die Erde zu bewegen können (Pröls, 2001, S. 445).

Erreichen nun Strahlung, Teilchen und magnetische Felder die Erde, wechselwirken diese mit dem erdeigenen Magnetfeld und der Atmosphäre. Im folgenden Kapitel werden die für diese Interaktionen relevanten Eigenschaften der Erde sowie die Auswirkungen solarer Eruptionen erläutert.



**Abbildung 2.8:** Aufnahme eines koronalen Massenauswurfs. Der weiße Kreis entspricht der Sonnenscheibe. Deutlich zu sehen ist die bogenförmige Struktur und die enorme Ausdehnung. Aufgenommen von dem SoHO Satelliten am 27.02.2000.

Quelle: SoHO, NASA, ESA, aktualisiert am: 31.07.2015, Zugang am 09.06.2017 über  
 → <https://www.nasa.gov/content/goddard/what-is-a-coronal-mass-ejection>

# Kapitel 3

## Wechselwirkungen mit der Erde und ihre Folgen

### 3.1 Auswirkungen der Sonne auf die Erde

**Welche Eigenschaften der Erde werden maßgeblich durch die Sonne beeinflusst? Welche Prozesse und Wechselwirkungen finden dabei statt?**

Die Erde gewährt einer Mannigfaltigkeit von Lebewesen jeden Tag Schutz vor äußeren Einflüssen, wie hochenergetischer Strahlung und Teilchen, die das uns bekannte Leben auf der Erde unmöglich machen würden.

Im Folgenden werden die erforderlichen Eigenschaften vorgestellt, wobei insbesondere auf die terrestrische Atmosphäre und das erdeigene Magnetfeld fokussiert werden soll. Des Weiteren wird erörtert, inwiefern diese mit solaren Einflüssen wechselwirken und welche Konsequenzen bei einer stark erhöhten Sonnenaktivität auftreten.

Das Magnetfeld der Erde bildet eine Art Schutzschild. Die Existenz eines Magnetfeldes auf der Erde ist bereits seit mehreren hundert Jahren bekannt, doch die Erklärung für dessen genauen Ursprung steht nach wie vor aus. Eine Hypothese nennt als Ursache einen Dynamoeffekt ähnlich wie bei der Sonne. Dieser basiert hier jedoch nicht wie bei der Sonne auf Plasmaströmungen, sondern auf Induktion im flüssigen Kern der Erde. Dieser sogenannte äußere Erdkern, der sich radial zwischen 2900 km und 5000 km im Bezug auf den Erdmittelpunkt erstreckt, besteht aus einem flüssigen Eisen-Nickel-Gemisch ([Lauterbach, 1975](#), S. 163).

Dieses erzeugt aufgrund der Bewegung von Ladungsträgern, verursacht von der Eigenrotation der Erde, Corioliskräfte und Konvektionsvorgängen, ein Magnetfeld, welches global annäherungsweise eine Form aufweist, als befände sich in dem Innern der Erde ein Stabmagnet oder ein Ringstrom ([Resnick and Halliday, 1994](#), S. 1112).

Das auf diese Weise erzeugte Feld besitzt in Abhängigkeit vom Ort der Messung auf der Erdoberfläche eine Stärke zwischen 0,24 und 0,66 Gauss ([NASA Space Science Data Coordinated Archive/Williams](#)). Dabei handelt es sich um das geomagnetische Hauptfeld, dessen Quelle im Erdinneren verortet wird und das zeitlich und großräumig als annähernd konstant

angesehen werden kann. Allerdings gibt es eine langfristige, geringe Variation über einige hundert bis tausend Jahre, die Säkularvariation genannt wird (Lauterbach, 1975, S. 180). Bei dieser Annahme handelt es sich allerdings nur um ein Modell, da das Erdmagnetfeld nicht nur zeitlich in kleineren Intervallen variabel ist, sondern auch dessen Erscheinungsbild einem ständigen Wandel unterworfen ist.

Entgegen der vorherrschenden Annahme liegen die geographischen und die magnetischen Pole nicht übereinander, sondern das Magnetfeld ist gegenüber der Rotationsachse geneigt und verschoben. Dies ergibt sich daraus, dass die magnetischen Pole im Laufe der Zeit mit einer Geschwindigkeit von acht Kilometern pro Jahr wandern. Der geomagnetische Nordpol, bei dem es sich eigentlich um einen magnetischen Südpol handelt, bewegt sich dabei über das nördliche Kanada.

Obwohl Abbildungen oft modellhaft das Erdmagnetfeld als perfekten Dipol zeigen, ist es keineswegs derart regelmäßig und zeitlich konstant. Anhand von Untersuchungsmethoden des Archäomagnetismus', in dessen Forschung Gesteinsschichten bezüglich der vorherrschenden Ausrichtung des magnetischen Moments analysiert werden, konnte festgestellt werden, dass sich das Erdmagnetfeld innerhalb der letzten vier Millionen Jahre mindestens neunmal umgepolt hat (Soffel, 1991, S. 19). Ebenso sind lokal begrenzte Variationen verursacht durch örtliche Erzvorkommen möglich sowie zeitliche Veränderungen der sogenannten Inklination, welche den Austrittswinkel der Magnetfeldlinien zu der Erdoberfläche in Abhängigkeit zum aktuellen Standort beschreibt (Resnick and Halliday, 1994, S. 1114).

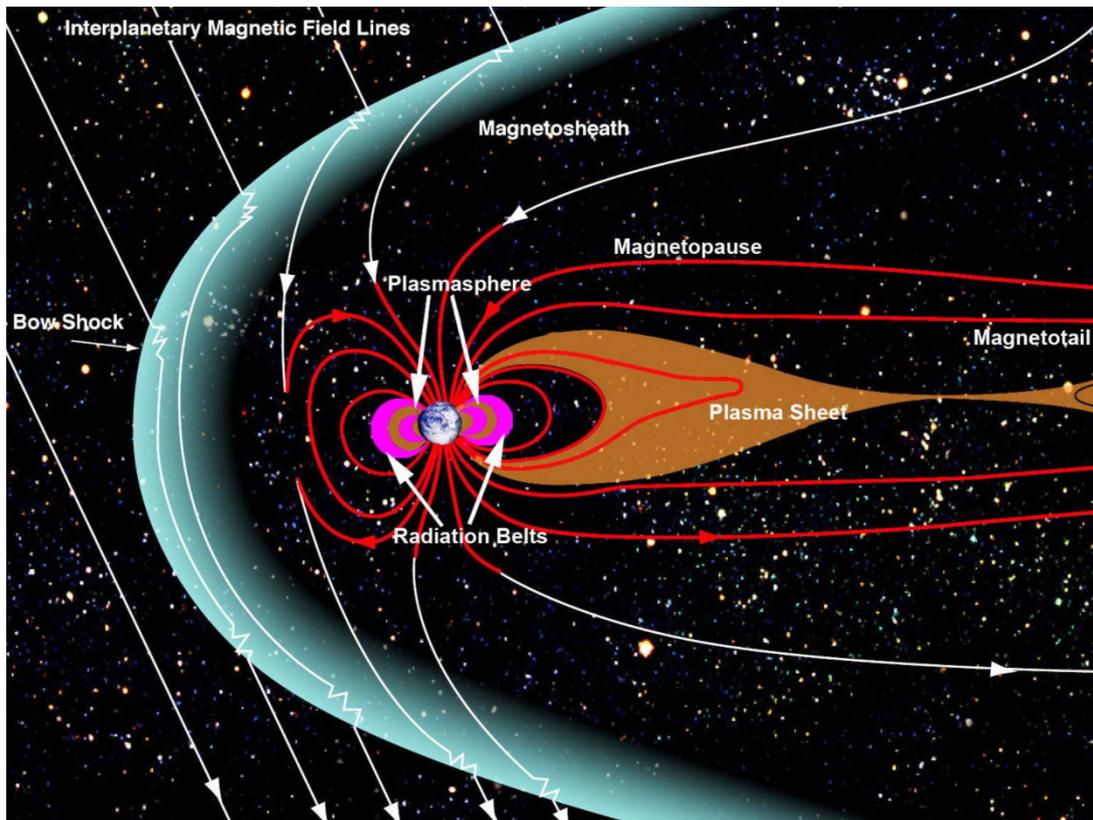
Eine weitere, beträchtliche Einflussgröße besteht in dem Einwirken der Sonne mittels Strahlung und Teilchen, zum Beispiel durch den Sonnenwind, der die Form und Eigenschaften des Erdmagnetfeldes maßgeblich beeinflusst. Dabei ist das globale Dipolfeld der Erde von der sogenannten Magnetosphäre abzugrenzen. Wie bereits zuvor beschrieben, ist es möglich, das geomagnetische Hauptfeld als weitestgehend stabil anzusehen. Im Kontrast dazu ist die Magnetosphäre zu nennen, die sich unter ständiger Wechselwirkung mit dem Einfluss kosmischer Phänomene, wie dem Sonnenwind, in einem Zustand des Wandels befindet und wie folgt charakterisiert wird:

„Als Magnetosphäre bezeichnet man das Gebiet des erdnahen Raumes, in dem die wesentlichen Prozesse hauptsächlich durch das erdmagnetische Feld bestimmt werden.“(Lauterbach, 1975, S. 51)

Die Gestalt der Magnetosphäre wird maßgeblich vom Sonnenwind beeinflusst. Auf der sonnenzugewandten Hemisphäre erstreckt sich die Magnetosphäre ungefähr zehn Erdradien in den Weltraum. Doch auf der abgewandten Seite der Erde wird sie wie ein Kometenschweif gestreckt, sodass ihre Ausdehnung über 200 Erdradien betragen kann (Parks, 2004, S. 9).

Die Grenze zwischen solarem Magnetfeld sowie dessen Wirkung und der Magnetosphäre wird als Magnetopause bezeichnet. Diese ist allerdings nicht als statisch anzusehen, sondern lokal und zeitlich variabel. Mit dem Sonnenwind als Quelle besteht dort ein Gleichgewicht zwischen dem magnetischen Druck der Magnetosphäre und dem kinetischen Druck der Teilchen des Sonnenwindes. Je nach Stärke des Sonnenwindes verschiebt sich die Magnetopause (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 69).

Modellhaft kann man sich diese Eigenschaft vorstellen wie bei einem prallen Luftballon, auf den von einer Seite eine Kraft wirkt. Der Ballon beult sich auf dieser Seite ein und die Luftballonhaut verschiebt sich. Erhöht man innerhalb des Ballons den Druck oder vermindert die wirkende Kraft, wird die Eindellung geringer und die Haut dehnt sich wieder etwas aus. In diesem Analogon



**Abbildung 3.1:** Darstellung der Magnetosphäre der Erde. Von der linken Seite kommt der Sonnenwind und staucht das Magnetfeld auf der der Sonne zugewandten Seite und zieht es auf der abgewandten wie einen Schweif auseinander. In rosa sind die van-Allen-Strahlungsgürtel dargestellt.

Quelle: NASA, Holly Zell, aktualisiert am: 31.07.2015, Zugang am 15.06.2017 über  
 → [https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/470173main\\_magnetosphere2\\_full.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/470173main_magnetosphere2_full.jpg)

entspricht das Innere des Ballons der Magnetosphäre, die äußere Kraft dem Sonnenwind und die Luftballonhaut der Magnetopause, die diese beiden voneinander abgrenzt.

Dies kann als erdeigener Schutzschirm angesehen werden, da ohne die Magnetosphäre sämtliche hochenergetischen Teilchen die Erdoberfläche erreichen und dort die Erde korrodieren und Lebewesen schädigen würden.

Treten geladene Teilchen in die Magnetosphäre ein, so wirkt auf sie die Lorentzkraft, die senkrecht zu dem vorherrschenden Magnetfeld steht. Daraus folgt eine spiralförmige Bahn, auf der sich die Teilchen in Abhängigkeit von ihrer Energie bewegen und verschieden tief in die Erdatmosphäre eindringen. Ein wichtiger Faktor dabei ist die sogenannte magnetische Steifigkeit, die beschreibt, inwiefern die Bahn von geladenen Teilchen von einem Magnetfeld beeinflusst werden kann. Dabei gilt, dass

$$R = B\rho = \frac{p}{q}, \quad (3.1)$$

wobei  $p = \gamma m_0 \beta c$  und  $\beta = \frac{v}{c}$  sowie  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  ist (Akasofu and Chapman, 1972, S. 40).

Ein Eindringen in die Erdatmosphäre und ein Annähern an die Erdoberfläche ist möglich, ab einem Grenzwert  $R_c$ , der definiert wird als:

$$R_c = \frac{C \cos^4 \lambda}{r^2}, \quad (3.2)$$

mit  $\lambda$  als magnetische Breite.

Daraus ergibt sich, dass dieser kritische Wert zwischen 0 und 14,5 GV liegt, wobei er am geringsten an den Polen und am größten am Äquator ist. Dementsprechend treten geladene Teilchen eher in höheren Breitengraden in die Erdatmosphäre ein, was man an dem vermehrten Auftreten von Polarlichtern beobachten kann (Klecker, 2009, S. 14).

Treten die Teilchen nicht in die Atmosphäre ein und wechselwirken mit der dortigen Materie, bewegen sie sich auf zyklischen Bahnen in der Magnetosphäre um die Erde. Diese ringförmigen Bahnen, in denen geladene Teilchen auf diese Weise gespeichert werden, werden als van-Allen-Strahlungsgürtel bezeichnet. Dabei lassen sich zwei Bereiche voneinander abgrenzen, wobei sich der innere Ring in einem Bereich von 8.000 bis 16.000 km und der äußere von 20.000 bis 50.000 km vom Erdmittelpunkt gesehen erstreckt (ebd., S. 15).

Im inneren Ring befinden sich zum größten Teil hochenergetische Protonen und im äußeren Elektronen sowie positive geladene Ionen. Aufgrund der jeweiligen Bewegungsrichtung der geladenen Teilchen ergibt sich ein dem Erdmagnetfeld entgegen gerichtetes Feld, das das Erdmagnetfeld verringert und dessen Strom als Ringstrom bezeichnet wird (ebd., S. 16).

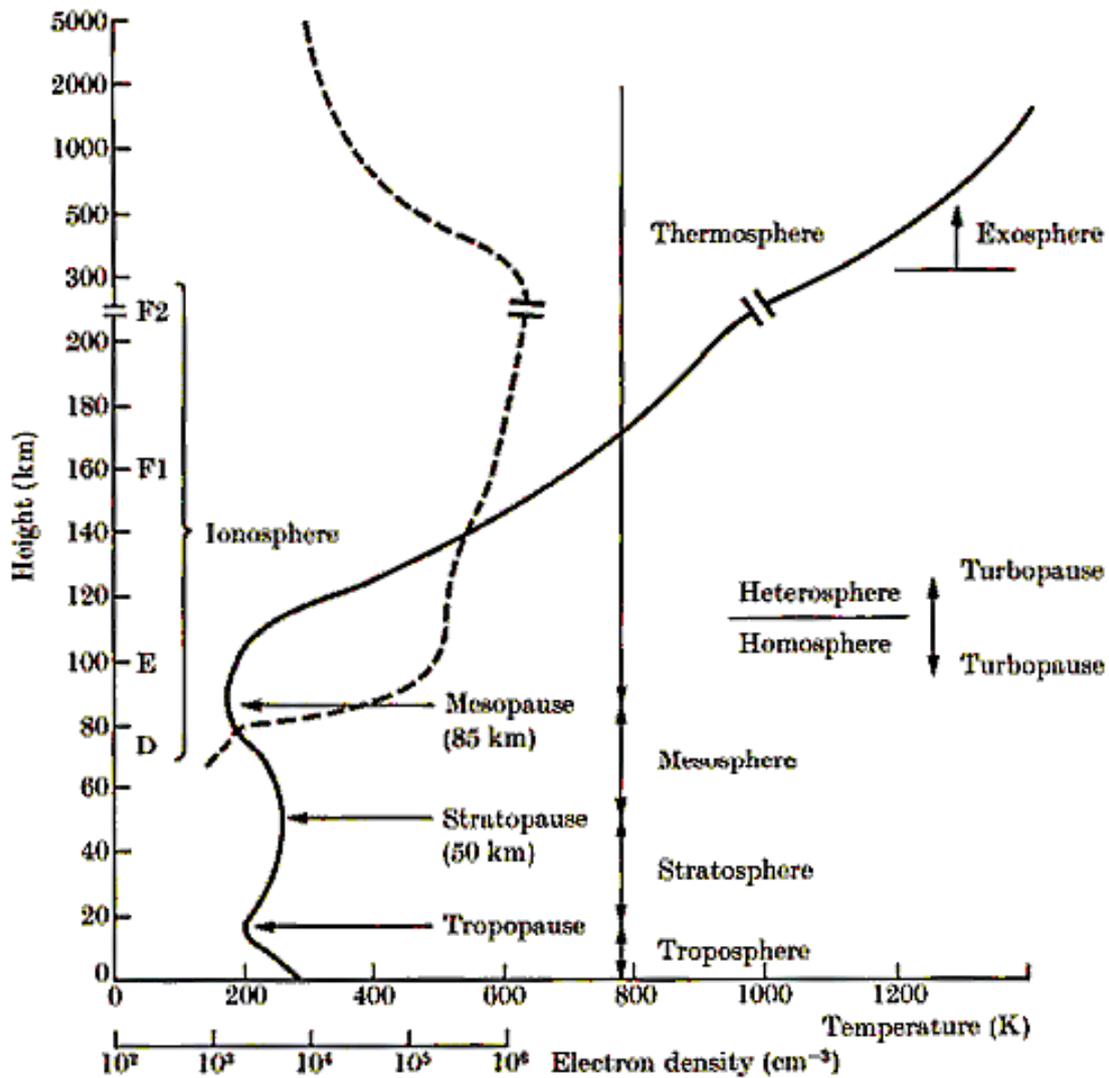
Solange sich die Sonne in einem ruhigen Zustand befindet, beeinflusst vor allem die Variation des Sonnenwindes die Form und Stärke der Ringströme. Ereignen sich allerdings die beschriebenen explosiven Phänomene, unterliegen die Magnetfelder und Strömungen massiven Veränderungen, deren Auswirkungen Mensch und Technik betreffen können.

Steigen die Strahlungsintensität und die Zahl der hochenergetischen Teilchen an, verstärkt sich der kinetische Druck durch die Schockwelle eines Extremereignisses um ein Vielfaches. Zwischen dem solaren Magnetfeld, das von Wolken solaren Materials zur Erde getragen wird, und dem Erdmagnetfeld finden ähnlich wie zuvor bei der Sonne beschriebene Rekonnexionen statt. Dabei verbinden sich komplexe Magnetfeldlinien beider Felder zu simpleren Strukturen, sodass magnetische Energie frei wird und das Erdmagnetfeld seine Gestalt ändert (Hanslmeier, 2009, S. 9).

Dieser erhöhte Druck durch den Sonnenwind führt dazu, dass sich die Magnetosphäre der sonnenzugewandten Seite stark komprimiert. Auf diese Weise gelangen deutlich größere Mengen geladener Teilchen in den van-Allen-Strahlungsgürtel, sodass dessen Strom rapide ansteigt. Aufgrund seiner dem Erdmagnetfeld entgegengesetzten Orientierung wird so das globale Magnetfeld massiv vermindert, sodass es kaum noch als Schutzschirm fungiert und hochenergetische Teilchen die unteren Atmosphärenschichten erreichen können. Diese enormen Störungen des Erdmagnetfeldes werden als geomagnetische Stürme bezeichnet, deren Auswirkungen im folgenden Unterkapitel erläutert werden.

Ein zweiter Schutz vor den Einflüssen der Sonne und anderen kosmischen Einwirkungen stellt die Atmosphäre der Erde dar. Im Folgenden werden der Aufbau und die Eigenschaften der sogenannten Hochatmosphäre thematisiert, da diese insbesondere mit solaren Teilchen wechselwirkt. Definiert wird die Hochatmosphäre als die Schichten oberhalb einer gedachten Grenze, die sich ca. 24 km über der Erdoberfläche und innerhalb der unteren Stratosphäre befindet. Als obere Grenze wird der Beginn der Magnetosphäre angesehen.

Von unten nach oben genannt sind die Schichten der Hochatmosphäre wie folgt angeordnet: Obere Stratosphäre (24–50 km), Stratopause, Mesosphäre (50–85 km), Mesopause, Thermosphäre (oberhalb von 90 km) und darüber die Exosphäre (Lauterbach, 1975, S. 80 ff.).



**Abbildung 3.2:** Darstellung der verschiedenen Schichten der Erdatmosphäre.

Quelle: „Solar-Terrestrial Physics: An Account of the Wave and Particle Radiations from the quiet and the active Sun, and of the consequent terrestrial Phenomena“ (Akasofu and Chapman, 1972, S. 111)

Bereits während der normalen Schwankungen innerhalb der Sonnenzyklen sind die Auswirkungen der Sonne insofern deutlich, als dass die Exosphärentemperatur zwischen dem Minimum und dem Maximum Temperaturschwankungen von 700 K erfahren kann.

Auch spielt die Atmosphäre eine wichtige Rolle bei der Absorption von kurzwelliger, elektromagnetischer Strahlung. Diese wird in dem Bereich unterhalb von  $2900 \text{ \AA}$  in der Hochatmosphäre mittels des Ozon-Sauerstoff-Zyklus absorbiert. Steigt allerdings die Intensität von ultravioletter und Röntgenstrahlung während eines Flares rapide an, finden Ionisationsprozesse in der sogenannten Ionosphäre statt. Diese beginnt in einer Höhe von ca. 80 km und besteht aus ionisiertem Gas, Elektronen und Ionen.

Die erhöhte Ionisationsrate während einer Eruption verursacht einen Anstieg der Elektronendichte in der D-Schicht (80–85 km) und verändert damit maßgeblich deren Eigenschaften, was gravierende Auswirkungen auf die Kommunikation mittels elektromagnetischer Wellen haben kann, die im folgenden Unterkapitel erläutert werden (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 63).

Ein sichtbarer Beweis für Stoß- und Anregungsvorgänge zwischen solaren Elektronen und Ionen und Partikeln in der Atmosphäre sind die in der Einleitung bereits beschriebenen Polarlichter. Diese treten in nördlichen Breiten als sogenannte Aurora borealis und auch in südlichen Breiten als Aurora australis auf. Dies geschieht, wenn geladenen Teilchen entlang der Feldlinien der vom Sonnenwind geformten Magnetosphäre in die Erdatmosphäre gelangen und dort mit Partikeln wechselwirken. Eine Anregung von molekularem Stickstoff ( $N_2$ ) führt zu bläulich-grünen Leuchterscheinungen, gelbe entstehen bei molekularem Sauerstoff ( $O_2$ ) und rote bei elementarem Sauerstoff (Bornarel and Liliensten, 2006, S. 85).

Ist das Erdmagnetfeld nach einer Sonneneruption stark gestaucht oder vermindert, können mehr geladene Teilchen in die Erdatmosphäre auch in niedrigeren Breiten eintreten, sodass sich in Zeiten hoher Sonnenaktivität deutlich vermehrt Polarlichter sogar bis in den Mittelmeerraum beobachten lassen.

Diese ästhetischen Erscheinungen werden bereits seit vielen hundert Jahren beobachtet und bewundert, doch sind die Auswirkungen von Sonneneruptionen in Zeiten von moderner Technologie und Raumfahrt weitaus gefährlicher und kostspieliger. Welche Gefahren für Mensch und Technik in Folge von explosiven Ereignissen auf der Sonne drohen, wird im folgenden Kapitel erläutert.

## 3.2 Folgen für Mensch und Technik

### **Wie wirken sich Ereignisse auf der Sonne auf Mensch und Technik aus (Satelliten, Astronauten/Piloten, Kommunikation, Kraftwerke und Stromleitungen)?**

Die Auswirkungen der Sonne sind für einen Nicht-Wissenschaftler kaum festzustellen und daher auch nicht so bekannt wie beispielsweise die Folgen von Erdbeben oder Tsunamis. Dies mag zum einen daran liegen, dass eine erhöhte Intensität von Teilchen und Strahlung nicht so unmittelbar erlebbar ist wie eine bebende Erde oder gefährliche Wellen. Zum anderen sind die technischen und biologischen Auswirkungen nicht offensichtlich auf Eruptionen der Sonne zurückzuführen.

Selbst einer der mächtigsten Menschen der Welt erlebte ein derartiges Ereignis zunächst ohne sein Wissen. Am 24. April 1984 brach plötzlich die Verbindung des hochfrequenten Radiotelefons ab, mit dem Ronald W. Reagan, der 40. Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika, von der Air Force One gerade mit Washington in Kontakt stand. Während der folgenden zwei Stunden ohne die Möglichkeit irgendeiner Verbindung zum Flugzeug wurden Vermutungen über einen feindlichen Angriff und andere Katastrophenszenarien angestellt (Zirker, 2002, S. 173).

Letztendlich stellte sich heraus, dass es zu einer gewaltigen Sonneneruption gekommen war, die zu einem Anstieg der Ionisationsrate und der Elektronendichte in der Ionosphäre geführt hatte. Dieses Phänomen ist als Ionosphärensturm bekannt. Unterscheiden muss man zwischen den sogenannten SID (sudden ionospheric disturbances), die von hochenergetischer, elektromagnetischer Strahlung nur wenige Minuten nach einem solaren Ausbruch verursacht werden, und Ionosphärenstürmen, deren Quelle von der Sonne ausgestoßene Protonen und Elektronen sind, die die Erde erst nach einigen Tagen erreichen (Odenwald, 2010, S. 26 f.).

Diese Störungen in der Ionosphäre verursachen zumeist einen Ausfall von kurzwelligen Kommunikationswegen, was als Møgel-Dellinger-Effekt bezeichnet wird ([Hanslmeier, 2009](#), S. 10). Die UKW-Kommunikation (Ultrakurzwellen-Kommunikation) beruht auf dem Prinzip der Totalreflexion unter flachem Winkel an der Ionosphäre. Verändert diese ihre Eigenschaften, wie beispielsweise den Grad der Ionisation und die Dichte, erfolgt keine oder nur noch eine stark verminderte Reflexion, sodass die Kommunikation mittels hochfrequenten, elektromagnetischen Wellen mehrere Tage lang unmöglich werden kann (ebd., S. 10 f.).

Eine besondere Relevanz hatten diese Störungen im 20. Jahrhundert, da ein großer Teil der nationalen und internationalen Kommunikation mittels UKW getätigt wurde. Zeugnis darüber geben Ausschnitte aus Zeitungen, wie der „New York Times“ vom 4. September 1943, die über eine Verzögerung der Landung alliierter Truppen in Italien aufgrund eines Kommunikationsausfalls berichtete ([Odenwald, 2010](#), S. 27).

Seit den 1950er Jahren nahm das Interesse an den Auswirkungen solarer Eruptionen aufgrund der einsetzenden Raumfahrt stark zu. Sind Objekte auf der Erdoberfläche und wenige Kilometer darüber noch durch die Erdatmosphäre geschützt, kreisen Satelliten oberhalb der dichten Luftschichten im Orbit, um so eine möglichst geringe Reibung, einen geringen Energiebedarf und lange Missionsdauern zu erreichen.

Zusätzlich zu Ionisationen finden in der Atmosphäre verursacht von elektromagnetischer Strahlung ebenfalls Dissoziation – das Aufbrechen von Molekülstrukturen in kleinere Untereinheiten – und Anregungen von Materie statt. In Folge dessen erhöht sich die Temperatur der Luftmassen und die Atmosphärenschichten dehnen sich aus ([Bornarel and Lilensten, 2006](#), S. 63).

Diese Expansion von zum Teil mehreren hundert Kilometern führt zu vermehrten und ungeplanten Wiedereintritten von Satelliten und dementsprechenden Kontrollverlusten und Sachschäden. Vergleicht man die Maxima der solaren Aktivität im Verlauf der Sonnenzyklen, so kann man eine deutliche Korrelation zwischen Zeiten vermehrter Eruptionen und dem Verlust eines stabilen Orbits sowie Wiedereintritten von Satelliten feststellen ([Odenwald, 2010](#), S. 28 f.).

Doch selbst wenn rechtzeitig bei den Satelliten eine Kurskorrektur vorgenommen werden kann, entstehen noch weitere Gefahren für sie, wenn die natürlichen Schutzschilde der Erde von den solaren Einflüssen geschwächt werden. Sowohl eine Abnahme des Erdmagnetfeldes als auch eine massive Stauchung der Magnetosphäre auf einen Abstand von weniger als einen Erdradius auf der sonnenzugewandten Hemisphäre führen dazu, dass Satelliten einer großen Intensität von hochenergetischen Teilchen und Strahlung ausgesetzt sind.

Die so entstehenden Störungen lassen sich je nach Art der Beeinflussung kategorisieren. Einerseits können erhöhte Strahlungsintensitäten das Material von Satelliten und deren elektronische Systeme schädigen. Andererseits treten vermehrt sogenannte Single Event Upset (SEU) Effekte auf, bei denen innerhalb des Satellitenprozessors aufgrund von Ionisation oder hochenergetischen Teilchen der Binärcode um nur wenige Vertauschungen von 0 und 1 verändert wird, was beispielsweise bei dem NASA Satelliten TDRS-1 zu einem schwerwiegenden und teuren Defekt an der Höhenkontrolle führte ([Bornarel and Lilensten, 2006](#), S. 104 f.).

Zusätzlich werden Messungen und Bildaufnahmen maßgeblich gestört, da solare Partikel bei den Satellitendetektoren zu einem erheblichen Rauschen beitragen. Ein zusätzliches Problem entsteht aufgrund von Interferenzen mit solarer, elektromagnetischer Strahlung, die die Kommunikation zwischen den Steuerungszentralen auf der Erdoberfläche und den Satelliten beeinträchtigt, sodass

bei anderen Störungen mit fatalen Folgen eine angemessene Reaktion nicht mehr möglich ist (Baker *et al.*, 2004, S. 7 f.).

Tritt der schlimmste Fall ein und der funktionsunfähige Satellit ist verloren, stellen die hohen finanziellen Verluste von mehreren Millionen Euro nicht das größte Problem dar. Jeder ausfallende Satellit, der nicht kontrolliert zum Absturz gebracht werden kann, vergrößert die Menge an Weltraumschrott, der mittlerweile bereits 94 % der künstlichen Objekte im erdnahen Weltraum einnimmt. Dabei sind 22 % ausgediente Satelliten, 17 % ausgebrannte Raketenstufen und 55 % kleine Fragmente, was zusammen eine Masse von über zwei Millionen Kilogramm ergibt. Zusammenstöße von Satelliten und bemannten Raumfahrzeugen mit einem 100 g leichten Stück Schrott können kinetische Energien über  $3 \times 10^9$  J erreichen, welche massive Schäden verursachen können.

Aus diesem Grund werden derzeit ungefähr 8.500 der etwas größeren Objekte beobachtet, doch während einer besonders starken Eruption verlor das Überwachungszentrum North American Aerospace Defense Command (NORAD) die Positionen von 1.300 Teilen, sodass Zusammenstöße ohne Warnungen geschehen konnten. Trotz frühzeitiger Alarmierung der Kontrollzentren von Satelliten und anderen Raumfahrzeugen, wenn dies denn möglich ist, ist der Aufwand von komplizierten Ausweichmanövern immens. So verbrauchte ein französischer Satellit bei einer Korrektur der eigenen Bahn 400 g Treibstoff, der den Satelliten noch für mehr als drei Jahre länger in der Umlaufbahn gehalten hätte (Bornarel and Lilensten, 2006, S. 111 ff.).



**Abbildung 3.3:** Darstellung des um die Erde kreisenden Weltraumschrotts. Die Fragmente sind zur Veranschaulichung vergrößert dargestellt.

Quelle: ESA, Zugang am 18.06.2017 über

→ [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2008/03/Trackable\\_objects\\_in\\_orbit\\_around\\_Earth](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2008/03/Trackable_objects_in_orbit_around_Earth)

Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit Weltraumschrott beträgt momentan zwar nur 1 zu 10.000, doch steigt diese mit der wachsenden Anzahl ausfallender Satelliten exponentiell an. Ein weit größeres Problem für die bemannte Raumfahrt besteht in der erhöhten ionisierenden Strahlungsbelastung.

Als Maß für die Strahlendosis wird das Sievert verwendet. Eine Dosis von über zwei Sievert ist tödlich, wobei man geschützt von den Schutzschirmen der Erde über das gesamte Jahr lediglich durchschnittlich 2,4 mSv ausgesetzt ist. Astronauten hingegen exponieren sich zum Teil bis zu 500 mSv pro Jahr, wobei während einer einzelnen Sonneneruption die Dosis bereits mehrere Hundert Sievert betragen kann.

Insbesondere Arbeiten außerhalb der Weltraumstation oder des Shuttles und erdfernere Missionen bergen Gefahren. So stieg die Strahlendosis auf der Mondoberfläche während eines explosiven Ereignisses auf bis zu 7 Sv, was zum Tode geführt hätte (ebd., S. 114 f. und [Guetersloh and Zapp, 2010](#), S. 366). Die für die Zukunft geplanten Reisen zu entfernten Objekten wie dem Mars sind zu diesem Zeitpunkt körperlich für die Astronauten noch zu gefährlich, da sie eine zu hohe Strahlendosis über eine derart lange Zeit ohne die schützenden Eigenschaften der Erde erhielten. Einrichtungen wie das NASA Space Radiation Shielding Programm forschen derzeit nach Methoden, wie dem Erzeugen eines starken, schützenden Magnetfeldes in den Rahmfahrzeugen, um derartige Reisen künftig zu ermöglichen ([Parker, 2005](#), S. 7 ff.).

Doch nicht nur der kleine Kreis von Menschen, die in das All fliegen, ist von den Auswirkungen von Sonneneruptionen betroffen, sondern auch die Technik der Menschen auf der Erde.

Ein wenig bekannter Bereich ist die vermehrte Korrosion von Rohrleitungssystemen. Dies bedeutet, dass Erdöl führende Pipelines, die aus Metalllegierungen bestehen, einem ständigen Prozess der Oxidation ausgesetzt sind. Rosten diese durch, können Lecks und somit katastrophale Folgen für die Umwelt entstehen. Präventiv wird daher an eine Ummantelung der Pipelines eine leicht negative Spannung im Vergleich zum Erdboden angelegt. Während eines geomagnetischen Sturms können allerdings elektrische Ströme in den Boden induziert werden, sodass die Potentialdifferenz aufgehoben wird und eine verstärkte Korrosion auftritt, was teure Ausbesserungsarbeiten nötig macht ([Bornarel and Lilensten, 2006](#), S. 93 f.).

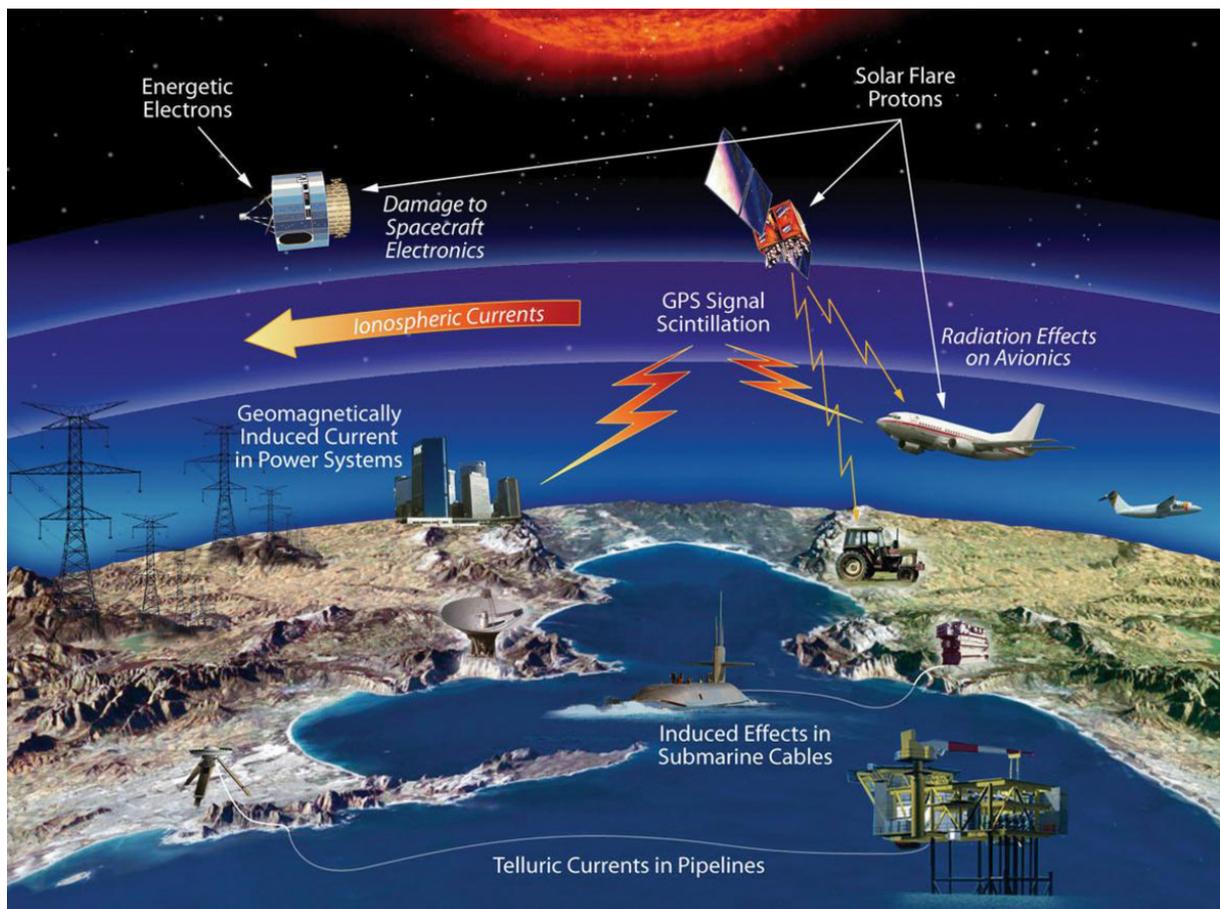
Wenn die Bevölkerung neben der Sichtung von Polarlichtern andere Folgen solarer Explosionen erlebt hat, dann handelte es sich dabei wohl am ehesten um Probleme mit der Stromversorgung. Verändert sich das Erdmagnetfeld während einer Sonneneruption rapide, werden in elektrischen Leitern Ströme induziert. Vor allem Hochspannungsleitungen sind davon betroffen. Diese Beeinträchtigungen wurden bereits mit der Erfindung des elektrischen Telegraphen bemerkt und gewannen an Relevanz aufgrund der wachsenden Infrastruktur und Komplexität der Stromversorgungssysteme ([Kappenmann, 2004](#), S. 10).

Während eines geomagnetischen Sturmes werden langsam alternierende Ströme induziert, die über die Hochspannungsleitungen zu Transformatoren gelangen. Bereits geringe Veränderungen der Spannung verursachen eine massive Temperaturerhöhung in diesen, wobei im Jahr 1992 im Verlauf eines magnetischen Sturms ein Anstieg von 115 K in einem Transformator festgestellt wurde. Als Folge dieser Überhitzung können Elemente in den Transformatoren schmelzen und so gesamte Umspannwerke funktionsunfähig werden. Es ist möglich, dass kaskadenförmig ein riesiger Teil des Netzwerkes ausfällt, sodass mehrere Millionen Haushalte über Stunden ohne Strom sind, wozu es im Jahre 1989 in Kanada auch kam ([Bornarel and Lilensten, 2006](#), S. 94 ff.).

Weitere Auswirkungen wurden im Bereich von Eisenbahnen festgestellt, wobei es sich zumeist um Stromausfälle und Signalstörungen handelte. Außerdem beeinträchtigen Sonneneruptionen maßgeblich die Telekommunikation, wobei Störungen über fast die gesamte Bandbreite beobachtet werden können.

Wie bereits zuvor erläutert sind insbesondere Satelliten von den Folgen explosiver Ereignisse auf der Sonne betroffen, wobei vor allem das Globale Positionsbestimmungssystem (GPS) anfällig für Defekte ist. Als Folge schwerer geomagnetischer Stürme und Veränderungen in der Erdatmosphäre können Positionsbestimmungen um mehrere Meter bis Kilometer abweichen. Bedroht von diesen Fehlkalkulationen sind hauptsächlich Schiffe und Flugzeuge. Um mögliche Unfälle zu vermeiden, werden daher von den GPS-Satelliten oft zwei verschiedene Frequenzen abgestrahlt, die unabhängig voneinander verarbeitet werden und so weniger fehleranfällig sind, was allerdings mit hohen Kosten verbunden ist (ebd., S. 97 ff.).

Weitere Beeinträchtigungen bestehen im Bereich der Raketenstarts, wobei die größten Gefahren von Ausfällen der Elektronik im Bereich der Treibstoffverbrennung und -lagerung sowie der Kommunikation zwischen Astronauten und Bodenstationen bestehen.



**Abbildung 3.4:** Darstellung der Auswirkungen auf einige technische Systeme.

Quelle: NASA, Zugang am 18.06.2017 über

→ <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/faq13.jpg>

Viele der schon besprochenen Auswirkungen solarer Ereignisse betreffen hochmoderne Technologien und haben dementsprechend immense Kosten zur Folge. Ein Bericht mit dem Titel „Severe space weather events – Understanding societal and economic impact: A workshop report“ verfasst von dem „Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events“, schätzt den finanziellen Schaden eines schweren geomagnetischen Sturms im Worst Case auf ein bis zwei Billionen Dollar, was vergleichbar mit dem Brutto Sozialprodukt für ein Jahr eines industrialisierten Landes ist. Dabei würden alle Reparaturen und die vollständige Wiederinstandsetzung zwischen vier und zehn Jahren dauern ([National Research Council, 2008](#)). Allein die Instandsetzung eines Telekommunikationssatelliten wie die des kanadischen Anik E2 kostete 50 bis 70 Millionen Dollar ([Baker, 2009](#), S. 4).

Betrachtet man also sämtliche Folgen solarer Einflüsse, sind die potentiellen finanziellen, sachlichen, technologischen und sozialen Schäden offensichtlich. Doch insbesondere mit Blick auf die Zukunft, die eine immense Weiterentwicklung von Technologien und Raumfahrt mit sich bringen wird, wird die Notwendigkeit deutlich, Ressourcen zu mobilisieren, um negative Auswirkungen zu minimieren. Dies ist nur möglich, wenn die Forschung bezüglich des Weltraumwetters intensiviert wird, sodass ein besseres Verständnis der Vorgänge auf der Sonne und der Wechselwirkungen mit der Erde erlangt werden kann.

Im folgenden Kapitel wird zunächst erläutert, welche genaue Definition dem Begriff des Weltraumwetters zugrunde liegt. Anschließend wird thematisiert, aus welchen Gründen eine Vorhersage des Weltraumwetters nötig ist und was diese leisten muss. Danach wird ein Überblick der Entwicklungen im Bereich der Weltraumwettervorhersage und Erforschung gewährt sowie einige Institutionen konkreter vorgestellt.



# Kapitel 4

## Weltraumwetter und dessen Vorhersage

### 4.1 Die Geschichte der Beobachtung des Weltraumwetters

**Ab welcher Zeit erkannten Menschen Zusammenhänge zwischen Ereignissen auf der Sonne und auf der Erde?**

**Wie wird der Begriff des Weltraumwetters definiert?**

Beobachtungen der Sonne und damit korrelierenden Ereignissen lassen sich über 3000 Jahre zurückverfolgen. Die ältesten Aufzeichnungen stammen aus der Stadt Ugarit, die im jetzigen Syrien in der Bronzezeit ein kulturelles Zentrum war, und dokumentieren Sonnenfinsternisse. In besonderem Maße zeichnete sich knapp 800 Jahre später die babylonische Wissenschaftskultur durch ihre ausführlichen, quantitativen Arbeiten und Berechnungen über die Bewegung von Himmelskörpern und weiteren astrophysikalischen Phänomenen aus.

Doch erst mit der Erfindung des Beobachtungsinstrumentes Teleskop im frühen 17. Jahrhundert erlebte die Sonnenforschung einen enormen Aufschwung. So wurden Entdeckungen wie der Sonnenzyklus und dessen Verbindung mit geomagnetischen Phänomenen Mitte des 19. Jahrhunderts und explosive Ereignisse auf der Sonne während Sonnenfinsternissen nur wenige Jahre später ermöglicht ([Kumar, 2006](#)).

Diese präzisere Erforschung sowohl der Sonne als auch der Erde offenbarten eine starke Verbindung zwischen solaren und terrestrischen Erscheinungen. Auch die fortschreitende Technologisierung mit zuletzt der bemannten und unbemannten Raumfahrt und deren modernen Beobachtungsinstrumenten verdeutlichten die Relevanz vom Weltraumwetter für Mensch und Technik.

Obwohl die Verbindung zwischen Sonne und Erde also schon lange bekannt war, beschränkte sich das Interesse zumeist auf die wissenschaftliche Grundlagenforschung. Dies sollte sich im Jahr 1997 drastisch ändern und die Geschehnisse in dieser Zeit sollten der Forschung im Bereich des Weltraumwetters einen enormen Aufschwung bescheren.

Am 6. Januar 1997 ereignete sich auf der Sonne ein koronaler Massenauswurf, der von der Raumsonde SoHO (Solar and Heliospheric Observatory) detektiert wurde und direkt auf die Erde gerichtet war. Das wissenschaftliche Interesse weltweit war enorm und sämtliche verfügbaren Messinstrumente wurden in Bereitschaft versetzt. So interessant die gewonnenen Daten auch

waren, die bemerkenswerte Einblicke in die physikalischen Eigenschaften koronaler Massenauswürfe ermöglichten, zeigten sich viele Wissenschaftler erstaunt und besorgt, dass sie dieses extreme Ereignis nicht vorhersagen konnten.

Aufnahmen der Sonne von den vorherigen Tagen zeigten keine außergewöhnliche Aktivität, sodass keinerlei Warnung erfolgen konnte. Trotzdem wurden die Folgen in den darauffolgenden Tagen deutlich. Der von dem Massenauswurf verursachte geomagnetische Sturm führte am 11.01. zu einem Ausfall des Kommunikationssatelliten TELSTAR-401. Trotz mehrerer Versuche den Kontakt wieder herzustellen, gehört der Satellit, der die Übertragung großer amerikanischer Fernsehsender wie ABC, Fox und PBS gewährleistete, mittlerweile zum Weltraumschrott und erzeugte einen Schaden von ca. 200 Millionen Dollar ([Bornarel and Lilensten, 2006](#), S. 121 ff.).

Diese Hilflosigkeit, sowohl keine Vorhersage eines derartigen Ereignisses treffen zu können als auch trotz Kenntnis über mögliche Turbulenzen einen wichtigen Kommunikationssatelliten zu verlieren, verdeutlichte ein Defizit im Bereich der Vorhersage des Weltraumwetters und mangelnde Schutzmöglichkeiten. Des Weiteren erlangten die Auswirkungen eines Phänomens des Weltraumwetters erstmalig auch größeres öffentliches Interesse, sodass in vielen Zeitschriften und Nachrichtensendungen darüber berichtet wurde.

Doch nicht nur die allgemeine Neugier wurde geweckt, sondern viele Industriezweige wie Telekommunikation und Stromversorgung erkannten die Notwendigkeit, sich mit dem Weltraumwetter zu beschäftigen, um immense Schäden finanzieller und materieller Art zu vermeiden. Dementsprechend befanden sich Wissenschaftler plötzlich in der Situation, dass physikalische Erkenntnisse nicht mehr nur der Forschung dienen sollten, sondern auch für fachliche Laien von hoher Bedeutung waren.

Vor welchen Herausforderungen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Bereich des Weltraumwetters stehen, lässt sich anhand einer Definition des Begriffs Weltraumwetter zeigen:

„Unter dem Begriff des Weltraumwetters versteht man Zustände auf der Sonne, im Sonnenwind und in der Erdmagnetosphäre, die boden- und weltraumgestützte technische Systeme beeinträchtigen sowie menschliches Leben und Gesundheit gefährden können.“ ([Bothmer and Jakowsky, 2007](#))

Diese Definition beinhaltet die drei wesentlichen Gegenstände der heutigen Forschung. Hierbei handelt es sich zum einen um die Erforschung der Sonne. Dies soll das Verständnis solarer Vorgänge vertiefen und bisher unverstandene Strukturen erklären. Zum anderen ist es nötig, die Eigenschaften der Erde wie die Zusammensetzung der Hochatmosphäre und deren Besonderheiten besser zu verstehen sowie die Ursache und das Verhalten des Erdmagnetfeldes zu ergründen. Aus der Summe dieser Erkenntnisse ergibt sich das dritte Themenfeld der Wechselwirkungen zwischen Sonne und Erde, welche für die Auswirkungen auf Mensch und Technik verantwortlich ist.

Diese zentralen Forschungsgebiete offenbaren allerdings die aktuellen Probleme und Defizite, die ebenso wie 1997 auch zwanzig Jahre später noch dem Verständnis von Weltraumwetter im Wege stehen. Außerdem ist eine vollständige physikalische Kenntnis über das Weltraumwetter zwar Voraussetzung, um mögliche Gefahren zu erkennen, doch bildet dies lediglich eine Basis für die Entwicklung von Schutzmaßnahmen vor den Auswirkungen für Mensch und Technik.

Zusammenfassend muss die Forschung bezüglich solarer und terrestrischer Phänomene intensiviert werden, eine zuverlässige Weltraumwettervorhersage gewährleisten, wobei es in diesem

Bereich insbesondere in den letzten Jahren enorme Fortschritte gegeben hat, und schützende Vorkehrungen treffen. Welche Errungenschaften in dem Bereich der Vorhersage von Weltraumwetter bereits erlangt wurden, auf welche Weise Vorhersagen getroffen werden und wie Vorhersagen in den Betrieb technischer Systeme Eingang finden, wird im folgenden Unterkapitel erläutert.

## 4.2 Vorhersage von Weltraumwetter und das Space Weather Prediction Center

**Welche Institutionen gibt es im Bereich der Weltraumwettervorhersage?  
Welche Aufgaben und Ziele haben diese?**

Die Vorhersage des Weltraumwetters ist schwerlich mit irgendeiner anderen Art von Frühwarnsystemen vergleichbar. Da die meisten Daten mittels Satelliten aufgenommen werden, handelt es sich um einen der teuersten Zweige der Wettervorhersage. Hinzu kommen die Defizite im Wissen über die physikalischen Grundlagen, die großen Ungenauigkeiten bei der Vorhersage und die vergleichsweise schwerwiegenden Folgen.

Trotz aller Widrigkeiten sind auch Warnungen, die nur wenige Stunden vor den schädigenden Auswirkungen herausgegeben werden, überaus wichtig und können Verluste von vielen Millionen Dollar verhindern.

Zu den bedeutendsten Institutionen, die die wichtigsten Informationen sammeln, auswerten und Vorhersagen treffen, gehören unter anderem die Space Weather Services des Australian Bureau of Meteorology ([http://www.sws.bom.gov.au/Space\\_Weather](http://www.sws.bom.gov.au/Space_Weather)), das schwedische Space Weather Center (<http://src.irf.se/en>), das Space Situational Awareness-Space Weather Service Network der ESA (<http://swe.ssa.esa.int/>) sowie das Space Weather Prediction Center (SWPC) der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in den Vereinigten Staaten von Amerika (<http://www.swpc.noaa.gov/>) (Hanslmeier, 2009, S. 11).

Das Letztgenannte soll im Rahmen dieser Arbeit eingehender betrachtet werden. Die wissenschaftlichen Wurzeln des SWPC reichen bis in das neunzehnte Jahrhundert und begannen mit der Sammlung terrestrischer Wetterdaten. Doch erst in den letzten zehn Jahren wurde die Spezialisierung auf das Weltraumwetter gefestigt und die Finanzierung aufgrund der steigenden Relevanz gesichert.

Dabei werden folgende Richtlinien und Ziele verfolgt:

*„To provide space weather products and services that meet the evolving needs of the Nation.“*

„[Aufgabe ist,] Produkte und Services bezüglich Weltraumwetter zur Verfügung zu stellen, um so den stetig wachsenden Bedarf der Nation zu bedienen.“

*„A Nation prepared to mitigate the effects of space weather through the understanding and use of actionable alerts, forecasts, and data products.“*

[Ziel ist] eine Nation, die vorbereitet ist, die negativen Auswirkungen des Weltraumwetters mittels des Verständnisses [der Vorgänge] und des Gebrauchs funktionsfähiger Frühwarnsysteme, Vorhersagen und verwertbarer Daten zu mindern.“(Review 2009)

Das SWPC befindet sich in Boulder, Colorado aus und ist rund um die Uhr besetzt. Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem Verteidigungsministerium der Vereinigten Staaten, doch ist das SWPC für den zivilen Sektor verantwortlich, da für das Militär eine Sonderstelle der U.S. Air Force ihren eigenen Zuständigkeitsbereich hat.

Aufgabe des SWPC ist es, Vorhersagen über das Auftreten, die Dauer und potentielle Wechselwirkungen und Gefährdungen durch das Weltraumwetter für Mensch und Technik zu treffen und diese der Öffentlichkeit sowie der Industrie aufbereitet zur Verfügung zu stellen.

Zu diesem Zweck verwendet das SWPC verschiedene Instrumente sowohl am Boden als auch im Bereich der Raumfahrt. Dazu gehört unter anderem ein Magnetometer in Boulder, das das geomagnetische Feld und dessen Schwankungen detektiert. Des Weiteren erhält das SWPC Daten von den GOES-Satelliten (Geostationary Operational Environmental Satellite). Bei diesen handelt es sich um eine Serie von insgesamt sechzehn geostationären Satelliten, von denen derzeit vier aktiv an der Wettervorhersage beteiligt sind.

Zusätzlich werden Daten verarbeitet, die von dem LASCO-Instrument (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) aufgenommen werden. Dieses befindet sich an Bord des Sonnen- und Heliosphären-Observatoriums SoHO, welches unter Zusammenarbeit der NASA und ESA 1995 gestartet wurde.

Der LASCO-Koronograph sammelt Daten und ermittelt Veränderungen in der Korona, wobei die Sonnenscheibe selbst künstlich, wie bei einer Sonnenfinsternis, abgedunkelt wird. Auf diese Weise detektiert LASCO einen Bereich von 1,1 bis 32 Sonnenradien, wobei die Abschirmung der direkten Strahlung der Sonnenscheibe eine bessere Empfindlichkeit ermöglicht, da die Korona im Vergleich zu der Sonnenscheibe schwach strahlt (siehe <http://www.swpc.noaa.gov/products/lasco-coronagraph>).

Die auf diese Weise gewonnenen Daten werden von Mitarbeitern des SWPC nach einem Klassifizierungssystem, welches im Kapitel 7.2 näher erläutert wird, ausgewertet, eingestuft und veröffentlicht.

Zum breiten Spektrum von Vorhersagen und Warnungen gehören unter anderen eine 27-Tage-Aussicht für drei der wichtigsten Größen in Bezug auf Weltraumwetter – dem solaren Fluss im Bereich der Wellenlänge 10,7 nm und zwei Indizes A und K, wobei diese das Erdmagnetfeld beschreiben und einen geomagnetische Sturm anzeigen können. Des Weiteren stellt das SWPC eine ständig aktualisierte 3-Tages-Vorhersage zur Verfügung sowie eine Interpretation der Daten. Ebenfalls wird die Anzahl der Sonnenflecken prognostiziert und die Entwicklung des Sonnenzyklus dargestellt. Doch nicht nur Vorhersagen werden getroffen, sondern auch vergangene Daten und Ereignisse werden aufgearbeitet, klassifiziert und in Archiven gespeichert (für diese und weitere Information siehe <http://www.swpc.noaa.gov/>).

Insbesondere ist bemerkenswert, dass das SWPC deutliche Bemühungen zeigt, die Ergebnisse ihrer Arbeit auch der breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Dies zeigt sich hauptsächlich daran, dass zu den meisten Vorhersagen nicht nur Datensätze und Diagramme, sondern auch Beschreibungen und klassifizierte Warnungen, deren Systematisierung ebenfalls erläutert wird, veröffentlicht werden.

Verwendet werden die Vorhersagen und Warnungen von verschiedensten Institutionen. Dazu gehören sowohl private Nutzer als auch Firmen in der Industrie und andere Regierungsbehörden. Grundlegend kann man insbesondere Kunden des SWPC in den Bereichen Luftfahrt, bemannte und unbemannte Raumfahrt, Satellitenbetrieb und -wartung, Radiokommunikation sowie Navigation mittels GPS finden.

Für die hier verwendeten und weiteren Informationen beachte man den Informationsflyer des SWPC ([Flyer SWPC](#)), sowie das Community Review of the NCEP (National Centers for Environmental Prediction) SWPC aus dem Jahr 2009 ([Review 2009](#)). Zugang zu aktuellen Daten, einem Datenarchiv und weiteren Informationen zu verschiedenen Phänomenen des Weltraumwetters erhält man über die Website der National Oceanic and Atmospheric Administration ([NOAA, http://www.swpc.noaa.gov/](#)).



# Kapitel 5

## Astrophysik in der Schule

**Welchen Stellenwert nimmt Astrophysik in der Schule ein?**

**Welche Anreize/Vorteile bieten Themen der Astrophysik für den Schulunterricht?**

Eine der wichtigsten Aufgaben einer Physiklehrkraft besteht darin, den Physikunterricht attraktiver und aktueller zu gestalten. Ein wesentlicher Ansatzpunkt ist dabei die Gestaltung eines interessanten und motivierenden Unterrichts. Die Notwendigkeit dafür wird anhand des geringen Interesses von Seiten der Schülerinnen und Schüler offensichtlich.

Die ersten PISA-Studien, die die mathematischen und naturwissenschaftlichen Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler untersuchten, konfrontierten Deutschland 2000 und 2003 mit unterdurchschnittlichen Leistungen der Schülerinnen und Schüler im Vergleich zu anderen Ländern. Doch bereits die Studie in 2006 zeigte eine deutliche Verbesserung und erreichte zum ersten Mal ein Ergebnis über dem Durchschnitt. Dieser Aufwärtstrend manifestierte sich auch in den darauffolgenden Jahren 2009 und 2012 (Prenzel *et al.*, S. 209 ff.).

Obwohl nun laut der PISA-Studien die naturwissenschaftlichen Leistungen der Schülerinnen und Schüler in Deutschland innerhalb der letzten 12 Jahre signifikant verbessert worden sind, gilt Physik trotz alledem als eines der unbeliebtesten Fächer.

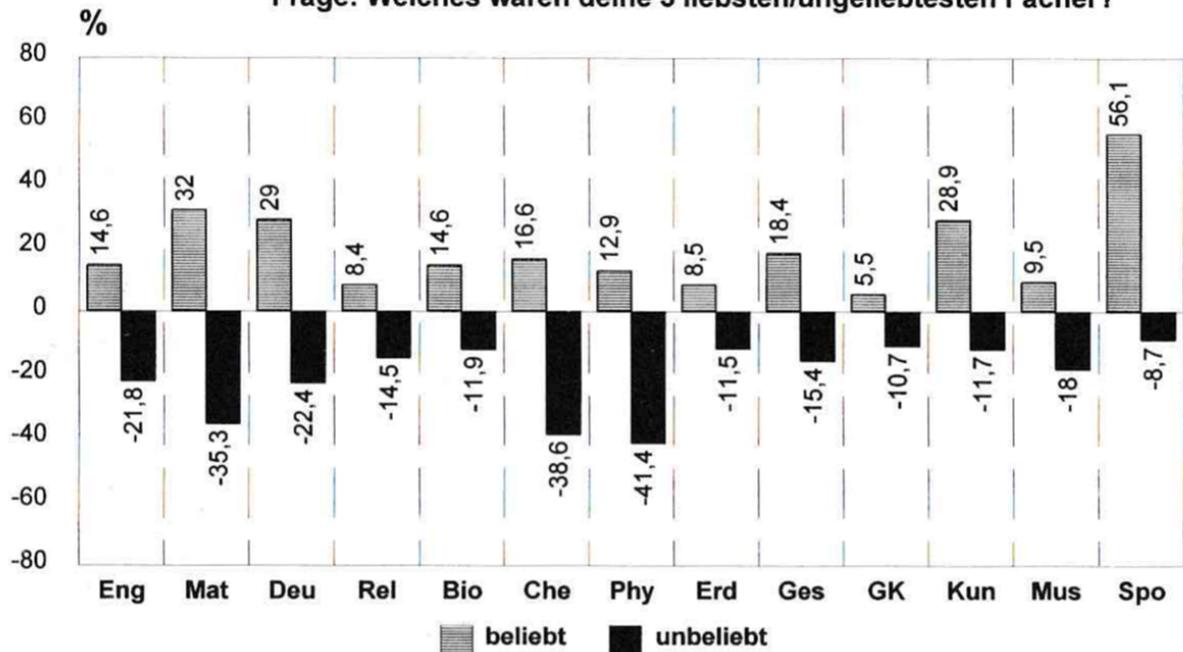
Dies zeigte auch eine Erhebung im Rahmen von Examensarbeiten von Greck (1991) und Bäuerle (1994). Die Untersuchung erfolgte bei 751 Schülerinnen und Schülern, von denen 41,4% Physik als unbeliebtes Fach angaben (siehe Abbildung 5.1). Allerdings ist anzumerken, dass dem Physikunterricht mit einer starken Meinung begegnet wird, da 54,3 % der Schülerinnen und Schüler Physik entweder als beliebtes oder unbeliebtes Fach nannten. Somit wurde Physik im Vergleich zu anderen Nebenfächern (z.B. Biologie, Erdkunde oder Geschichte) vergleichsweise häufig genannt (Muckenfuß, 1995, S. 76).

Eine Steigerung gelingt gemäß der Kieler IPN-Interessenstudie (Hoffmann, Häußler, and Lehrke, 1998, S. 31 ff.), indem praktische Themen in den Unterrichtsalltag integriert werden. Die Erhebung zeigt, dass insbesondere Gebiete mit einem theoretischen Schwerpunkt wie quantitative Berechnungen ohne praktischen Bezug eher geringes Interesse erzeugen. Signifikant motivierender sind hingegen Bereiche, die eine Rolle in der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler spielen sowie einen praktischen und realitätsnahen Bezug aufweisen. Beispiele dafür nach der genannten Untersuchung sind Themen aus der Medizin und Technik sowie die Erörterung gesellschaftsrelevanter Inhalte und Bereiche, die Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler aufgreifen.

## Beliebtheit der Fächer

### relative Häufigkeit der Fächernennung

Frage: Welches waren deine 3 liebsten/ungeliebtesten Fächer?



Datenbasis: N = 751 Realschüler/innen (336 Mä; 415 Ju)

**Abbildung 5.1:** Dargestellt ist die prozentuale, relative Häufigkeit der Fächernennung. Dabei wurde nach den drei liebsten und ungeliebtesten Fächern gefragt.

Quelle: „Lernen im sinnstiftenden Kontext“ (Muckenfuß, 1995, S. 76, Abbildung 5)

Ein dementsprechend lohnendes Beispiel für ein interessantes Themengebiet stellt die Astronomie und Astrophysik dar. Doch leider gibt es weder einen eigenständigen Astronomieunterricht noch eine geregelte Einbindung astronomischer Inhalte in anderen Fachunterricht. Die Entwicklung, die zu diesem geringen Status der Astronomie in der Schule geführt hat, wird im Folgenden erläutert.

Vor dem zweiten Weltkrieg war Astronomieunterricht ein fester Bestandteil an den meisten deutschen Schulen. Infolge der Machtergreifung der Nationalsozialisten und der damit einhergehenden Ideologien erfuhren die Naturwissenschaften eine Abwertung, sodass astronomische Themen oft nur noch in anderen Schulfächern als kontextuelle Anwendungen integriert wurden. Doch auch nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges wurde eher das Bildungsangebot in den Geisteswissenschaften intensiviert, sodass Naturwissenschaften und insbesondere die Astronomie einen geringen Stellenwert hatten.

Ein massiver Aufschwung entstand für den Astronomieunterricht in den Ostgebieten nach der Deutschen Teilung. Aufgrund des „Sputnikschocks“ entwickelte sich ein weltweites öffentliches Interesse an astronomischen Themen wie der Raumfahrt. Auch in Ostdeutschland konnte von der russischen Besatzungsmacht unterstützt Astronomie in der Oberstufe als eigenständiges Fach unterrichtet und ein entsprechender Lehrplan verfasst werden. Verstärkt wurde dieser Trend noch weiter durch die bemannte Weltraumfahrt und die Mondlandung in den 1960er Jahren (Bernhard, 2000, S. 28).

Trotz dieser Bemühungen stand das Fach vor mehreren gravierenden Problemen. Aufgrund der langjährigen Vernachlässigung von Astronomie in der Schule gab es wenige qualifizierte Lehrerinnen und Lehrer, sodass das Fach zum großen Teil von interessierten Lehrkräften getragen wurde, die sich das benötigte Wissen autodidaktisch aneigneten.

Ebenso herrschte ein Mangel an didaktischer Fachliteratur und aktualisierten Schulbüchern. Vor allem im Bereich der Astronomie war dies aber von enormer Wichtigkeit, da insbesondere seit der bemannten und unbemannten Raumfahrt stetig neue Erkenntnisse gewonnen werden konnten und somit sämtliche Lehrmittel einer ständigen Überarbeitung bedurften. Auch sollte der Astronomieunterricht durch praktische Erfahrungen durch selbstständige Beobachtungen und Experimente bereichert werden. Doch auch die Finanzierung der nötigen Lehrmittel hing stark von dem Engagement der Schule sowie der Lehrerinnen und Lehrer ab (Zimmermann, 1990, S. 80 f.).

Insgesamt ist zu betonen, dass die Unterschiede zwischen den Bundesländern aber auch zwischen den einzelnen Schulen sehr groß waren und immer noch sind. Je nach Finanzierungsmöglichkeiten und individuellen Förderern reicht das Spektrum von wenigen kontextuellen Bezügen in anderen Fächern bis zu eigenständigen Astronomiekursen in der Oberstufe.

In Ost-Berlin beispielsweise trat nach der Wiedervereinigung zumindest für das Fach Astronomie der schlimmste Fall ein, da sich die neuen Lehrkonzepte maßgeblich an den Vorstellungen des ehemaligen Westens orientierten. Astronomie wurde also insofern degradiert, dass sie lediglich als kontextuelle Einbettung beispielsweise im Physikunterricht Anwendung findet oder in separaten Arbeitsgemeinschaften außerhalb der regulären Schulzeiten von interessierten Lehrerinnen und Lehrern thematisiert wird.

Zusammenfassend ist also festzustellen, dass Astronomie in Deutschland und insbesondere in Berlin keine staatliche Unterstützung erhält und die Integration astronomischer Themen in die Unterrichtszeit anderer Fächer oder in außerschulische Projekte allein in der Hand engagierter Lehrkräfte liegt.

Im Folgenden soll daher näher erläutert werden, welche Möglichkeiten exemplarisch bestehen, astronomische Inhalte einzubinden und welche Vorteile sich daraus ergeben. Zudem soll vorgestellt werden, welche didaktischen Konzepte und Vorschläge zu ausgewählten Themen rund um das Weltraumwetter bereits existieren.



# Kapitel 6

## Kompetenzen und Inhalte

**Welche Themen der Astrophysik/des Weltraumwetters erweisen sich als geeignet für die Schule?**

**Welche Kompetenzen werden mit diesen gefördert?**

**Welche didaktischen Ziele werden verfolgt?**

Hervorragende didaktische Aufbereitungen lassen sich im fachdidaktischen Magazin „Astronomie+Raumfahrt“ finden. In diesem Kapitel sollen ausgewählte Themen und didaktische Reduktionen vorgestellt werden. Dabei wird sich am inhaltlichen Aufbau des fachlichen, ersten Teils dieser Arbeit orientiert. Zunächst werden Themen rund um die Sonne und Ereignisse auf dieser, anschließend die Eigenschaften der Erde und dann die Wechselwirkungen erörtert.

Als Grundlage für die Behandlung von Weltraumwetter ist es sinnvoll, zunächst die Eigenschaften der ruhigen und dann der aktiven Sonne zu behandeln, da diese die Quelle für das Weltraumwetter darstellt.

In der Ausgabe von „Astronomie+Raumfahrt“ aus dem Jahr 1997 schlägt [Lindner \(1997, S. 14\)](#) vor, zu Beginn der Reihe über die Sonne Eigenschaften wie scheinbarer und wahrer Durchmesser, Masse und Dichte zu behandeln. Insbesondere die Bestimmung der Masse erweist sich als interessante Transferaufgabe, um das Rechnen mit Kräften wie der Gravitationskraft  $F_G$  und der Zentralkraft  $F_Z$  zu üben. Man geht dabei von der Annahme aus, dass sich die Planeten um die Sonne in konzentrischen Kreisbahnen bewegen. Dabei gilt für die Kräfte:

$$F_G = \gamma \frac{m_S m_P}{r^2}, \quad F_Z = \gamma \frac{m_P v^2}{r}, \quad (6.1)$$

wobei  $\gamma = 6,6 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$  die Gravitationskonstante ist, die Indizes  $S$  und  $P$  die Massen der Sonne und des Bezugsplaneten anzeigen und  $v = 2\pi r/T$  die Umlaufgeschwindigkeit des Planeten anzeigt. Empfehlenswert ist die Verwendung der Erde als betrachteter Planet. Setzt man die beiden Formeln gleich, stellt nach  $m_S$  um, setzt  $v$  ein und nimmt für  $T$  die Umlaufdauer der Erde um die Sonne sowie für  $r$  den mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde, ergibt sich für die Sonnenmasse  $m_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ .

Dieses Ergebnis ist zum einen sehr beeindruckend mit der Erdmasse von lediglich  $6 \times 10^{24} \text{ kg}$  zu vergleichen und zum anderen ist es möglich, unter Einbeziehung der anderen Planetenmassen zu berechnen, dass die Sonne 99,87 % der gesamten Masse des Sonnensystems innehat ([Lindner, 1997, S. 16](#)).

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Temperatur der Sonne, da diese zum einen Interesse aufgrund ihres extremen und radial stark schwankenden Charakters weckt und zum anderen eine gute Überleitung zu der aktiven Sonne darstellt. Daraufhin sollten die verschiedenen Zonen beziehungsweise Schichten der Sonne thematisiert werden. Dies kann zunächst mittels des im Kapitel 2.1 vorgestellten, statischen Zwiebelmodells eingeführt werden. Weiterführend eröffnen sich daraus zwei Gebiete, wobei es sich bei dem einen um Wärme- und somit Energietransport im Inneren der Sonne handelt, was im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch näher erläutert wird. Zum anderen ist mit Blick auf das Weltraumwetter die Wärme- bzw. die Energieabstrahlung der Sonne zu behandeln.

Die Auswirkungen der Leuchtkraft der Sonne sind zum einen als wärmende Sonnenstrahlen auf der Haut für die Schülerinnen und Schüler unmittelbar erlebbar und zum anderen kann man diese quantitativ mit einfachen Mitteln erfassen. Möglich wird dies, indem ein vollständig mit Wasser gefüllter, isolierter Erlenmeyerkolben, an dessen Boden schwarzes Papier geklebt wird, der Mittagssonne ausgesetzt und in regelmäßigen Abständen die Wassertemperatur mittels eines Temperaturfühlers ermittelt und gegen die Zeit aufgetragen wird. Dem Wasser der Masse  $m_W$  wird in einer festen, verstrichenen Zeit  $t$   $\Delta T$  Wärme zugeführt:

$$Q = m_W \Delta T c, \quad (6.2)$$

wobei  $c$  der Wärmekapazität von Wasser und  $\Delta T$  der Temperaturänderung entspricht.

Die Solarkonstante ergibt sich durch

$$S = \frac{P}{A}, \quad (6.3)$$

wobei  $P = Q/t$  die Leistung und  $A$  die bestrahlte Fläche – also das schwarze Papier – ist.

Aufgrund vieler Störfaktoren bei den Messungen ist der so berechnete Wert von circa  $1 \text{ kW m}^{-2}$  eine lediglich grundlegende Näherung. Da der Versuchsaufbau allerdings sehr simpel ist, erscheint es sinnvoll, dass beispielsweise mehrere Schülergruppen das Experiment durchführen und im Anschluss ihre Ergebnisse vergleichen und Messunsicherheiten diskutieren. Diese bestehen zum Beispiel in der Erwärmung des Glases, der Wärmeabgabe an die Umgebung, Unsicherheiten der Messfühler oder auch in dem Vorbeiziehen von Wolken. Außerdem sollte thematisiert werden, dass dieses Ergebnis nicht die Gesamtleistung der Sonne darstellt, da die Atmosphäre der Erde einen großen Teil reflektiert und absorbiert (Lindner, 1997, S. 17 f.).

Vergleichen kann man diesen Wert mit der erwarteten Leistung aufgrund der erzeugten Energie im Inneren der Sonne mittels Kernfusion. Ebenfalls als lohnenswert erscheint es, die Sonne wie im Kapitel 2.1 gezeigt, mit einer Glühbirne zu vergleichen und die entsprechende „Solarkonstante“ zu bestimmen, um ein Gefühl für die Größenordnung dieses Wertes den Schülerinnen und Schülern zu vermitteln.

Zudem kann die Glühbirne als Modell für die Sonne verwendet werden, um so die Abstrahlung und die Wärmewirkung zu verdeutlichen. Allerdings ist es wie bei allen Modellen nötig, neben den Gemeinsamkeiten auch die Unterschiede beziehungsweise die Grenzen des Modells zu thematisieren. In diesem Falle handelt es sich dabei insbesondere um die unterschiedlichen Quellen der Energie und die verschiedenen Abstrahlspektren.

Als Quelle für die enormen Energiemengen, die die Sonne abstrahlt, lässt sich Kernfusion als Thema in den Oberstufenunterricht Physik integrieren. Die dabei stattfindende Proton-Proton-Reaktion erzeugt 98,5 % der Gesamtenergie (Bahcall, Pinsonneault, and Basu, 2001, S. 995).

In dem ersten Schritt dieser Reaktion fusionieren zwei Protonen ( ${}^1\text{H}$ ) zu einem Deuteriumkern ( ${}^2\text{H}$ ), wobei ein Positron ( $e^+$ ) und ein Neutrino ( $\nu$ ) frei werden.



Der Deuteriumkern reagiert mit einem weiteren Proton zu einem Isotop des Heliums ( ${}^3\text{He}$ ). Dabei wird ein Photon mit der Energie von  $4,2 \times 10^{-12}$  J frei.



Eine nach Lindner (1997) interessante, mögliche Aufgabe besteht darin, dass die Schülerinnen und Schüler anhand der ermittelten Abstrahlleistung von  $3,86 \times 10^{26}$  W berechnen, wie viele dieser genannten Kernfusionen pro Sekunde im Inneren der Sonne ablaufen. Dafür errechnet man zunächst die gesamte abgestrahlte Energie, die in einer Sekunde  $3,86 \times 10^{26}$  J beträgt. Teilt man diesen Wert durch die freiwerdende Energie pro Reaktion, ergeben sich circa  $9 \times 10^{37}$  Reaktionen.

Ein für Schülerinnen und Schüler meist nur schwer fassbarer Begriff innerhalb dieses Themengebiets ist der Massendefekt und somit die Äquivalenz von Energie und Masse. Da dieses Prinzip bei den Prozessen innerhalb der Sonne sehr wichtig ist, schlägt Lindner (1997) vor, dies mithilfe von praktischen Rechenanwendungen im Unterricht zu veranschaulichen. Eine interessante Aufgabe dazu besteht darin, zu bestimmen, wie groß der Massendefekt der Sonne innerhalb einer Stunde bei bekannter Abstrahlenergie ist. Diese ist mittels  $E = L \cdot t$  für eine Stunde  $E = 1,39 \times 10^{30}$  J. Stellt man nun die berühmte Formel der Äquivalenz von Masse und Energie von Albert Einstein um, erhält man für  $m = E/c^2$  einen Massendefekt pro Stunde von circa  $1,55 \times 10^{13}$  kg. Dabei handelt es sich um einen sehr großen, nur schwer vorstellbaren Wert, doch lässt sich dieser mithilfe von Vergleichen veranschaulichen. Der Massendefekt der Sonne pro Stunde beträgt in einem lebensnahen Bereich ungefähr der Masse von 220 Milliarden Menschen mit einer Durchschnittsmasse von 70 kg. In der Größenordnung der Sonne ist der Massendefekt allerdings ein vernachlässigbar kleiner Verlust, der gerade einmal ein Trillionstel ( $10^{18}$ ) Prozent der Gesamtmasse der Sonne ausmacht. Das entspricht in etwa 1 Prozent der Gesamtmasse über eine erwartete Lebenszeit der Sonne von 10 Milliarden Jahren.

Haben die Schülerinnen und Schüler einen guten Überblick über die ruhige Sonne, so kann man daraufhin zunächst die aktive Sonne behandeln, um auf diese Weise zu Ereignissen wie explosiven Massenauswürfen überzuleiten. Da die Energie im Innern der Sonne durch Fusionsprozesse frei wird, durchquert Energie die Sonne in verschiedenen Formen wie Strahlung und Konvektion, was in Kapitel 2 genauer beschrieben wird. Dabei kann auf Vorwissen sowohl von den vorangegangenen Themengebieten wie Dichte der Sonne und Temperatur der Sonne als auch aus der Sekundarstufe I, in der verschiedene Formen des Energietransportes behandelt werden, zurückgegriffen werden.

Verlässt diese Energie die Sonne und deren unmittelbare Umgebung als elektromagnetische Strahlung, stellt sie, wenn sie die Satelliten und Messstationen der Erde erreicht, die wichtigste Informationsquelle für den Menschen bezüglich der Sonne dar. Aus diesem Grund sind Themen wie „Licht als Welle“, „elektromagnetische Strahlung“, „Emissions- und Absorptionsspektren“ und „Spektroskopie“, die einen festen Platz in der gymnasialen Oberstufe haben, sehr gut mit der Sonne und dem Weltraumwetter verknüpfbar.

Die beiden erstgenannten Bereiche werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher erläutert, da sie aus dem regulären Unterrichtsalltag fachlich als bekannt vorausgesetzt werden. Emissionsspektren können beispielsweise fächerübergreifend im Chemieunterricht eingeführt werden,

indem die Abstrahl- und somit Wellenlängencharakteristik anhand von Linienspektren verschiedener leuchtender Gase untersucht werden.

Absorptionsspektren können von den Schülerinnen und Schülern selbstständig beim entdeckenden Lernen mithilfe von Handspektroskopen beobachtet werden. Diese gibt es kostengünstig zum Selberbasteln von verschiedenen Anbietern zu kaufen oder es ist möglich, einen solchen nach [Lindner \(1997\)](#) aus Pappe und einem Prisma eigenständig zu konstruieren.

Die Schülerinnen und Schüler sind auf diese Weise imstande, ein kontinuierliches Spektrum mit dunklen Absorptionslinien – den Fraunhoferlinien – zu beobachten. Die Auswertung kann auf die Erkenntnisse der Emission aufbauen, indem gezeigt wird, dass, wenn man die zuvor behandelten Gase mit weißem Licht durchleuchtet, die elektromagnetische Strahlung der charakteristischen Wellenlängen in alle Raumrichtungen gestreut werden und somit die Intensität im kontinuierlichen Spektrum abnimmt. Eindrucksvoll ist ebenfalls die Erkenntnis, dass die gestreute elektromagnetische Strahlung wiederum ein Emissionsspektrum mit denselben charakteristischen Linien darstellt. Auf diese Weise können anhand der Fraunhoferlinien Erkenntnisse bezüglich der Zusammensetzung der Sonne und der Erdatmosphäre, aber auch über Bewegungen und Veränderungen auf der Sonne erlangt werden.

Als Grundlage für die Absorption und Emission können die Atommodelle und die diskreten Energieniveaus mithilfe der Entwicklung der jeweiligen Modelle im historischen Kontext sowie deren Vor- und Nachteile hergeleitet und erläutert werden. Dies wird aus zuvor genannten Gründen nicht weiter ausgeführt. Auch die Spektroskopie und Spektrographenmodelle können anhand der Weiterentwicklung im Laufe der Zeit reduziert und interessant vermittelt werden. Da die nähere Erörterung den Rahmen dieser Arbeit überschreitet, wird an dieser Stelle die weitere Lektüre von [Hearnshaw \(2009\)](#) und [Nahar and Pradhan \(2011\)](#) empfohlen.

Haben die Schülerinnen und Schüler einen grundlegenden Einblick in die Physik der Sonne erhalten, können Extremereignisse, die das Weltraumwetter bestimmen, thematisiert werden. Aufgrund der Komplexität von Phänomenen wie Sonnenflecken, Flares und Massenauswürfen ist es sinnvoll diese überwiegend qualitativ zu behandeln. Als wichtigste Ursache für derartige Ereignisse ist das Magnetfeld und die Speicherung sowie explosive Freisetzung von Energie zu nennen. Dies kann natürlich zum Anlass genommen werden, die grundlegenden Eigenschaften von Magnetfeldern anhand dieses praktischen Beispiels zu wiederholen. Doch sind die in Kapitel 2.2 in vereinfachter Form erläuterten komplexen Gebilde der Magnetfelder so kompliziert, dass eine qualitative Beschreibung der Vorgänge anhand schematischer Abbildungen für den schulischen Gebrauch genügt.

Eine großartige Möglichkeit, die Sonne und insbesondere die extremen Ereignisse auf dieser zu erforschen, ergibt sich, wenn den Schülerinnen und Schülern entweder an der Schule selbst oder an einem außerschulischen Lernort ein Teleskop zur Sonnenbeobachtung zur Verfügung steht. Auf diese Weise eröffnen sich Gelegenheiten wie die Zahl und Lage der Sonnenflecken festzuhalten oder Ausbrüche am Rand der Sonnenscheibe zu entdecken. Sind solche Instrumente nicht vorhanden, ist es ebenfalls denkbar, mit externen Daten und Bildern zu arbeiten. Zu diesem Zweck bieten sich insbesondere einige Internetquellen an, wie die der [NASA](#), des [Big Bear Solar Observatory](#) und des [Space Weather Prediction Center](#).

Als Bestandteil des Weltraumwetters sollten Themen rund um die Einflüsse der Sonne auf die Erde thematisiert werden. Dabei können Kenntnisse über das Magnetfeld der Erde und die Bewegung von Ladungen in Magnetfeldern reaktiviert und vertieft werden. Um die wesentlichen

Eigenschaften der Erde wie ihr Magnetfeld und ihre Atmosphäre, zu thematisieren, bietet sich eine Zusammenarbeit mit dem Erdkundeunterricht an. Als Experiment im Physikunterricht zu bewegten Ladungen im homogenen Magnetfeld kann hierbei das in den meisten Schulen vorhandene Fadenstrahlrohr zusammen mit Helmholtz-Spulen verwendet werden. Damit lassen sich die Bewegungen von Ladungsträgern veranschaulichen und eine erste Näherung zu den Strahlungsgürteln der Erde erreichen (eine Beschreibung zu dem Versuch siehe *Astronomie+Raumfahrt*, 2001 Ausgabe 3).

Um die Auswirkungen von Extremereignissen auf den Menschen und die Technik erörtern zu können, sollten verschiedene Arten der elektromagnetischen Strahlung sowie deren Auswirkungen auf biologische und technische Systeme thematisiert werden. Zugunsten des Erstgenannten bietet sich eine fächerübergreifende Kooperation mit dem Biologieunterricht an.

Insbesondere die Themen des Weltraumwetters, die sich mit dem Menschen und der Technik beschäftigen, erzeugen ein großes Interesse und motivieren die Schülerinnen und Schüler, da sie die unmittelbare Erlebenswelt betreffen. Aus diesem Grund bieten sie eine Grundlage für reflektierte Kommunikation und begründetes Argumentieren. Diskussionswürdige Fragen wären exemplarisch:

- „Welche Auswirkungen könnte schlimmstenfalls das Weltraumwetter auf die Gesellschaft haben?“
- „Welche Möglichkeiten gibt es, sich vor schädlichen Auswirkungen des Weltraumwetters zu schützen?“
- „Wie wirkt sich das Weltraumwetter für die Zukunft der Menschheit aus, wenn beispielsweise bemannte Raummissionen zum Mars geplant werden?“

Als Grundlage für diese Diskussionen ist es nötig, eine Informationsbasis zu bilden. Diese kann mittels eines medienorientierten Unterrichts erarbeitet werden. Viele Quellen im Internet oder in Zeitschriften wie „*Astronomie+Raumfahrt*“ gewähren eine große Fülle aufbereiteter, leicht verständlicher Inhalte zu vielen Themen rund um die Auswirkungen des Weltraumwetters. Dabei werden die Medien- und Kommunikationskompetenzen der Schülerinnen und Schüler gefördert sowie auf interessante und motivierende Art und Weise Fakten und Hypothesen bewertet und diskutiert.

In diesem Kapitel wurde verdeutlicht, dass Themen der Astrophysik im Allgemeinen und insbesondere des Weltraumwetters sehr geeignet sind, um in der Schule behandelt zu werden. Diese Gebiete ermöglichen eine praktische und interessante Gelegenheit, fest integrierte Themen des alltäglichen Physikunterrichts in praktischen und spannenden Kontexten zu verwenden, wie hier anhand von einigen exemplarischen, ausgesuchten Highlights aufgezeigt wurde.

Doch sollte man das Weltraumwetter nicht nur als inhaltliche Einbettung für gängige Themen ansehen, sondern insbesondere die verschiedenen Möglichkeiten der Unterrichtsgestaltung beachten, die sich auf diese Art eröffnen.

Nachdem hier einige allgemeine, inhaltliche Anregungen gegeben wurden, soll nun im Folgenden ein konkretes Beispiel für die Einbindung des Weltraumwetters in den Physikunterricht erörtert werden. Dafür wird vorgeschlagen, die genannten Grundlagen unter dem Titel „Die Sonne und ihre Auswirkungen auf die Erde“ in den alltäglichen Unterrichtsverlauf in geeigneten Phasen zu integrieren. Bei besonders interessanten und ergiebigen Themen, von denen eine Auswahl in diesem Kapitel präsentiert wurden, lohnt es sich natürlich, diesen eine eigene

Unterrichtseinheit von einigen Stunden zu widmen. Aufgrund des Schwierigkeitsgrade und den Themengebieten wird diese Reihe in die Oberstufe eingeordnet. Dabei bleibt der Grad der quantitativen Betrachtung und der Tiefe in die einzelnen Themen variabel, da sich astrophysikalische Inhalte rund um die Sonne und insbesondere des Weltraumwetters hervorragend qualitativ sehr spannend unterrichten lassen.

Verfügen die Schülerinnen und Schüler über grundlegendes Wissen über die Sonne und das Weltraumwetter wird im Folgenden eine praktische Anwendung vorgestellt. Bei dieser werden Originaldaten verwendet, um eine hypothetische Wettervorhersage für ein reales Extremereignis aus dem Jahr 2003 zu erstellen. Dabei können die Schülerinnen und Schüler unter Einbezug ihrer erworbenen Kompetenzen im Bereich Informatik und ihres Grundlagenwissens einen Einblick in die Arbeitsweise von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gewinnen. Außerdem wird es den Schülerinnen und Schülern auf diese Weise ermöglicht eigenständig auf anspruchsvolle, aber bewältigbare Weise Erkenntnisse zu erlangen, Daten auszuwerten und zu interpretieren und ihre Ergebnisse zu diskutieren. Zudem wird die Relevanz von Weltraumwetter und dessen Auswirkungen auf Mensch und Technik anhand eines praktischen Beispiels thematisiert. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, auf welche Weise Schülerinnen und Schüler mit Originaldaten arbeiten können und inwiefern diese reduziert werden können.

# Kapitel 7

## Beispiel für die Verwendung in der Schule

### 7.1 Daten des Space Weather Prediction Center

**Welche Daten wurden verwendet?**

**Wie wurden diese reduziert?**

Die Beobachtung und Vorhersage des Weltraumwetters beruht im Wesentlichen auf dem Sammeln und Auswerten von Daten. Diese werden von Satelliten wie den bereits kurz vorgestellten GOES-Satelliten – geostationäre Wettersatelliten der USA – aufgenommen und von verschiedenen internationalen Einrichtungen ausgewertet. Eine derartige Aufbereitung sowohl für staatliche als auch wirtschaftliche und private Interessen erfolgt durch das SWPC. Das SWPC stellt zusätzlich die unbearbeiteten Daten von 1955 bis zu stündlich aktuellen der Öffentlichkeit zur Verfügung.

Im Folgenden wird anhand besonders interessanter Datensätze explizit erörtert, auf welche Weise man die entsprechenden Daten erhält. Außerdem wird gezeigt, wie sich diese enormen Mengen an Daten sinnvoll für den Gebrauch im Unterricht aufbereiten lassen.

Der Zugriff auf die Daten erfolgt über den Data Access des SWPC (<https://satdat-vip.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/>). In dieser Datenbank werden die verschiedenen Informationen chronologisch dargestellt. Dabei kann man zwischen kompletten Datensätzen, gemittelten Daten oder fertigen Graphiken wählen. In diesem Beispiel wurde mit den Gesamtdaten gearbeitet. Sind gewünschtes Jahr, Monat und Tag ausgewählt, stehen die Daten von GOES-10 und GOES-12 zur Verfügung. Gewählt werden muss zwischen den Datenformaten \*.csv oder \*.nc, wobei Zweitgenanntes eher für den wissenschaftlichen Gebrauch geeignet ist. Das Dateiformat \*.csv steht für „comma-separated variables“ und kann in Tabellenkalkulationsprogrammen, wie z.B. Excel, geöffnet werden, was sowohl in dieser Arbeit verwendet wurde als auch meistens in der Schule allgemein zur Verfügung steht und als Standardprogramm den Schülerinnen und Schülern bekannt ist.

Für die Graphik (7.1) wurden Messwerte der Röntgenstrahlung des Satelliten GOES-10 vom 28. Oktober 2003 verwendet. In der Excel-Datei beinhalten die ersten ca. 150 Zeilen allgemeine Angaben zu dem Aufnahmedatum, den Aufnahmebedingungen, der Art der Messwerte und der Bedeutung der Variablen.

Zunächst ergibt sich allerdings das Problem, dass die darauffolgenden Daten, also Zeitstempel und die verschiedenen Messwerte, in einer einzigen Spalte nur getrennt von Kommata stehen. Es ist aber möglich, diese in separate Spalten aufzuteilen. Dazu befindet sich unter dem Reiter „Daten“ bei den „Datentools“ die Funktion „Text in Spalten“. Dabei muss man Kommata als Trennzeichen wählen. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass im letzten Schritt des Textkonvertierungs-Assistenten bei der Einstellung der Datenformate in den erweiterten Einstellungen für das Standardformat das Dezimaltrennzeichen auf Punkt gesetzt und das Häkchen bei nachstehendem Minuszeichen entfernt wird. Zudem gibt es bei den Messwerten einige fehlerhafte Werte. Diese sind mit -99999 eingetragen und würden die Auswertung stark verfälschen. Daher sollten diese durch die „Suchen und Ersetzen Funktion“ von Excel durch einen beliebigen Buchstaben ersetzt werden. Dies führt zu einem automatischen Ausschluss der betroffenen Zeile in den folgenden Berechnungen.

Die nächste Reduktion befasst sich mit der Datenmenge, da im unbearbeiteten Zustand über 28.000 Werte für 24 Stunden in drei Sekunden Abständen vorliegen. Aus diesem Grund wurde sich in dieser Arbeit dafür entschieden, Mittelwerte für jeweils zehn Minuten Intervalle zu bilden. Dabei wird die Mittelwert-Funktion von Excel verwendet. Um sich die Auto-Ausfülloption zu Nutze zu machen, wird die Mittelwert-Funktion mit der Index-Funktion wie folgt kombiniert:

$$= \text{MITTELWERT}(\text{INDEX}(\text{F} : \text{F}; (\text{ZEILE}(\text{A1}) - 1) * 200 + 159) : \text{INDEX}(\text{F} : \text{F}; (\text{ZEILE}(\text{A1}) - 1) * 200 + 358)) \quad (7.1)$$

Hierbei ist zu beachten, dass F für die Spalte steht, in der sich die Messwerte nach der Aufspaltung befinden. Zudem starten die Messwerte in diesem Beispiel erst ab der 159. Zeile, sodass diese Zahl zu der Intervallgröße von 200 addiert werden muss. Der Ausdruck  $\text{Zeile}(\text{A1}) - 1$  erlaubt eine Durchnummerierung von 0 bis  $n$  mithilfe der Auto-Ausfülloption. Um den Mittelwert von 200 Messwerten zu bilden, wird der Anfangspunkt  $200+159$  und der Endpunkt  $200+358$  angegeben. Daraus ergeben sich dann 144 Messwerte in zehn Minuten Intervallen über 24 Stunden.

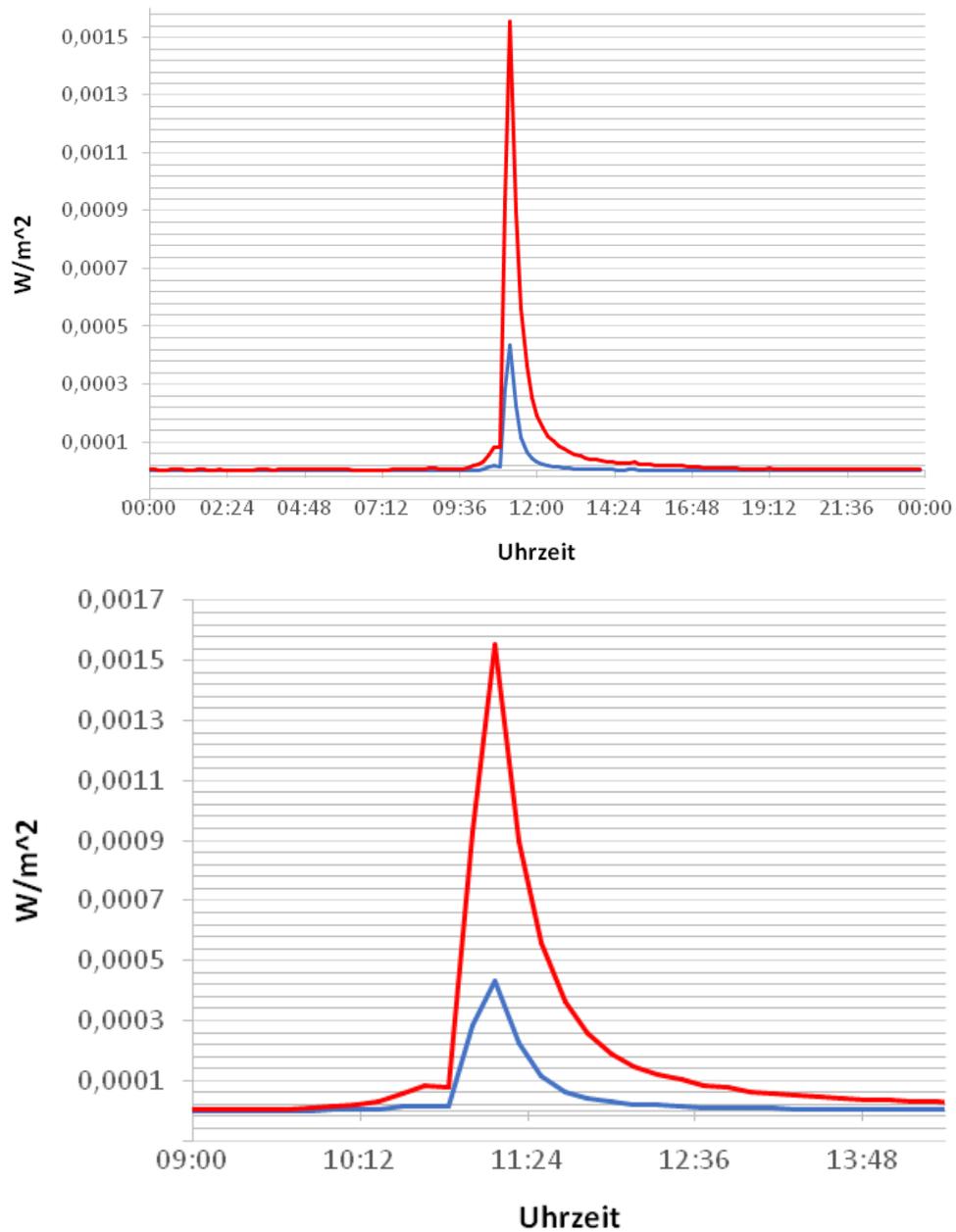
Für die Erstellung einer Zeitskala bietet es sich weniger an, die bereits vorhandene zu benutzen, sondern mithilfe der Auto-Ausfülloption eine eigene individuell zu erstellen. Da in diesem Beispiel von Messwerten eines Tages mit 10-Minuten-Intervallen ausgegangen wird, trägt man in die ersten beiden Zeilen die ersten beiden Messzeiten ein (hier: 00:00 und 00:10) und ergänzt die restlichen Werte automatisch. Aus den Messwerten und Zeitwerten ist es auf einfache Weise möglich bei Excel eine Graphik zu erstellen.

Außerdem wurden Daten vom FTECS (Fundamental TEChnologieS) hinzugezogen, die vom ACE (Advanced Composition Explorer) – einer Raumsonde der NASA – und dessen Instrument EPAM (Electron, Proton and Alpha Monitor) aufgenommen wurden. Dabei handelt es sich um Flussdichten von Ionen und Elektronen. Zusätzlich werden Daten bezüglich des geomagnetischen Feldes verwendet, die vom Boulder Magnetometer in Colorado unter der Aufsicht des United States Geological Survey (USGS) aufgenommen werden. Der Zugriff auf die Daten erfolgt allerdings über die National Centers for Environmental Information (NCEI).

Die Daten des FTECS liegen leider immer nur für ein ganzes Jahr vor, sodass es nötig wäre, die irrelevanten Zeilen zu löschen. Es werden die Flussdichten der Ionen in 25 verschiedenen Energieintervallen vom Instrument LEMS30 bzw. LEMS120 gemessen, von denen es sinnvoll ist, einige wenige auszuwählen. Im Rahmen dieser Arbeit und auch mit Blick auf den Aufwand wurde für die Flussdichte der Ionen die fertige Graphik des SWPC verwendet (siehe Abbildung 7.2) und empfohlen.

Zusätzlich wurden Daten bezüglich des geomagnetischen Feldes benutzt. Diese liegen für viele verschiedene terrestrische Observatorien vor, wobei hier mit den Messwerten des Boulder Magnetometers gearbeitet wird. Bei der Wahl zwischen minütlichen oder stündlichen Intervallen werden in dieser Arbeit minütliche Zeitintervalle gewählt und nach beschriebener Methode reduziert. Die Messwerte werden für einen Monat heruntergeladen, sodass man wieder die überflüssigen Daten löschen muss.

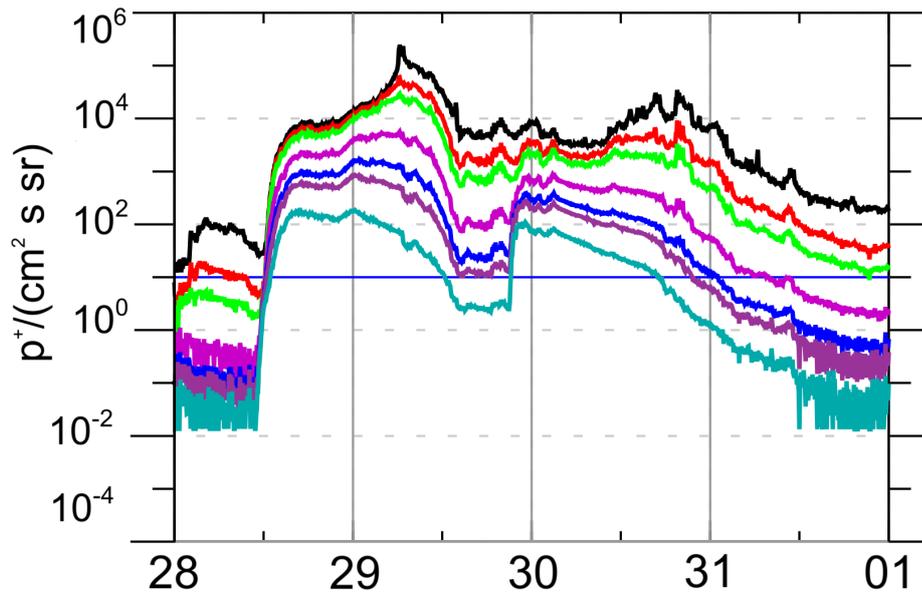
Für die Verwendung der Originaldaten in der Schule eröffnen sich je nach Leistungsstand der Schülerinnen und Schüler, der Zeitkapazitäten und der verfügbaren Ressourcen mehrere Möglichkeiten. Zunächst ist eine Zusammenarbeit mit dem Informatikfachbereich sinnvoll, um Zugang zu einer ausreichenden Zahl von Computern zu erhalten. Anhand einer sehr ausführlichen Beschreibung ist es denkbar, dass Schülerinnen und Schüler, die Erfahrung mit Excel aufweisen, eigenständig die Originaldaten reduzieren und auswerten. Ein Arbeiten in Kleingruppen, in denen Schülerinnen und Schüler mit und ohne Erfahrungen mit Excel sich gegenseitig unterstützen, würde sich dabei besonders anbieten. Sollte dies zu anspruchsvoll sein oder die Zeit nicht ausreichen, können den Schülerinnen und Schülern die bereits reduzierten Daten präsentiert und zur Auswertung bereitgestellt werden. Grundlegend ist es ebenfalls möglich, lediglich die fertigen Graphiken zur Verfügung zu stellen, doch empfiehlt sich an dieser Stelle eine Förderung des computergestützten Lernens sowie der Nutzung neuer Medien und des Umgangs mit Daten.



**Abbildung 7.1:** Dargestellt ist die Strahlungsstromdichte von Röntgenstrahlung aufgetragen gegen die Uhrzeit in UTC (koordinierte Weltzeit) am 28.10.2003 gemessen vom GOES-10 Satelliten (oben: ganztägig, unten: Detailansicht). Die blaue Kurve stellt die kurzwellige Röntgenstrahlung im Bereich von 0,05–0,3 nm und die rote Kurve die langwellige Röntgenstrahlung im Bereich von 0,1–0,8 nm dar.

Datenzugriff am 05.08.2017 über

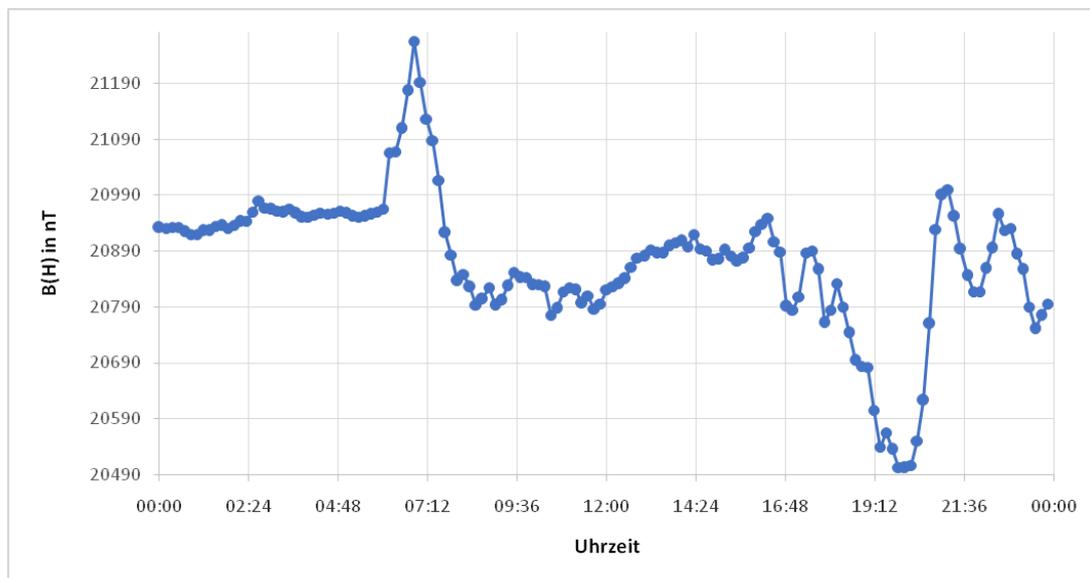
→ <https://satdat-vip.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/>



**Abbildung 7.2:** Dargestellt ist die Flussdichte der Protonen aufgetragen gegen die Uhrzeit in UTC am 28.10.2003–31.10.2003 gemessen vom GOES-11 Satelliten. Die Farben stellen jeweils die verschiedenen Energielevel der Protonen dar (schwarz: > 1 MeV, rot: > 5 MeV, grün: > 10 MeV, rosa: > 30 MeV, blau: > 50 MeV, lila: > 60 MeV, türkis: > 100 MeV).

Quelle (bearbeitet), Zugriff am 09.08.2017 über

→ [ftp://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new\\_plots](ftp://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_plots)



**Abbildung 7.3:** Aufgetragen ist die horizontale Komponente des Erdmagnetfelds in nT gegen die Uhrzeit in UTC am 29.10.2003 gemessen vom Boulder Magnetometer.

Datenzugriff am 11.08.2017 über

→ <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data.shtml>

## 7.2 Klassifizierung und Wettervorhersage

**Nach welchem Schema und welchen Normen funktioniert das Klassifizierungssystem?  
Wie lassen sich die Daten nach diesem System auswerten?**

Die Auswertung der Daten und die Erstellung einer Wettervorhersage erfolgt nach einem allgemein gültigen Klassifizierungssystem. Dies soll im Folgenden vorgestellt werden. Darauf aufbauend werden die exemplarisch gezeigten Daten in dieses eingeordnet und aus den gewonnenen Erkenntnissen eine Wettervorhersage erstellt.

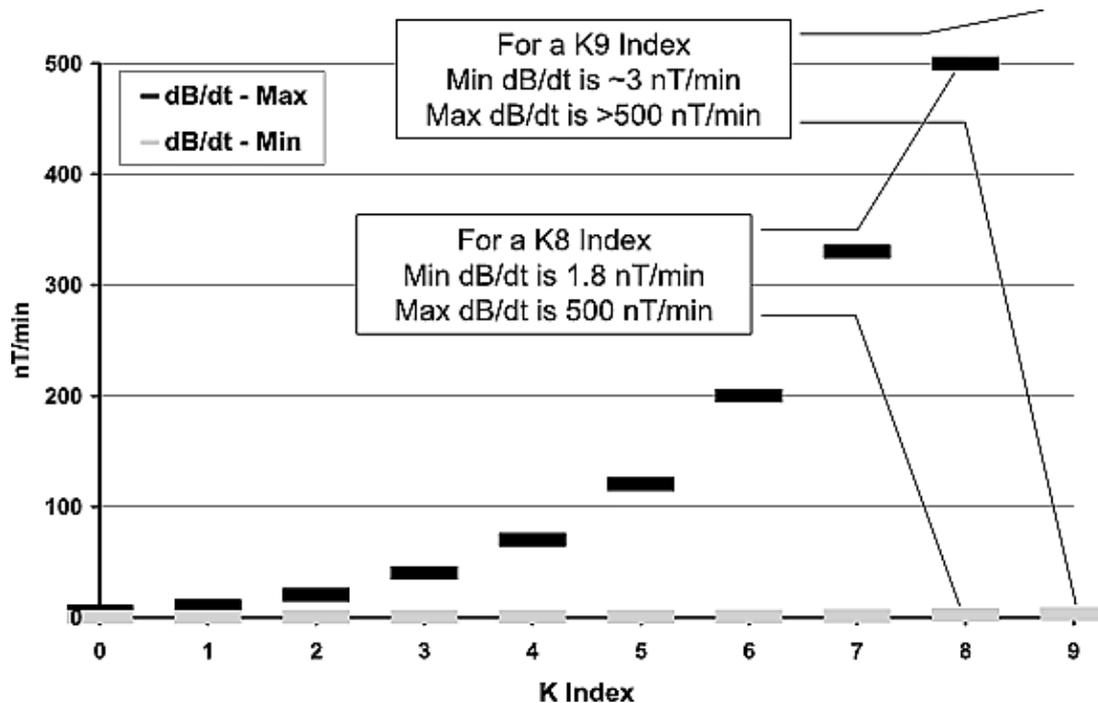
Zunächst wird die Strahlungsstromdichte der Röntgenstrahlung näher erörtert. Anhand des Maximalwerts lässt sich, wie in Kapitel 2.3 erläutert, die Stärke des Flares klassifizieren. In dem Beispiel beträgt der Maximalwert  $18,4 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-2}$ . Dies ergibt einen Flare der Kategorie X18. Gemäß der Abbildung 7.1 ergibt sich lediglich ein X15 Flare, doch ist zu bedenken, dass es sich dabei nur um Mittelwerte handelt. Daran kann man auch Schülerinnen und Schülern eindrucksvoll zeigen, dass zum einen die Bildung des Mittelwertes an dieser Stelle die Daten zwar deutlich vereinfacht, aber Extremwerte relativiert, und zum anderen der massive Anstieg der Röntgenstrahlungsintensität zeitlich sehr begrenzt ist.

Außerdem klassifiziert das SWPC mithilfe des Röntgenstrahlungsflusses eine gröbere Einteilung von Strahlungsausbrüchen mit Blick auf die Auswirkungen auf die Technik. Dabei werden fünf Kategorien genannt, wobei R1 die geringste und R5 die höchste Gefahrenstufe darstellen. Die Intervalle definieren sich über die Flussstärke in  $\text{W m}^{-2}$  ( $R1 > 10^{-5}$ ,  $R2 > 5 \times 10^{-5}$ ,  $R3 > 10^{-4}$ ,  $R4 > 10^{-3}$  und  $R5 > 2 \times 10^{-3}$ ). Der hier behandelte Flare fällt damit in die Kategorie R4, womit es sich um ein schwerwiegendes Ereignis handelt. Die möglichen Konsequenzen werden von dem SWPC in jeder Kategorie beschrieben. Die Kategorie R4 bedeutet, dass hochfrequente Radiokommunikation auf Teilen der sonnenzugewandten Seite der Erde für ein bis zwei Stunden ausfallen kann, Unterbrechungen der Navigation in der selben Dauer zu Fehlern bei der Positionsbestimmung führen und die Satellitennavigation ebenfalls beeinträchtigt sein kann. Für die möglichen Konsequenzen der anderen Gefahrenklassen sind die Erläuterungen des SWPC zu beachten ([Skalen](#)).

Nachdem die Röntgenstrahlung nach einem Ausbruch nur wenige Minuten braucht, um bei der Erde und den Messinstrumenten anzukommen, können hochenergetische Teilchen, wie hier Protonen, aus koronalen Massenauswürfen erst ca. 1–2 Tage später detektiert werden. So kann man der Abbildung 7.2 entnehmen, dass ein massiver Anstieg der Protonenflussdichte erst am späten Nachmittag des 28. Oktobers beginnt und sein Maximum am Vormittag des 29. Oktobers erreicht.

Die Klassifizierung der Partikelflussdichte erfolgt beim SWPC in der Kategorie „Solar Radiation Storms“ und definiert fünf Stufen, die sich nach der durchschnittlichen Flussdichte von Ionen mit einer Energie von mehr als 10 MeV richten ( $S1 > 10 \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ,  $S2 > 10^2 \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ,  $S3 > 10^3 \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ,  $S4 > 10^4 \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  und  $S5 > 10^5 \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ). Der hier behandelte Flare wird dementsprechend in die Klasse S4 eingeordnet. Dem SWPC gemäß bedeutet dies eine Gefährdung von Astronauten, die sich außerhalb von Raumfahrzeugen bewegen, und eine erhöhte Belastung von Flugpassagieren in großen Höhen. Zudem können Fehler in den Speichereinheiten von Satelliten sowie Störungen bei hochfrequenter Kommunikation und Navigation über mehrere Tage hinweg auftreten.

Erreichen geladene Teilchen die Erde, stellen nicht nur sie selbst eine Gefahr für Mensch und Technik dar, sondern sie bewirken auch starke Schwankungen der Magnetosphäre, was zu geomagnetischen Stürmen führen kann. Da diese insbesondere Auswirkungen auf technische Systeme haben, werden sie ebenfalls vom SWPC klassifiziert. Dies erfolgt mithilfe des sogenannten Kp-Index, der zwischen eins und neun liegen kann. Der Kp-Index und der K-Index definieren jeweils die Schwankungen im Erdmagnetfeld, wobei der Kp-Index ein korrigierter K-Index ist, der die Messungen von zwölf ausgewählten Observatorien vereint. In diesem Beispiel kann nur der K-Index ermittelt und repräsentativ als Kp-Index angenommen werden. Dafür werden drei Komponenten des Erdmagnetfeldes gemessen. H steht für die horizontale Komponente, D für die Deklination und Z für die senkrechte Komponente. Der K-Index ergibt sich über die



**Abbildung 7.4:** Dargestellt ist der K-Index für das Boulder Observatorium. Dabei definieren sich die Indizes durch die Veränderung des Magnetfeldes in nT über die Zeit. Angegeben sind die minimalen und maximalen Werte von K8 und K9.

Quelle: „An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms“ (Kappenman, 2005, Abbildung 1)

maximale Änderung, die in diesem Fall bei der H-Komponente zu finden ist. Da der K-Index ein lokaler, also vom Breitengrad abhängiger Faktor ist, hat nach Abbildung 7.4 bei einer Änderung von mindestens  $3 \text{ nT min}^{-1}$  der K-Index für das Boulder Magnetometer einen Wert von neun. Allgemein sind in Abbildung 7.3 große Schwankungen von bis zu  $800 \text{ nT}$  innerhalb von 90 min erkennbar. Berechnet man die Schwankungen in diesem Zeitintervall für eine Minute, erhält man ca.  $11 \text{ nT min}^{-1}$  und dies entspricht somit einem K9-Index.

Gemäß des beschriebenen Kp-Index teilt das SWPC geomagnetische Stürme in fünf Klassen ein ( $G1 = Kp5$ ,  $G2 = Kp6$ ,  $G3 = Kp7$ ,  $G4 = Kp8$ ,  $G5 = Kp9$ ). Ein geomagnetischer Sturm der Klasse G5, wie er in diesem Beispiel auftrat, kann ausgedehnte Probleme bei der Spannungskontrolle und Schutzmechanismen in Kraftwerken sowie Totalausfälle von Teilen des Stromnetzes und Beschädigungen von Transformatoren verursachen. Zudem kann es zu massiven statischen Aufladungen der Oberflächen von Raumfahrzeugen, stunden- oder tagelangen Störungen bei nieder- und hochfrequenter Kommunikation und Navigation sowie zu der Beobachtung von Nordlichtern in geringen Breitengraden kommen.

Mithilfe der Weltraumwetterskalen und Erklärungen des SWPC ist es möglich, dass die Schülerinnen und Schüler eine Einordnung in die jeweils korrekten Klassen vornehmen und Vorhersagen für das Weltraumwetter und dessen Auswirkungen der betroffenen Tage erstellen.

Für eine vertiefende Betrachtung kann man noch die Art des Flares genauer untersuchen. Dabei unterscheidet man zwischen einem kurzlebigen impulsiven Flare, bei dem in wenigen Minuten der Anstieg und Abfall der Röntgenstrahlungsintensität in gleicher Weise exponentiell ist, und einem hier präsentierten long-duration Flare, der sich durch eine deutlich langsamere, aber trotzdem exponentielle Abklingrate auszeichnet. Bei einer solchen Untersuchung bietet es sich an, die Charakteristika von exponentiellen Gleichungen mit den Schülerinnen und Schülern vertiefend und praktisch zu wiederholen, was vorteilhaft ist, da der exponentielle Zerfall auch in vielen anderen physikalischen Bereichen wie dem radioaktiven Zerfall von großer Bedeutung ist. Es wird hier also deutlich, dass sich unter Einbezug weiterer Daten und Ansätze noch viele weitere Gelegenheiten bieten, physikalische und mathematische Themen anzuwenden.

Nachdem die Daten wie beschrieben verarbeitet und ausgewertet wurden, ist nun von großem Interesse, welche Auswirkungen der behandelte Strahlungsausbruch und der koronale Massenauswurf auf Mensch und Technik im Oktober 2003 tatsächlich hatte. Dies wird im folgenden Kapitel näher erörtert.

## 7.3 Extremereignis des Jahres 2003

### Was geschah 2003? Welche Auswirkungen hatte dieses Ereignis auf Mensch und Technik?

Eine detaillierte Auswertung der Daten des SWPC befindet sich in dessen Archiv und beinhaltet eine Beschreibung der [Highlights](#) jeweils einer signifikanten Zeitspanne. Der hierfür relevante Report bezieht sich auf die Ereignisse vom 27. Oktober 2003 bis zum 2. November 2003 und hat die Kennziffer 1470.

In diesem Zeitintervall zeigte die Sonne ein sehr aktives Verhalten und insbesondere drei Bereiche, die als Region 484, 486 und 488 bezeichnet werden, stellten immer wieder Quellen von Ausbrüchen dar. Immer wieder kam es zu kleineren Ausbrüchen der Klasse M, die man als Vorwarnung ansehen konnte. Während der Beobachtung der aktiven Regionen produzierte vor allem die Region 486, die bereits Ursprung von vier koronalen Massenauswürfen gewesen war, die allerdings nicht in Richtung der Erde zeigten, mehrere Ausbrüche. Aufgrund der allmählichen Positionierung der Region 486, die den dreizehnfachen Durchmesser der Erde aufwies, in der Nähe der Sonnenscheibenmitte schlugen viele Weltraumwetterstationen Alarm und veröffentlichten Warnungen. Am 28. Oktober um kurz vor 11 Uhr kam es schließlich zu einem gewaltigen X-Klasse Flare, auf den kurze Zeit später ein koronaler Massenauswurf folgte.

Wie man auch der Abbildung [7.1](#) entnehmen kann, waren die Auswirkungen des Strahlungsausbruchs bereits wenige Minuten nach dem Flare auf der Erde messbar. Die stark erhöhte Intensität der Röntgenstrahlung führte zu einem ein- bis zweistündigen Ausfall der hochfrequenten Radiokommunikation auf der gesamten sonnenzugewandten Seite der Erde und zu etlichen Fehlern bei Navigationssystemen ([Bornarel and Lilensten, 2006, S. 128](#)).

Doch auch der Massenauswurf hatte gewaltige Ausmaße. Der Sonnenwind erreichte Geschwindigkeiten von 2125 km/s und traf circa 19 Stunden nach dem Ausbruch auf die Erde. Damit handelte es sich um den viertstärksten Massenauswurf seit Beginn der Aufzeichnungen des Weltraumwetters. Der daraus resultierende geomagnetische Sturm dauerte 27 Stunden und war der sechststärkste aufgezeichnete Sturm seit 1922 (ebd., S. 128 ff.).

Diese zeitliche Abfolge eines explosiven Ereignisses muss für die Schülerinnen und Schüler verdeutlicht werden, um sowohl das Potential als auch die Grenzen der Vorhersage verständlich zu machen. Da die gefährliche Röntgenstrahlung bereits wenige Minuten nach dem Beginn des Ausbruchs ihre maximale Intensität bei der Erde erreicht, bieten Vorhersagen und Warnungen in diesem Bereich zumeist eine zu geringe Reaktionszeit. Daher ist die Beobachtung von aktiven Region, wie bereits beschrieben, von so großer Wichtigkeit. Doch besteht in diesem Gebiet noch viel Potential, da die physikalischen Vorgänge auf der Sonne noch nicht weit genug verstanden sind, um anhand der Aktivität einer Region sichere Vorhersagen zu treffen. Bessere Chancen bestehen allerdings bei den zumeist folgenden koronalen Massenauswürfen, da die herausgeschleuderten Teilchenwolken mehrere Stunden bis Tage brauchen, um die Erde zu erreichen. So können Warnungen rechtzeitig ausgesprochen und Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, ehe das Bombardement hochenergetischer Teilchen beginnen und ein geomagnetischer Sturm resultieren kann. Eine explizite und rechtzeitige Vorhersage ist also dementsprechend im Bereich des Weltraumwetters nicht ohne Einschränkungen möglich, doch verdeutlicht dies nur umso mehr die Notwendigkeit, die Sonne und die Vorgänge auf ihr intensiver zu untersuchen und zu verstehen.

Dieses Ereignis ist also nicht nur aufgrund der rekordverdächtigen Ausmaße von großer Bedeutung für die Geschichte des Weltraumwetters, sondern auch weil anhand der folgenden Auswirkungen auf den Menschen und die Technik eindrucksvoll gezeigt werden konnte, welche Bedeutung die Vorhersage und vor allem rechtzeitige Warnungen haben.

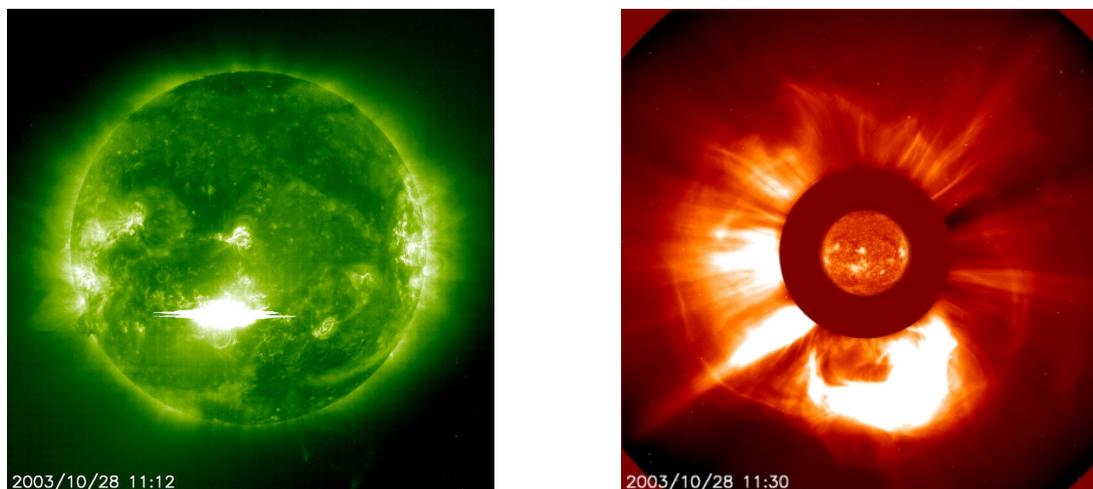
Wegen der Ausrichtung der Ausbrüche zur Erde waren die Beobachtungsstationen im dauerhaften Einsatz und alarmierten die Betreiber von Satelliten und anderen möglicherweise betroffenen Systemen wie z. B. Kraftwerken. Dies zeigte Wirkung, sodass sich immerhin 25 % aller Satelliten auf mögliche Beeinträchtigungen vorbereiteten, was sich als notwendig herausstellte, da von diesen 60 % Störungen vermerken konnten. Doch konnten auch Gegenmaßnahmen wie das Abschalten von einigen Systemen oder Kurskorrekturen nicht verhindern, dass ein japanischer Satellit ausfiel und nicht wieder in Betrieb genommen werden konnte. Daraus entstand ein finanzieller Schaden von 512 Millionen Dollar (ebd., S. 130)

Einige weitere Vorsichtsmaßnahmen wurden getroffen, wie dass sich die Astronauten auf der ISS (International Space Station) in dem am besten geschützten Bereich aufhalten sollten. Ebenfalls wurden einige Flugrouten, die regulär in Polnähe lokalisiert waren, geändert.

Auch im Bereich der Stromversorgung konnten negative Auswirkungen beobachtet werden. So wurde es beispielsweise nötig, überhitzende Transformatoren zu kühlen. In Schweden kam es sogar zu einem fast einstündigen Stromausfall, von dem ca. 50.000 Haushalte betroffen waren (ebd., S. 131). Insgesamt hielten sich die Schäden und Störungen aber in Anbetracht der Stärke des Ereignisses in Grenzen. Zum großen Teil war dies den Vorhersagen und Warnungen des SWPC und anderer Stationen zu verdanken.

Diese Erkenntnis könnte beispielsweise für diesen didaktischen Vorschlag das Ziel der Reihe sein, welches die Schülerinnen und Schüler möglichst eigenständig erreichen sollten. Nachdem

sie die Klassifizierung anhand der Daten und der Klassifizierungssysteme vorgenommen und eine Wettervorhersage und Prognose der potentiellen Störungen und Schäden erstellt haben, bietet sich eine Internetrecherche oder eine Recherche von ausgewählter Literatur an, um die tatsächlichen Auswirkungen in Erfahrung zu bringen. Die Beschreibungen von [Bornarel and Lilensten \(2006\)](#) eignen sich hervorragend, doch auch große Zeitungen wie die „[The New York Times](#)“ oder der „[Der Tagesspiegel](#)“ verfügen über eine Auswahl von Artikeln, auf die man über ihre jeweiligen Archive zugreifen kann. Diese Unterschiede zwischen den zuvor getroffenen Vorhersagen und



**Abbildung 7.5:** Links dargestellt ist der X-Flare der Region 486 aufgenommen von SoHO am 28.10.2003 um 11:12 Uhr UTC. Rechts dargestellt ist der darauffolgende koronale Massenauswurf aufgenommen von SoHO um 11:30 Uhr UTC.

Quelle links: NASA, Holly Zell, aktualisiert am: 04.08.2017, Zugang am 09.08.2017 über

→ <https://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/10.28Flare.html>

Quelle rechts: NASA, ESA, aktualisiert am: 12.03.2010, Zugang am 09.08.2017 über

→ <http://sci.esa.int/soho/47806-lasco-c2-image-of-a-cme/>

den tatsächlichen Auswirkungen können daraufhin kritisch diskutiert und mögliche Gründe für den glimpflichen Verlauf können vorgeschlagen werden. So lässt sich beispielsweise erklären, dass die Astronauten keiner lebensgefährlichen Strahlung ausgesetzt waren, da sie aufgrund der Vorwarnungen keine Aktivitäten außerhalb der Raumfahrzeuge durchführten und sich zu ihrem Schutz in dem am besten geschützten Bereich der ISS aufhielten. Auch die geringen Schäden an den meisten Satelliten und bei der Stromversorgung lassen sich mithilfe der Schutzmaßnahmen begründen, die aufgrund der Warnungen getroffen werden konnten.

Anschließend wird empfohlen, die wachsende Notwendigkeit für die intensive Erforschung des Weltraumwetters zu thematisieren. Dabei können die Schülerinnen und Schüler unter anderem diskutieren, welche Folgen ein Worst-Case-Szenario für die Menschheit haben könnte. Auch Überlegungen, wie man zukünftig Menschen und Technik vor den schädlichen Auswirkungen schützen könnte, sind interessante und aktuelle Themen in der Wissenschaft und verdeutlichen die Relevanz, bei der rasanten Entwicklung von Technik und Raumfahrt die Risiken zu beachten und Schutzmaßnahmen zu bedenken.

In diesem abschließenden Teil des didaktischen Vorschlags soll ein besonderer Schwerpunkt auf der kommunikativen Interaktion zwischen den Schülerinnen und Schülern liegen, bei denen sie kritisch bewerten, reflektieren und Vorschläge argumentativ begründen. Ziel dieser Reihe sollte immer sein, Interesse und Motivation der Schülerinnen und Schüler zu fördern, während physikalische und fächerübergreifene Themen behandelt und bereits genannte verschiedene Kompetenzen weiterentwickelt werden.

# Kapitel 8

## Fazit und Ausblick

**Was leistet diese Arbeit?**

**Welche weiteren Zugänge zu Informationen und Materialien bieten sich noch an?**

**Welche Bedeutung wird Weltraumwetter in der Schule haben?**

Ziel dieser Arbeit war zu zeigen, wie das Weltraumwetter in den Physikunterricht eingebunden werden kann. Dafür wurde zunächst ein fachlicher Überblick der relevanten physikalischen Inhalte bezüglich der Sonne und der Erde gewährt. Auf dieser fachlichen Grundlage aufbauend wurden zuerst exemplarische Highlights genannt, anhand derer Schülerinnen und Schüler an Themen des Weltraumwetters herangeführt und entsprechende Kompetenzen gefördert werden können. Ein konkreter didaktischer Vorschlag für die Einbindung von Weltraumwetter sollte sowohl exemplarische Anregungen geben als auch verdeutlichen, auf welche Weise ein zunächst kompliziert wirkendes Thema interessant für den schulischen Gebrauch reduziert und integriert werden kann.

Dabei wurde sich bewusst für die gründliche Aufbereitung der Daten und der Inhalte, aber gegen eine konkrete Planung der Reihe entschieden, da Entscheidungen über den Umfang, die Tiefe, den Schwierigkeitsgrad und die Sozialformen beim Arbeiten mit Blick auf die individuellen Bedürfnisse der Lerngruppen und die Präferenzen der durchführenden Lehrerinnen und Lehrer getroffen werden sollten. Dementsprechend handelt es sich bei den gemachten Vorschlägen um Anregungen, den Physikunterricht mithilfe von spannenden Themen wie dem Weltraumwetter interessant zu gestalten.

Auch wenn astrophysikalische Themen derzeit wenig Raum im Physikunterricht finden, gibt es dennoch Bemühungen, Materialien und Ideen für Astrophysik in der Schule und in der Lehre zur Verfügung zu stellen.

Ein Beispiel dafür ist eine in der Zeitung „Space Weather Quarterly“ beschriebene zweiwöchige Summer School, in der Studentinnen und Studenten in dem „Center for Integrated Space Weather Modeling“ (CISM) die Gelegenheit bekamen, anhand von didaktisch aufbereiteten Materialien einen Einblick in die Astrophysik und das Weltraumwetter zu erlangen (Simpson, 2004).

In einer weiteren Ausgabe dieses sehr informativen Magazins erschien ein Artikel, der von zwei Lehrern in den USA berichtet, die Astrophysik aktiv in ihren Unterricht integrieren (Kumar, 2008). Dabei wird unter anderem die Website [Windows to the Universe](#) der National Earth Science Teachers Association empfohlen, die zu vielen spannenden Themen wie auch dem Welt-

raumwetter leicht verständlich Informationen präsentiert und Materialien bereitstellt. Ebenfalls wird auf die Website des hier bereits oft genannten SWPC verwiesen, die einen sehr umfassenden Bereich für Lehrerinnen und Lehrer aufweist (<http://www.swpc.noaa.gov/content/education-and-outreach>). In diesem befindet sich unter anderem eine große Auswahl von Materialien, aber auch eine vollständige Unterrichtsplanung, die verschiedene mögliche Themen rund um die Sonnenphysik und das Weltraumwetter von Klasse sieben bis zwölf beinhaltet ([Curriculum Guide for Teachers](#)).

Doch auch auf spielerische Art und Weise wird versucht, astrophysikalische Themen spannend aufzubereiten. Ein besonders interessantes Beispiel dafür ist die Comic Buch Serie „Mol and her robotic dog Mirubo“, die ursprünglich von einer japanischen Universität entwickelt wurde, aber mittlerweile in über 20 Sprachen übersetzt wurde und sich mit Fragen wie „Was ist der Sonnenwind?“ auseinandersetzt (ebd., S. 15).

Obwohl nun verschiedene Möglichkeiten präsentiert wurden, an Informationen und Materialien zu gelangen, bleibt es die Realität, dass in Deutschland bisher nur selten diese Gelegenheiten genutzt werden. Die Lektüre dieser Arbeit soll daher anregen, sich als Lehrerin oder Lehrer aktiv zu informieren, zu engagieren und astrophysikalische Themen wie das Weltraumwetter in ihren Unterricht zu integrieren. Ein bedeutender Vorteil besteht in der Steigerung der Motivation zugunsten von spannenden Themen sowohl für die Schülerinnen und Schüler als auch für die Lehrerinnen und Lehrer. Zusätzlich wird in Zukunft insbesondere das Weltraumwetter für die fortschreitende Technologisierung und Raumfahrt von immer größerer Bedeutung für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Dabei besteht ein erster Schritt darin, für die kommenden Generationen ein Bewusstsein für die Relevanz des Weltraumwetters zu schaffen, dessen Grundstein bereits während der Bildung in der Schule gelegt wird.

„Education is the most powerful weapon we can use to change the world.“  
([Mandela, 2012](#))

# Literaturverzeichnis

- Akasofu, S.I., Chapman, S.: 1972, *Solar-Terrestrial Physics: An account of the wave and particle radiations from the quiet and the active sun, and of the consequent terrestrial phenomena*, Oxford University Press, Oxford.
- Aristoteles/Ross, W.D.: 1908, *Meteorologica*, Oxford Clarendon Press, Oxford.
- Bahcall, J.N., Pinsonneault, M.H., Basu, S.: 2001, Solar Models : Current Epoch and Time Dependences, Neutrinos and Helioseismological Properties. *The Astrophysical Journal* **555**, 990 – 1012.
- Baker, D.N.: 2009, What Does Space Weather Cost Modern Societies? *Space Weather Quarterly* **6**, 4 – 5.
- Baker, D.N., Daglis, I.A., Daly, E.J., Kappenman, J.G., Panasyuk, M.I.: 2004, Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. *Space Weather Quarterly* **1**, 7 – 9.
- Benz, A.O.: 2008, Flare Observations. *Living Reviews in Solar Physics* **5**.  
<http://dx.doi.org/10.12942/lrsp-2008-1>.
- Bernhard, H.: 2000, 40 Jahre Astronomieunterricht in Ostdeutschland. *Astronomie+Raumfahrt* **1**, 28 – 33.
- Bornarel, J., Lilensten, J.: 2006, *Space Weather, Environment and Societies*, Springer, Niederlande.
- Bothmer, V., Jakowsky, N.: 2007, Das Weltraumwetter. *Sterne und Weltraum Special*.
- Choudhuri, A.R.: 2003, The solar dynamo as a model of the solar cycle. In: Dwivedi, B.N. (ed.) *Dynamic Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, 103 – 127.
- Christensen-Dalsgaard, J., Thompson, M.J.: 2003, Rotation of the solar interior. In: Dwivedi, B.N. (ed.) *Dynamic Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, 55 – 74.
- Die Bibel: 2016, *Die Bibel – Einheitsübersetzung Altes und Neues Testament*, Herder Verlag, Freiburg.
- Engvold, O.: 2015, Description and Classification of Prominences. In: Engvold, O., Vial, J.C. (eds.) *Solar Prominences*, 31 – 60.
- Gordon Emslie, A., Tandberg-Hanssen, E.: 2009, *The physics of solar flares*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Guetersloh, S., Zapp, N.: 2010, Energetic particles and manned spaceflight. In: Schrijver, C.J., Siscoe, G.L. (eds.) *Heliophysics Space Storms and Radiation: Causes and Effects*, Cambridge University Press, Cambridge, 359 – 381.

- Hamel, J.: 2009, Heinrich Samuel Schwabe und die Entdeckung der Periodizität der Sonnenflecken. *Astronomie+Raumfahrt* **114**, 37–38.
- Hanslmeier, J.: 2009, Gefahr von der Sonne. *Astronomie+Raumfahrt* **114**, 9–12.
- Hearnshaw, J.: 2009, *Astronomical spectrographs and their history*, Cambridge University Press, New York.
- Heidrich, W.: 2009, Geisterhafte Nordlichter. *Astronomie+Raumfahrt* **114**, 17–18.
- Hoffmann, L., Häußler, P., Lehrke, M.: 1998, *Die IPN-Interessenstudie Physik*, IPN, Kiel.
- Kappenman, J.G.: 2005, An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms. *Space Weather* **3**(8).
- Kappenmann, J.G.: 2004, The Evolving Vulnerability of Electric Power Grids. *Space Weather Quarterly* **1**, 10–12.
- Kegel, W.H.: 1998, *Plasmaphysik: Eine Einführung*, Springer, Berlin.
- Kleckler, B.: 2009, Die Physik des erdnahen Weltraums. *Astronomie+Raumfahrt* **114**, 13–16.
- Kumar, M.: 2006, Space Weather and the Sun: The Search to Understand our Turbulent Star. *Space Weather Quarterly* **3**, 14–19.
- Kumar, M.: 2008, Space Weather for Kids. *Space Weather Quarterly* **5**, 12–16.
- Lauterbach, R.: 1975, *Physik des Planeten Erde*, Akademie-Verlag, Berlin.
- Lindner, K.: 1997, Die Sonne im Astronomieunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Astronomie+Raumfahrt* **1**, 14–30.
- Mandela, N.R.: 2012, *Notes to the Future – Words of Wisdom*, Atria Books, New York.
- Muckenfuß, H.: 1995, *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*, Cornelsen Verlag, Darmstadt.
- Nahar, S.N., Pradhan, A.K.: 2011, *Atomic Astrophysics and Spectroscopy*, Cambridge University Press, Cambridge.
- NASA Space Science Data Coordinated Archive/Williams, D.R.: *Earth Fact Sheet*.  
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>.
- NASA Space Science Data Coordinated Archive/Williams, D.R.: *Sun Fact Sheet*.  
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>.
- National Research Council: 2008, *Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report*, The National Academies Press, Washington, DC.
- Odenwald, S.: 2010, Introduction to space storms and radiation. In: Schrijver, C.J., Siscoe, G.L. (eds.) *Heliophysics Space Storms and Radiation: Causes and Effects*, Cambridge University Press, Cambridge, 15–43.
- Parker, E.: 2005, Shielding Space Explorers from Cosmic Rays. *Space Weather Quarterly* **2**, 7–10.

- Parks, G.K.: 2004, *Physics of Space Plasmas*, Westview Press, Oxford.
- Prenzel, M., Sälzer, C., Klieme, E., Köller, O. [http://www.pisa.tum.de/fileadmin/w00bgi/www/Berichtband\\_und\\_Zusammenfassung\\_2012/PISA\\_EBook\\_ISBN3001.pdf](http://www.pisa.tum.de/fileadmin/w00bgi/www/Berichtband_und_Zusammenfassung_2012/PISA_EBook_ISBN3001.pdf).
- Prölss, G.W.: 2001, *Physik des erdnahen Weltraums*, Springer Verlag, Berlin.
- Resnick, R., Halliday, D.: 1994, *Physik Teil 2*, Walter de Gruyter, Berlin.
- Schlegel, B., Schlegel, K.: 2011, *Polarlichter zwischen Wunder und Wirklichkeit*, Springer, Heidelberg.
- Schmidt, D., Schüssler, M.: 2009, Der Aktivitätszyklus der Sonne. *Astronomie+Raumfahrt* **114**, 28 – 31.
- Schneider, P.: 2008, *Einführung in die Extragalaktische Astronomie und Kosmologie*, Springer, Heidelberg.
- Simpson, S.: 2004, A Sun – to – Mud Education in two weeks. *Space Weather Quarterly* **1**, 6 – 8.
- Siscoe, G.L., Silverman, S.M., Siebert, K.D.: 2002, Ezekiel and the Northern Lights: Biblical Aurora Seems Plausible. *Eos* **83**, 173 – 179.
- Soffel, H.C.: 1991, *Paläomagnetismus und Archäomagnetismus*, Springer Verlag, Berlin.
- Stenflo, J.O.: 1994, *Solar Magnetic Fields*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Niederlande.
- Stix, M.: 1989, *The Sun*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Švestka, Z.: 2003, Solar activity. In: Dwivedi, B.N. (ed.) *Dynamic Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, 238 – 261.
- Warmuth, A.: 2009, Sonnenstürme und Weltraumwetter. *Astronomie+Raumfahrt* **114**, 21 – 28.
- Webb, D.F.: 2015, Eruptive Prominences and Their Association with Coronal Mass Ejections. In: Engvold, O., Vial, J.C. (eds.) *Solar Prominences*, 411 – 432.
- Weigert, A., Wendker, H.J., Wisotzki, L.: 2010, *Astronomie und Astrophysik*, Wiley-VCH, Weinheim.
- Youssef, M.: 2012, On the relation between the CMEs and the solar flares. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* **1**, 172 – 178.
- Zimmermann, O.: 1990, Zur Lage des Astronomieunterrichts in der Bundesrepublik Deutschland. *Astronomie in der Schule* **3**, 80 – 83.
- Zirker, J.B.: 2002, *Journey from the Center of the Sun*, Princeton University Press, Princeton.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank all jenen aussprechen, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben. Besonders möchte ich meine Betreuer Prof. Dr. Carsten Denker und Prof. Dr. Burkhard Priemer dabei hervorheben, ohne deren konstruktive Hilfen und Korrekturen diese Arbeit nicht die jetzige Qualität erreicht hätte. Weiterhin gilt mein Dank den Mitgliedern der Arbeitsgruppe der optischen Sonnenphysik am AIP, die mich freundlich aufgenommen und mir immer mit großer Bereitschaft geholfen haben.

Des Weiteren danke ich noch meiner Familie und insbesondere meinem Vater, der mit seinem kritischen Blick auf diese Arbeit meinen Horizont erweitert hat. Abschließend möchte ich tiefe Dankbarkeit meinem Freund gegenüber ausdrücken, der mich von der ersten bis zur letzten Sekunde in allen Höhen und Tiefen unterstützt hat.

# Anhang

## Reduzierte Daten für die Röntgenstrahlungsflussdichte und die Magnetfeldstärke

xs = "Röntgenstrahlung mit kurzer Wellenlänge (0.05 - 0.3 nm)"; Flussdichte in  $W\ m^{-2}$

xl = "Röntgenstrahlung mit langer Wellenlänge (0.1 - 0.8 nm)"; Flussdichte in  $W\ m^{-2}$

B = "Feldstärke des Erdmagnetfeldes"; Feldstärke in pT; gemessen in Boulder, Colorado

Uhrzeit	Röntgenstrahlung		Magnetfeld
	xs	xl	B
0:00	2,92702E-07	5,21055E-06	20,93121
0:10	1,44896E-07	3,58296E-06	20,93081
0:20	7,2517E-08	2,60754E-06	20,93219
0:30	8,74524E-08	2,59985E-06	20,93222
0:40	3,38805E-07	4,03187E-06	20,92419
0:50	2,19462E-07	3,623E-06	20,91973
1:00	2,4006E-07	4,22086E-06	20,91983
1:10	9,67566E-08	2,92646E-06	20,92616
1:20	9,06707E-08	2,76314E-06	20,92571
1:30	6,16941E-07	6,33329E-06	20,93372
1:40	3,04508E-07	5,12137E-06	20,93532
1:50	9,5704E-08	3,02212E-06	20,93081
2:00	1,27639E-07	3,01829E-06	20,93631
2:10	1,3945E-07	3,2786E-06	20,94234
2:20	8,12323E-08	2,7856E-06	20,94381
2:30	5,61234E-08	2,36655E-06	20,96023
2:40	5,13023E-08	2,19743E-06	20,97972
2:50	9,02508E-08	2,55947E-06	20,96725
3:00	5,86695E-08	2,31776E-06	20,96475
3:10	1,22699E-07	2,77498E-06	20,96198
3:20	1,85636E-07	3,44906E-06	20,9591
3:30	1,71253E-07	3,82487E-06	20,96575
3:40	1,32736E-07	3,50505E-06	20,95688
3:50	1,09979E-07	3,14699E-06	20,95004
4:00	1,71834E-07	3,78275E-06	20,95076
4:10	2,3684E-07	4,4225E-06	20,95439
4:20	1,93959E-07	4,22648E-06	20,95756
4:30	1,73062E-07	4,03566E-06	20,95587
4:40	1,59761E-07	3,838E-06	20,95828
4:50	1,55567E-07	3,90002E-06	20,96148
5:00	2,34749E-07	4,51403E-06	20,95689
5:10	4,06232E-07	5,85586E-06	20,95149
5:20	1,68197E-07	4,09024E-06	20,95054
5:30	1,21806E-07	3,61821E-06	20,95194
5:40	2,03915E-07	4,43431E-06	20,95543
5:50	2,27345E-07	4,77709E-06	20,95944
6:00	2,92945E-07	5,39417E-06	20,96553
6:10	1,19967E-07	3,64248E-06	21,06568
6:20	7,48022E-08	2,75084E-06	21,06742
6:30	8,32959E-08	2,69585E-06	21,10848
6:40	1,23778E-07	2,95296E-06	21,17622
6:50	6,99456E-08	2,50941E-06	21,26512

7:00	5,10404E-08	2,17574E-06	21,19226
7:10	5,81389E-08	2,21607E-06	21,12577
7:20	9,40993E-08	2,58471E-06	21,08796667
7:30	1,52686E-07	3,45182E-06	21,01634
7:40	1,95968E-07	3,98926E-06	20,92229
7:50	3,88663E-07	5,51226E-06	20,88343
8:00	2,76675E-07	5,29585E-06	20,8363
8:10	2,86601E-07	4,82483E-06	20,84794
8:20	5,44463E-07	6,38459E-06	20,82573
8:30	4,72546E-07	6,65244E-06	20,79355
8:40	6,30279E-07	7,75608E-06	20,80316
8:50	6,80607E-07	7,87509E-06	20,82495
9:00	3,38116E-07	6,37471E-06	20,79264
9:10	3,33451E-07	6,46471E-06	20,80192
9:20	2,52585E-07	5,80271E-06	20,8274
9:30	1,91143E-07	5,09589E-06	20,85216
9:40	2,95243E-07	5,49111E-06	20,84226
9:50	1,52754E-06	9,87312E-06	20,84298
10:00	2,63093E-06	1,74574E-05	20,8292
10:10	2,63347E-06	2,03257E-05	20,83056
10:20	5,3217E-06	2,90779E-05	20,82532
10:30	1,3747E-05	5,74421E-05	20,77469
10:40	1,63802E-05	8,11889E-05	20,78708
10:50	1,31516E-05	8,04052E-05	20,81689
11:00	0,000284919	0,000929691	20,82448
11:10	0,00043425	0,001553328	20,82031
11:20	0,000224993	0,000897256	20,79644
11:30	0,00011295	0,000559404	20,81012
11:40	6,47332E-05	0,00036447	20,78571
11:50	4,1954E-05	0,000255418	20,79527
12:00	2,96221E-05	0,000189964	20,82065
12:10	2,22122E-05	0,000148299	20,82664
12:20	1,80249E-05	0,00011992	20,83077
12:30	1,48349E-05	0,00010331	20,84012
12:40	1,18978E-05	8,61363E-05	20,86099
12:50	1,02811E-05	7,59734E-05	20,87756
13:00	8,43935E-06	6,42571E-05	20,88068
13:10	7,21509E-06	5,58713E-05	20,89243
13:20	6,30086E-06	4,97931E-05	20,88547
13:30	5,54655E-06	4,48134E-05	20,88561
13:40	4,93586E-06	4,02672E-05	20,89878
13:50	4,55986E-06	3,74145E-05	20,9046
14:00	4,13031E-06	3,44369E-05	20,90744
14:10	3,7476E-06	3,16415E-05	20,89751
14:20	3,51307E-06	2,95063E-05	20,91997
14:30	3,27133E-06	2,76706E-05	20,89399
14:40	2,83996E-06	2,59691E-05	20,89021
14:50	3,28049E-06	2,69161E-05	20,87271
15:00	3,35346E-06	2,93835E-05	20,87458
15:10	2,50498E-06	2,38878E-05	20,89159
15:20	2,2609E-06	2,16704E-05	20,88071
15:30	2,15436E-06	2,08572E-05	20,87099

15:40	2,01216E-06	2,00925E-05	20,87662
15:50	1,83548E-06	1,88456E-05	20,89539
16:00	1,65511E-06	1,74751E-05	20,92467
16:10	1,8682E-06	1,97611E-05	20,93828
16:20	1,63652E-06	1,92702E-05	20,94917
16:30	1,31018E-06	1,62208E-05	20,90655
16:40	1,08756E-06	1,38879E-05	20,88877
16:50	9,8622E-07	1,31506E-05	20,7909
17:00	8,69348E-07	1,22614E-05	20,78471
17:10	7,93347E-07	1,1623E-05	20,80803
17:20	7,238E-07	1,09811E-05	20,88717
17:30	6,44224E-07	1,02813E-05	20,8902
17:40	5,72768E-07	9,56895E-06	20,85687
17:50	5,12355E-07	8,85429E-06	20,76178
18:00	4,73875E-07	8,28921E-06	20,78478
18:10	4,23069E-07	7,70045E-06	20,83233
18:20	3,93932E-07	7,19586E-06	20,79016
18:30	3,94108E-07	7,11292E-06	20,74328
18:40	4,07254E-07	7,21644E-06	20,694
18:50	3,82421E-07	7,0046E-06	20,68412
19:00	5,02964E-07	7,42058E-06	20,68235
19:10	5,01069E-07	7,71548E-06	20,60533
19:20	5,02547E-07	7,45828E-06	20,53984
19:30	3,47686E-07	6,49839E-06	20,56491
19:40	2,78338E-07	5,68498E-06	20,5348
19:50	3,80821E-07	6,43137E-06	20,50334
20:00	3,26523E-07	5,99047E-06	20,50203
20:10	3,34378E-07	5,93975E-06	20,50696
20:20	3,94267E-07	6,30879E-06	20,55037
20:30	4,4032E-07	6,61099E-06	20,62229
20:40	4,22165E-07	6,71648E-06	20,7594
20:50	3,64628E-07	6,11363E-06	20,92842
21:00	3,51263E-07	5,73382E-06	20,99032
21:10	2,96247E-07	5,07752E-06	21,00006
21:20	2,68877E-07	4,87668E-06	20,95181
21:30	4,1562E-07	5,48388E-06	20,89277
21:40	3,19852E-07	5,26433E-06	20,84585
21:50	2,48784E-07	4,64869E-06	20,81715
22:00	2,18581E-07	4,16429E-06	20,81708
22:10	2,22523E-07	4,05483E-06	20,85802
22:20	2,16362E-07	3,91034E-06	20,89471
22:30	2,25539E-07	3,81092E-06	20,95544
22:40	2,32993E-07	3,93685E-06	20,92724
22:50	2,50753E-07	4,15563E-06	20,93093
23:00	2,78999E-07	4,14647E-06	20,88394
23:10	2,99007E-07	4,36974E-06	20,85648
23:20	3,31467E-07	4,52224E-06	20,78975
23:30	3,54981E-07	4,72585E-06	20,75076
23:40	2,34549E-07	3,72126E-06	20,77416
23:50	2,42516E-07	3,69333E-06	20,79479