

Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik
Fakultät Physik und Astronomie

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

Sonnenflecken
Beobachtung und Vermessung im Physikunterricht an Gymnasien

Eingereicht von
Michael Tausend

im
September 2024

Betreuer:
Dr. Stephan Lück

Prüfer:
Prof. Dr. Thomas Trefzger
Dr. Stephan Lück

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1. Historischer Einstieg	5
1.2. Zielsetzung und Legitimation des Themas	6
2. Physikalische Grundlagen zu Sonnenflecken	7
2.1. Heliographisches Koordinatensystem	7
2.2. Oberfläche der Sonne und Sonnenflecken	9
2.3. Entstehung von Sonnenflecken	12
2.3.1. Rotation der Sonne	12
2.3.2. Magnetfeld der Sonne	13
2.3.3. Entstehungsprozess der Sonnenflecken	14
2.4. Struktur von Sonnenflecken	16
2.5. Sonnenfleckstatistik	18
2.5.1. Klassifizierung von Sonnenflecken	18
2.5.2. Relativzahl der Sonnenflecken und der Schwankung	21
2.6. Beobachtungseffekte auf der Sonnenoberfläche	22
2.6.1. Randverdunklung	22
2.6.2. Wilson-Effekt	24
3. Digitale Werkzeuge zur Analyse von Sonnenflecken	27
3.1. Bildbeschaffung mittels des SDO	27
3.2. SunMap	30
3.3. Solarmonitor und Solarmap	33
4. Mögliche Sonnenfleckanalysen im Schulkontext	35
4.1. Bestimmung der Sonnenfleckrelativzahl	36
4.2. Lagebestimmung von Sonnenflecken und ihre Eigenbewegung	38
4.2.1. Positionsbestimmung der Hauptflecken einer aktiven Region	38
4.2.2. Eigenbewegung der Hauptflecken einer aktiven Region	41
4.3. Bestimmung der differentiellen Rotation	43
5. Fazit	49

Literaturverzeichnis	51
A. Anhang	55

1. Einleitung

1.1. Historischer Einstieg

Die Beobachtung von Sonnenflecken gilt als eine der ältesten Tätigkeiten der Astronomie. Dies ist nicht sonderlich verwunderlich, denn die Sonne als zentrale Energiequelle unseres Lebens stellt wohl schon immer einen außerordentlichen Reiz dar. Bereits im alten China wurden bei tiefstehender Sonne die ersten Sonnenflecken mit dem bloßen Auge registriert und dokumentiert. (vgl. Hanslmeier (2020, S.43))

Dass diesen Beobachtungen in der europäischen Antike wenig Beachtung geschenkt wurde, kann wohl auf das damals vorherrschende Weltbild zurückgeführt werden. Nach diesem war die Sonne eine perfekte und vor allem homogene Kugel. Unregelmäßigkeiten, wie sie die Sonnenflecken darstellen, wurden daher eher mit optischen Fehlern oder Ähnlichem verargumentiert, als dass das Verständnis des Universums in Frage gestellt wurde.

So dauerte es bis zum Anfang des 17. Jahrhunderts bis die ersten Veröffentlichungen über diese Phänomene berichteten. Vorreiter dabei waren Galileo Galilei, Christoph Schreiner sowie Johannes Fabricius. Sie profitierten mitunter von der Entwicklung von Teleskopen, die einen genaueren Blick auf die Sonne ermöglichten. Vor allem die beiden erst genannten Forscher konnten sich allerdings nicht einigen, wer zuerst Sonnenflecken beobachtet hatte. Doch diese Debatte führte nicht nur zu einem besseren Verständnis der Sonnenaktivität, sondern markierte auch einen wichtigen Moment in der Entstehung der modernen Wissenschaft, da Beobachtungen zunehmend experimentell verifiziert wurden.

Aus dieser Annäherung an die wissenschaftliche Arbeit, wie wir sie heute verstehen, konnten schnell die ersten Erkenntnisse über unser Zentralgestirn gefolgert werden. Doch auch heute noch stehen einige Fragen zu den Aktivitäten der Sonne buchstäblich in den Sternen und ein Blick auf sie lohnt sich noch genauso wie in der Zeit der Aufklärung.

1.2. Zielsetzung und Legitimation des Themas

Das Thema der Sonnenflecken ist im Lehrplan PLUS der Gymnasien in Bayern im Astrophysikteil der 13. Jahrgangsstufe verankert und stellt daher einen für den Schulalltag relevanten Inhalt dar. Diese Arbeit wendet sich an Physiklehrende, die eben diese Jahrgangsstufe in Astrophysik unterrichten (werden). Sie ist einer Handreichung für diesen Unterrichtsinhalt gleichzusetzen und versucht den Lehrenden einen guten Einstieg in die Thematik der Sonnenflecken zu geben. Hierzu werden nach dieser kleinen Einleitung zunächst einige physikalische Grundlagen gelegt, welche für die späteren Erarbeitungen von Relevanz sein werden. Wichtig dabei ist zu erwähnen, dass das Thema der Sonnenphysik aufgrund ihrer Ausführlichkeit auf die Ausschnitte heruntergebrochen wurde, die für die Bildung und Untersuchung von Sonnenflecken besonders relevant sind.

Im dritten Teil der Arbeit sollen technische Hilfsmittel vorgestellt werden. Große Bedeutung erhalten diese vor allem bei der wissenschaftlichen Untersuchung von Sonnenflecken. Abschließend wird eine Auswahl an Auswertungsmöglichkeiten von Sonnenfleckbeobachtungen geschildert und anhand von beispielhaften Auswertungen vorgestellt. Diese sind so gewählt, dass eine Umsetzung in der gymnasialen Oberstufe möglich ist. Besonderer Schwerpunkt der Arbeit ist es, den Lehrenden eine Möglichkeit aufzuzeigen und an die Hand zu geben, die wissenschaftliche Arbeit in der Praxis den Lernenden näher zu bringen. Es sollen dabei insbesondere Kompetenzen aus den Bereichen des Experimentierens, Auswertens und Schlussfolgerns adressiert werden, wie sie im Lehrplan im Kompetenzbereich für das Fachprofil Physik festgehalten wurden.

2. Physikalische Grundlagen zu Sonnenflecken

2.1. Heliographisches Koordinatensystem

Um die Phänomene, die sich auf der Sonne abspielen, genau zu analysieren und damit wissenschaftliche Arbeit zu betreiben, ist eine exakte Positionsbestimmung auf der Sonnenoberfläche von besonderer Notwendigkeit. Die Sonne ist eine Kugel, die sich um eine feste Achse dreht. Entsprechend ist eine Orientierung auf deren Oberfläche anhand von Kugelkoordinaten sinnvoll. Festgelegt wurden hierbei die imaginären Durchstoßpunkte der Rotationsachse durch die Sonnenoberfläche als die beiden Pole des Koordinatensystems. „Dabei nennt man den Nordpol jenen Punkt, der von der Erde aus gesehen zum Nordhimmel weist.“ (Hoell et al. (2017, S.3)) Ähnlich zum Vorgehen auf der Erde werden davon ausgehend die heliographischen Längen und Breitengrade definiert. Hierbei wird als Sonnenäquator der längste Breitenkreis bezeichnet. „Die heliographische Breite wird vom Sonnenäquator aus nach Norden von 0° bis $+90^\circ$ und nach Süden von 0° bis -90° gezählt.“ (Reinsch et al. (1999, S.224)) Etwas problematischer ist hingegen die Einteilung der Längengrade, denn es gibt keinen ausgezeichneten Punkt durch den man den 0-Längengrad legen könnte. Zum Vergleich: Auf der Erde wird dieser einfach als der Längengrad definiert, der durch die englische Stadt Greenwich nahe London geht. Aus diesem Grund ist es notwendig, bei jeder zu analysierenden Aufnahme den 0-Meridian zu bestimmen. Hierbei werden in der Praxis vor allem zwei Möglichkeiten besonders oft verwendet. Zum einen gibt es die Möglichkeit den Zentralmeridian der Aufnahme als 0° -Längengrad festzulegen und anhand dieses Längengrades die Positionsbestimmung fortzuführen. Zum anderen ist es auch möglich sich an einem international festgelegten Nullmeridian zu orientieren, um eine einfache Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten zu ermöglichen. „Der international festgelegte Nullmeridian ist jener Meridian, der am 01.01.1854 um 12 Uhr Weltzeit (UT) durch den aufsteigenden Knoten des Sonnenäquators auf der Ekliptik ging.“ (Hoell et al. (2017, S.4))

Dieses beschriebene Koordinatennetz (dargestellt in Abb. 2.1) rotiert gleichförmig mit der mittleren Rotationsperiode der Sonne also $T = 25,38 \text{ Tage}$ (vgl. Hanslmeier (2020, S.258)). Mehr zum Thema Rotation der Sonne ist in einem der nachfolgenden Kapitel zu finden.

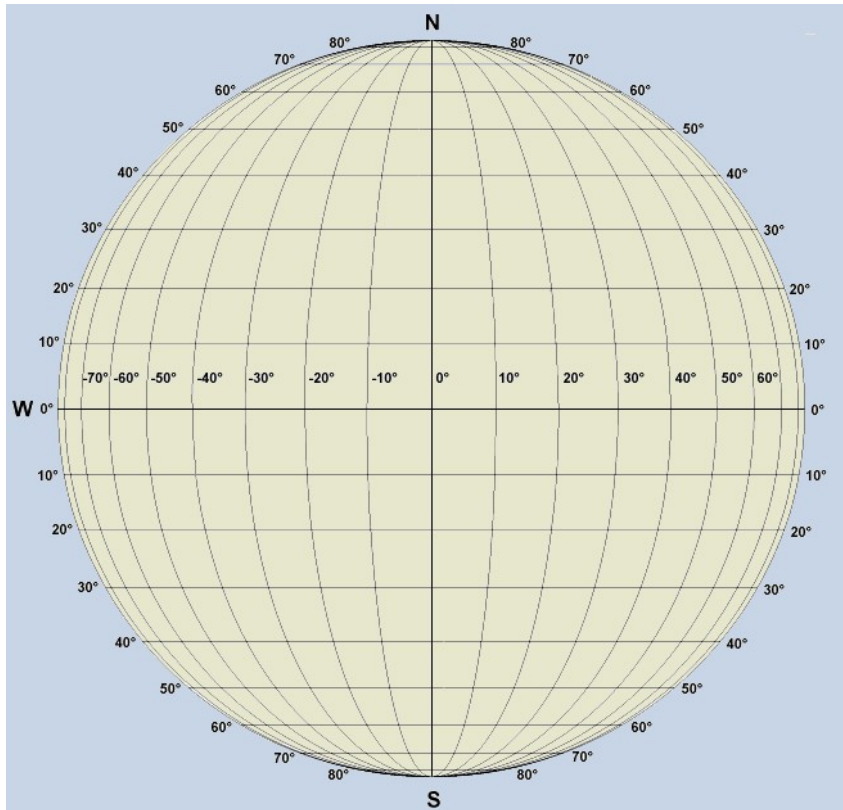


Abbildung 2.1.: Das heliographische Koordinatennetz
(Quelle: Fachgruppe Sonne (2022))

Zusätzlich sind der Sonnenäquator und der Erdäquator gegeneinander verkippt. Dies führt dazu, dass sich beobachtete Phänomene, die sich geradlinig auf der Sonnenoberfläche bewegen, von der Erde aus gesehen auf Ellipsen kreisen. Diese Neigung ist nicht stabil, sondern ist von der Erdposition im Vergleich zur Sonne abhängig. Damit ergibt sich eine jährliche Schwankung, die zur Folge hat, dass sich der Sonnenscheibenmittelpunkt auf den heliographischen Breitengraden zwischen $-7,25^\circ$ und $7,25^\circ$ befindet. Diese Abweichung vom Koordinaten-Nullpunkt wird üblicherweise mit B_0 angegeben. (vgl. Hoell et al. (2017, S.5)) Hinzu kommt eine Schwankung der Sonnenachse. „Der Positionswinkel P - manchmal auch P_0 genannt - der Sonnenachse gegen die Nord-Süd-Richtung schwankt zwischen $-26,4^\circ$ und $26,4^\circ$ (+ = Neigung der Sonnenachse nach Osten).“ (Hoell et al. (2017, S.5))

Der letzte Wert, der bei der Positionsbestimmung noch von großen Nutzen sein kann, ist der zur Überführung der beiden Möglichkeiten der Festlegung des 0-Meridians. L_0 gibt nämlich genau den Längengrad an, auf dem sich der Zentralmedian im (international festgelegten) Carrington'schen Koordinatensystem zur Beobachtungszeit befindet.

„Die täglichen Werte für B_0 , P_0 und L_0 sind in astronomischen Jahrbüchern und im Mitteilungsblatt SONNE der Vereinigung der Sternfreunde e. V. verzeichnet.“ (Reinsch et al. (1999, S.226)) Alle beschriebenen Größen werden in Abb. 2.2 veranschaulicht.

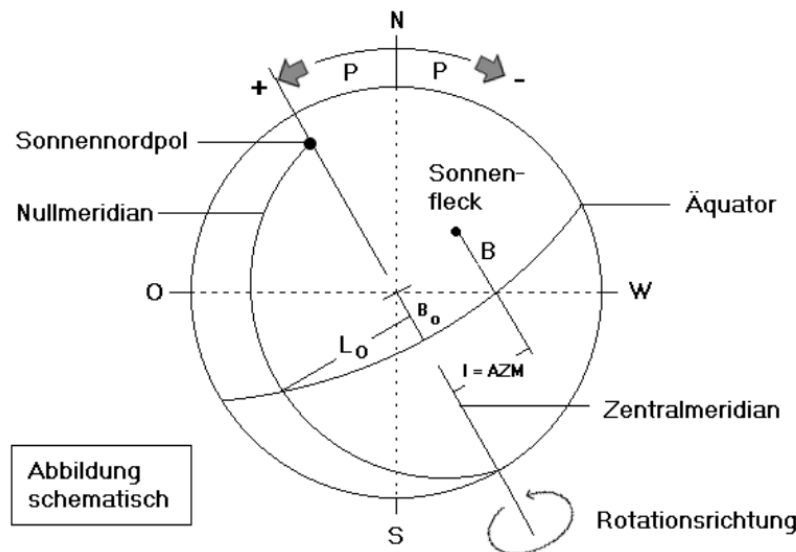


Abbildung 2.2.: Verkipptes Sonnenkoordinatennetz (Quelle: Hoell et al. (2017, S.4))

2.2. Oberfläche der Sonne und Sonnenflecken

Blickt man mit entsprechender Ausrüstung in Richtung Sonne, so lassen sich auf der Oberfläche einige Strukturen entdecken, die es zu untersuchen lohnt. Zunächst sei aber noch die Frage adressiert, was man als Oberfläche eines Gassterns auffasst. Die Sonne besitzt nämlich keine Kruste aus festem Material ähnlich der Erde. Als Oberfläche der Sonne wird daher meistens die Photosphäre herangezogen. Dies ist „diejenige Schicht [der Sonne], aus der fast die gesamte sichtbare Strahlung zu uns gelangt.“ (Hanslmeier (2013, S.174)) Betrachtet man nun diese Sonnenoberfläche, so fällt zunächst auf, dass die Sonne nicht homogen abstrahlt und damit über das Stefan-Boltzmann-Gesetz auch nicht überall gleich heiß ist. Es kann die sogenannte Granulation beobachtet werden. Ein Sonnenausschnitt, der diese Granulation gut zeigt, ist in Abb. 2.3 zu sehen. Diese Inhomogenität in der Sonnenintensität kann auf Konvektionsprozesse zurückgeführt werden, die sich in der

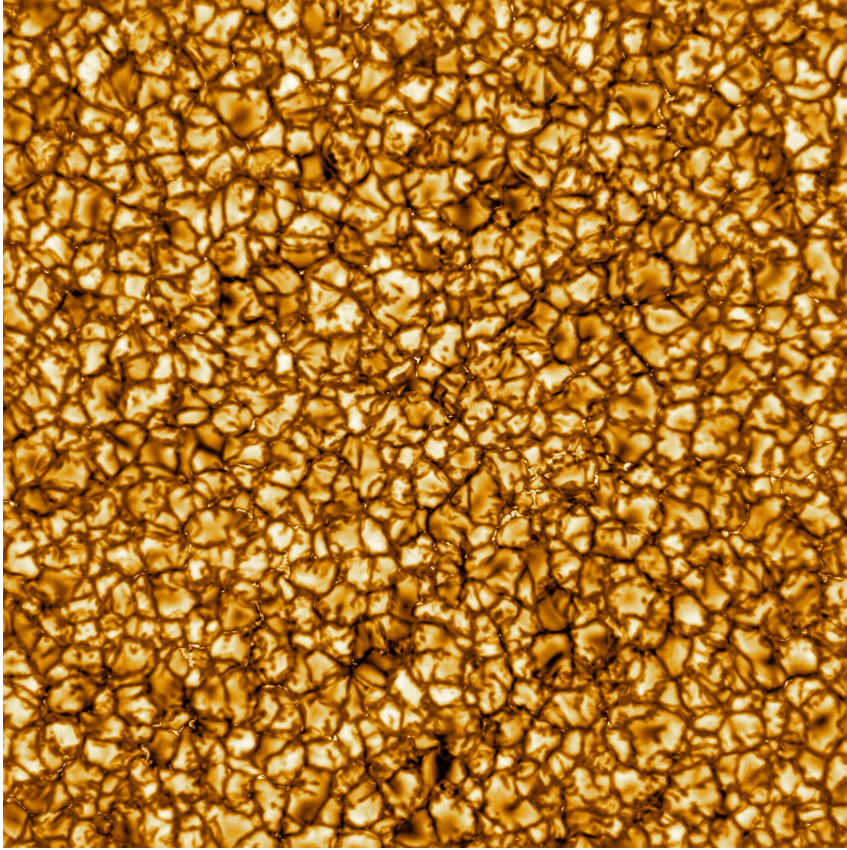


Abbildung 2.3.: Granulation der Sonnenoberfläche (Quelle: NSF (2022))

Photosphäre abspielen. „Heißes Plasma strömt nach oben, kühlt sich ab und sinkt wieder nach unten usw. Die hellen Granulen sind um 200 K bis 300 K heißer als die dunklen intergranularen Zwischenräume.“ (Hanslmeier (2020, S.268))

Neben diesen Granulen sind besonders schwarze Flecken charakteristisch für die Sonnenoberfläche. Die Sonnenflecken sind dabei Gebiete der Photosphäre, die eine deutlich geringere Temperatur aufweisen. Aufgrund der hohen Helligkeit der restlichen Sonnenoberfläche im Hintergrund erscheinen diese Gebiete sehr viel dunkler und werden oftmals als bräunlich bis schwarz beschrieben. „Die Anzahl der Sonnenflecken variiert mit einer mittleren Periode von elf Jahren, das ist der [sogenannte] *Sonnenfleckzyklus*.“ (Hanslmeier (2020, S.274)) Dieser Zyklus wird ebenso Schwabe-Zyklus genannt. Auch die Lage der Flecken während dieses Zyklus ist sehr charakteristisch. So wurde diese genauer untersucht und in den sogenannten Schmetterlingsdiagrammen veranschaulicht.

Eine solche Veranschaulichung ist in Abb. 2.4 dargestellt. Zu Beginn eines Zyklus sind die Flecken um die Breitengrade -30° und 30° zu beobachten. Wir befinden uns hier in der Phase des Aktivitätsminimums. Im Laufe des Zyklus sind immer mehr Sonnenflecken in den Breitengraden näher am Äquator zu erkennen. Zum Schluss jedes Durchgangs entstehen die Flecken in direkter Äquaturnähe und die äquatorfernen Sonnenflecken verschwinden. Im Anschluss sind auch keine Flecken am Äquator mehr zu finden und der nächste Schwabe-Zyklus beginnt. Die in Abb. 2.4 angegebene Zeitskala sind die Carrington-Rotationen. Hierbei werden „die (synodischen) Rotationen [...] seit dem 09.11.1853 um 21:38 UTC fortlaufend gezählt.“ (Wischnewski (2021, S. 738))

Neben den im Vergleich zur restlichen Photosphäre dunklen Stellen der Oberfläche, gibt es natürlich auch die Bereiche, in denen eine überdurchschnittlich hohe Temperatur vorherrscht. Diese werden als besonders hell wahrgenommen. Bezeichnet werden die heißeren Stellen der Sonnenoberfläche als Fackelgebiete oder einfach als Fackeln. Da im folgenden Fackeln keine größere Rolle mehr spielen sollen, wird an dieser Stelle auf weitere Einzelheiten hierzu verzichtet.

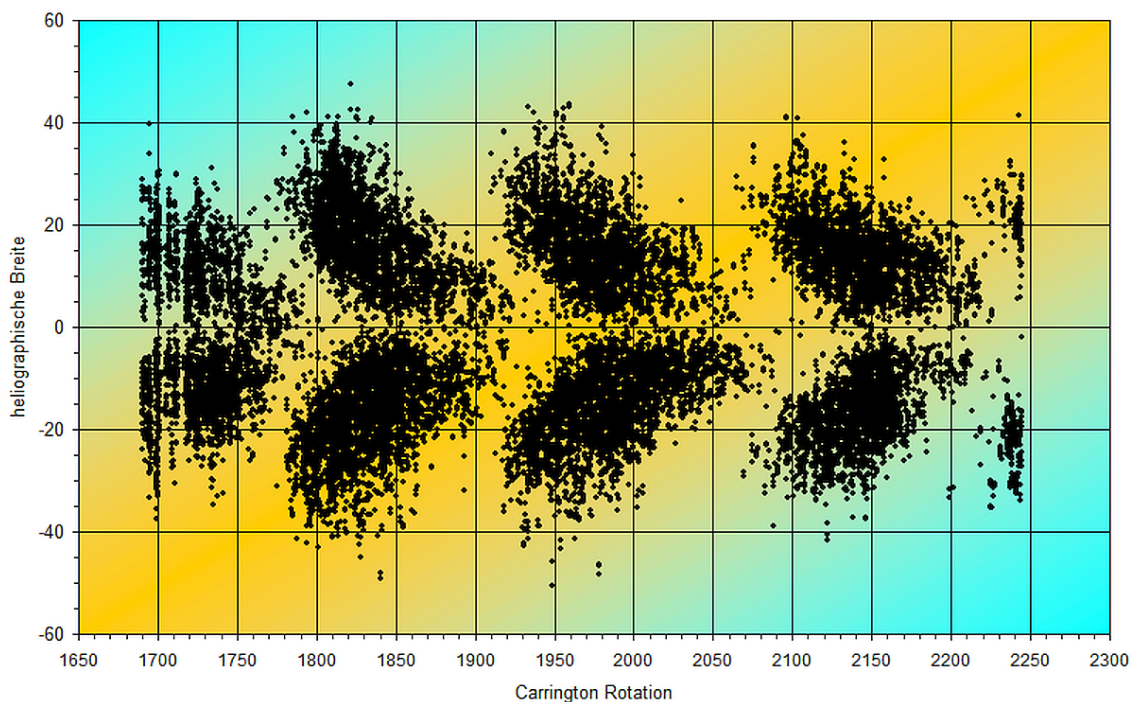


Abbildung 2.4.: Schmetterlingsdiagramm (Quelle: Möller (2021))

2.3. Entstehung von Sonnenflecken

Die Entstehung von Sonnenflecken steht stark mit den physikalischen Gegebenheiten der Sonne in Zusammenhang. Explizit sind Rotation und Magnetfeld unseres Heimatsterns für die Ausbildung von Sonnenflecken verantwortlich. Diese werden deshalb nachfolgend genauer erläutert.

2.3.1. Rotation der Sonne

Bei der Betrachtung der Sonnenrotation kristallisiert sich schnell ein großer Unterschied zu der uns auf der Erde gewohnten Rotation heraus. Die intuitive Annahme einer gleichförmigen Rotation über die gesamte Sonne hinweg ist falsch, denn „die Sonne [ist] als heiße Gas-kugel kein starrer Körper, sondern besteht quasi aus Gasringen oder -scheiben, welche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten strömen.“ (Mielke (2013, S.48)) Anhand von Beobachtungen von Sonnenflecken konnte eine differentielle Rotation in Abhängigkeit der heliographischen Breite festgestellt werden. Die Rotation lässt sich somit physikalisch in folgender Winkelgeschwindigkeit ω notieren:

$$\omega(\phi) = A + B \cdot \sin^2(\phi) \quad (2.1)$$

Dabei ist ϕ die heliographische Breite und A sowie B sind Konstanten, die näherungsweise mit $A = 14, 525^\circ/\text{Tag}$ und $B = -2, 83^\circ/\text{Tag}$ bestimmt werden können. (vgl. Möller (2022, S.15))

In Abb.2.5 ist die differentielle Rotation in einem Schaubild dargestellt. Wie aus diesem und der oben genannten Formel für die Winkelgeschwindigkeit herauszulesen ist, dreht sich die Sonne in Äquaturnähe merklich schneller als an den Polen. Damit ergeben sich synodische Rotationsdauern von 27 Tagen am Äquator und bis zu 35 Tagen an den Polen. (vgl. Comins (2011, S.285))

Die differentielle Rotation erstreckt sich allerdings nicht über die gesamte Sonne. Es ist von hohen Reibungsverlusten innerhalb der Sonne auszugehen, falls dies der Fall wäre. Die Lösung dieses Problems ist eine Rotation ähnlich eines starren Körper ab einer gewissen Sonnenkernnähe. „Seit Anfang der 1990er-Jahre ist man sich sicher, dass die Rotation unterhalb der Konvektionszone gleichmäßig mit etwa 26,8 Tagen stattfindet ($\rightarrow$ Tacholine).“ (Wischnewski (2021, S.737)) Entdeckt wurde die differentielle Rotation von Richard C. Carrington anhand von Sonnenfleckenbeobachtungen in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Ihm zu Ehren werden wie oben erwähnt die Sonnenrotationen auch Carrington-Rotationen genannt und fortlaufend nummeriert. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit befinden wir uns in der 2289. Carrington-Rotation.

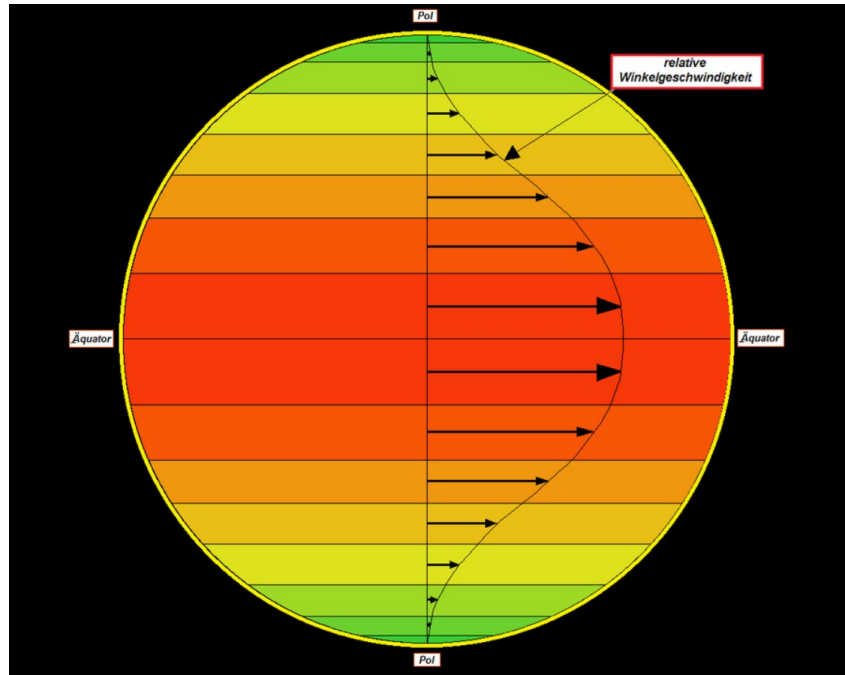


Abbildung 2.5.: Visualisierung der differentiellen Rotation der Sonne (Quelle: WerrenGraphik (2024))

2.3.2. Magnetfeld der Sonne

Das Sonnenmagnetfeld lässt sich global als bipolar beschreiben, ähnlich wie dies bei einem Stabmagneten der Fall ist. (vgl. Bahr et al. (2015, S.2)) Allerdings unterliegt es einem Zyklus. Denn alle 11 Jahre dreht sich die magnetische Polarität an den Sonnenpolen um. Man spricht hierbei vom Magnetfeldzyklus, der sich über 22 Jahre erstreckt.

Wendet man den Blick etwas in das Detail, so fallen weitere zeitliche Invarianten und Komplexitäten auf. Aufgrund der hohen Temperatur, die auf der Sonne vorherrscht, liegt nahe zu alles an Sonnenmaterie in einem ionisierten Zustand vor. (vgl. Weigert et al. (2009, S.183)) Durch die Ionisierung ist die Sonne übersät von vielen freien Ladungen, die sich bewegen können und sich in einem Plasmazustand befinden. Aufgrund von Konvektionsprozesse inner- und unterhalb der Photosphäre findet die Bewegung des ionisierten Plasmas statt. „Bei den dadurch entstehenden Plasmaströmen kann die Driftgeschwindigkeit von Ionen und Elektronen unterschiedlich sein, sodass ein elektrischer Nettostrom entsteht, der ein Magnetfeld erzeugt.“ (Demtröder (2017, S.323)) Dieses Magnetfeld ist eng mit der Bewegung des Plasmas verbunden und wird im Modellbild der *Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien* beschrieben. „Magnetfelder und Plasmamaterie würden sich nach diesem Modellbild stets miteinander verbunden bewegen, zusammengepresst, ausein-

andergezogen, verformt und verwirbelt werden.“ (von Kusserow & Marsch (2023, S.69)) Begründen lässt sich diese Modellannahme mit Hilfe der nahezu unendlichen Leitfähigkeit, die das Plasma aufweist und damit die starke Verbindung der elektrischen Ströme und magnetischen Felder gewährleistet.

Auch die differentielle Rotation trägt zur Komplexität des Sonnenmagnetfeldes bei. Durch die Rotation ergibt sich - genau wie auf der Erde - eine Corioliskraft. „Wenn sich Materie in der rotierenden Sonne nicht parallel zur Rotationsachse und auch nicht in der Umlaufsrichtung bewegt, dann sorgt diese Kraft für eine seitliche Ablenkung aus der ursprünglichen Bewegungsrichtung des Plasmas.“ (von Kusserow & Marsch (2023, S.77)) Diese Bewegung führt analog zum vorhergenannten Prozess zu einem Beitrag des Gesamtmagnetfeld der Sonne.

2.3.3. Entstehungsprozess der Sonnenflecken

Für den Entstehungsprozess von Sonnenflecken sind nun die beiden in den vorgegangenen Kapitel beschriebenen zentralen Eigenschaften der Sonne wesentlich. Durch die differentielle Rotation der Sonne werden die Magnetfeldlinien, die in der ungestörten Photosphäre polwärts verlaufen, am Äquator schneller beschleunigt als an den Polen. „Dadurch verformen sich die Magnetfeldlinien in charakteristischer Weise und werden zu immer engeren Schleifen parallel zu den Breitenkreisen.“ (Demtröder (2017, S.323)) In Abb. 2.6 wird dieser Einfluss der differentiellen Rotation auf das Sonnenmagnetfeld dargestellt.

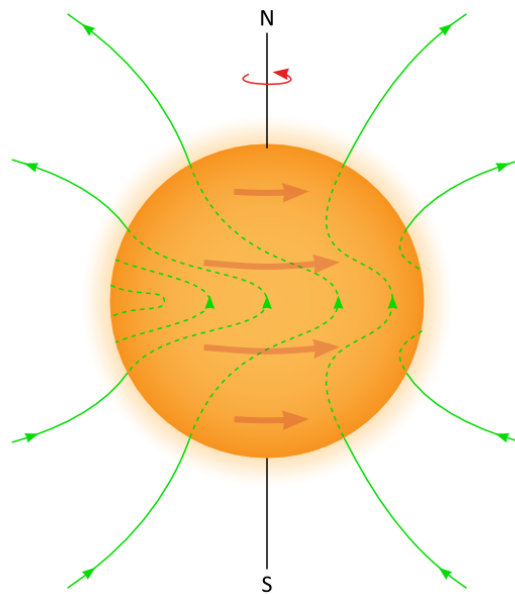


Abbildung 2.6.: Verdrillung des Magnetfeldes der Sonne durch die differentielle Rotation (Quelle: Georg-August-Universität-Göttingen (2014))

Aus tieferen Schichten der Photosphäre aufsteigendes Plasma kann dann diese Feldlinien noch weiter verbiegen. Es entsteht ein Nord- und Südpol auf der Oberfläche der Sonne. An diesen Polen verlaufen die Feldlinien nahezu senkrecht zur Oberfläche. Durch die Lorentzkraft werden die elektrisch geladenen Plasma-Partikel tangential zur Sonnenoberfläche abgelenkt. Die Lorentzkraft bewirkt nämlich eine Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen, welche sich in einem Magnetfeld bewegen, senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung und dem Magnetfeld, welches sie durchlaufen. Durch diese Lorentz-Ablenkung fehlt an den Stellen, an denen Pole auf der Sonnenoberfläche entstanden sind, der Nachschub an heißem Plasma, sodass diese Sonnenbereiche abkühlen. Die kälteren Stellen sind für uns als Sonnenflecken beobachtbar. Wie genau diese Magnetfeldlinien bei der Entstehung von Sonnenflecken verlaufen soll Abb. 2.7 darstellen.

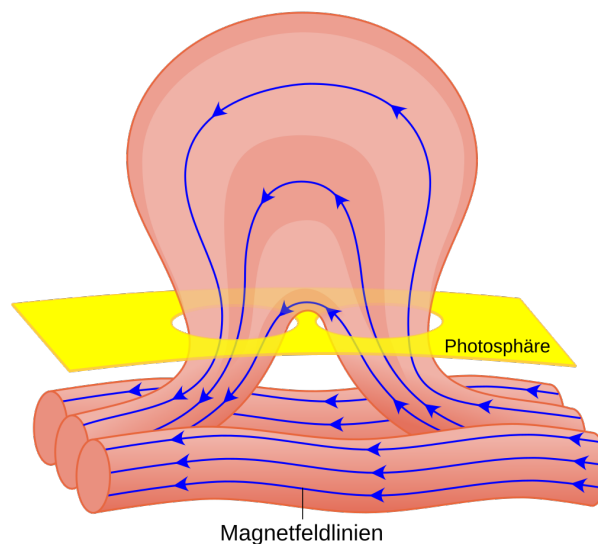


Abbildung 2.7.: Verbogene Magnetfeldlinien durchstoßen die Photosphäre und erzeugen damit Sonnenflecken (Quelle: Tillmann (2024))

Die Erklärung der Sonnenflecken als Durchstoßpunkte der Magnetfeldlinien durch die Photosphäre geht auf H. W. Badcock zurück und wird deshalb auch Modell von Badcock genannt. Dieses Modell erklärt auch, wieso Sonnenflecken oftmals paarweise auftreten. Sie werden durch die beiden unterschiedlichen magnetischen Pole hervorgerufen und entstehen an den Stellen, an denen die Feldlinien aus der Photosphäre heraus bzw. wieder in sie eintreten. Auch hier zeigt sich eine bemerkenswerte Charakteristik. „In jeder Gruppe besitzt der Sonnenfleck, der bei der Beobachtung der rotierenden Sonne zuerst sichtbar wird (also der rechte Fleck jeder Schleife) die gleiche Polarität wie das momentane solare Magnetfeld in dieser Hemisphäre.“ (Comins (2011, S.289))

Bereits 1908 wies G. E. Hale das erste Mal die starken Magnetfelder in Sonnenflecken nach. Er nutzte hierfür die Aufspaltung des von den Sonnenflecken ausgehenden Lichtspektrums aufgrund des Zeeman-Effektes. (vgl. Hale (1908)) Der Zeeman-Effekt beschreibt die Aufspaltung von Spektrallinien einer Lichtquelle, die starken Magnetfelder ausgesetzt ist. Wie diese Aufspaltung aussehen kann ist in Abb. 2.8 ersichtlich.

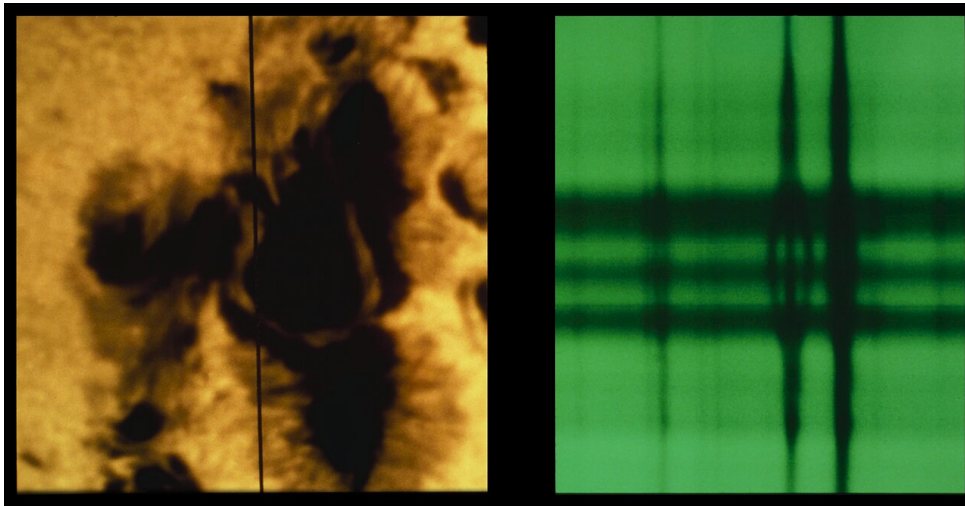


Abbildung 2.8.: Sonnenfleck (links) und die Ausspaltung seines Spektrums (rechts)
(Quelle: NoirLab (2020))

Bis die Sonnenflecken wieder verschwinden kann ein wenig Zeit vergehen, was das Studium dieser etwas erleichtert. „Die Lebensdauer der Flecken beträgt einige Tage, bei 90% der Flecken weniger als elf Tage.“(Hanslmeier (2020, S.274))

2.4. Struktur von Sonnenflecken

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, sind Sonnenflecken Bereiche von tieferer Temperatur, die aufgrund der hohen umgebenen Temperatur im Kontrast als schwarz wahrgenommen werden. Da Sonnenflecken natürliche Phänomene sind, treten sie zwar oftmals in einer idealtypischen Struktur auf, jedoch nicht identisch. Im Gegenteil: Sonnenflecken können sich untereinander in vielfacher Weise unterscheiden. In der Folge sollen die prototypischen Merkmale der Sonnenflecken dargelegt werden, anhand derer die Flecken charakterisiert und beschrieben werden können.

Der meist im Zentrum gelegene dunkelste Bereich eines Sonnenflecks wird als Umbra bezeichnet. Der Durchmesser der Umbren beträgt „im Mittel etwa 10000 km.“(Reinsch et al. (1999, S.103)) Im Vergleich zur Strahlungsintensität der umliegenden Photosphäre der Sonne weisen Umbren ungefähr 10 Prozent dieser Intensität auf. Zur Bestimmung der

Temperatur der Umbren kann das Stefan-Boltzmann-Gesetz verwendet werden:

$$I/I_{phot} = (T/T_{phot})^4 \quad (2.2)$$

(vgl. Reinsch et al. (1999, S.103))

Umgeben wird die Umbra vom Hof, der sogenannten Penumbra. Dabei handelt es sich um eine etwas hellere Schicht, die sich radial um die Umbra erschließt. Die Strahlungsinintensität dieses Bereichs liegt zwischen 50 und 90 Prozent der Intensität der Hintergrundstrahlung der Photosphäre. (vgl. Reinsch et al. (1999, S.105)) Es ergeben sich für die beiden Zonen folgende Temperaturen: 4300 K (Umbra) und 5000 K (Penumbra). (vgl. Comins (2011, S. 284))

Bevor der Sonnenfleck endgültig von der Penumbra in die Photosphäre übergeht, ist noch ein heller Ring um die Penumbra zu beobachten. Dies tritt besonders bei isolierten größeren Flecken auf. (vgl. Rast et al. (2008, S.864))

Sogenannte Lichtbrücken können Sonnenflecken unterbrechen. Diese „stehen mit drei unterschiedlichen Phänomenen in Verbindung:

- Zerfall eines Flecks
- Eindringen einer Fackel
- bogenförmige Protuberanz.“ (Wischnewski (2021, S.739))

Als Vorstufe eines Sonnenflecks können Poren betrachtet werden. Aus ihnen kann ein Sonnenfleck entstehen, meist verschwinden sie allerdings nach kürzester Zeit. Einen kleinen Überblick über all die angesprochen Strukturmerkmale von Sonnenflecken soll Abb. 2.9 geben.

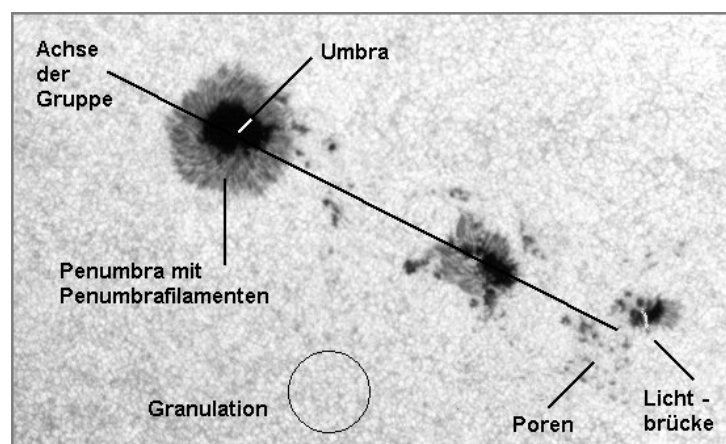


Abbildung 2.9.: Sonnenfleck mit den wichtigsten Strukturmerkmalen (Quelle: Paech (2001))

2.5. Sonnenfleckstatistik

2.5.1. Klassifizierung von Sonnenflecken

Um eine bessere Statistik über die Sonnenfleckenzahl und damit die Aktivität der Sonne führen zu können, wurden Klassensysteme entwickelt, in welche die Sonnenflecken eingeordnet werden können. In der Folge sollen die beiden aktuell geläufigsten Klassifikationssysteme vorgestellt werden.

Klassifizierung nach Waldmeier

Die aktuell wohl gebräuchlichste Klassifikation ist die Züricher Klassifikation. Sie stammt von Max Waldmeier aus dem Jahre 1938 und wurde 1939 noch durch eine Klasse von W. Brunner ergänzt.(vgl. Reinsch et al. (1999, S.120))

Die Klassen wurden dabei folgendermaßen definiert:

A: Ein einzelner Fleck oder eine Gruppe von Flecken, ohne Penumbra oder bipolare Struktur.

B: Gruppe von Flecken ohne Penumbra in bipolarer Anordnung.

C: Bipolare Fleckengruppe, von der der eine Hauptfleck von einer Penumbra umgeben ist.

D: Bipolare Gruppe, deren Hauptflecken eine Penumbra besitzen; mindestens einer der beiden Hauptflecken soll eine einfache Struktur aufweisen. Länge der Gruppe im allgemeinen $< 10^\circ$.

E: Große bipolare Gruppe; die beiden von Penumbren umgebenen Hauptflecken zeigen im allgemeinen eine komplizierte Struktur. Zwischen den Hauptflecken zahlreiche kleineren Flecken. Länge der Gruppe $\leq 10^\circ$.

F: Sehr große bipolare oder komplexe Sonnenfleckengruppe; Länge von mindestens 15° .

G: Große bipolare Gruppe ohne kleine Flecken zwischen den Hauptflecken; Länge $\leq 10^\circ$.

H: Unipolarer Fleck mit Penumbra; Durchmesser $< 2,5^\circ$.

I: Unipolarer Fleck mit Penumbra; Durchmesser $> 2,5^\circ$.

Die Einteilung in diese Klassen ist nur der erste Schritt. Zur vollständigen Klassifizierung wird neben der Art der Sonnenfleckengruppe die Anzahl der Einzelflecken angegeben. In der Waldmeier-Klassifizierung treten also Bezeichnungen wie A1, B4 oder H2 auf um die Sonnenfleckengruppe vollständig zu beschreiben. Eine Gruppe kann im zeitlichen Verlauf ihrer Existenz dabei natürlich verschiedene Klassenstufen durchlaufen.

Beispielhafte Sonnenflecken der entsprechenden Klassen sind in Abb. 2.10 ersichtlich.

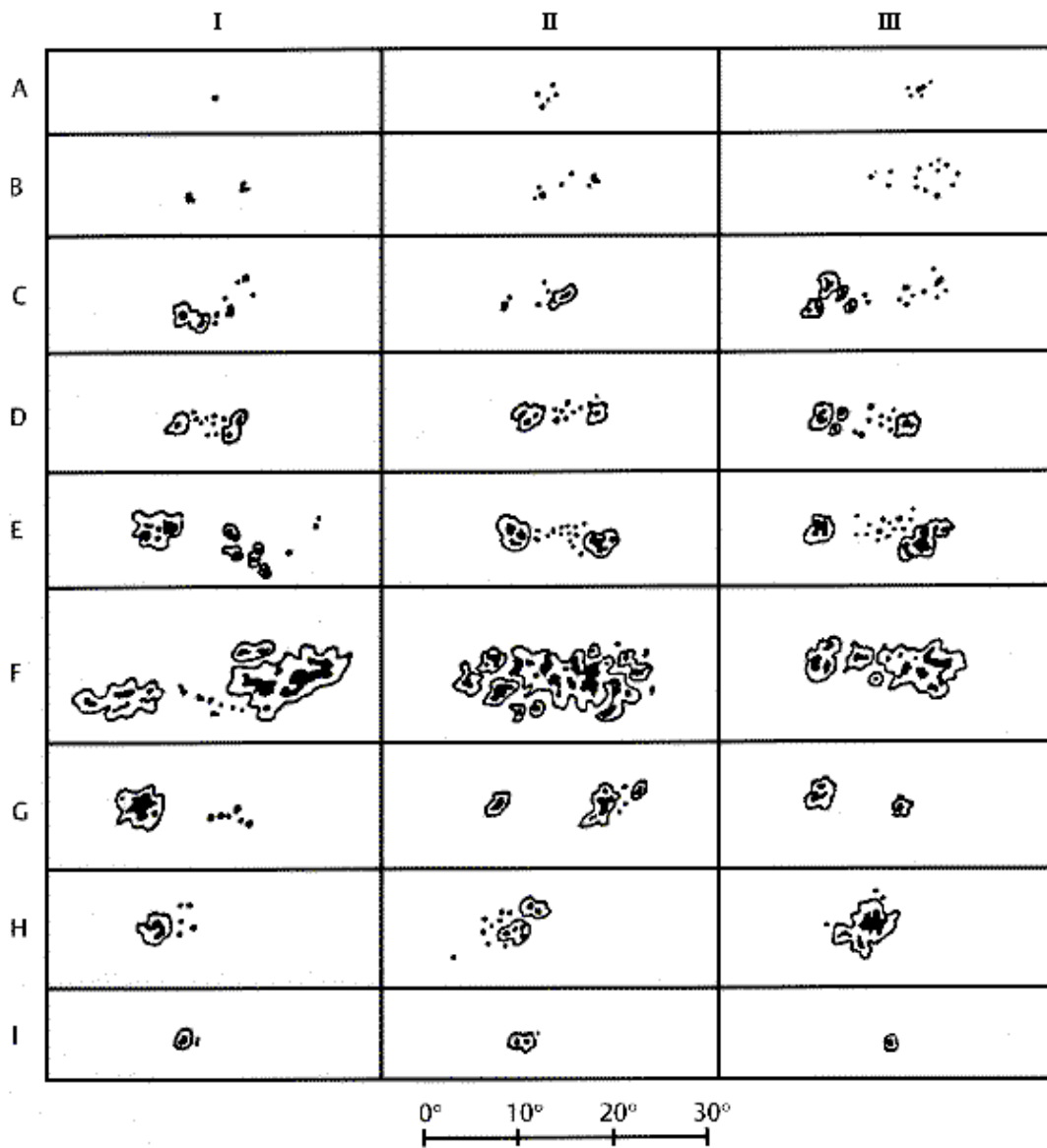


Abbildung 2.10.: Beispielhafte Sonnenflecken der Waldmeierklassen (Quelle: Volksternwarte (2000))

Klassifizierung nach McIntosh

Dieses Klassensystem stellt eine Weiterentwicklung des Waldmeier-Systems dar. Es besteht dabei aus drei Kategorien, in denen jeweils eine Zuordnung stattfindet und welche sich zu einer Gesamtklasse zusammensetzen. Die untersuchten Kategorien sind hierbei die prinzipielle Struktur, ähnlich wie das auch in der Waldmeier-Klassifizierung geschieht, die Penumbra des Hauptfleckes der Gruppe und die Anordnung der restlichen zur Gruppe gehörigen Flecken. (vgl. Wischnewski (2021, S.775)) Die McIntosh-Klassen wurden wie folgt festgelegt:

Strukturklassen:

- A:** unipolar, ohne Hof (entspricht Waldmeier A)
- B:** bipolar, ohne Höfe (entspricht Waldmeier B)
- C:** bipolar, ein Hof (entspricht Waldmeier C und G)
- D:** bipolar, zwei Höfe, $< 10^\circ$ (entspricht Waldmeier D)
- E:** bipolar, zwei Höfe, zwischen 10° und 15° (entspricht Waldmeier E)
- F:** bipolar, zwei Höfe, $> 15^\circ$ (entspricht Waldmeier F)
- H:** unipolar, mit Hof (entspricht Waldmeier H und J)

Penumbra:

- x:** ohne Hof (nur bei A und B)
- r:** verkümmerter Hof
- s:** kleiner symmetrischer Hof (ähnlich zu Waldmeier J)
- a:** kleiner unsymmetrischer Hof, Nord-Süd-Durchmesser $\leq 2,5^\circ$
- h:** großer symmetrischer Hof (analog zu Waldmeier H), Nord-Süd-Durchmesser $> 2,5^\circ$
- k:** großer unsymmetrischer Hof, Nord-Süd-Durchmesser $> 2,5^\circ$

Sonnenflecken-Anordnung in der Gruppe:

- x:** undefiniert, gilt bei unipolar (also A oder H)
- o:** offen, bei den Typen E und F
- i:** Zwischenflecken ohne Hof (intermediate)
- c:** Zwischenflecken mit Hof (compact)

Insgesamt entstehen hier Klassen, die beispielsweise von der Form *Fhi* oder *Dkc* sind und in die Sonnenflecken eingeordnet werden können.

Im Vergleich zur Einteilung von Waldmeier ist die nach McIntosh kleingliedriger und enthält bzw. erfordert mehr Informationen. Welche man in seiner Arbeit verwendet, kommt ganz auf den Verwendungszweck an.

2.5.2. Relativzahl der Sonnenflecken und der Schwankung

Um der Sonnenaktivität eine aussagekräftige Maßzahl zu geben, wurde die *Sonnenfleckrelativzahl* folgendermaßen definiert (vgl. Weigert et al. (2009, S.180)):

$$R = k \cdot (10g + f) \quad (2.3)$$

Hierbei gibt g die Anzahl der Fleckengruppen und f die der Einzelflecken an. Hinzu kommt der Korrekturfaktor k , der jedem Beobachter zu geordnet wird. Dabei ist dieser Faktor abhängig von der Ausrüstung, der Methode und der Zuverlässigkeit des Beobachters. Diese Relativzahl ist natürlich sehr davon abhängig, welche Flecken noch in eine Gruppe gezählt werden oder welche Sonnenflecken mit den verwendeten Instrumenten noch aufgelöst werden können. Aus diesem Grund wird die internationale Relativzahl aus einem Mittelwert aller eingereichten Relativzahlen berechnet. Die aktuellen Relativzahlen sind auf der Webseite des Solar Influences Data Analysis Centers einzusehen: <https://www.sidc.be/>

Besonders wertvoll wird die Relativzahl der Sonnenflecken, wenn man sie in einen temporären Kontext setzt. Aus Sonnenbeobachtungen und deren Aufzeichnung ist es möglich, diese Relativzahlen verlässlich bis ins Jahr 1650 zu rekonstruieren. Über eine indirekte Methode sind zudem Relativzahlen, die aus früheren Jahren stammen zu erhalten. „Es besteht [nämlich] ein Zusammenhang zwischen dem Zerfall der radioaktiven Isotope B-14 und C-14 und der Sonnenaktivität.“ (Wischnewski (2021, S.770))

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf seit ca. 1600, wie dies in Abb. 2.11 dargestellt ist, fällt vor allem das absolute Minimum in den Jahren zwischen 1650 und 1700 auf.

Besonders wird dieses sogenannte Maunder-Minimum, da es zeitlich mit einer kleinen Eiszeit auf der Nordhalbkugel zusammenfällt. Dies legt den Schluss nahe, dass Sonnenaktivität und dabei speziell die Relativzahl der Sonnenflecken mit den klimatischen Bedingungen auf der Erde zusammenhängen.

Abgesehen davon ist auch eine mittlere Periode von ca. 11 Jahren in der Relativzahl zu erkennen. Diese geht wohl auf den Schwabezyklus zurück, der in vorangegangenen Kapiteln bereits diskutiert wurde.

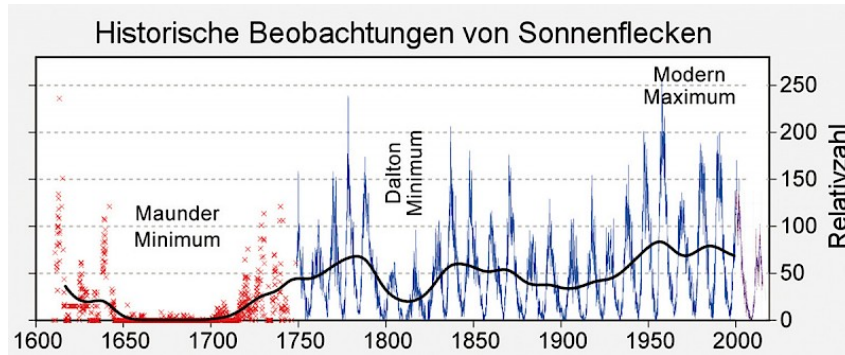


Abbildung 2.11.: Internationale Relativzahl der Sonnenflecken seit 1600 (Quelle: Khalisi (2020))

2.6. Beobachtungseffekte auf der Sonnenoberfläche

2.6.1. Randverdunklung

Ein Effekt, der nahezu auf jeder Sonnenaufnahme auftritt, ist die sogenannte Randverdunklung. Hierbei wird die Tatsache beschrieben, dass bei Betrachtung der Sonne die Mitte stets deutlich heller ist als der Rand der Sonnenscheibe. Oftmals wird dieses Phänomen auch Mitte-Rand-Variation genannt. Zu sehen ist die Randverdunklung in Abb. 2.12.

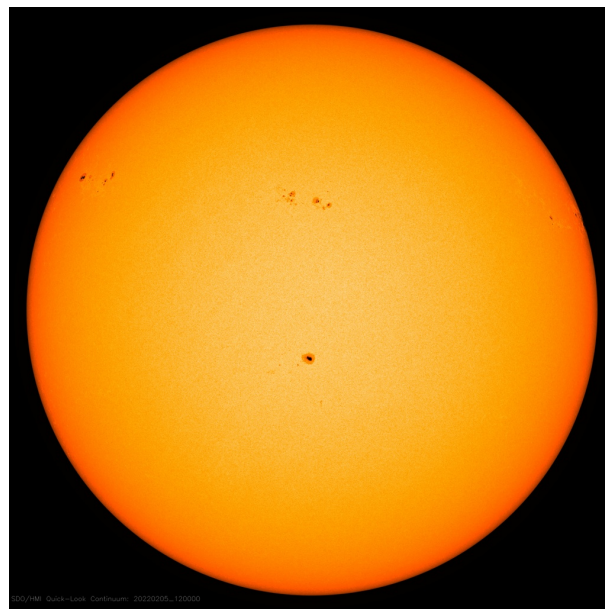


Abbildung 2.12.: Randverdunklung erkennbar an einer Sonnenaufnahme aus dem Jahr 2024 (Quelle: SDO (2024))

Dieser Effekt kann durch geometrische Überlegungen erklärt werden. Der Großteil des sichtbaren Lichtes stammt aus der Photosphäre. In der darüberliegenden Atmosphäre wird ein Teil dieser Strahlung allerdings wieder absorbiert. Die Absorption verläuft exponentiell mit dem Weg durch diese Atmosphärensicht. Blickt man zum Rand der Sonne wird die Wegstrecke, die durch diese absorbierende Atmosphäre zurückgelegt werden muss, immer länger und die Intensität der transmittierten Strahlung nimmt ab. Die geometrischen Überlegungen sind in Abb.2.13 visualisiert.

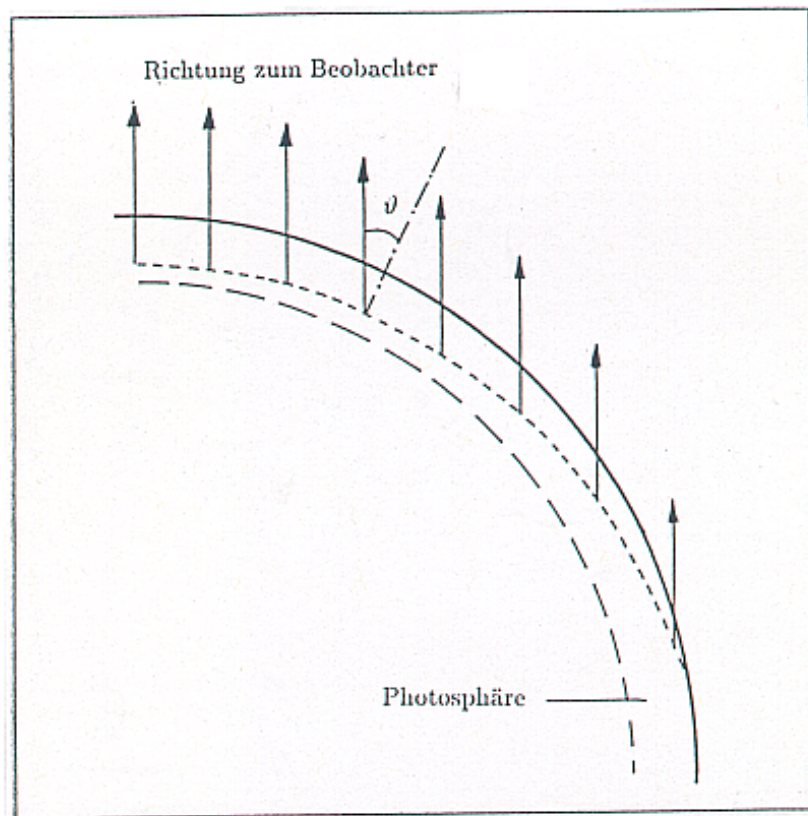


Abbildung 2.13.: Geometrische Überlegung zur Erklärung der Randverdunklung (Quelle: Weiprecht (2002))

Zusätzlich liegt in der Photosphäre ein Temperaturgefälle vor, d.h. die Temperatur nimmt zum Sonnenkern hin zu. Da die Blicktiefe in die Sonne hinein gleichbleibt, blickt man beim Betrachten der Sonnenmitte in tiefere und damit heißere Schichten der Sonne. Aufgrund des Betrachtungswinkels ist dies beim Sonnenrand nicht der Fall und Licht aus kälteren (rötlicheren) Schichten im Vergleich zur hellen (gelblichen) Mitte wird vom Auge registriert (vgl. Weiprecht (2002)).

Bei der Rand-Mitte-Variation ist es wichtig zu beachten, dass diese Wellenlängen abhängig ist. „Im optischen Spektralbereich handelt es sich um eine Randverdunklung, wobei der Effekt umso stärker ist, je kleiner die Wellenlänge der gemessenen Strahlung ist.“ (Weigert et al. (2009, S.172))

Eine Auftragung der Intensität in Abhängigkeit des Abstands vom Sonnenscheibenmittelpunkt und der Wellenlängen ist in Abb. 2.14 zu sehen. Hierbei ist die Intensität auf das Strahlungsmaximum in der Mitte der Sonnenscheibe normiert.

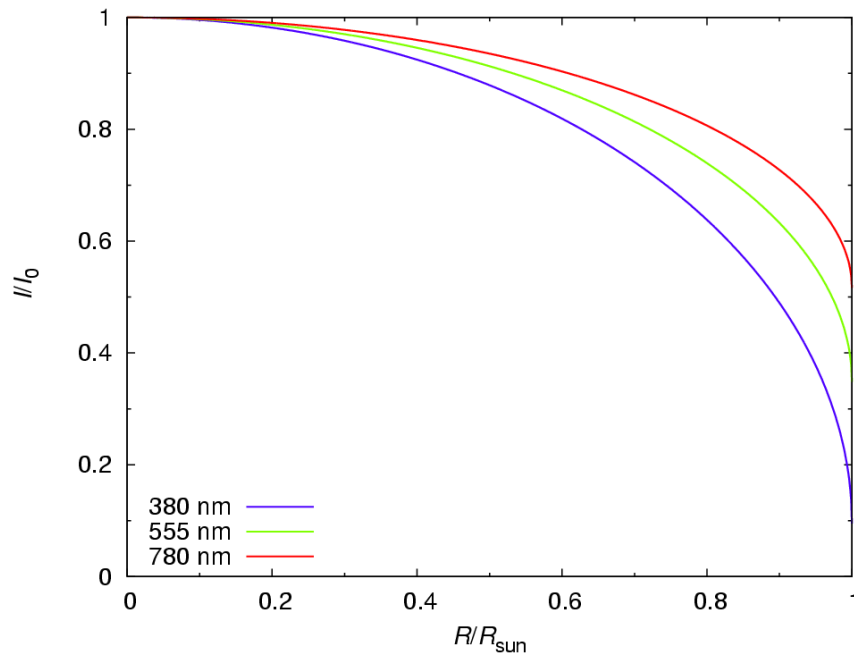


Abbildung 2.14.: Randverdunklung in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichts (Quelle: Scheffler & Elsässer (1990))

2.6.2. Wilson-Effekt

Ein weiterer Beobachtungseffekt, der bei der Betrachtung von Sonnenflecken auftritt, ist der Wilson-Effekt. In mancher Literatur ist er auch unter dem Namen Schülen-Wilson-Effekt gelistet. „Sonnenflecken zeigen in der Nähe des Sonnenrandes eine systematische Verformung, welche der für ein flaches Gebilde erwarteten perspektivischen Verkürzung genau entgegen gerichtet ist.“ (Reinsch et al. (1999, S.143)) Konkret wird der Teil der Penumbra, der auf der Sonnenrandseite zu finden ist, im Vergleich zum Sonnenmitten zugewandeten Teil des Hofes deutlich größer. Eine Visualisierung des Phänomens ist in Abb. 2.15 zu sehen.

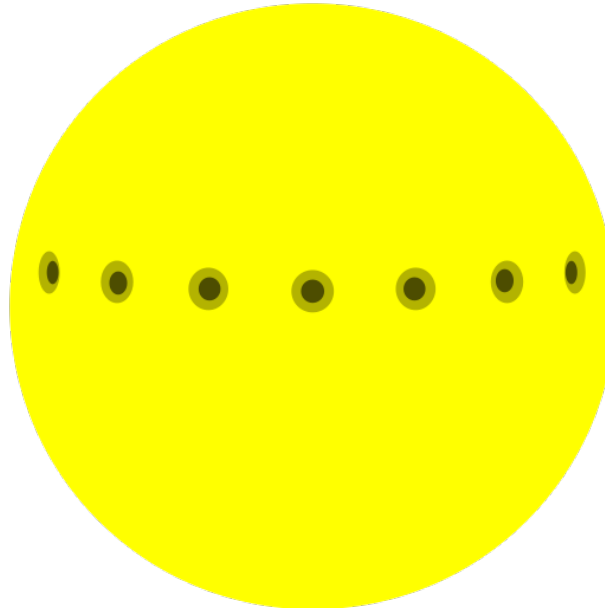


Abbildung 2.15.: Visualisierung des Wilson-Effekts durch Sonnenflecken auf der Photosphäre (Quelle: Ivanov (2012))

Erklärt werden kann dies mit dem Modell von „schüsselförmige[n], scheinbare[n] Vertiefungen von ca. 800 *km* in den Sonnenflecken.“ (Mielke (2013, 47)) Wichtig ist, dass es sich nicht um Vertiefungen im eigentlichen Sinne handelt. Auch hier spielt die Blicktiefe in den Gas-Ball eine Rolle. Die optische Tiefe ist unter anderem von der Temperatur des Mediums abhängig. Dies hat zur Folge, dass man tiefer in die Photosphäre hineinblickt, wenn man sie an einem Sonnenfleck betrachtet. Die Entstehung der Asymmetrie lässt sich mit Hilfe von geometrischen Überlegungen erklären, die in Abb. 2.16 dargestellt sind.

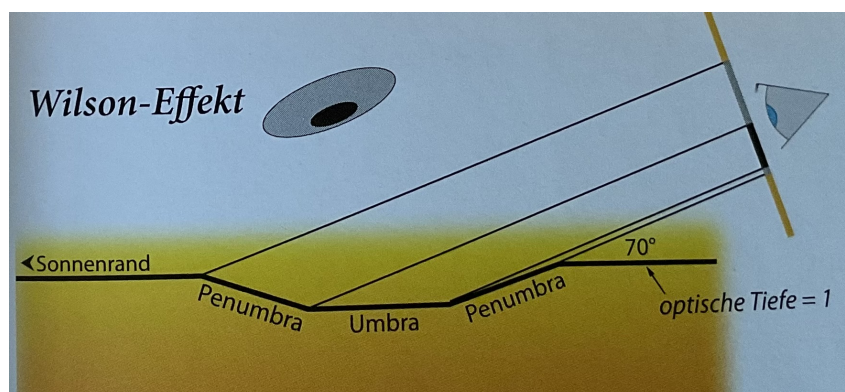


Abbildung 2.16.: Geometrische Überlegungen zur Erklärung des Wilson-Effekts (Quelle: Wischnewski (2021, S.743))

3. Digitale Werkzeuge zur Analyse von Sonnenflecken

Je nachdem auf welchen Aspekt der wissenschaftlichen Arbeit man im Unterricht seinen Fokus legen möchte, kann es hilfreich sein, einige Aufgaben an Programme bzw. Institutionen abzugeben. Durch diese Auslagerung bestimmter Teilschritte kann auf die übrig gebliebenen Aktivitäten im wissenschaftlichen Prozess ein höherer Fokus gelegt und mehr Zeit darin investiert werden. In der Folge sollen entsprechende Anlaufstellen genauer erläutert werden, welche Teilschritte in der Analyse von Sonnenflecken übernehmen können.

3.1. Bildbeschaffung mittels des SDO

Der erste Schritt bei der Analyse von Sonnenflecken ist die Beschaffung entsprechender Aufnahmen der Sonne. In erster Linie ist es sinnvoll, den Lernenden den Umgang mit Teleskopen näherzubringen. Es handelt sich hierbei um eine äußerst relevante Form der Informationsgewinnung über extraterrestrische Vorgänge, die aufgrund ihrer Anwendungsnähe für viele Schülerinnen und Schüler eine große Faszination auslösen kann.

Allerdings sind für eine systematische Analyse von Sonnenphänomen an die Aufnahmen in Sachen Quantität und Qualität Voraussetzungen geknüpft, die in unterrichtlichen Kontexten nicht zu gewährleisten sind. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, sich an gewonnenem Datenmaterial zu bedienen, das öffentlich zur Verfügung gestellt wird.

Eine Möglichkeit ist es dabei, die Bilder des Solar Dynamics Observatory (SDO) zu nutzen. Beim SDO handelt es sich um die erste Raummission, die im Rahmen des NASA-Programms Living with a star (LWS) stattfand. Das SDO befindet sich auf etwa 35000 km in einer geosynchronen Umlaufbahn. Das Ziel dieser Mission ist es, Ursachen für die Variation der Sonne in Sachen Magnetfeld und Aktivität zu finden. Auch deren Auswirkung auf die Erde sollen studiert werden. (vgl. Pesnell et al. (2012, S.3))

Aus diesem Grund liefert diese Mission seit dem 1. Mai 2010 alle 15 Minuten Daten an die Erde, die eine Auswertung hinsichtlich dieser Fragen möglich machen.

Das SDO wurde dabei mit 3 verschiedenen Experimentgruppen bestückt:

1. Atmospheric Imaging Assembly: Dies besteht aus vier Teleskopen, welche die Sonnenoberfläche und die Atmosphäre der Sonne untersuchen.
2. Extreme Ultraviolet Variability Experiment: Es bestimmt die Fluktuation extremer ultravioletter Strahlung, die von der Sonne ausgeht.
3. Helioseismic and Magnetic Imager: Hierbei werden Magnet- und Geschwindigkeitsfelder auf der Sonnenoberfläche analysiert. (vgl. Pesnell et al. (2012, S.3))

Da - wie oben bereits beschrieben - Sonnenflecken stark mit den Magnetfeldern zusammenhängen, sind für die später dargestellten Auswertungen vor allem die Bilder der 3. Experimentgruppe relevant.

Der Download der Daten erfolgt direkt auf der Homepage des SDO:

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

Über den Reiter *Data* und der Unterkategorie *AIA/HMI Browse Data* lassen sich die gewünschten Dateien auswählen. Ein Ausschnitt der Auswahloberfläche von SDO ist in Abb. 3.1 zu sehen.

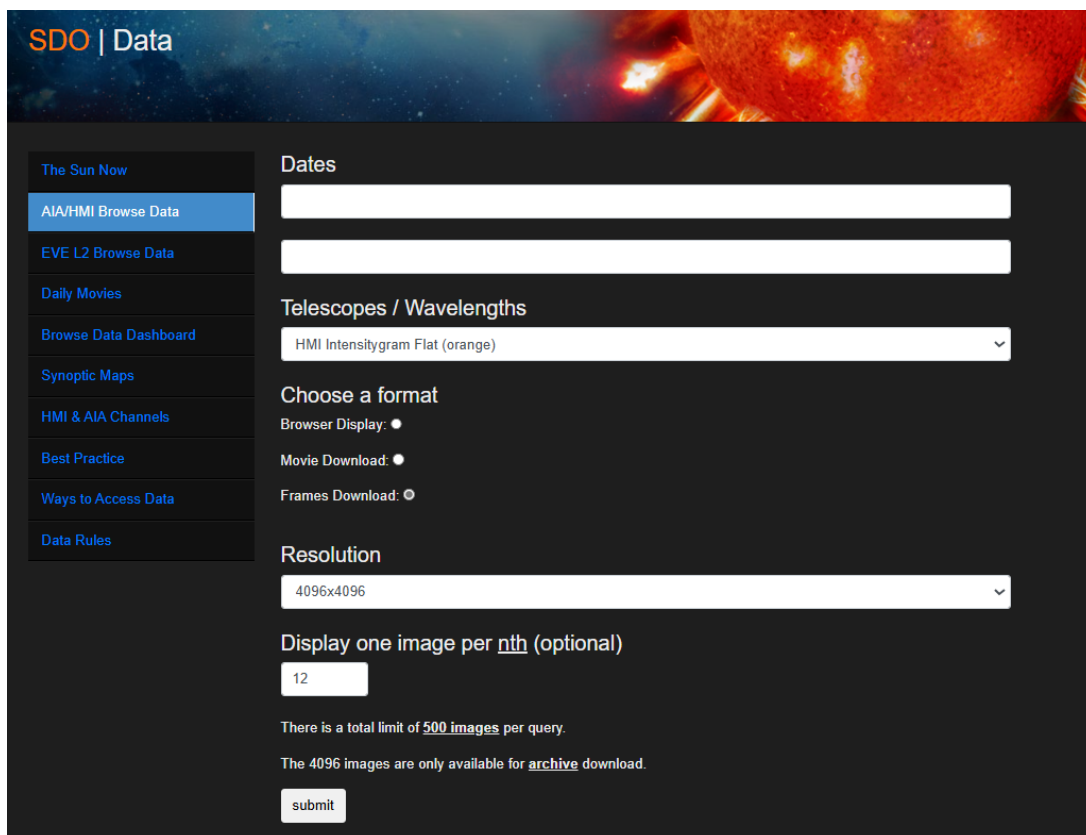


Abbildung 3.1.: Auswahloberfläche zum Download der Bilder von SDO (Quelle: SDO (2024))

Bei der Auswahl des Teleskops hat sich das *HMI Intesitygram Flat (orange)* als Bestes für die Positionsbestimmung von Sonnenflecken herausgestellt. Hier sind die Sonnenflecken im Kontrast besonders gut zu erkennen.

Wenn sich zunächst ein Überblick über die Bilder verschafft werden möchte, bietet sich vor allem die Darstellung im *Browser Display* an.

Nach der Auswahl der Daten über die Eingabe des zu untersuchendem Zeitraum, des gewünschten Teleskops, des Formats, der Auflösung und der indirekten Auswahl der Bildanzahl bzw. des zeitlichen Bildabstands, wird von der Website ein Archiv erstellt. Mit Hilfe des zur Verfügung gestellten Links gelangt man zu diesem und kann die gewählten Bilder herunterladen.

Hier noch ein wichtiger Hinweis: Das Erstellen des Archivs kann je nach Auflösung und Bildanzahl eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen. Zur Reduzierung dieser Zeit kann es hilfreich sein, den Zeitraum in kleinere Zeitabschnitte einzuteilen oder die Auflösung herunterzusetzen. In vielen Fällen ist eine Auflösung von 2048x2048 durchaus ausreichend. Dies hängt allerdings ganz klar vom Verwendungszweck der Bilder ab.

Die großen Vorteile der Bilder von SDO lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Erstens liefert die NASA-Mission rund um die Uhr aktuelle Bilder von der Sonnenoberfläche, wohingegen Sonnenaufnahmen mit Teleskopen natürlich nur möglich sind, während die Sonne vom Beobachtungsort aus zu sehen ist.

Zweitens gewährleistet die Positionierung der Messstation außerhalb der Erdatmosphäre eine durchgehend gute Qualität der Bilder, da sich keine Störungen einschleichen können, die durch die Erdatmosphäre eintreten können.

Zu guter Letzt werden die Sonnenaufnahmen direkt so gedreht, dass sich der Sonnen-nordpol oben befindet. Dies ermöglicht eine deutlich schnellere Analyse der Bilder, da auf die geometrischen Berechnungen des P -Winkels aus Kapitel 2.1 verzichtet werden kann. Dies soll auf keinen Fall dazu verleiten, den Sachverhalt, der in Kapitel 2.1 angesprochen wurde, nicht mit den Lernenden ausführlich zu behandeln. Ist das Prinzip aber einmal verstanden, stellt diese Vororientierung der zur Verfügung gestellten Bilder eine deutliche Erleichterung dar. Die eingesparte Zeit kann dabei helfen den Fokus auf die eigentliche Analyse der Sonnenflecken zu legen.

Ein Beispielbild, welches aus der SDO-Datenbank bezogen wurde, wird in Abb. 2.12 dargestellt.

3.2. SunMap

Ein Programm, das perfekt auf die Auswertung von Sonnenflecken zugeschnitten wurde, ist SunMap. Hierbei handelt es sich um ein Programm, das von Ralf Pagenkopp mit Unterstützung von Klaus-Peter Daub geschrieben wurde. Es ist kostenlos erhältlich über die Website von Ralf Pagenkopp (<http://ralfpagenkopp.de/>) oder durch einen direkten Austausch mit ihm. Besonders schön dabei ist, dass für SunMap ein ausführliches Handbuch existiert, welches mit dem Programm bereitgestellt wird.

Die Anwendung wurde dafür konzipiert, Bilder von der Sonnenoberfläche auf deren Sonnenflecken hin zu untersuchen. Besonders deren Positionsbestimmung fällt mit dem Programm sehr leicht und ist deshalb sehr anwenderfreundlich.

In die Anwendung können neben selbst aufgenommenen Photographien sowie den Bildern von SDO auch Zeichnungen hochgeladen werden. Wichtig ist dabei nur, dass die gesamte Sonnenscheibe auf dem Bild / der Zeichnung erkennbar ist.

In Abb. 3.2 ist die Ansicht in SunMap dargestellt. Hierfür wurde ein Bild aus der SDO-Datenbank verwendet. Durch die Bezeichnungskonvention der Bilder sind in SunMap direkt einige Daten des Bildes hinterlegt bzw. werden vom Programm bestimmt. Diese können genauer in der dargestellten Funktionsleiste in Abb. 3.2 abgelesen werden. Dazu gehören: Der bestimmte P -Winkel, B_0 , der Längengrad auf dem sich L_0 des Carrington-Koordinatensystems im aktuell angezeigten Koordinatensystem befinden, die Nummer der Carrington-Rotation Rot und der Aufnahmezeitpunkt in Tag und Uhrzeit. Einzig die Eingabe des Nordwinkels (Nw) in Grad ist von Nöten. Dadurch, dass es sich um ein Bild von SDO (Nordpol oben) handelt, ist dieser exakt das negative des P -Winkels.

Zur Bestimmung der Positionen der Sonnenflecken wird nun mittels der rechten Maustaste ein Zoomfenster geöffnet, dessen Zoomfaktor durch das Mausrad angepasst werden kann. Durch Gedrückthalten der rechten Maustaste kann der angezeigte Bildausschnitt verändert werden. Mit Hilfe der linken Maustaste ist es möglich, im Zoomfenster die Position des Sonnenflecks festzulegen. Die Koordinaten der ausgewählten Position (roter Kreis) werden nun in der Funktionsleiste in den beiden Zeilen unter dem Schaltfeld *Profil* dargestellt.

Als besonders nützlich erweist sich die Auswertungsfunktion von SunMap. Hiermit lassen sich die Koordinaten speichern und zusätzliche Einträge wie Klassifizierung der Sonnenflecken festhalten. Diese Auswertungsdateien können in Excel eingelesen und analysiert werden. Die *Trend Exl*-Schaltfläche erlaubt es, Auswertungsdateien mehrerer Bilder zusammen auszuwerten und den zeitlichen Verlauf von Sonnenflecken zu studieren.

Alle in SunMap gespeicherten Positionen bleiben erhalten und können bei wiederholtem Öffnen der Bilddatei angepasst oder ergänzt werden.

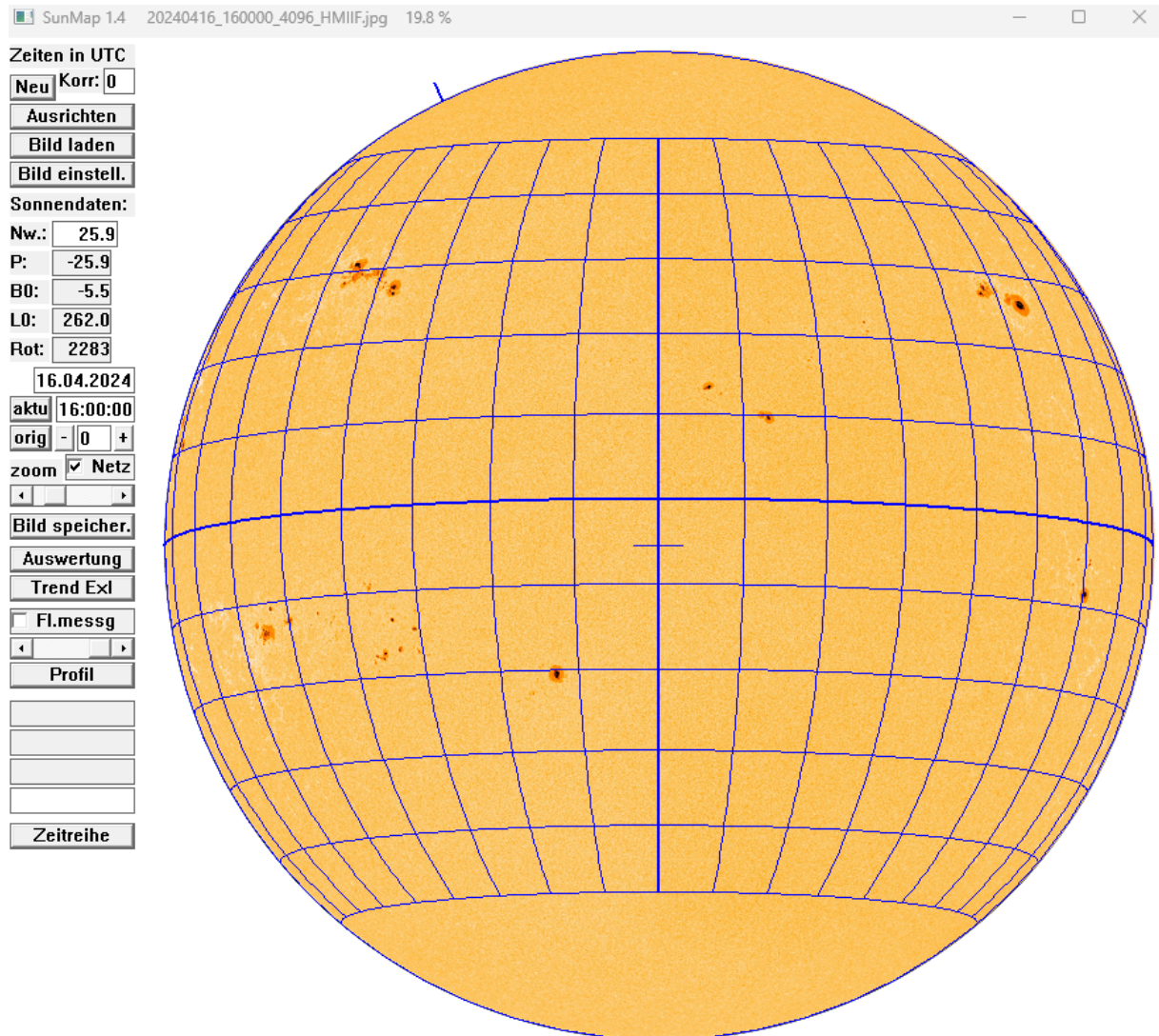


Abbildung 3.2.: Ansicht einer Sonnenaufnahme in SunMap (Quellen: Bild SDO (2024), Programm SunMap (2018))

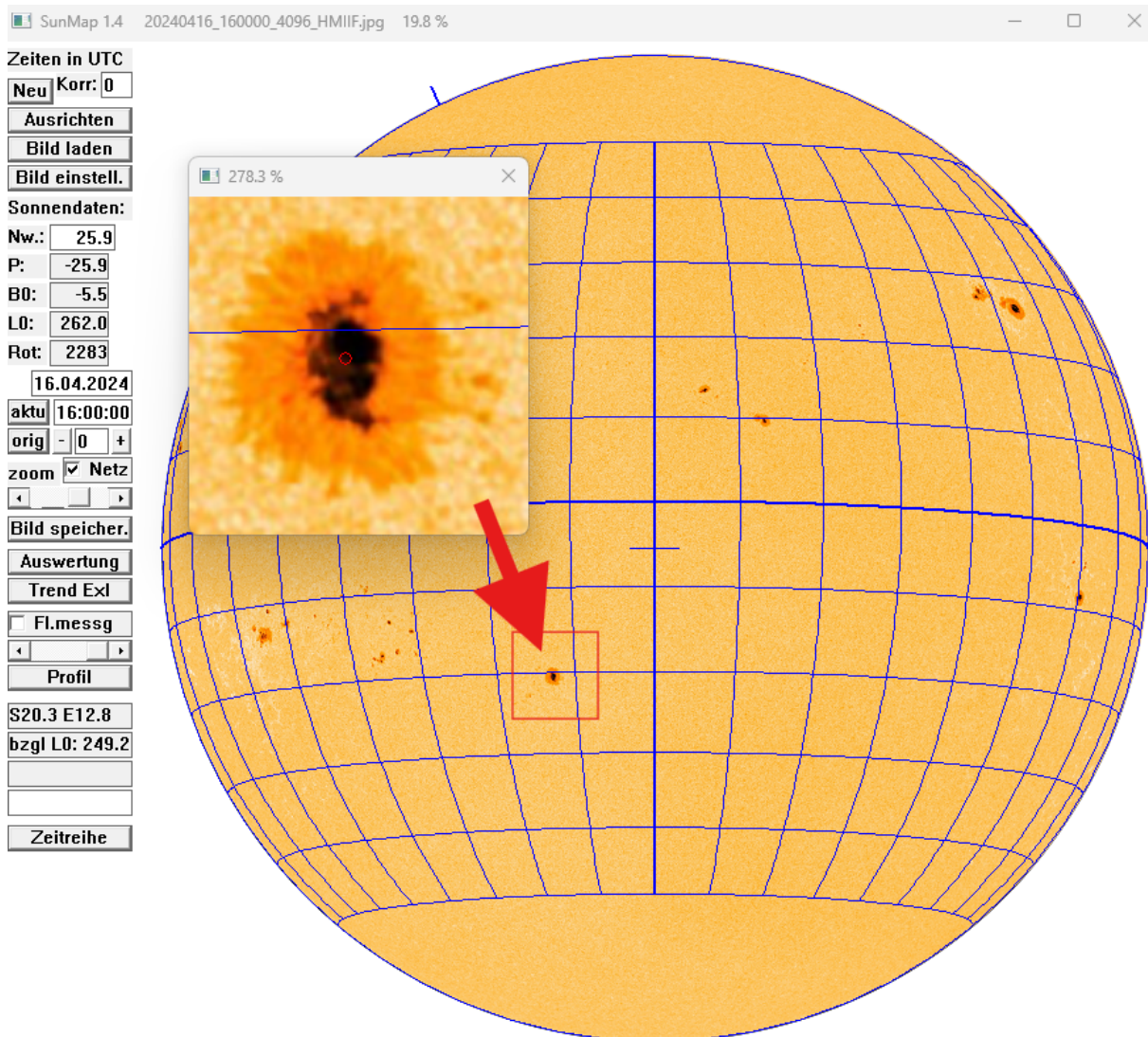


Abbildung 3.3.: Positionsbestimmung eines Sonnenflecks mittels der Zoom-Funktion (Quellen: Bild SDO (2024), Programm SunMap (2018))

3.3. Solarmonitor und Solarmap

Eine hilfreiche Webseite, die stets aktuelle Daten, aber auch archivierte Daten zur Sonnenaktivität bereit stellt, ist:

<https://www.solarmonitor.org/>

Hierbei handelt es sich um ein gemeinsames Projekt der Solar Physics Group des Trinity College Dublin und des Dublin Institute for Advanced Studies. Die Seite stellt eine Datenbank dar, welche bei angegeben Datum alle aktiven Regionen auf der Sonnenoberfläche angibt und visualisiert. Zusätzlich werden jeweils die Positionen, die Klassifikationen in den McIntosh-Klassen, die Fläche und die Anzahl der Sonnenflecken pro Fleckengruppe ausgegeben. Dies ist hierbei für den aktuellen Tag aber auch für Tage über mehrere Jahre in die Vergangenheit möglich.

Angegeben werden die aktiven Regionen mittels der NOAA-Nummer. „Die National Oceanic and Atmospheric Administration nummeriert alle aktiven Regionen fortlaufend durch.“ (Wischnewski (2021, S.768)) Diese Nomenklatur stellt heute das Standardformat zur Beschreibung von aktiven Sonnenfleckregionen auf der Sonne dar. Angegeben werden die NOAA-Nummern in folgender Form: AR12345 oder 12345. In manchen Quellen werden die voranstehenden Einsen auch weggelassen.

Problematisch ist diese Zählung in diesem Sinne, dass jede aktive Region, die auf der Sonnenoberfläche erscheint, eine neue Nummer erhält. Eben auch jene, die eine komplette Rotation der Sonnen überstanden haben und nun erneut nach langer Abstinenz auf der zu beobachtenden Sonnenscheibe auftauchen. Somit sind langlebige Regionen oftmals doppelt benannt und nicht eindeutig.

Die Webseite ist deshalb so nützlich, weil es eine einfach Möglichkeit bietet, die Entwicklung einiger Fleckengruppen schnell nachzuvollziehen. Auch das allgemeine Studieren der Sonnenaktivität ist problemlos möglich.

Für Lehrkräfte ist es deshalb hilfreich, da hier aktive Regionen im Vorfeld herausgesucht werden können, die sich für eine genauere Analyse mit Lernenden besonders anbieten. Den Untersuchungskriterien entsprechend ist es nämlich sinnvoll, in besonderer Weise ausgeprägte Regionen zu wählen. Natürlich gehört es zum Lernprozess dazu, sich mit den Problematiken auseinander zu setzen, die bei einer solchen Sonnenfleckanalyse auftreten können. Allerdings bietet es durchaus Vorteile zunächst Sonnenfleckengruppen zu studieren, die eine etwas einfachere Struktur aufweisen und Entwicklung durchlaufen. Später ist es mit Sicherheit sinnvoll, sich im Sinne einer Differenzierung auch komplexeren Fleckengruppen zu widmen.

Eine weitere Webseite, die ähnliche Zwecke erfüllen kann, ist:

<https://www.sidc.be/spaceweatherservices/applications/solarmap>

Hinter dieser Seite steht das Solar Influences Data Analysis Center des Royal Observatory aus Belgien. Die Solarmap dieser Organisation bietet ähnliche bzw. die gleichen Informationen, welche jedoch durch genauere Visualisierungen des Sonnenmagnetfeldes ergänzt wurden. Diese Ergänzungen lassen die Darstellung etwas unübersichtlich wirken. Auch die Darbietung der Informationen in Form einer Tabelle mit dem Vergleich zum vorherigen Tag ist bei Solarmonitor etwas zugänglicher.

Aus diesem Grund ist für den Einstieg die Darstellung der Astrophysiker aus Dublin zu bevorzugen. Sind später genauere Informationen zum Sonnenmagnetfeld notwendig, ist die zweitgenannte Webseite sicherlich eine gute Anlaufstelle.

4. Mögliche Sonnenfleckanalysen im Schulkontext

Ein Lernbereich des LehrplanPLUS der gymnasialen Oberstufe im Astrophysikteil der 13. Jahrgangsstufe stellt neben der Orientierung am Himmel, dem Sonnensystem, den Sternen und anderen Großstrukturen auch die Sonne dar. Der Behandlung unseres Zentralgestirns werden dabei ca. 15 Stunden im Schuljahresverlauf eingeräumt. Wichtiges Thema dieses Lernbereichs sind auch die „Zusammenhänge zwischen [der] Änderungen des solaren Magnetfelds, dem Auftreten von Sonnenflecken und Phasen hoher Sonnenaktivität“ (ISB (2024)) für Diskussionen und Stellungnahmen zu verwenden. Dafür ist es wichtig sich mit diesen physikalischen Ereignissen vertraut zu machen. Die nachfolgenden Sonnenfleckanalysen stellen eine unterrichtliche Möglichkeit dar, den Lernenden einen Einblick in die physikalische Arbeitsweise zu geben. Es soll damit ein Verständnis aufgebaut werden, wie (Astro-)Physiker zu ihren Hypothesen und Theorien gelangen, welche allerdings wiederum einer experimentellen Bestätigung unterzogen werden müssen.

Bei den in dieser Arbeit besprochenen Analysen ist es denkbar, dass sie nach einer kleinen Erarbeitungsphase im Unterricht durchgeführt werden. Die Sonnenfleckanalysen können allerdings auch - je nach Vertiefungsgrad - in Projektarbeiten in Kleingruppen oder als Seminararbeiten ausgelagert werden. Auch eine Teilnahme an Wettbewerben, wie „*Jugend forscht*“, ist in diesem Themenbereich durchaus vorstellbar.

Betont werden sollte an dieser Stelle, dass nur eine kleine Auswahl an möglichen Auswertungen im folgenden Kapitel vorgestellt werden können. Eine große Liste an weiteren zu untersuchenden Fragestellungen bietet Erik Wischnewski (2021, S.781f.).

4.1. Bestimmung der Sonnenfleckrelativzahl

Der erste Schritt der Analyse von Sonnenflecken ist das Zählen dieser. Besonders spannend kann der unterrichtliche Einstieg zur sogenannten Sonnenfleckenstatistik über den Zusammenhang der Sonnenaktivität mit dem Klima auf der Erde gestaltet werden. Im nächsten Schritt liegt es nahe die aktuelle Sonnenaktivität zu studieren. Dieses Vorhaben kann relativ leicht anhand der vom SDO zur Verfügung gestellten Bilder durchgeführt werden. Beispielhaft soll dies in der Folge an einer Sonnenaufnahme vom 1.12.2023 um 12 Uhr diskutiert werden. Diese ist in Abb. 4.1 zu sehen.

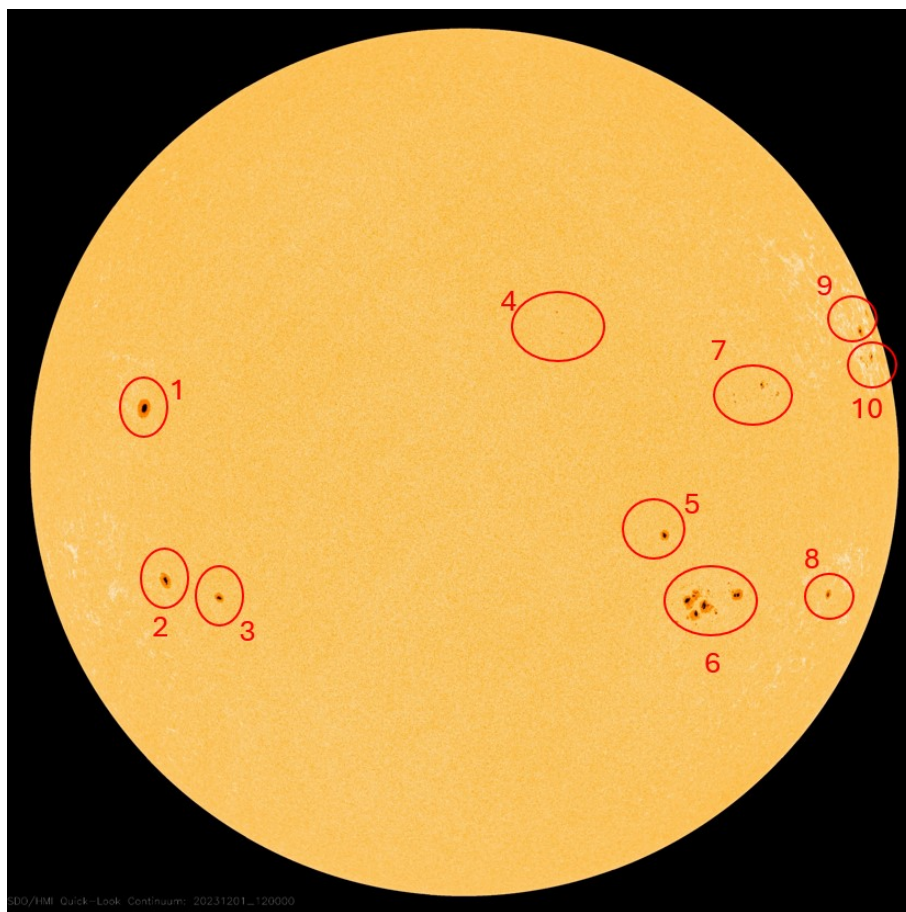


Abbildung 4.1.: Sonnenaufnahme vom 01.12.2023-12:00Uhr mit Markierung der aktiven Regionen (Quelle: SDO (2024))

Zunächst ist eine grobe Einteilung in aktive Regionen vorzunehmen. Dies kommt einer Aufgliederung in Sonnenfleckengruppen gleich. In Abb. 4.1 ist die Einteilung für die gewählte Sonnenaufnahme vorgenommen. Durch Zählung dieser erhält man den ersten statistisch-relevanten Wert: $g = 10$.

Anschließend folgt eine genaue Analyse der einzelnen Fleckengruppen. Dafür bietet sich zum einen die Zoom-Funktion von SunMap an, zum anderen kann dies auch durch Vergrößern in einer ähnlichen Applikation zum Öffnen von Bildern durchgeführt werden. Die Analyse und Klassifizierung der einzelnen Fleckengruppen ergibt folgende Werte:

Nr. der Fleckengruppe:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fleckenanzahl:	1	1	1	2	1	21	6	1	2	3

Ein genauerer Blick auf die einzelnen Fleckengruppen kann im Anhang geworfen werden. In Summe ergibt sich damit für die Gesamtfleckenzahl f : $f = 39$. Es kann die Sonnenfleckrelativzahl R (ohne Beachtung des Korrekturfaktors) mit folgendem Wert bestimmt werden:

$$R = 10 \cdot g + f = 10 \cdot 10 + 39 = 139 \quad (4.1)$$

Lässt man diese Sonnenfleckstatistik von mehreren Lernenden durchführen, so könnte eine Diskussion über die Subjektivität dieser Analyse besonders gewinnbringend für den Unterricht sein. Wann gilt etwas als ein neuer Sonnenfleck? Wie nah müssen zwei Flecken beieinander liegen um als Gruppe zu gelten? Wie sinnvoll ist der Korrekturfaktor? Auch eine Erarbeitung wie sich ein solcher Korrekturfaktor zusammensetzen sollte, stellt eine aussichtsreiche Fragestellung dar, die es lohnt im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe zu diskutieren.

4.2. Lagebestimmung von Sonnenflecken und ihre Eigenbewegung

4.2.1. Positionsbestimmung der Hauptflecken einer aktiven Region

Eine übliche Art, eine aktive Region zu analysieren, ist es die Lage der Hauptflecken dieser Gruppe zu untersuchen.

In der Folge wird dies anhand der Gruppe mit der Bezeichnung AR13644 diskutiert. Diese Gruppe wurde ausgewählt, da sie langlebig und einfach in ihrer zeitlichen Entwicklung war. Heißt in diesem Fall: Die Gruppe konnte bei einer kompletten *Wanderung* über die Sonnenscheibe beobachtet werden, ohne das Hauptflecken verschwanden oder sich die Struktur der Sonnenfleckengruppe drastisch änderte. Die Gruppe trat in der 2283. Carrington-Rotation der Sonne auf. Sie konnte zwischen dem 16. und dem 27. April 2024 auf der Sonnenoberfläche beobachtet werden. Aus diesem Grund werden aus dem SDO-Archiv die Sonnenbilder in diesem Zeitraum einer Analyse unterzogen. Hierbei werden die Bilder des Typs HMIIF herangezogen. Es handelt sich dabei um einen Bildtyp, der die Randverdunklung durch eine *Glättung* eliminiert. Zudem wird ein Farbfilter auf die Bilder angewendet, der den Kontrast zwischen Sonnenflecken und Photosphäre erheblich erhöht. Vergleiche hierfür Abb. 2.12 und Abb. 4.2. In Abb. 2.12 wird im Vergleich zur hier verwendeten Aufnahme weder die Glättung noch dieser Farbfilter angewendet.

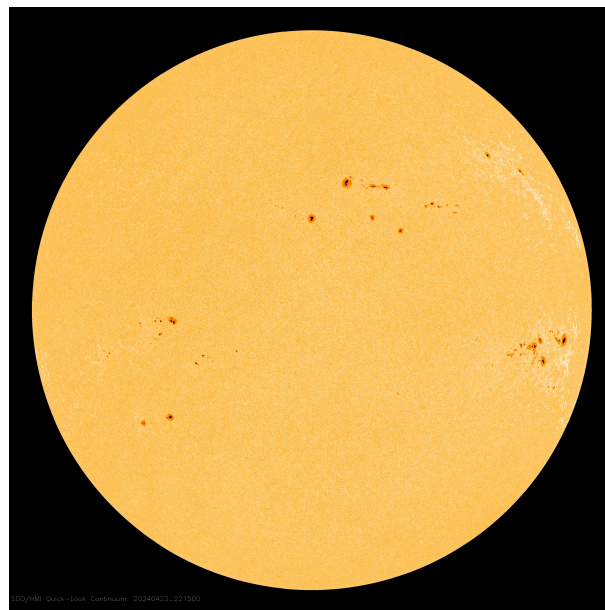


Abbildung 4.2.: Sonnenaufnahme vom 23.04.2024-22:15Uhr im HMIIF-Format (Quelle: SDO (2024))

Um einen guten Kompromiss zwischen Auswertungsaufwand und Genauigkeit der Sonnenfleckbewegung zu gewährleisten, ist ein mittlerer Zeitabstand zwischen den Bildern von 3 Stunden zu empfehlen. Dieser wird in der folgenden Auswertung zu Grunde gelegt. Die Zeitdifferenz der Bilder entspricht im Portal von SDO einer Eingabe von: *Display one image per nth (optional): 12*. Es wird also jedes 12. Bild aus dem Archiv verwendet, wobei das SDO alle 15 Minuten eine neue Aufnahme macht.

Auf den ausgewählten Sonnenaufnahmen werden nun die Positionen der Hauptflecken bestimmt. In diesem Fall werden die Flecken mit F1 und F2 sowie P1 und P2 bezeichnet. Die Definition der Hauptflecken der aktiven Region AR13644 ist in Abb. 4.3 einzusehen.

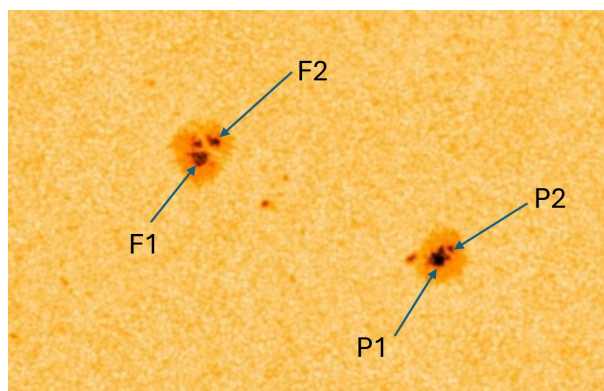


Abbildung 4.3.: Aktive Region 13644 mit der Definition der Hauptsonnenflecken (Quelle: SDO (2024))

Bezeichnungen als F- bzw. P-Fleck sind in bipolaren Gruppen - wie hier vorliegend - üblich. Mit P werden dabei die vorausgehenden (= engl. preceding) Flecken benannt, entsprechend die folgenden (= engl. follow) Sonnenflecken mit F. In Abb. 4.3 sind natürlich auch weitere Sonnenflecken zu sehen. Diese werden aufgrund ihres schnellen Verschwindens oder ihrer kleinen Ausprägung für diese Auswertung nicht zu den Hauptflecken gezählt und deshalb nicht weiter ausgewertet.

Die Positionsbestimmung der gewählten Hauptflecken wird mit Hilfe der Software Sun-Map durchgeführt. Sie verläuft analog zum in Kapitel 3.2 beschriebenen Prozess.

Wichtig für die Auswertung mehrerer Bilder einer Zeitfolge ist es stets den Nordwinkel (*Nw*) passend zur Aufnahme zu wählen. Zudem ist es für die spätere Auswertung von großem Nutzen, wenn die Sonnenflecken immer gleich in der Auswertungsdatei bezeichnet werden. Dies ist hier mit F1, F2, P1 und P2 geschehen. Die Position eines Sonnenflecks wird mit der Position des Mittelpunkts seiner Umbra gleichgesetzt und entsprechen ausgewertet. Die Ergebnisse der Positionsauswertung der Hauptflecken der AR13644 im heliographischen Koordinatensystem sind in Abb. 4.4 und Abb. 4.5 dargestellt. Hierbei stellen die Pfeile die zeitliche Entwicklung dar.

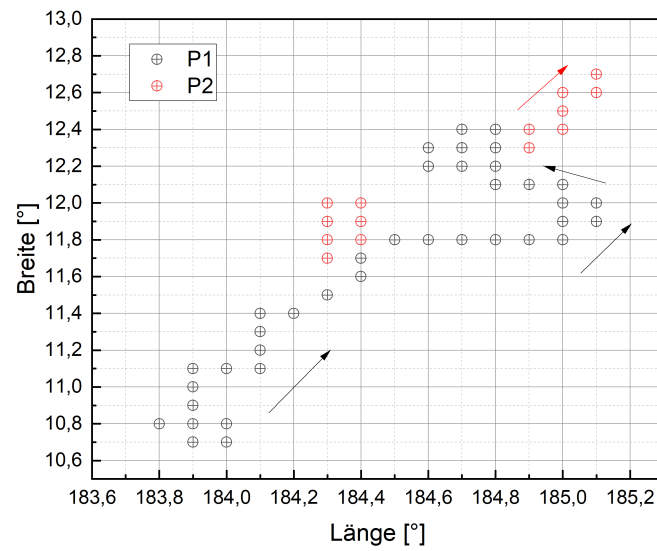


Abbildung 4.4.: Position der P-Flecken in heliographischen Koordinaten

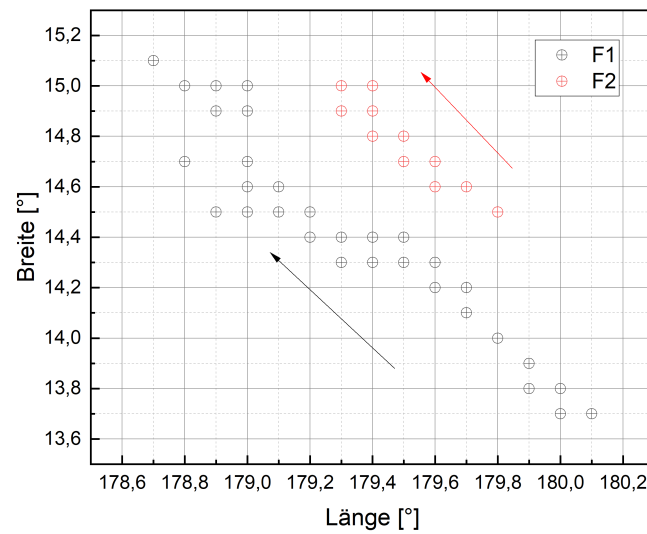


Abbildung 4.5.: Position der F-Flecken in heliographischen Koordinaten

4.2.2. Eigenbewegung der Hauptflecken einer aktiven Region

Die im vorigen Kapitel bestimmte Bewegung kann mitunter auf die differentielle Rotation zurückgeführt werden. Nun ist die Idee, diese Rotation herauszurechnen um auf die sog. Eigenbewegung der Flecken zu kommen. Die Inspiration zu diesem Vorhaben stammt von Möller (2022). Aus seiner Arbeit, die in der 83. Ausgabe des Journal für Astronomie erschien, geht allerdings nicht hervor, wie die differentielle Rotation eliminiert werden kann. Eine Möglichkeit soll nun erläutert werden.

Für die Eigenbewegung eines Sonnenflecks ist die Eigenbewegung in den beiden Koordinatenrichtungen relevant. Für die Bewegung in Richtung der Breitengrade ändert sich nichts im Vergleich zur Bewegung im heliographischen Koordinatensystem. Hier spielt die differentielle Rotation keine Rolle, da sie senkrecht zu dieser Bewegung stattfindet. Problematischer wird es allerdings bei der Bewegung in den Längengraden.

Im heliographischen Koordinatensystem dreht sich das Koordinatennetz mit der mittleren Rotationsgeschwindigkeit ω_{Koor} der Sonne. Diese lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\omega_{Koor} = \frac{360^\circ}{T_{sid}} = \frac{360^\circ}{25,38 \text{ Tage}} = 14,18^\circ \frac{1}{\text{Tage}} \quad (4.2)$$

Setzen wir den ersten Messzeitpunkt als t_0 , so lässt sich wie folgt die Strecke L_n berechnen, die das Koordinatensystem in der Zeit zwischen t_0 und t_n zurückgelegt hat:

$$L_n = \omega_{Koor} \cdot \Delta t_n = \omega_{Koor} \cdot (t_n - t_0) \quad (4.3)$$

Da sich die Flecken in dieselbe Richtung wie auch das Koordinatensystem drehen, muss diese Strecke zur gemessenen Längenbewegung addiert werden.

Nun ist noch der Anteil der Bewegung abziehen, welcher durch die differentielle Bewegung verursacht wird, um auf die Bewegung zu kommen, die der Fleck aus sich heraus vollführt. Die Winkelgeschwindigkeit der differentiellen Rotation $\omega_{diff}(B)$ am gesuchten Breitengrad B berechnet sich entsprechend der Formel aus dem Kapitel zur Rotation der Sonne. Damit ergibt sich die Strecke $L_{diff,n}$, die durch die differentielle Rotation seit dem Messstartzeitpunkt t_0 verursacht wurde iterativ wie folgt:

$$L_{diff,n} = L_{diff,n-1} + [\omega_{diff}(B_n) \cdot (t_n - t_{n-1})] \quad (4.4)$$

Hierbei wird mit B_n der zum Zeitpunkt t_n gemessene Breitengrad bezeichnet. Zudem wird für den ersten Messzeitpunkt t_0 $L_{diff,0} = 0$ gesetzt. Diese Iteration ist notwendig, da sich der Sonnenfleck in den Breitengraden bewegen und somit die Winkelgeschwindigkeit der

differentiellen Rotation variieren kann. Eigentlich wäre eine Integration über diese entsprechenden Winkelgeschwindigkeiten mathematisch korrekt. Allerdings lässt sich dieses Integral durch eine möglich kleingliedrige Iteration annähern. Aus diesem Grund werden die Messzeitpunkte möglichst nah aneinander gewählt. In diesem Fall 3 Stunden.

Insgesamt ergibt sich für eine tatsächliche Koordinate der Eigenbewegung $L_{Eig,n}$ zum Messzeitpunkt t_n aus der bestimmten Koordinate im heliographischen Koordinatensystem $L_{hel,n}$:

$$L_{Eig,n} = L_{hel,n} + L_n - L_{diff,n} \quad (4.5)$$

Wendet man anschließend diese Rechnung auf die 4 Hauptfleckten der AR13644 an, so ergeben sich folgende Eigenbewegungen ΔL und ΔB der Flecken:

	F1	F2	P1	P2
ΔL	0,32°/Tag	0,33°/Tag	0,14°/Tag	0,09°/Tag
ΔB	0,01°/Tag	0,02°/Tag	0,01°/Tag	0,03°/Tag

4.3. Bestimmung der differentiellen Rotation

Ein weiterer möglicher Auswertungsansatz von Sonnenfleckbewegungen ist die Bestimmung der differentiellen Rotation. Dieses Verfahren hat einen besonderen historischen Reiz. Mit diesem Vorgehen wurde die differentielle Rotation entdeckt und erstmals beschrieben. „Aus seiner achtjährigen, von November 1853 bis März 1861 durchgeführten Beobachtungsreihe leitete Carrington das interessante Resultat ab, da[ss] die Winkelgeschwindigkeit der Sonnenflecken infolge der Rotation der Sonne eine mit der heliographischen Breite im Zusammenhange stehende Veränderlichkeit aufweise derart, da[ss] die in der Nähe des Äquators befindlichen Flecke[n] eine geringere Rotationszeit ergeben, als die höheren Breiten angehörenden.“ (Scheller (1908, S.37))

Idee der folgenden Auswertung ist es, sich verschiedene Sonnenflecken anzuschauen, die sich auf unterschiedlichen heliographischen Breiten befinden. Es werden anschließend zu zwei verschiedenen Zeitpunkten die heliographischen Koordinaten bestimmt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Zeitpunkte möglichst weit auseinander gewählt werden, sodass sich die relativen Messungenauigkeiten etwas verkleinern. Wichtig ist allerdings, dass die untersuchten Sonnenflecken bereits eine gewisse Zeit (ca. 1-2 Tage) seit ihrer Entstehung bestehen. Der Entstehungsprozess sowie eine turbulente Entwicklung in einer Fleckengruppe können das Ergebnis unnötig verfälschen und sollten deshalb bei der Sonnenfleckenauswahl berücksichtigt werden. Aus den bestimmten Sonnenfleckkoordinaten kann jeweils eine Rotationsgeschwindigkeit bestimmt werden. Wird diese schlussendlich gegen die heliographische Breite der Sonnenflecken aufgetragen, so erhält man differentielle Rotation der Sonne.

Das Vorgehen soll in der Folge an den nachstehenden Sonnenflecken präsentiert werden:

Bezeichnung	A	B	C	D	E	F	G
Aktive Region	13672	13679	13685	13690	13756	13763	13766
$t_{1,Tag}$	11.05.24	15.05.24	19.05.24	25.05.24	17.07.24	25.07.24	25.07.24
$t_{1,Uhrzeit}$	23:00	12:15	3:00	5:45	15:30	4:15	18:30
$t_{2,Tag}$	17.05.24	20.05.24	26.05.24	30.05.24	26.07.2024	01.08.24	31.07.24
$t_{2,Uhrzeit}$	2:30	15:45	6:00	8:30	6:30	11:45	6:15

Hierbei stellt t_1 jeweils den ersten und t_2 den zweiten Messzeitpunkt für die Auswertung dar. Es wurden in den angegebenen Regionen stets die Hauptflecken vermessen. Dies ist in diesem Fall mit den größten Sonnenflecken jeder aktiven Region gleich zu setzen.

Zur Bestimmung der Koordinaten bietet sich das Programm SunMap an. Das Vorgehen hierbei ist Kapitel 3.2 zu entnehmen. Wichtig ist, dass für die Berechnung nur die Koordinaten relevant sind, die vom Programm direkt bestimmt werden. Das heißt, beim Längengrad ist der absolute Wert relevant und nicht der bezüglich des aktuellen L_0 . Falls die Werte in Bezug auf diesen Längengrad verwendet würden, müsste die Rotation des 0-Carrington-Grades mit beachtet werden, was die Rechnung deutlich verkomplizieren würde. Für den Breitengrad ist diese Überlegung hinfällig, da sich dieser selbst bei einer Überführung in das Carrington-System nicht ändert.

Nach der Auswertung der Sonnenfleckpositionen lassen sich die Winkelgeschwindigkeiten der Sonnenflecken über folgende Formel bestimmen:

$$\omega_{syn} = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad (4.6)$$

L_i beschreibt hierbei die Längenkoordinate (absolut, nicht bezüglich L_0), die zum Messzeitpunkt t_i aufgezeichnet wurde.

Wie der Bezeichnung ω_{syn} bereits zu entnehmen ist, handelt es sich beim bestimmten Wert um die synodische Winkelgeschwindigkeit der gesuchten Rotation. Dies hängt damit zusammen, dass die Bilder vom SDO aus einem geostationären Orbit entstehen. Daher wird auch die berechnete Winkelgeschwindigkeit bezüglich des Koordinatensystems der Erde bestimmt. Man spricht also von der synodischen Winkelgeschwindigkeit. „Da [...] [die] Erde die Sonne im gleichen Sinne umläuft wie die Sonne rotiert (aus Gründen der Entstehung), erhält man die Winkelgeschwindigkeit $\omega(B)_{sid}$ der Sonne in Bezug auf die Fixsterne (**siderisch**) indem man zum bisherigen Ergebnis (Winkelgeschwindigkeit $\omega(B)_{syn}$ der Sonne in Bezug auf das Koordinatensystem der Erde) die Umlauf-Winkelgeschwindigkeit ω_{Erde} der Erde in Bezug auf das Koordinatensystem der Sterne addiert:“

$$\omega(B)_{sid} = \omega(B)_{syn} + \omega_{Erde} \quad (4.7)$$

(Fischer (2020, S.6))

Die Erde dreht sich in ca. 365,25 *Tagen* einmal um die Sonne. Damit ergibt sich ω_{Erde} mit:

$$\omega_{Erde} = \frac{360^\circ}{365,25 \text{ Tage}} = 0,9856^\circ \frac{1}{\text{Tag}} \quad (4.8)$$

(vgl. Fischer (2020, S.6))

Für die untersuchten Sonnenflecken ergeben sich somit folgende Ergebnisse:

Bezeichnung	A	B	C	D	E	F	G
$\omega_{syn} [^{\circ}/Tag]$	13,1174	13,6615	13,4035	13,4908	13,2986	13,4400	13,4809
$\omega_{sid} [^{\circ}/Tag]$	14,1030	14,6471	14,3891	14,4764	14,2842	14,4256	14,4657

Möchte man bestätigen oder widerlegen, ob diese Daten zu der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen differentiellen Rotation passen, ist es wichtig zu wissen, mit welcher Unsicherheit bei den gemessenen Ergebnissen auszugehen ist. Hierbei wird der Fehler bei der Bestimmung der Koordinaten auf $\pm 0,2^{\circ}$ geschätzt.

Der Fehler auf die Differenz der Längengrade $\Delta L = L_2 - L_1$ ergibt sich durch die Addition der absoluten Fehler. Also in diesem Fall:

$$\sigma_{\Delta L} = \sigma_{L_1} + \sigma_{L_2} = 0,2^{\circ} + 0,2^{\circ} = 0,4^{\circ} \quad (4.9)$$

Für den Fehler auf ω_{syn} wird die Zeitmessung als fehlerfrei angenommen, da diese im Verhältnis zum oben diskutierten Fehler verschwindet. Da sich bei Quotienten die relativen Fehler fortpflanzen, ergibt sich für $\sigma_{\omega_{syn}}$ die nachstehende Formel:

$$\sigma_{\omega_{syn}} = \omega_{syn} \cdot \frac{\sigma_{\Delta L}}{\Delta L} \quad (4.10)$$

Abschließend wird angenommen, dass sich der Fehler auf ω_{Erde} im Vergleich zum Fehler auf ω_{syn} vernachlässigen lässt.

Somit ergibt sich für die Unsicherheit von ω_{sid} , dass diese gleich dem Fehler auf die synodische Winkelgeschwindigkeit ist. Die Fehlerbetrachtung geht in diesem Abschnitt auf Taylor (1988, S.39ff.) zurück.

Aus den ausgewerteten Daten ergeben sich folgende Werte für $\sigma_{\omega_{sid}}$:

Bezeichnung	A	B	C	D	E	F	G
$\sigma_{\omega_{sid}} [^{\circ}/Tag]$	0,084	0,083	0,060	0,084	0,050	0,059	0,078

In Abb. 4.6 sind die berechneten siderischen Winkelgeschwindigkeit der untersuchten Sonnenflecken gegen ihre heliographische Breite aufgetragen.

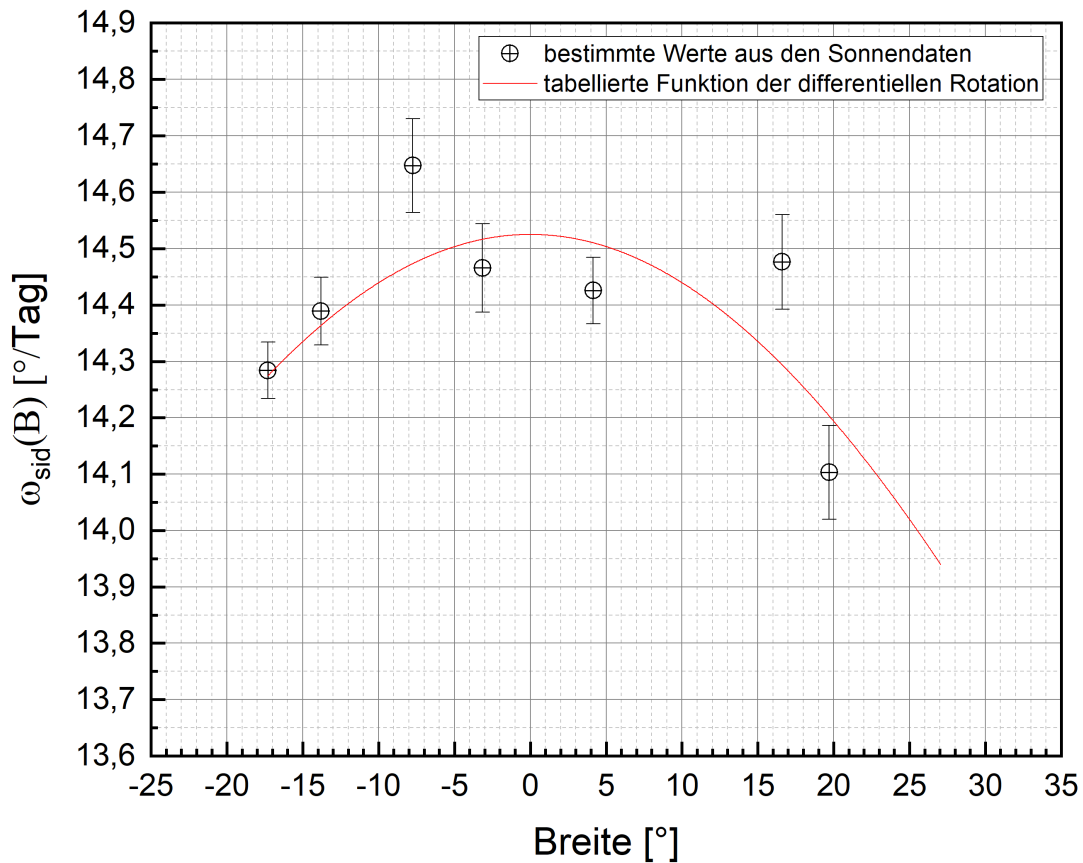


Abbildung 4.6.: Siderische Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit der heliographischen Breite

Vergleicht man die Messwerte mit der in rot eingezeichneten Kurve aus Abb. 4.6, welche den theoretischen Verlauf nach Kapitel 2.3.1 darstellt, so fällt auf, dass alle Werte im Rahmen von zwei Standardabweichungen mit der Kurve übereinstimmen. Es ist also anhand dieser Analyse davon auszugehen, dass die theoretische Kurve ihre Gültigkeit hat.

Für eine unterrichtliche Auseinandersetzung mit dieser Bestimmung der differentiellen Rotation der Sonne ist eine Diskussion der Messwerte im Vergleich zur theoretisch bestimmten Kurve essentiell. Betrachtet man beispielsweise Abb. 4.6, so fallen zwei Ausreißer nach oben sofort auf. In unterrichtlichen Kontexten gibt es an dieser Stelle die Möglichkeit, weiter auf die Ausreißer einzugehen. Stellen sie eine zufällige Abweichung dar oder ist ein anderes Phänomen für die Verschiebung verantwortlich? Den Argumentationen entspre-

chend können andere Flecken (beispielsweise aus einer anderen Carrington-Rotation oder anderen Breitengraden) einer Auswertung unterzogen werden, um die neuen Theorien zu testen.

Es bleiben dem Lehrenden bei dieser Analyse einige Freiheiten in der Umsetzung. Beispielsweise kann die Fleckenzahl deutlich durch arbeitsteilige Kleingruppen erhöht werden. Dies würde zu einer valideren Bewertung des theoretischen Verlaufs führen. Es besteht aber auch die Möglichkeit die Fehlerrechnung aus didaktischen Gründen durch einfachere Abschätzungen der Messwertgenauigkeit zu ersetzen, um einen größeren Fokus auf die digitale Auswertung der Sonnenbeobachtungen zu legen.

5. Fazit

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Analyse von Sonnendaten im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe eine wertvolle Möglichkeit bietet, Schülerinnen und Schüler beim Aufbau eines tieferen Verständnisses von astronomischen Phänomenen zu unterstützen. Durch die Vielfalt der zu untersuchenden Fragestellungen spielt dabei vor allem die Auswertung von Sonnenflecken eine zentrale Rolle. Während der Beobachtung und Analyse dieser Sonnenphänomene werden nicht nur die Dynamiken der Sonne kennengelernt, sondern auch grundlegende Methoden wissenschaftlicher Datenauswertung und -interpretation geschult. Die Integration aktueller Daten in den Unterricht kann dabei die Relevanz der Forschungsfragen steigern und bringt die Faszination der Astronomie in den Schulalltag. Das Einbinden digitaler Hilfsmittel bietet zudem eine didaktische Möglichkeit, den Unterrichtsfokus auf spezielle Bereiche der physikalischen Arbeit zu richten. Somit stellt die Vermessung von Sonnenflecken eine gewinnbringende wie notwendige Verknüpfung von Theorie und Praxis im naturwissenschaftlichen Unterricht dar, die sich anhand der aufgezeigten beispielhaften Auswertungen umsetzen lässt.

Literaturverzeichnis

- BAHR, B., RESAG, J. & RIEBE, K. (2015): *Faszinierende Physik*. Springer.
- COMINS, N. F. (2011): *Astronomie: eine Entdeckungsreise zu Sternen, Galaxien und was sonst noch im Kosmos ist*. Spektrum Akademischer Verlag.
- DEMTRÖDER, W. (2017): *Experimentalphysik 4*. Springer.
- FACHGRUPPE SONNE, V. (2022): *Positionsbestimmung von Sonnenflecken*. URL <https://www.vds-sonne.de/de/AG-Positionen.php>, accessed: (22.09.2024).
- FISCHER, O. (2020): *Die differentielle Rotation der Sonne selbst bestimmen*. <https://www.spektrum.de/sixcms/media.php/1308/WIS-2020-12b-MSOS-Sonnenflecken.pdf>. Accessed: (21.09.2024).
- GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT-GÖTTINGEN (2014): *Die Sonne und ihre Aktivität*. URL <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7066>, accessed: (22.09.2024).
- HALE, G. E. (1908): *On the Probable Existence of a Magnetic Field in Sun-Spots*. In: The Astrophysical Journal, Band 28, 315.
- HANSLMEIER, A. (2013): *Faszination Astronomie*. Springer.
- HANSLMEIER, A. (2020): *Einführung in Astronomie und Astrophysik*, Bd. 4. Springer.
- HOELL, J., JUNKER, E., SCHWAAB, G., SCHWAB, M. & HILBRECHT, H. (2017): *Einführung in die Positionsbestimmung*. https://www.vds-sonne.de/de/Positionen/Positionsbestimmung_2016.pdf. Accessed: (14.09.2024).
- ISB (2024): *LehrplanPLUS*. URL <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/13/physik/grundlegend-astro>, accessed: (25.09.2024).
- IVANOV, V. (2012): *Wilson effect*. URL https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wilson_effect.svg, accessed: (22.09.2024).
- KHALISI, E. (2020): *Historische Beobachtungen von Sonnenflecken*. URL <https://www.sternzeit-online.de/archiv-suche/1-2020/die-langfristige-sonnenaktivitaet/>, accessed: (22.09.2024).
- MIELKE, E. (2013): *Sonne, Mond und... schwarze Löcher: ein Streifzug durch die moderne Astrophysik*. Springer-Verlag.
- MÖLLER, M. (2021): *Schmetterlingsdiagramm Januar 1980 bis Juli 2021*. URL <https://forum.astronomie.de/threads/schmetterlingsdiagramm-januar-1980-bis-juli-2021.310163/>, accessed: (22.09.2024).

- MÖLLER, M. (2022): *Eigenbewegungen von Sonnenflecken*. In: Zeitschrift der Vereinigung der Sternfreunde e.V.
- NOIRLAB, N. (2020): *Sunspot with spectrum*. URL <https://noirlab.edu/public/images/noao-6031/>, accessed: (22.09.2024).
- NSF, U. (2022): *Images from the Inouye Solar Telescope*. URL <https://nso.edu/gallery/gallery-images-from-the-inouye/>, accessed: (22.09.2024).
- PAECH, M. (2001): *Schema einer bipolaren Sonnenfleckgruppe*. URL <https://astrosolar.com/de/informationen/tipps-tricks-zur-sonnenbeobachtung/basiswissen-sonne/sonnenflecken-photospharische-fackeln-und-lichtbrucken/>, accessed: (22.09.2024).
- PESNELL, W. D., THOMPSON, B. J. & CHAMBERLIN, P. (2012): *The solar dynamics observatory (SDO)*. Springer.
- RAST, M., MEISNER, R., LITES, B., FOX, P. & WHITE, A. (2008): *Sunspot Bright Rings: Evidence from Case Studies*. In: The Astrophysical Journal, **557**: 864.
- REINSCH, K., BECK, R., HILBRECHT, H. & VÖLKER, P. (1999): *Die Sonne beobachten*. Sterne und Weltraum, Hütig.
- SCHEFFLER, H. & ELSÄSSER, H. (1990): *Mitte-Rand-Variation*. URL https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Middle-Edge_Variation.png, accessed: (22.09.2024).
- SCHELLER, A. (1908): *Über die Rotationszeit der Sonne: Besonders abgedruckt aus dem LXXXIV. Bande der Denkschriften der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*. K. k. Hof-und Staatsdruckerei.
- SDO, D. (2024): *SolarDynamicsObservatory*. URL <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi/>, accessed: (22.09.2024).
- SUNMAP (2018): *SunMap*. Accessed: (22.09.2024).
- TAYLOR, J. R. (1988): *Fehleranalyse: eine Einführung in die Untersuchung von Unsicherheiten in physikalischen Messungen*. VCH-Verlag-Gesellschaft.
- TILLMANN, R. (2024): *Solar flare diagram*. URL https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenfleck#/media/Datei:Sunspot_diagram.svg, accessed: (22.09.2024).
- VOLKSTERNWARTE, P. E. (2000): *Waldmeier-Klassifikation*. URL <https://www.inter-sol.org/EXAMPL2D.HTM>, accessed: (22.09.2024).
- VON KUSSEROW, U. & MARSCH, E. (2023): *Magnetisches Sonnensystem*. Springer.
- WEIGERT, A., WENDKER, H. J. & WISOTZKI, L. (2009): *Astronomie und Astrophysik: Ein Grundkurs*. John Wiley & Sons.

- WEIPRECHT, J. (2002): *Physikalische Ursachen der Randverdunklung*. URL <https://www.astro.uni-jena.de/Teaching/Praktikum/pra2002/node181.html>, accessed: (22.09.2024).
- WERRENGRAPHIK (2024): *Differentielle Rotation*. URL <https://sonnenrotation-sonnensystem.jimdofree.com/differentielle-sonnenrotation/>, accessed: (22.09.2024).
- WISCHNEWSKI, E. (2021): *Astronomie in Theorie und Praxis Kompendium und Nachschlagewerk mit Formeln, Fakten Hintergründen*. 9.

A. Anhang

Die nachfolgenden Bilder stammen allesamt aus dem Datenarchiv der SDO. (SDO (2024)):

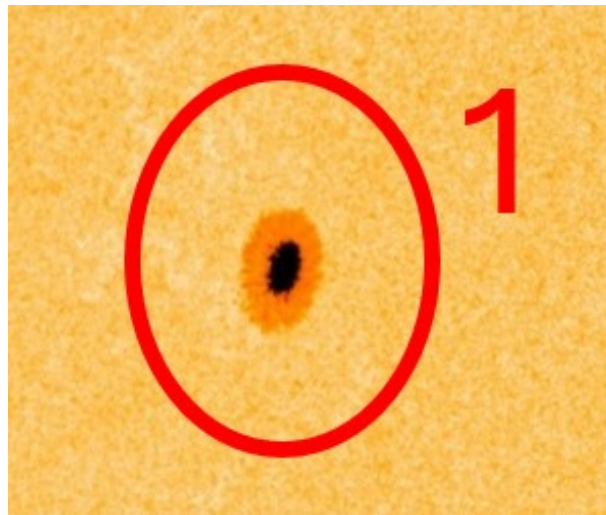


Abbildung A.1.: Fleckengruppe 1 aus Abb. 4.1

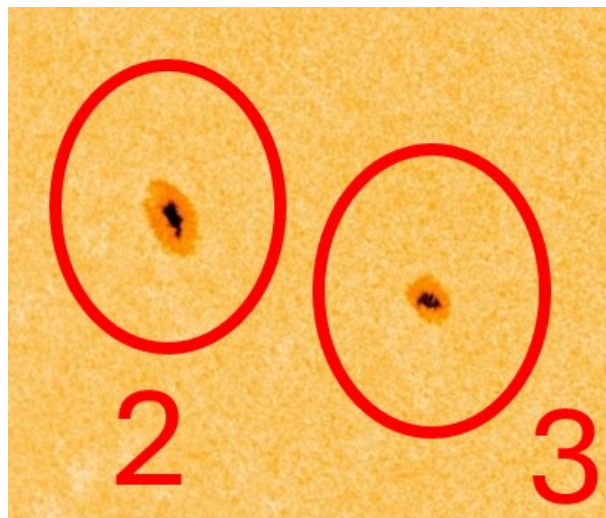


Abbildung A.2.: Fleckengruppen 2 und 3 aus Abb. 4.1

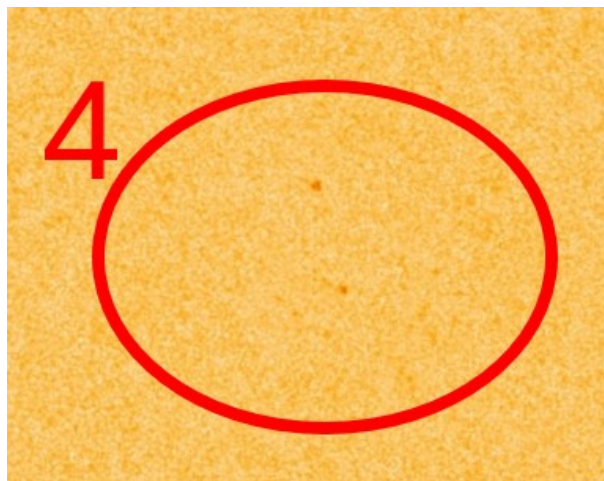


Abbildung A.3.: Fleckengruppe 4 aus Abb. 4.1

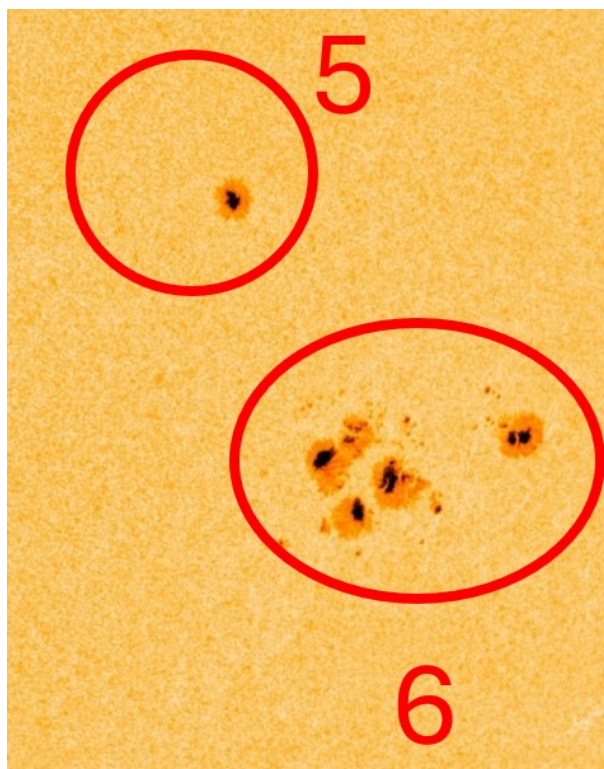


Abbildung A.4.: Fleckengruppen 5 und 6 aus Abb. 4.1

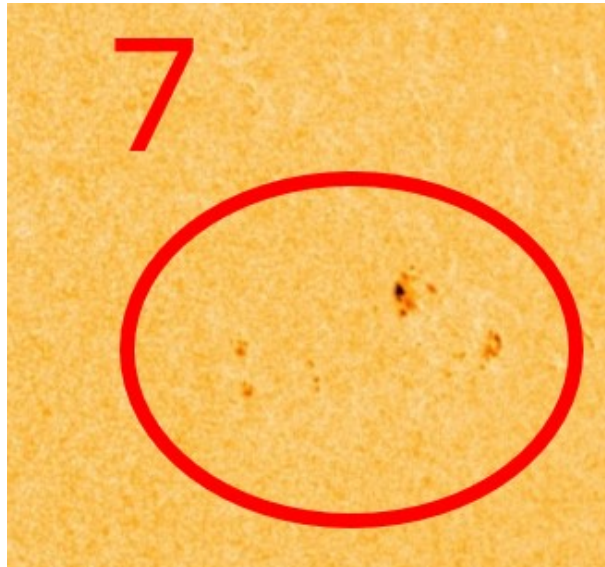


Abbildung A.5.: Fleckengruppe 7 aus Abb. 4.1

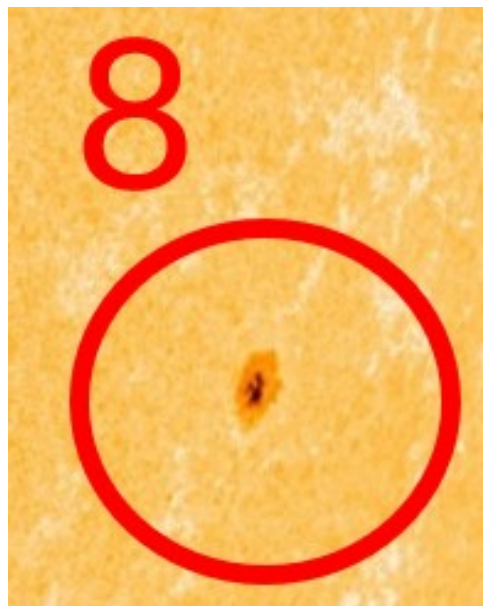


Abbildung A.6.: Fleckengruppe 8 aus Abb. 4.1

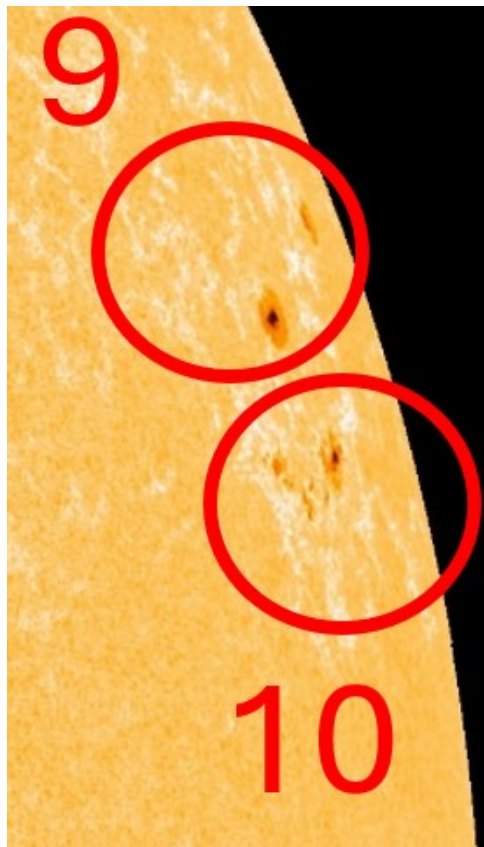


Abbildung A.7.: Fleckengruppen 9 und 10 aus Abb. 4.1

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig verfasst wurde und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt wurden. Weitere Personen waren an der Fertigung nicht beteiligt. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, sind in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Sofern die Arbeit unter Einsatz von Künstlicher Intelligenz als Werkzeug erstellt wurde, sind die entsprechenden Stellen der Arbeit unter Angabe des verwendeten Werkzeugs gekennzeichnet.

Diese Erklärung erstreckt sich auch auf etwa in der Arbeit enthaltene Zeichnungen, Kartenskizzen und bildliche Darstellungen.

Ort, Datum

Unterschrift