

Photovoltaik

Hintergründe und Technologien

Da die erneuerbaren Energieressourcen immer mehr an Bedeutung in unserer Gesellschaft gewinnen und hierbei die Photovoltaik eine viel umworbene Technik ist soll dieser Bericht eine Einführung in die Hintergründe der Funktion und der unterschiedlichen Technologien bieten.

Licht

Zu Beginn widmen wir uns der Frage „Was ist Licht?“. Eine Zeitreise beginnend im 17. Jh. führt uns bis in das 19. Jh. und wird uns dies nach aktuell gültigem physikalischem Verständnis beantworten.

Teilchenbild

Isaac Newton (1543-1726) vertritt die Meinung, dass das Licht ein Strom kleiner Teilchen ist. In seinem Buch Opticks beschreibt er als Grundlage seiner Theorie, dass das Licht einen scharfen Schatten wirft, im Gegensatz zu Schall oder Wasserwellen. Er gilt somit als Vertreter des Teilchenbildes für Licht.

Wellenbild

Christian Hugen (1629-1695) und später Thomas Yung (1773-1829) beschreiben die Fortbewegung von Licht als eine Wellenbewegung, hierzu liefert der Young'sche Doppelspaltversuch als das entscheidende Experiment den Übergang von der Auffassung eines Teilchenbildes zu dem eines Wellenbildes.

Beim Doppelspaltversuch wird Licht auf eine Platte „B“ gestrahlt welche zwei kleine Spalten hat die nahe nebeneinander liegen (siehe Abbildung 1). Das durchdringende Licht fällt auf der anderen Seite auf eine Platte „C“ und wird auf der Platte als Streifenmuster sichtbar. Dies ist begründet durch die Interferenz. Es bilden sich durch die Überlagerung von Wellen Bereiche mit hoher Einstrahlungsintensität aus und ebenso Bereiche wo sich die Wellen durch destruktive-Interferenz auslöschen, somit bleibt dieser Bereich dunkel.

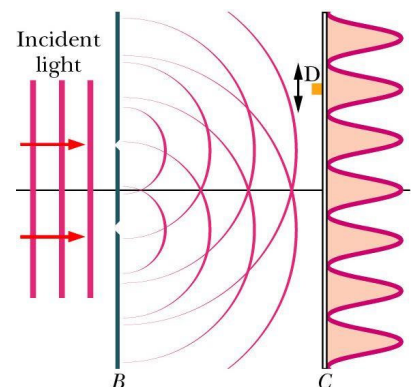


Abbildung 1: [1] Doppelspaltversuch- Licht trifft von links auf Platte mit zwei Spalten „B“. Durchscheinendes Licht wird auf Platte „C“ in Form von hellen Linien projiziert. „D“ stellt einen Photonendetektor dar der eine Intensitätsdarstellung in der Form einer stehenden vertikalen Welle (rosa) darstellt.

Zwischen den Streifen der Interferenz und der Destruktiven Interferenz bildet sich eine Helligkeitsabstufung. Hier soll vollständigkeithalber erwähnt werden das sich Licht auch beugt, d.h. trifft Licht auf eine Kante so wirft es zwar einen scharfen Schatten, jedoch ist dieser Winkel des Schattens größer als der Winkel mit dem das Licht auf die Kante trifft. Daher erscheinen im Doppelspaltversuch die Bereiche der Destruktiv-Interferenz nicht als komplett dunkel.

Infrarot

Ebenso im 18 Jh. entdeckte Friedrich Herschel (1738-1822) die Infrarotstrahlung die für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Er benützte zur spektralen Zerlegung des Lichtes ein Glasprisma und wollte dabei die Energieverteilung der einzelnen Teile des Sonnenlichtes messen. Die von der Sonne ausgestrahlten Wellenlängen beschränken sich nicht nur auf den Bereich des sichtbaren Lichts welche eben durch ein Prisma in die einzelnen Teile, also Wellenlängen mit der Einheit Nanometer [nm], aufgeteilt werden können.

Wie in Abbildung 2 dargestellt bricht der violette Anteil (Wellenlänge=380 nm) des Sonnenlichtes mehr zur Prismen Oberfläche hin als der orange und rote Anteil.

Herschel nützte geschwärzte Quecksilber Thermometer und maß die Temperaturen in den jeweiligen Bereichen. Dabei bemerkte er das der größte Temperaturanstieg nicht im sichtbaren Spektralbereich liegt, somit erkannte er das jenseits des roten sichtbaren Lichtes es noch die Infrarotstrahlung gibt. Dies wird als der Wellenlängenbereich von 780 nm bis 1 mm bezeichnet.

Angemerkt sei hier zu diesem Experiment, das per se die Infrarotstrahlung (z.B. 1000 nm) je spezi-fischer Wellenlänge energieärmer ist als die eines Anteiles des sichtbaren Lichtes (z.B. 700 nm), zudem wird im Vergleich dieser zwei Wellenlängen mehr sichtbares Licht (700 nm) von der Sonne ausgestrahlt als die der Infrarotstrahlung (mit 1000 nm). Somit müsste eigentlich im sichtbaren Bereich durch einen vermuteten größeren Energieeintrag

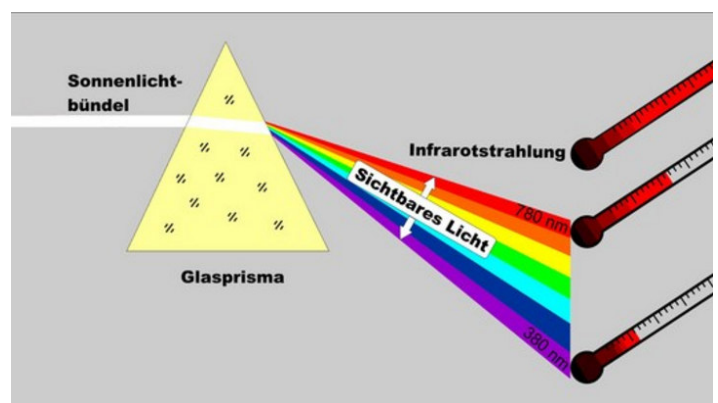


Abbildung 2: [2] Temperatur Messung der spektralen Anteile (Wellenlängen) des Sonnenlichtes

die Temperatur am Thermometer höher sein, jedoch muss berücksichtigt werden, dass durch die Größe der Thermometer-Messfläche mehr als nur die eine Wellenlänge absorbiert wird. Da sich eben langwellige Strahlung, wie Infrarot, weniger stark bricht wie kurzweilige (sichtbares violett), kumulieren sich im Infrarotbereich mehrere Wellenlängen auf die vergleichsweise gleiche Fläche wie im violetten Bereich. Somit ist auch erkenntlich, dass die eintreffende Energie und damit die Temperatur dort höher ist.

Elektromagnetische Welle

Die Maxwell'schen Gleichungen lassen im 19. Jh. zu dem Schluss kommen, dass sich Licht in Form einer elektromagnetischen Welle mit der Geschwindigkeit von $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (im Vakuum) fortbewegt. Jedoch konnte mit dieser Theorie nicht die Wechselwirkung von Licht und Materie erklärt werden, also die Absorption von Licht durch einen Körper, und ebenso nicht die Wärmestrahlung eines Körpers.

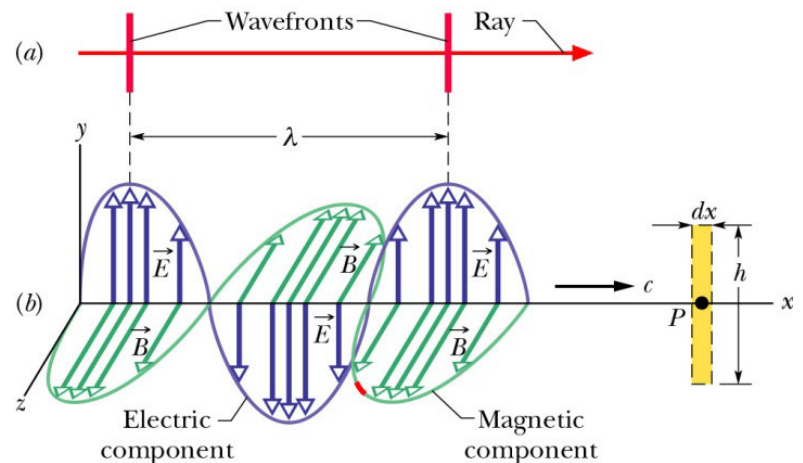


Abbildung 3: [1] Licht als Welle von elektrischem und magnetischem Anteil.

Somit entbrannte der Disput, ob Licht nun eine Welle oder ein Teilchen sei. Max Planck (1858-1947) konnte unter der Annahme, dass Licht aus Wellenpaketen besteht, das Gesetz der Schwarzkörperstrahlung herleiten, siehe Abb. 4 & Abb. 5. Somit erklärte er das Licht, später als „Photon“ bezeichnet, als ein Teilchen des elektromagnetischen Feldes. Die Eigenschaften wie Reflexion, Brechung von dem Teilchenbild und vom Wellenbild erklärt werden, hingegen Interferenz, Beugung und Polarisation nur vom Wellenbild. Der photoelektrische Effekt kann wiederum nach aktuellem Wissensstand nur mit dem Teilchenbild erläutert werden. Somit bestehen beide Ansichten als der sogenannte Wellen-Teilchen Dualismus des Lichtes.



Abbildung 4: [1] Planck nimmt das Licht als Energiepaket.

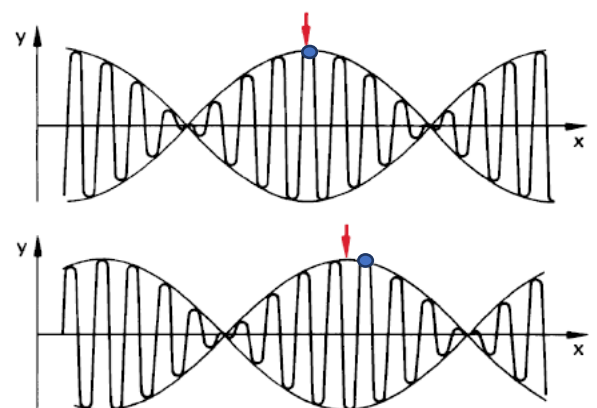


Abbildung 5: [1] Zustand einer Wellengruppe. Der Pfeil kennzeichnet das Maximum der Gruppe; der kleine Kreis einen Zustand konstanter Phase.

Sonnenstrahlung

Die Sonne besteht zu 92 Vol-% aus Wasserstoff (H) welches in einer Proton-Proton Zyklus (Fusionsreaktion) in Helium (He) umgewandelt wird, welches 7 Vol-% des Sterns einnimmt. Der restliche Anteil von ca. 1 Vol-% besteht volumetrisch abstuft aus Sauerstoff (O), Kohlenstoff (C), Neon (Ne) und Stickstoff (N). Wobei C & N & O ebenso in einer Reaktion anteilig ca. 1,6 % zur Energieproduktion in der Sonne beitragen. Dieser Reaktionszyklus spielt anteilmäßig bei größeren Sternen, welche dann auch höhere Temperaturen haben, eine wichtigere Rolle.

Temperaturstrahlung

Die effektive Oberflächentemperatur der Sonne von 5778 K führt zu einer Temperaturstrahlung, vergleichbar mit der Leuchtwendel einer Glühlampe.

Abhängig von der Temperatur strahlt ein Körper die Wellenlängen anteilmäßig unterschiedlich ab. Max Plank hat hierfür das Gesetz der sogenannten Schwarzkörperstrahlung hergeleitet. Dieses besagt das ein idealisierter Körper, auch schwarzer Strahler genannt, jede auf ihn auftreffende Strahlung absorbiert und zugleich abhängig von seiner Temperatur ein Strahlungsspektrum emittiert.

Die Sonnenstrahlung folgt dieser Beschreibung sehr gut und kann daher als ein solch schwarzer Körper angesehen werden, siehe Abbildung 6. Außerhalb der Erdatmosphäre kann ein solares Wellenlängenspektrum nach der roten Kurve gemessen werden.

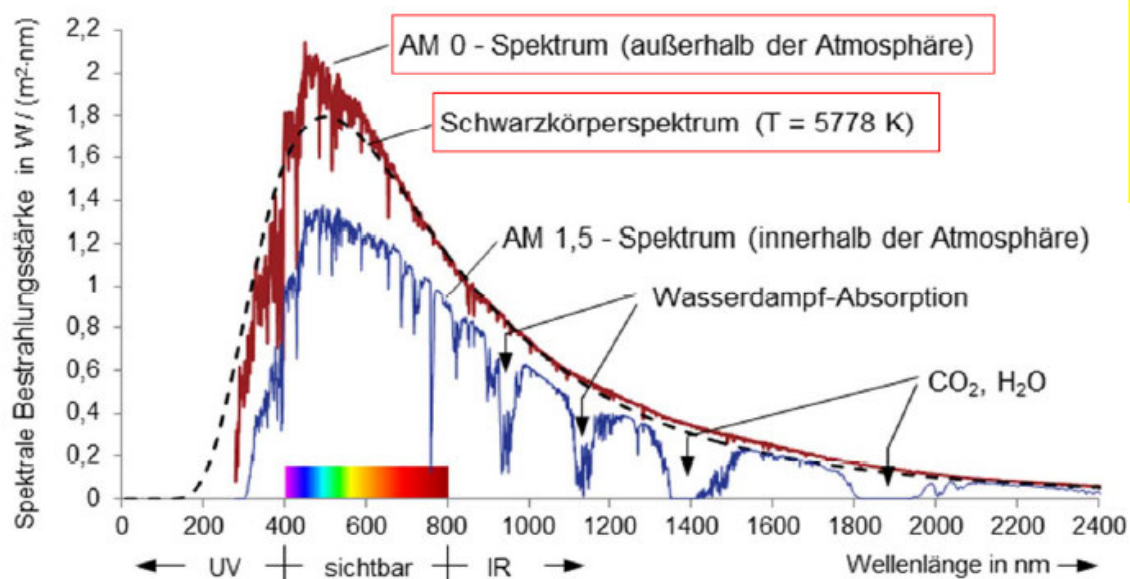


Abbildung 6: [1] Spektralverteilung der Sonnenstrahlung innerhalb der Atmosphäre AM 1,5 & AM1 und außerhalb der Atm. AM 0

Einstrahlung

Steht die Sonne im Zenit und im 90° Winkel zur Erdoberfläche, wird die kürzeste Distanz von der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre zurückgelegt, um auf die Erdoberfläche aufzutreffen. Es wird somit eine Air Mass von Faktor 1 (AM 1) durchdrungen, siehe Abbildung 7. Für Regionen die sich nicht innerhalb des nördlichen und südlichen Sonnenwendekreises befinden kann eine AM 1 nicht erreicht werden, da die Mehrheit der Weltbevölkerung aber in diesen Gebieten lebt und daher auch die Energie dort produziert wird definiert man einen gebräuchlicheren Air Mass von 1,5. Da die Luft- und Wasserdampf-Anteile des Solaren Spektrums absorbiert werden, gelangen diese Wellenlängen (z.B. 950 nm od. 1150 nm) nicht auf die Erdoberfläche, ebenso wie die Wellenlängen welche durch CO_2 oder Wasser liquid reflektiert werden, vergleiche mit Abb. 6.

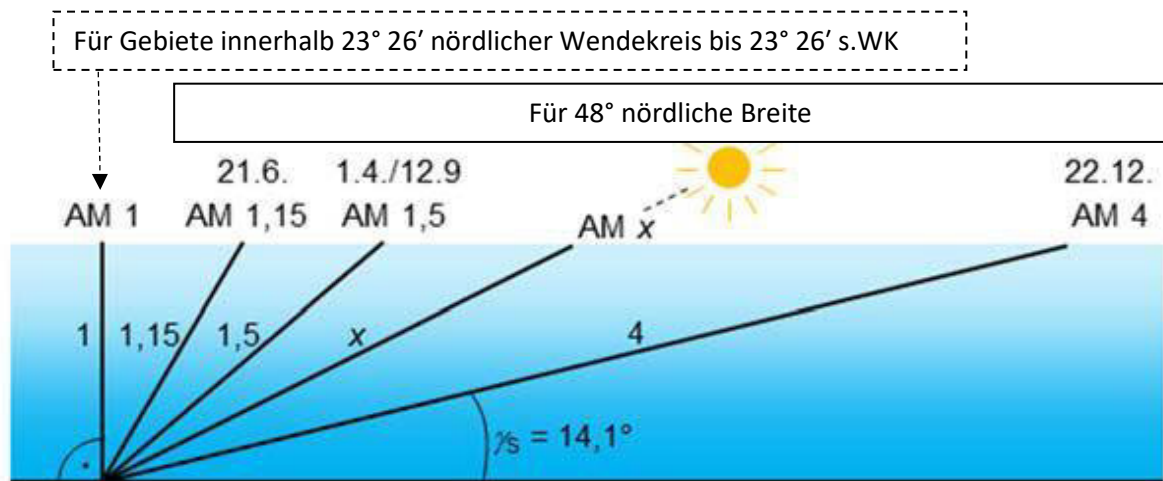


Abbildung 7: [3] Air Mass Darstellung zur jeweiligen Jahreszeit für 48° nörd. Breite und AM 1 für Gebiete zwischen den Wendekreisen.-adaptiert

In einer Globalstrahlungskarte wie in Abbildung 8 ist die jährliche Summe der diffusen Strahlung und der direkten Sonnenstrahlung zusammengefasst dargestellt. Abhängig von Breitengrad, Wetterbedingungen und Verschattung durch Gebirge ergeben sich unterschiedliche jährlichen Einstrahlungssummen je Fläche in $[\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$.

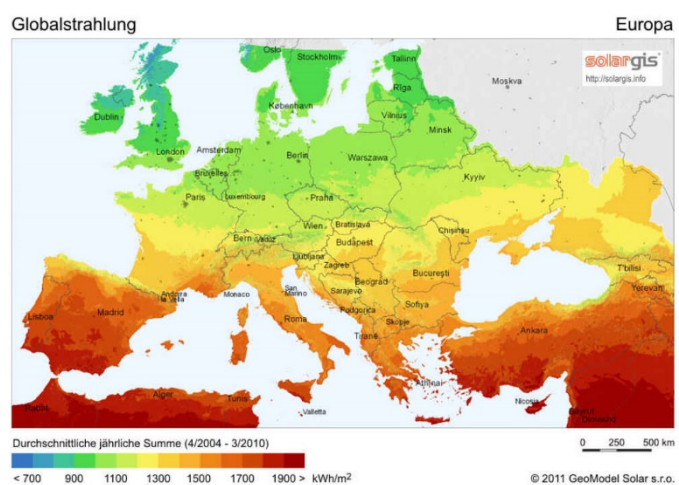


Abbildung 8: [4] Globalstrahlungskarte der durchschnittlichen jährlichen Strahlungssumme von Europa. Z.B. Linz = $1100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

Technologie

Generell können drei Technologien unterschieden werden. Wobei die Silizium (Si) basierenden PV und die Dünnschicht-PV am Markt verfügbar ist, hingegen die „neuen PV-Technologien“ wie Organische, Perovskite oder Farbstoff-Solarzellen noch im Forschungsstadium sind und sich erst etablieren müssen.

Silizium-PV

Durch den zeitlichen Vorsprung in dem Forschungsbereich der Halbleitertechnik, welche der Si-Solarzellenentwicklung zu Gute kommt, erreichen diese einen Marktanteil von ca. 80%. Zudem ist Silizium nicht giftig und in sehr großen Mengen und günstig verfügbar. Während des Wafer-Herstellungsprozess wird jedoch eine Anzahl von toxischen Chemikalien verwendet wie Trichlorsilan (SiHCl_3). Man unterscheidet monokristalline- und polykristalline- Wafer, wobei erstere i.d.R. höhere Wirkungsgrade, ca. 20%, erzielen. Einzelne Solarwafer werden danach nebeneinander angeordnet und elektronisch zusammengeschlossen und in Glas versiegelt, somit ergeben diese dann ein Modul, siehe Abbildung 9.

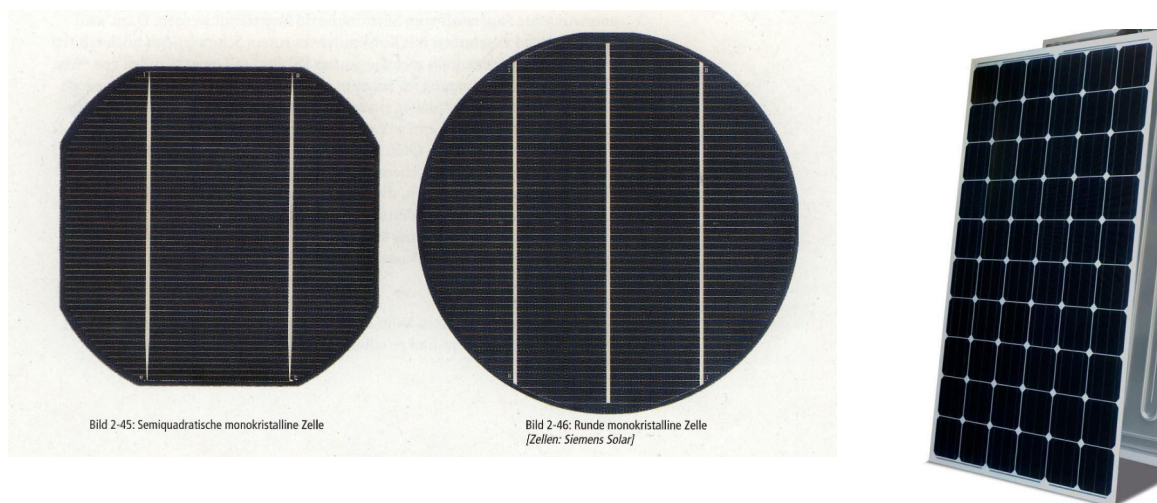


Abbildung 9: [3] Solarwafer mit in square und round-shape. [5] Solarmodul aus square-shape Wafer.

Dünnschicht-PV

Die wichtigsten zwei Vertreter der Dünnschichtsolarzellen sind CIGIS-Modul (copper indium gallium selenide), oder auch CIS – Module genannt, und CdTe - Solarzellen (Cadmiumtellurid). Hierbei wird anstatt von einzelnen Wafern eine Zelle in Modulgröße als Photoaktive Schicht aufgetragen.

CaTe-Module sind die größten Vertreter der Dünnschicht-Module und haben einen Marktanteil von 8%. Die Verfügbarkeit von Cadmium (Ca) ist unproblematisch, mit einem Abbaupensum von 20000 t/a weltweit reichen die Vorkommen für den aktuellen Bedarf aus. Jedoch ist Tellur (Te) ein kritisches Element, das mit einem Abbau von 500 t/a fast so knapp wie Gold ist.

Cadmium ist ein giftiges Schwermetall und stellt somit ein Umweltrisiko dar. Es ist zwar eine stabile, in Wasser unlösliche, chemische Verbindung, die jedoch im Falle eines Brandes bei über 1000°C schmilzt und so eine Gefahr darstellt.

Die Vorteile dieser Module liegen im geringeren Materialverbrauch und somit geringeren Modulkosten. Obwohl die CaTe-Module generell einen geringeren Wirkungsgrad haben, ca. 13%, sind diese in Regionen mit hohen Temperaturen geeigneter als Si-Module da zweitens durch die hohen Temperaturen an Wirkungsgrad einbüßen. [3]



Abbildung 10: [6] Dünnschicht-Module aufgeständert zu Arrays auf Weideflächen für Schafe.

Obwohl dieser Bericht nur einen Bruchteil des aktuellen Wissenstandes in der Photovoltaik wiedergibt, sind es doch die Grundlagen der Photoaktiven Materialwissenschaften. Beginnend bei der banalen Frage „Was ist Licht?“ bis hin zu einer Vorstellung von marktreifen Technologien soll dieser Review vorwiegend einen Überblick schaffen und Interesse an den Hintergründen der Physik schüren.

Abb.	Quelle	Zugriff	Link
[1]	Halliday, Physik 2009	25.01.2020	Halliday, Resnick, Walker, Physik. Wiley Verlag, 2. Auflage, 2009. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, DGS Leitfaden Photovoltaische Anlagen, 5. Auflage)
[2]	Jörg Hollandt 17.04.2009	25.01.2020	https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/elektromagnetisches-spektrum/infrarotstrahlung/
[3]	Mertens, K. 2013	25.01.2020	Mertens: Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis, 2. Auflage
[4]	SolarGIS 26.05.2007	25.01.2020	http://solargis.info/doc/index.php?select=71
[5]	Energie Schweiz 31.3.2017	25.01.2020	PVT Wrap-Up Energiesysteme mit Photovoltaisch- Thermischen Solarkollektoren
[6]	Emmanuel Ogunshile April 2017	25.01.2020	https://www.researchgate.net/figure/Thin-Film-Solar-Cells_fig2_317299110
[7]	NASA/SDO/Goddard Space Flight Center 2017	25.01.2020	Sun Primer: Why NASA Scientists Observe the Sun in Different Wavelengths," 2013 1 23. [Online] https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/light-wavelengths.html . [Zugriff am 10 03 2020]

Komplementärinformation

Die Sonne strahlt in allen Wellenlängenbereichen Licht aus, wie in Abb. 6 dargestellt ist die Intensitätsverteilung jedoch unterschiedlich. Von den hohen energiereichen, kurzen Wellenlänge emittiert die Sonne nur wenig Strahlung, im sichtbaren Bereich (400-800 nm) ist die energiedichte zwar nicht so groß jedoch die „Menge“ an den Strahlen ist viel größer. Die Summe der sichtbaren Wellenlängen-anteile resultiert auch in der weißen Erscheinung der Sonne für uns. Im nicht sichtbaren Infrarotbereich strahlt die Sonne eine große „Menge“ an energiearmer Strahlung aus, welche anteilsmäßig jedoch den größten Teil bildet.

Neben dem AMO Spektrum, wie in Abb.6 rot dargestellt, das von der Sonnenoberfläche ausgestrahlt wird gibt es auch eine Strahlung welche durch Sonneneruptionen verursacht werden. In diesen können extreme Temperaturen 6-10 Million Kelvin auftreten, wodurch Elemente wie Helium- oder Eisen-Ionen extrem kleine Wellenlängen im Ultravioletten Bereich ($10\text{ nm} = 100\text{ Å}$...Angstroms) aussenden, ähnlich wie in einem Spektrometer zur Bestimmung der Elemente. Die Sonne besteht generell aus heißen Gasen, die eine Temperatur von ca. 5700K haben und somit als die Oberflächentemperatur definiert sind. In der „Atmosphäre“ der Sonne können jedoch noch höhere Temperaturen erreicht werden, vergleiche mit Abb. 7. Dies kann auch auf der Erde in kleineren Maßstab erzeugt werden, ähnlich wie es bei der Corona-entladung in der Hochspannungstechnik oder der Plasmaerzeugung in Laboren Anwendung findet.

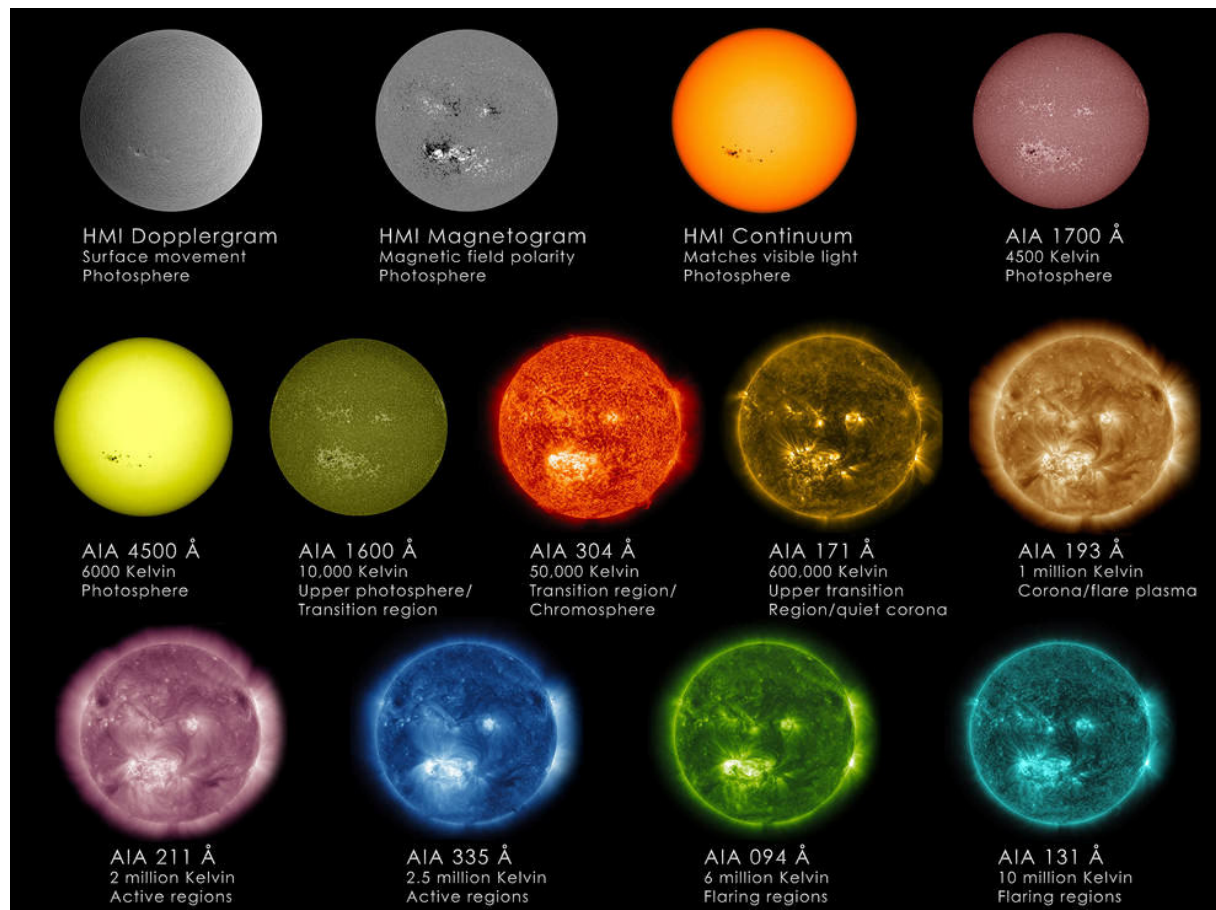


Abbildung 11: [7] SDO views the sun in 13 different ways, using two different on-board instruments.