

Jugend forscht 24/25



SOLARZELLE 3D

Von Tjorve Elend

Inhaltsverzeichnis

Theoretische Grundlagen zur Solarzelle	Seite 2
Die Idee und Anfänge des Projekts	Seite 3
Die erste praktische Umsetzung	Seite 4
Weitere Fortschritte	Seite 8
Aktueller Stand und Auswertung	Seite 12
Potenzielle Einsatzgebiete	Seite 15
Fazit und Ausblick	Seite 16
Danksagung	Seite 17
Abbildungsverzeichnis/Quellen	Seite 18

3D Solarzelle

Theoretische Grundlagen zu Solarzelle

Das Prinzip der Solarzelle beruht auf dem photovoltaischen Effekt. Dieser beschreibt die Umwandlung von Strahlung in elektrische Energie. Damit der photovoltaische Effekt stattfinden kann müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Strahlung muss eingefangen werden (Absorption)
2. Die Lichtabsorption muss zur Anregung beweglicher negativer und positiver Ladungsträger führen
3. Die Ladungen müssen getrennt werden

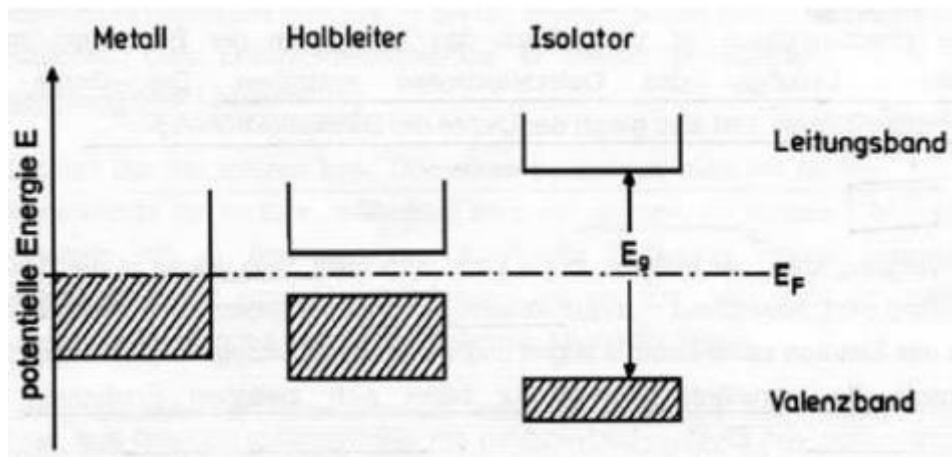
Die ersten beiden Bedingungen werden durch die halbleitenden Materialien erfüllt. Für die Ladungstrennung wird ein Übergang zwischen zwei verschiedenen Halbleitern benötigt (p-n-Übergang).

Die Leitfähigkeit von Halbleitern wird durch die Temperatur bestimmt: Bei 0 K (-273,15 °C, absoluter Nullpunkt, bei dem sich die Atome nicht mehr bewegen) sind sie daher gleichzusetzen mit Isolatoren, während sie auf Raumtemperatur leitfähig sind, jedoch nicht so stark wie Metalle. Durch steigende Temperaturen oder Beleuchtung steigt auch die Leitfähigkeit. Daher wird Licht benötigt, um die Ladungsträger anzuregen und den Halbleiter leitfähig zu machen.

Halbleiter sind Isolatoren mit schmaler Bandlücke: Elektronen können bereits bei geringer Anregung (thermisch, Licht) ins Leitungsband gelangen. Die Bandlücke beschreibt den Abstand zwischen Valenzband* und Leitungsband*. Dort können sie sich als negative Ladungen frei bewegen und somit einen Stromfluss ermöglichen (Abb. 01). Ein Elektron im Leitungsband hinterlässt dabei im Valenzband eine Fehlstelle, die als Loch (Defektelektron) bezeichnet wird. Das Loch verhält sich wie ein positiv geladener Ladungsträger. Die Anregung führt zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares, wobei die Anregungsenergie mindestens so groß sein muss wie die Bandlücke E_g . E_g beschreibt die benötigte Energie, um vom Valenzband auf das Leitungsband zu springen. Dieses ist in der folgenden Abbildung gut zu sehen.

Valenzband: Energiebereich mit Elektronenüberschuss

Leitungsband: Energiebereich mit Elektronenmangel



(Abb. 01) Bändermodell für verschiedene Leitungstypen. Mit Valenz- und Leitungsband.

Die Idee und Anfänge des Projekts

In dem Projekt „3D Solarzelle“ geht es darum, die verfügbare Bodenfläche so effizient wie möglich zur Energiegewinnung mit Solarzellen zu nutzen. Dies wird mit Lichtbrechung erreicht, etwa mit einem Strahlteiler, oder durch Spiegelung mit einem Spiegel. Die Idee zu dem Projekt entstand vor ungefähr 2 Jahren und konnte seitdem im SFZ (Schüler-Forschungszentrum-Hamburg) umgesetzt werden.

Meine Motivation war damals einfach Spaß zu haben, ein bisschen zu basteln und mir Wissen anzueignen.

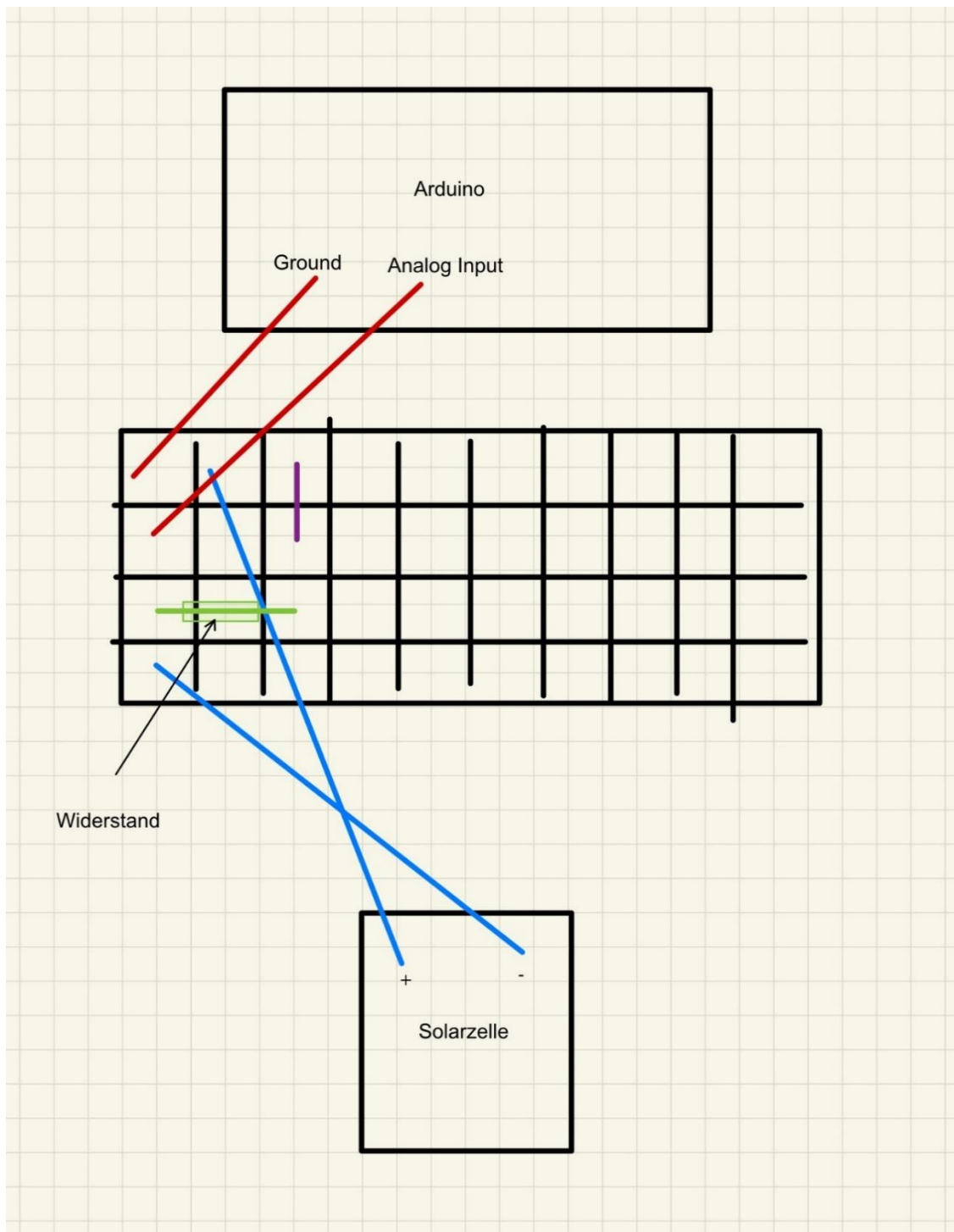
Das Projekt startete mit einer Onlinerecherche zum Thema Solarenergie. War meine Idee zu dem Projekt realistisch umsetzbar? Die Erkenntnisse zeigten, dass die Vermutung, dass die Solarzellen effektiver betrieben werden können, um das einfallende Sonnenlicht umzuwandeln richtig ist. Die durchschnittliche Sonneneinstrahlung im Zenit in Deutschland liegt bei ungefähr 1100 kWh pro m² im Jahr. Währenddessen können herkömmliche kristalline Siliziumzellen ungefähr 127,5-187 kWh pro m² im Jahr in Energie umwandeln, also ungefähr 11,59 bis 17 Prozent. Demnach bräuchte man für 100 Prozent Auslastung auf 1 m² Bodenfläche 8 m² Solarzellen. Somit war klar: Das Sonnenlicht muss geteilt werden.

Die erste Überlegung zur Umsetzung war, groß zu starten mit 8 Solarzellen in einem Oktaeder, das Licht würde mit einem Prisma geteilt und perfekt zurückgeworfen werden. Nach weiteren Überlegungen entstand ein Projektaufbau mit zwei Solarzellen und einem Strahlteiler. Zwei Solarzellen vom Typ SM850L und zwei geliehene Dreiecksprismen wurden zu einem behelfsmäßigen Strahlteiler umgebaut. Eine der beiden Solarzellen wurde mit einer 100-W-Lampe beleuchtet. Währenddessen wurde die erzeugte Spannung an einem Widerstand mit einem Multimeter gemessen.

Im nächsten Schritt wurde eine Solarzelle hingelegt, der Strahlteiler daraufgestellt und die zweite Solarzelle orthogonal zur ersten angeordnet. Dann wurden auch diese mit der 100 W-Lampe bestrahlt. Die ersten Messungen zeigten positiven Ergebnisse. Somit konnte der Beweis erbracht werden, dass unter Laborbedingungen das Aufteilen des Lichtes funktioniert. Zur erweiterten Beweisführung wurde der Praxistest im Freien über einen längeren Zeitraum geplant.

Die erste praktische Umsetzung

Die Idee war, einen Arduino zu programmieren, der die Stromdaten der Solarzelle ausmisst und diese auf einer SD-Karte speichert, um sie später am PC auszulesen. Die Programmierung des Arduinos und die Verkabelung stellten sich aber schwieriger heraus als anfangs gedacht. Im Internet gab es kein passendes Beispiel, etwas Neues musste überlegt werden. Die Datenspeicherung war relativ einfach, dazu gab es etliche Beispiele aus dem Internet und nur einzelne Variablen mussten geändert werden. Am Anfang gab es im Stromkreislauf noch ein Drehpotentiometer. Das Problem ist, dass man die gemessene Stromspannung dadurch verändern konnte. Also wurde das Drehpotentiometer durch einen konstanten Widerstand ausgetauscht. Dadurch gab es einen funktionierenden Stromkreislauf. Das Beibehalten des Drehpotentiometers hätte zu Ungenauigkeiten führen können vor allem wenn etwas gegen das Drehpotentiometer kommt. Darüber hinaus hätte jeder Aufbau sein eigenes Drehpotentiometer, was zu Problemen bei der Startkonfigurierung führen könnte und damit die Messung verfälschen würde.



(Abb 02) Selbsterstellte Skizze zur Verkabelung des Arduinos

Ground ist die Erdung des Arduinos und der Analog Input ist ein analoger Sensor des Arduinos.

Die Solarzelle ist wie eingezeichnet mit dem Plus- und Minuspol auf dem Steckbrett verbunden und die Beschriftung des Widerstandes ist leider im Bild oben schwer zu erkennen, bei diesem handelt es sich um das grün eingezeichnete.

Die ersten Messungen wurden einfach in ein Textdokument geschrieben, was rückblickend nicht die beste Lösung war. Wie in Abb. 03 zu sehen ist, war das komplett unübersichtlich und nicht zielführend, weshalb dann nur Stichproben gemacht wurden.

```

Start
Start
Minute: 1 Spannung A0 = 0 Spannung A1 = 0
        Spannung A2 = 29
Minute: 2 Spannung A0 = 9 Spannung A1 = 29
        Spannung A2 = 26
Minute: 3 Spannung A0 = 10 Spannung A1 = 26
        Spannung A2 = 60
Minute: 4 Spannung A0 = 52 Spannung A1 = 60
        Spannung A2 = 58
Minute: 5 Spannung A0 = 48 Spannung A1 = 58
        Spannung A2 = 55
Minute: 6 Spannung A0 = 50 Spannung A1 = 55
        Spannung A2 = 58
Minute: 7 Spannung A0 = 53 Spannung A1 = 58
        Spannung A2 = 71
  
```

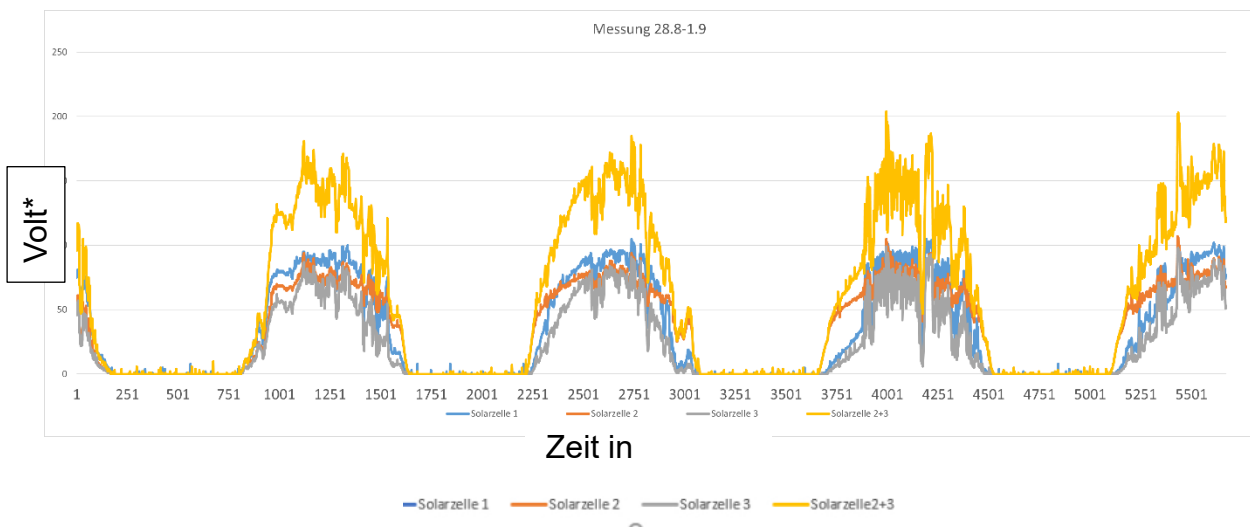
(Abb. 03) Ausgabe meiner ersten Messung (4-7 Juli 23)

Vor den Sommerferien 2023 wurden in einem nächsten Entwicklungsschritt dem Textdokument csv-Trennzeichen hinzugefügt, um die Daten in Excel zu importieren und mit ihnen zu arbeiten. Zu sehen in Abb. 04.

Minute	Solarzelle 1	Solarzelle 2	Solarzelle 3	Solarzelle 2+3
1	75	50	46	96
2	76	51	46	97
3	77	55	46	101
4	77	52	46	98
5	81	61	56	117
6	81	58	53	111
7	81	59	53	112
8	81	60	57	117
9	79	56	50	106
10	79	60	54	114
11	79	61	55	116
12	78	60	53	113
13	76	59	52	111
14	72	41	36	77
15	70	37	32	69
16	69	37	32	69
17	67	34	30	64
18	63	31	27	58
19	61	30	24	54
20	55	26	23	49
21	50	25	22	47
22	49	26	23	49
23	53	28	24	52
24	58	27	24	51
25	61	27	22	49
26	59	26	22	48
27	59	27	23	50
28	59	29	25	54
29	64	32	27	59
30	67	35	30	65
31	75	54	43	97
32	75	56	49	105
33	76	53	46	99
34	73	48	42	90
35	68	49	42	91
36	66	40	34	74

(Abb. 04) Ausgabe meiner ersten Messung mit csv-Trennzeichen, im Editor (links) und Excel (rechts), Messung vom 28. August – 1. September 23.

Bei der Programmierung wurden Variablen fehlerhaft deklariert, was zur Folge hatte, dass die Messung über die ganzen Sommerferien fehlgeschlagen ist und sie leider nicht auslesbar war. Der Fehler war, dass nach einem Testlauf nicht die beim Arduino erforderliche Wartezeit zum Speichern wieder eingefügt wurde. Nach den Ferien wurde dieser Fehler behoben und neue Messergebnisse konnten wieder in Excel eingefügt und in anschaulichen Tabellen dargestellt werden, wie in Abb. 05 zu sehen. Auch diese Tabellen zeigten wieder positive Messergebnisse und einen Zuwachs von teilweise 100 Prozent der Spannung, bei den beiden Solarzellen mit Strahlteiler im Vergleich zur Referenzspannung einer Solarzelle.



(Abb. 05) Excel-Graph der Messung vom 28. August – 1. September 23.

*(Volt-Werte in der 10-Bit-Codierung des Arduinos. Für die tatsächlichen Spannungswerte muss man die Werte durch 2^{10} dividieren und dann mit 5 Volt multiplizieren.)

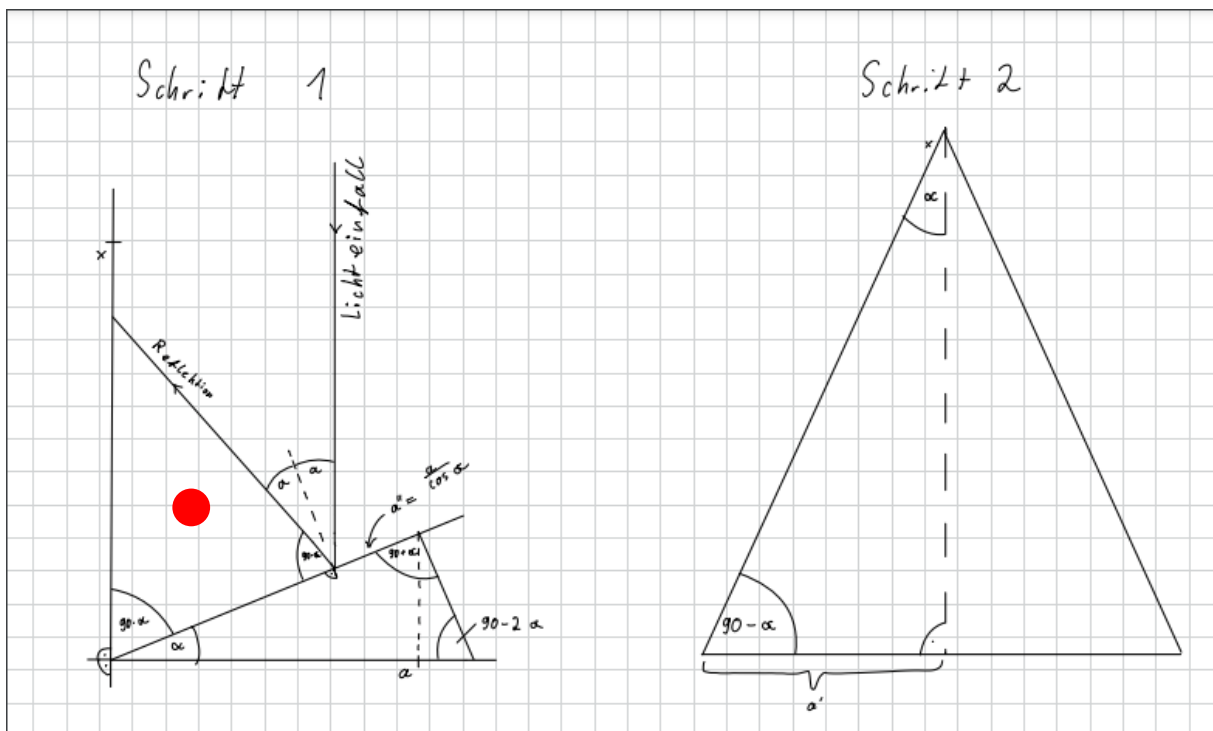
In Blau sind hierbei die Werte der einzelnen Solarzelle eingetragen, die als Referenzmessung diente (in der Legende Solarzelle 1). Orange und Grau sind die beiden Solarzellen, die orthogonal zueinanderstehen (in der Legende Solarzelle 2 und Solarzelle 3) und den Strahlteiler zwischen sich haben. In Gelb steht der summierte Ertrag der beiden Solarzellen mit Strahlteiler (in der Legende Solarzelle 2+3).

Weitere Fortschritte

Während des ganzen Prozesses wurde viel Wissen über die Funktionsweise des Arduinos gesammelt; zum Beispiel, dass der Arduino eine Verzögerung von 2 Millisekunden braucht, um Daten auf einem externen Speichermedium zu speichern.

Als These zur Idee mit dem Strahlteiler und dem Spiegel wurde vorgebracht, dass 2 Solarzellen auf einen Quadratmeter immer mehr Ertrag bringen, was die Ursprungsthese, dass ein Quadratmeter nicht effizient genutzt wird, weiter unterstützt jedoch gegen die Methode des Strahlteilers spricht und bedeuten könnte, dass dieser unnötig wäre da die Solarzellen mehr Leistung erzeugen würden. Darum wurden zwei weitere Solarzellen ohne Strahlteiler in die Messung mit eingebunden, bis jetzt war der Strahlteiler am effektivsten.

Aktuell wird versucht, den gleichen Effekt, der mit dem Strahlteiler hervorgerufen wird, auch mit einem Spiegel zu erzeugen. Dafür wurde mit etwas Hilfe eine Formel aufgestellt (siehe Abb. 07), mit der berechnet wurde, dass der Spiegel um 15 Grad geneigt werden muss, um die gespiegelte Fläche an der Wand zu verdoppeln, was dem Effekt des Strahlteilers entspricht. (siehe Abb. 06)



(Abb. 06) Spiegelzeichnung

In Abb 06 sieht man die Konstruktionszeichnung zur Rechnung. Der Winkel Alpha beschreibt die gesuchte Neigung des Spiegels. x ist die Länge von zwei übereinander gestellten Solarzellen, welche angestrahlt werden sollen. a ist die Länge der Grundfläche des Aufbaus. In Abb 06 rechts ist eine Vergrößerung des mit dem roten Punkt markierten Dreiecks dargestellt. a' ist die Länge des Spiegels. Die in Abb. 07 abgebildete Rechnung wird aus diesen beiden Skizzen abgeleitet.

$$\lambda \cdot \sin \alpha = \alpha' = \frac{a}{2 \cos \alpha}$$

$$2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \frac{a}{\lambda}$$

$$2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (\sin(2\alpha)) = \frac{a}{\lambda}$$

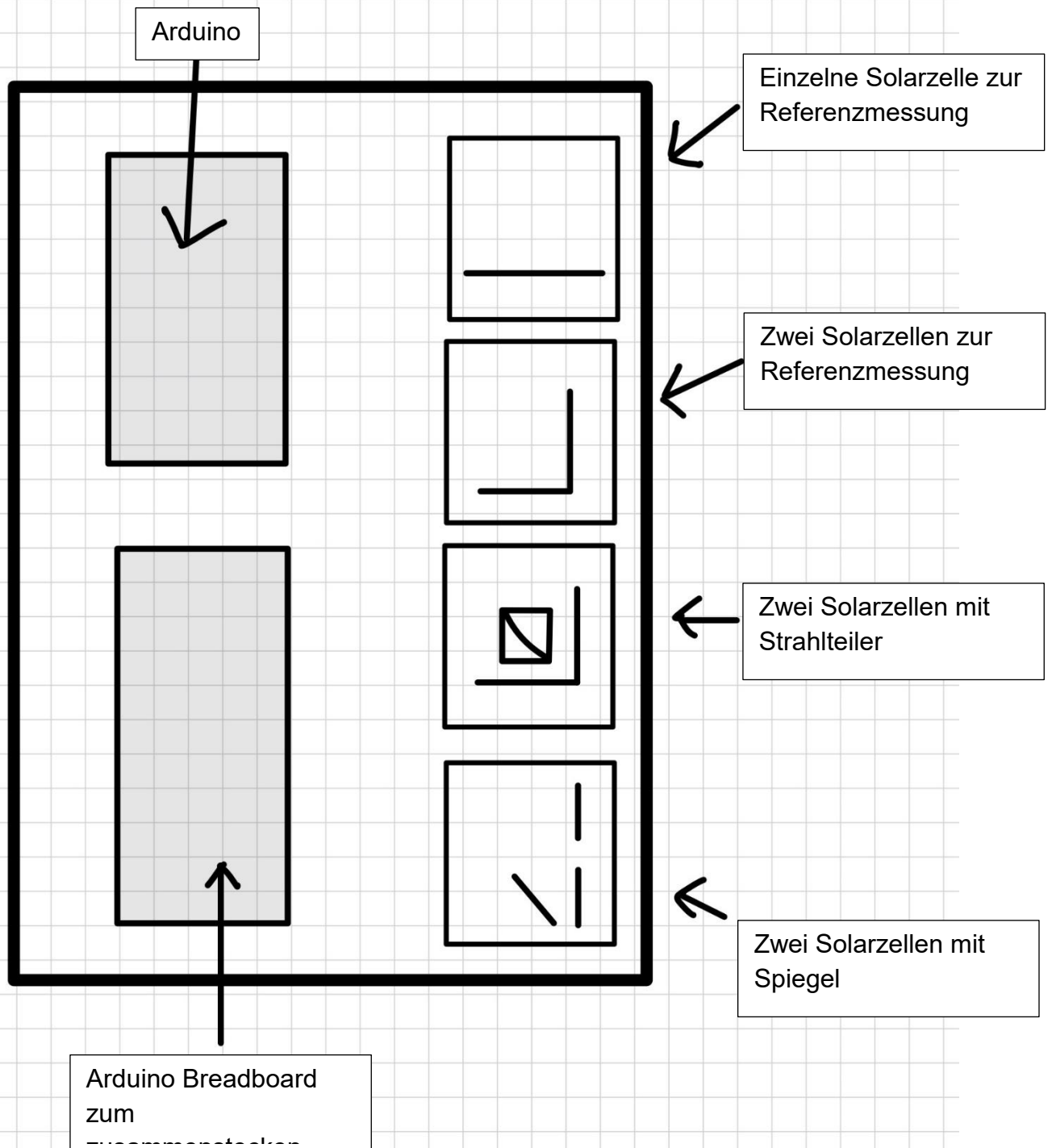
$$2\alpha = \arcsin\left(\frac{a}{\lambda}\right)$$

(Abb. 07) Winkelberechnung (Tjorve und Bernd Elend)

Dementsprechend ist der Spiegel eine andere Variante zum Strahlteiler, um das Licht gleichmäßig auf die doppelte Fläche zu verteilen. Es kommt nur darauf an, was von beiden einen geringeren Verlust und höheren Wirkungsgrad hat und somit am Ende für die Energiegewinnung am besten geeignet ist. In allen Versuchen wurde zudem ein Stück von allen Solarzellen abgeklebt, damit alle die gleiche benutzbare Fläche haben wie der Strahlteiler. Der ganze Aufbau (siehe Abb. 08) befindet sich in einem Acrylglaskasten, welcher den Arduino und die Solarzellen vor Regen und anderen Wettereinflüssen schützt. Die Bauteile des Kastens wurden im SFZ mit einem Lasercutter ausgeschnitten.

In dem Kasten sind bei jetzigen Messungen folgende Aufbauten vorhanden:

1. Eine einzelne Solarzelle für eine Referenzspannung.
2. Zwei Solarzellen im 90-Grad-Winkel zueinander für eine zweite Referenzspannung.
3. Zwei Solarzellen im 90-Grad-Winkel zueinander mit Strahlteiler.
4. Zwei Solarzellen übereinander mit einem Spiegel.



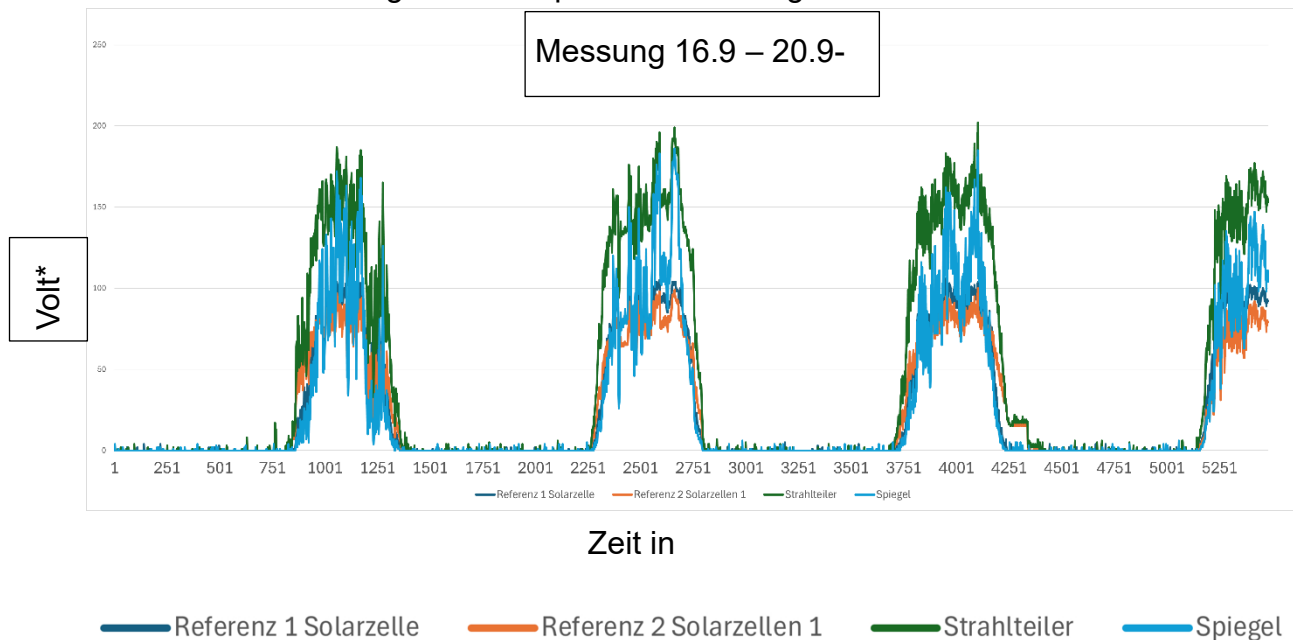
(Abb. 08) Skizze des Versuchsaufbau

Mit diesen vier Aufbauten können jetzt zwei verschiedene Referenzspannungen und zwei Messungen zur selben Zeit durchgeführt werden. Somit haben hier alle Aufbauten von Solarzellen die gleichen Bedingungen. Würden die Messungen nacheinander erfolgen könnten Umstände wie Wolken usw. die Messung verfälschen.

Aktueller Stand und Auswertung

Bei neueren Versuchen mit dem Spiegel hat sich nun gezeigt, dass der Spiegel Aufbau mehr Ertrag bringt als zwei aneinander gestellte Solarzellen aber immer noch nicht so effizient ist wie der Strahlteiler.

Dies kann man im folgenden Graphen in Abb. 09 gut erkennen:



(Abb. 09) Graphen der Messung vom 16.9 - 20.9.24

*(Volt-Werte in der 10-Bit-Codierung des Arduinos. Für die tatsächlichen Spannungswerte muss man die Werte durch 2^{10} dividieren und mit 5 Volt multiplizieren.)

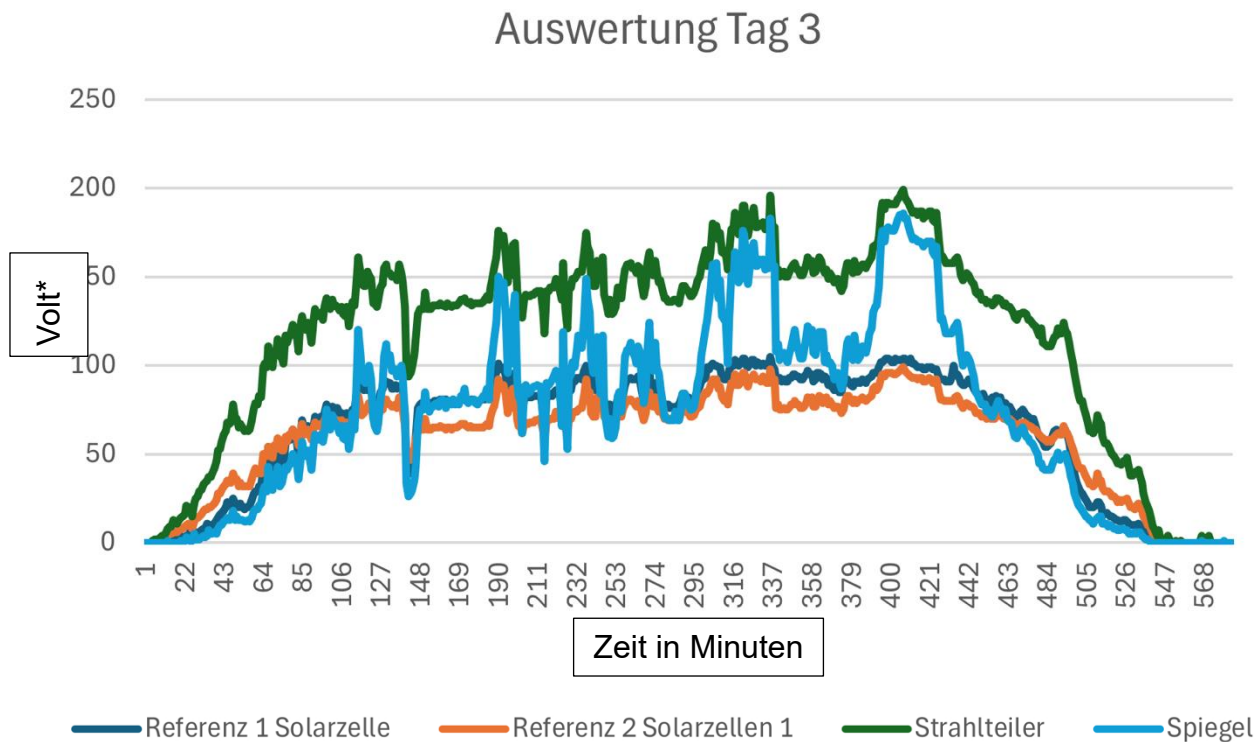
Hier zusehen ist:

- Die Referenzspannung zu einer einzelnen Solarzelle, die als Vergleich dient, ist dunkelblau dargestellt.
- In Orange abgebildet ist die Referenzspannung von 2 Solarzellen, die orthogonal zueinanderstehen, diese Messung dient dem Vergleich.
- Grün zeigt die Messergebnisse der Solarzellen, die ebenfalls orthogonal zueinanderstehen mit einem Strahlteiler in der Mitte zur Lichtbrechung.
- In Hellblau eingezeichnet sind die Messergebnisse der Solarzellen, welche einen Spiegel benutzen, um ihre Effektivität zu steigern.

Besonders gut sind die Sonnenaufgänge und Sonnenuntergänge, sowie Abschattung durch Wolken zu erkennen.

Außerdem lässt sich an der Breite der „Tageshügel“ (Zeit von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang) häufig gut ableiten, in welcher Jahreszeit die Messung stattgefunden hat. Im Vergleich zu Abb. 05 sieht man, dass die Zeit der Lichteinstrahlung pro Tag abgenommen hat.

Diese Messung wurde aufgezeichnet vom 16.9 (abends) bis 20.9 (mittags) 2024.



(Abb. 10) Tagesausschnitt des Graphen der Messung vom 16.9 - 20.9.24

*(Volt-Werte in der 10-Bit-Codierung des Arduinos. Für die tatsächlichen Spannungswerte muss man die Werte durch 2^{10} dividieren und mit 5 Volt multiplizieren.)

In diesem kleineren Ausschnitt des Graphen, der von Minute 2257 bis Minute 2839 aus der Messung in Abb. 09 reicht, kann man die Unterschiede zwischen den Graphen deutlich erkennen. Hier bei gibt es einige Auffälligkeiten:

1. Die zwei Solarzellen, die orthogonal zueinander stehen (ohne Strahlteiler) erzeugen weniger Spannung als die einzelne Solarzelle.
2. Die Solarzellen mit Spiegel erzeugen mehr Spannung als die einzelne Solarzelle, aber weniger als die Solarzellen mit Strahlteiler.
3. Alle haben zwar die gleichen Einbrüche und Hochpunkte zum gleichen Zeitpunkt, die Solarzellen mit Strahlteiler bleiben aber in der Spannungserzeugung über den Tag beständiger im Vergleich zu allen anderen Aufbauten.

Der erste Punkt lässt sich wahrscheinlich dadurch begründen, dass die meiste Zeit keine Sonne an die orthogonale Solarzelle kommt und diese eher Schatten wirft.

Der zweite Punkt könnte mehrere Gründe haben:

1. Der Spiegel steht nicht im optimalen Winkel, da er falsch angebracht worden ist.
2. Der Spiegel ist während der Messung verrutscht.
3. Der Strahlteiler hat einen höheren Wirkungsgrad als der Spiegel.

Eine weitere spannende Frage ist, warum der Spiegel manchmal nah an den Strahlteiler herankommt und sich dennoch insgesamt näher an der Leistung der einzelnen Solarzelle ist.

Auf diese Fragen gibt es noch keine eindeutigen Antworten.

Ebenfalls positive Ergebnisse zeigen weitere Auswertungen der Messergebnisse wie Durchschnittswerte oder der höchste Wert für jeden Aufbau:

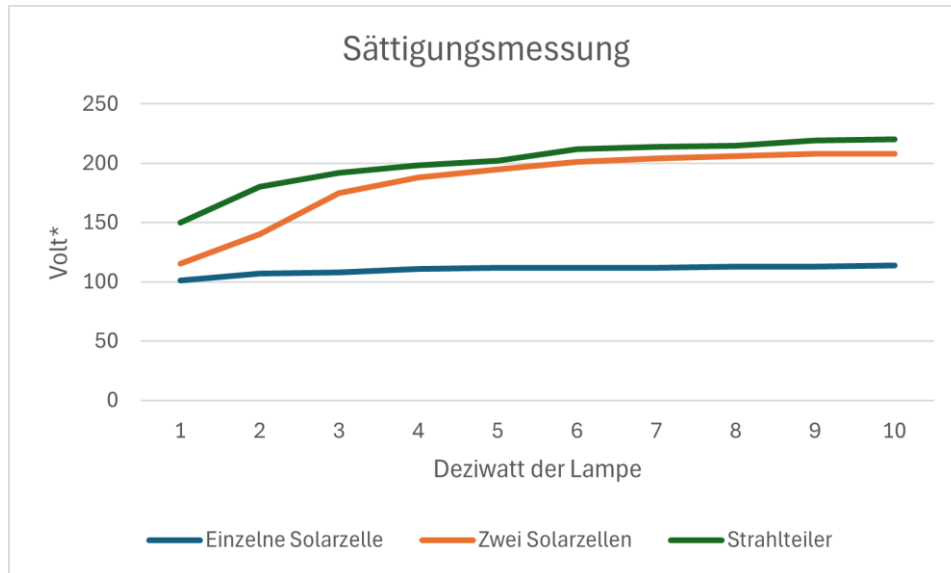
	Referenz Solarzelle 1	Referenz Solarzelle 2	Strahlteiler	Spiegel
Durchschnitt	23,05	22,30	42,85	25,22
Höchster Wert	106	100	202	186
Gesamt	126335	122220	234852	138238

(Abb. 11) Max- und Durchschnittswerte der Messung vom 16.9 – 20.9.24

*(Werte in der 10-Bit-Codierung des Arduinos. Für die tatsächlichen Spannungswerte muss man die Werte durch 2^{10} dividieren und mit 5 Volt multiplizieren.)

Am Durchschnitt deutlich zu erkennen ist, dass der Strahlteiler beständig höhere Messwerte liefert; zudem erreicht er den höchsten Maximalwert. Das spricht für den Strahlteiler. Die Abstufung ist die gleiche wie in den vorherigen Messergebnissen: Der Strahlteiler hat den höchsten Durchschnitt und den höchsten Maximalwert, gefolgt vom Spiegel, der einzelnen Solarzelle und zuletzt dem Aufbau mit zwei Solarzellen. Auch diese Zahlen sprechen für die oben genannte Behauptung. Somit steht die Methode mit dem Strahlteiler bis jetzt am besten da.

Die ganze Forschung basiert auf dem Grundgedanken, dass Solarzellen in die Sättigung kommen. Die Annahme ist, dass sich der Sättigungspunkt durch das Aufteilen von Licht verschieben lässt. Dies wurde experimentell unter Laborbedingungen bewiesen. (Abb.12)



(Abb. 12) Sättigungsmessung unter Laborbedingungen

*(Werte in der 10-Bit-Codierung des Arduinos. Für die tatsächlichen Spannungswerte muss man die Werte durch 2^{10} dividieren und mit 5 Volt multiplizieren.)

Hier sieht man deutlich an der Linienbewegung, dass die einzelne Solarzelle schon bei knapp 2 Deziwatt in die Sättigung geht, während der Strahlteiler, im Vergleich, dort einen höheren Ertrag hat und erst bei knapp 6 Deziwatt in die Sättigung geht. Damit ist bewiesen, dass sich die Sättigung durch Lichtbrechung beeinflussen lässt.

In der Messung wurden folgende Aufbauten gemessen und abgebildet:

1. Die einzelne Solarzelle ist eine Solarzelle, die auf dem Boden liegt
2. Zwei Solarzellen sind zwei orthogonal zueinander stehende Solarzellen
3. Die Strahlteiler-Kurve wurde mit zwei orthogonal zueinander stehenden Solarzellen und einem Strahlteiler in der Mitte aufgenommen

Der Aufbau mit Spiegel ist nicht in die Messung integriert, da er nicht notwendig ist um die Sättigung nachzuweisen. Die Werte wurden in 1-Deziwatt-Schritten aufgenommen.

Potenzielle Einsatzgebiete

Potenzielle Einsatzgebiete sind Orte, wo wenig Platz vorhanden ist oder dieser sehr teuer ist. Dort würde es sich am meisten lohnen. Man kann sie aber natürlich auch auf großem Platz bauen, um so möglichst viel Strom zu erzeugen. Im Privaten kann die platzsparende „3D Solarzelle“ sehr gut als Balkonkraftwerk eingesetzt werden – oder beim Camping, um elektronische Geräte zu laden. Man kann also sagen, dass sie sich sowohl für große Solarparks eignet, als auch für kleine Flächen, da sie mehr Strom erzeugt als herkömmliche Anordnungen von Solarzellen.

Fazit und Ausblick

Zusammengefasst lassen sich nun mehrere Dinge feststellen welche gleichzeitig die Höhepunkte in dieser Forschung markieren:

1. Es wurde unter Laborbedingungen bewiesen, dass der Strahlteiler mit zwei Solarzellen effektiver ist als eine einzelne Solarzelle oder auch zwei Solarzellen ohne Strahlteiler
2. In 5 Messungen unter freiem Himmel wurde die Idee weitere Male bewiesen.
3. Spätere Tests zeigten, dass der Strahlteiler effektiver ist als zwei orthogonal aneinander gestellte Solarzellen.
4. Der Spiegel kam dazu, welcher bis jetzt einen schlechteren Wirkungsgrad hat als der Strahlteiler.
5. Es wurde unter Laborbedingungen bewiesen, dass sich die Sättigung von Solarzellen durch Lichtbrechung verschieben lässt.

Die „3D Solarzelle“ ist ein sehr spannendes Projekt, an welchem ich mit Spaß gearbeitet habe. Um die nächsten Fragen zu klären wird die Forschung weitergeführt. Diesen Fragen gehe ich nun nach:

1. Warum ist der Spiegel weniger effizient als der Strahlteiler?
2. Bei welchem Widerstand gibt es die größte elektrische Leistung?
3. Welche andere Möglichkeiten zum Lichtbrechen gibt es noch, die infrage kommen?

Drei spannende Fragen, um die es in der nächsten Zeit gehen wird. Außerdem gibt es noch viele weitere Möglichkeiten die Energieeffizienz einer bestimmten Fläche zu verbessern, z.B. das automatische Bewegen der Solarzellen zur Sonne oder eine Spiegelkonstruktion die das Licht besser einfängt. Abschließend lässt sich also sagen, dass das Ende des Projektes noch lange nicht erreicht ist.

Danksagung

Ein großer Dank ans SFZ, welches mir einen Platz zum Arbeiten bereitgestellt hat, ebenso Materialien und das benötigte Werkzeug.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Projektbetreuer Sebastian Zander, welcher stets mit Fachwissen und praktischen Ratschlägen an meiner Seite stand, und bei Julius Frädrich, der das Projekt für mich mit einem kritischen Blick betrachtet hat.

Weiteres Dankeschön an:

- Bernd Elend, Hilfe bei der Trigonometrischen Formel
- Knuth Lampe, außerfachlicher Testleser

Quellen

- Solarzellen Theorie: [TU Dresten Theory Praktikum 12Okt2012.pdf](#)
(letzter Besuch 6.1.25)
- Wirkungsgrad der Solarzellen: www.solaranlage-ratgeber.de
(letzter Besuch 6.1.25)
- Sonneneinstrahlung in Deutschland
<https://senec.com/de/magazin/sonneneinstrahlung>
(letzter Besuch 13.1.25)

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 01. Bändermodell für verschiedene Leitungstypen
Quelle: [TU Dresten Theory Praktikum 12Okt2012.pdf](#)
- Abb. 02 Selbsterstellte Skizze zur Verkabelung des Arduinos
- Abb. 03 Ausgabe meiner ersten Messung (4-7 Juli 23)
- Abb. 04 Ausgabe meiner ersten Messung mit csv-Trennzeichen, im Editor (links) und Excel (rechts), Messung vom 28. August – 1. September 23.
- Abb. 05 Excel Graph der Messung vom 28. August – 1. September 23.
- Abb. 06 Spiegelzeichnung
- Abb. 07 Winkelberechnung (Tjorve und Bernd Elend)
- Abb. 08 Skizze des Versuchsaufbaus
- Abb. 09 Graphen der Messung vom 16.9 – 30.9.24
- Abb. 10 Tagesausschnitt des Graphen der Messung vom 16.9 – 20.9.24
- Abb. 11 Max- und Durchschnittswerte der Messung vom 16.9 – 20.9.24
- Abb. 12 Sättigungsmessung unter Laborbedingungen