



Mario Baumann, BSc

Analyse und Bewertung von Grätzelzellen (DSSC) anhand der DSSC-Demonstrationsanlage Angergasse

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Mike Alexander Lagler, BSc

Dr.techn. Dipl.-Ing. Ernst Schmutzer

Dipl.-Ing. Thomas Wieland

Institut für Elektrische Anlagen

Graz, Januar 2017

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines Studiums unterstützt haben. Besonderer Dank gilt hierbei meiner Familie und meinen Freunden, welche mich durch die ganze Studienzeit begleitet und bestärkt haben.

Vielmals bedanken möchte ich mich bei meinen Betreuern Herrn Dr. DI Ernst Schmautzer, DI Mike Lagler und DI Thomas Wieland für die Unterstützung und die Begleitung bei der Erstellung der Arbeit, sowie allen Mitarbeitern der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, welche mir jederzeit mit Rat und Tat beistanden.

Weiterer Dank gilt all jenen Personen und Institutionen, welche die Testanlage errichtet und betreut haben, damit die notwendigen Messungen durchgeführt werden konnten.

Auch gilt mein Dank all meinen Studienkollegen und all jenen, die sich für meinen studentischen Fortschritt interessiert haben.

Schließlich bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Partnerin und Freundin, die mir in jeglicher Situation unterstützt, bestärkt und neuen Mut geschenkt hat, meinem Ziel näher zu kommen.

Vielen Dank!

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG ***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

13. Januar 2017
Datum / *Date*

Mario Baumann
Unterschrift / *Signature*

Kurzfassung

Neue und die Weiterentwicklung existierender Stromerzeugungstechnologien gewinnen während der Energiewende in Europa zunehmend an Bedeutung. Untersuchungen an DSSCs (dye sensitized solar cells), auch Grätzelzelle genannt, sollen die Eignung dieser Solarzelle als weitere Möglichkeit der Energieernte eruieren. Dazu wird bei einer Demonstrationsanlage unter realen Umgebungsbedingungen der Energieertrag verschiedener DSSC-Typen über einen längeren Zeitraum gemessen und der Wirkungsgrad der einzelnen Photovoltaikzellen und der Wechselrichter sowie der Gesamtwirkungsgrad bestimmt und verglichen. Ermöglicht wird dies im Rahmen des "Smart-City Graz" Forschungsprojekts, welches aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert wird.

Durch die koordinierte Zusammenarbeit aller Projektpartner soll bei dieser Demonstrationsanlage die Weiterentwicklung der DSSC sowie neue Einsatzmöglichkeiten derartiger PV-Zellen untersucht werden.

Schlüsselwörter:

DSSC, Photovoltaik, Monitoring, Smart-City, Globalstrahlungsumrechnung

Abstract

New and further development of existing power generation technologies are gaining importance during the energy revolution in Europe. Studies on DSSCs (dye sensitized solar cells), also known as the Grätzel-Cell, are intended to prove this solar cell as a further possibility of energy harvesting. For this purpose, the energy yield of different DSSC types is measured over an extended time, in a demonstration plant under real ambient conditions, and the efficiency of the individual photovoltaic cells and the inverter as well as the overall efficiency are calculated and compared. This is made possible by the "Smart-City Graz" research project founded by the climate and energy fund.

Through the coordinated cooperation of all project partners, this demonstration plant will be used to investigate the further development of the DSSC as well as new applications for such PV-Cells.

Keywords:

DSSC, Photovoltaic, Smart-City, global radiation conversion

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Grundlagen	8
2.1	Solarstrahlung	8
2.2	DSSC (dye-sensitized solar cell)	11
2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	11
2.2.2	Vor- und Nachteile	13
2.2.3	Einsatzmöglichkeiten	14
2.3	Wechselrichter	18
2.3.1	Aufbau und Funktionsweise	18
2.3.2	Vor- und Nachteile	19
3	DSSC Demonstrationsanlage	21
3.1	Aufbau der DSSC-Anlage	21
3.2	Messaufbau	24
3.2.1	Messung elektrischer Größen	24
3.2.2	Messung nicht-elektrischer Größen	25
3.2.3	Sicherung der Messdaten	28
3.3	Messdatenverarbeitung	29
3.3.1	Messabweichung	29
3.3.2	Globalstrahlungsumrechnung	31
3.3.3	Versuche an der DSSC Demonstrationsanlage	45
3.3.4	Datenverifikation	51
4	Datenauswertung und Analyse	56
4.1	Wirkungsgradbestimmung der DSSC	56
4.1.1	Diffus- und Direktstrahlung	58
4.1.2	Temperaturabhängigkeit	59
4.1.3	Effizienzunterschied verschiedener Farbstoffe	60
4.1.4	Effizienzunterschied zwischen Level 0 und Level 1 DSSC	62
4.2	Wirkungsgradbestimmung der Micro-Wechselrichter	64
4.2.1	Diffus- und Direktstrahlung	65
4.2.2	Temperaturabhängigkeit	66
4.2.3	Effizienzunterschied zwischen Level 0 und Level 1 DSSC	67
5	Zusammenfassung	69



Literaturverzeichnis	73
A Anhang	75

1 Einleitung

Aufgrund des stetig steigenden Energieverbrauchs und die weltweite Klimaproblematik wird der sorgsame Umgang mit elektrischer Energie immer wichtiger. Von den EU-Staats- und Regierungschefs wurde 2014 der Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 mit den folgenden drei Hauptzielen beschlossen [1]:

- Senkung der Treibhausgasemissionen um mindestens 40 % (gegenüber dem Stand von 1990)
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen auf mindestens 27 %
- Steigerung der Energieeffizienz um mindestens 27 %.

Damit diese Ziele erreicht werden, können unter anderem Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) zur Gewinnung elektrischer Energie eingesetzt werden. Um mit diesen die erforderlichen Energiemengen erzeugen zu können, werden entsprechend große Flächen benötigt. Die einfachste Möglichkeit wäre, die PV-Anlagen auf Freilandflächen zu installieren. Aus optischen oder finanziellen Gründen werden diese in Österreich jedoch zu einem Großteil auf Gebäuden beziehungsweise deren Dächern montiert, wodurch die Energieernte durch die begrenzten Flächen limitiert wird. Um die Einsatzmöglichkeiten von PV-Anlagen zu erhöhen, und somit die erforderlichen Flächen zu schaffen, wird an neuen Technologien geforscht.

Diese Master-Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse von DSSCs (dye-sensitized solar cell, auch Grätzelzelle, Dünnschichtzelle, Farbstoffzelle genannt). Ermöglicht wird dies durch eine im Rahmen des Projektes "Smart City Graz" [2] errichtete Demonstrationsanlage.

Dabei sind mehrere Firmen beteiligt, von denen jede für sich auf die verschiedenen Aufgabenstellungen einer PV-Anlage spezialisiert ist. So zum Beispiel sind die Firmen SFL Technologies GmbH [3] für die Errichtung und Wartung, die Energie Steiermark AG [4] für den Betrieb, g2e glass2energy SA [5] für die Weiterentwicklung der DSSCs und die Technische Universität Graz [6] für den Messaufbau und -ablauf der Anlage zuständig. In dieser Arbeit werden die ersten acht Monate (März bis Oktober) der Demonstrationsanlage ausgewertet und analysiert. Dafür werden in regelmäßigen Abständen die Ergebnisse mit den beteiligten Firmen geteilt, um die Weiterentwicklung der Systemkomponenten auch während der Messphase zu ermöglichen.

2 Grundlagen

Eine PV-Anlage besteht im wesentlichen aus [7]:

- mehreren PV-Zellen, welche zu einem String zusammengeschalten sind,
- dem dazugehörigen Wechselrichter, welcher den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt und in das öffentliche Netz einspeist und
- einem Einspeisezähler oder Smartmeter, zur korrekten Vergütung der erzeugten Energie

In dieser Arbeit werden die ersten zwei Punkte näher betrachtet und bewertet. Zunächst werden noch der Begriff Solarstrahlung, Aufbau und Funktionsweise der DSSC und dem dazugehörigen Wechselrichter näher erklärt, da diese Erkenntnisse bei der Berechnung des Wirkungsgrades einer PV-Anlage notwendig sind.

2.1 Solarstrahlung

Die Grundvoraussetzung für die Funktion von PV-Zellen ist die gleiche, die ein Leben auf der Erde erst ermöglicht: die Sonne beziehungsweise ihre solare Strahlung.

Die Sonne kann man sich als einen kolossalen Fusionsreaktor vorstellen, der die bei der Kernfusion freiwerdende Energie in Form von Strahlung in den Weltraum abgibt. Die Sonne strahlt dabei eine kontinuierliche Leistung von $3,845 \cdot 10^{26}$ W in alle Richtungen ab. Da der Abstand zwischen Erde und Sonne in etwa 150 Mio. km beträgt, empfängt die Erde außerhalb der Erdatmosphäre nur einen Bruchteil der Solarstrahlung von circa 1367 W/m^2 . Diese Zahl wird als Sonnenkonstante bezeichnet. Das dazugehörige Strahlenspektrum wird mit dem Ausdruck "Air Mass 0" (AM0) bezeichnet [7].

Tritt die Strahlung durch die Atmosphäre, so ändert sich auf Grund von Reflexion, Absorption und Streuung auch das Spektrum. Je länger der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre ist, umso mehr ändert sich das Spektrum. Somit ergeben sich verschiedene Kennzahlen für den Air Mass (siehe Abbildung 2.1) [7].

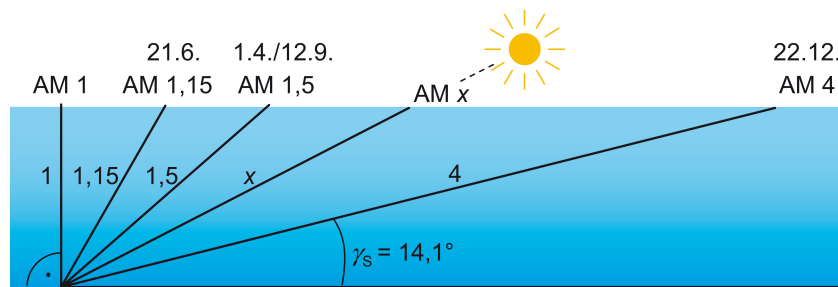


Abbildung 2.1: Air Mass und dessen Bedeutung [7]

Der senkrechte und kürzeste Weg der Strahlung durch die Atmosphäre wird mit $AM1$ bezeichnet. Ausgehend davon vergrößern sich die Kennzahlen je nach Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre. Zum Beispiel bedeutet $AM1.5$, dass die Strahlung einen 1.5-fach längeren Weg zurücklegt als beim senkrechten Weg ($AM1$).

In Abbildung 2.2 wird der Zusammenhang zwischen Direktstrahlung, eine normalgerichtete Strahlung auf eine Fläche, und Diffusstrahlung, durch Streuung und Reflexion eingestrahelte Strahlung auf eine Fläche, dargestellt.

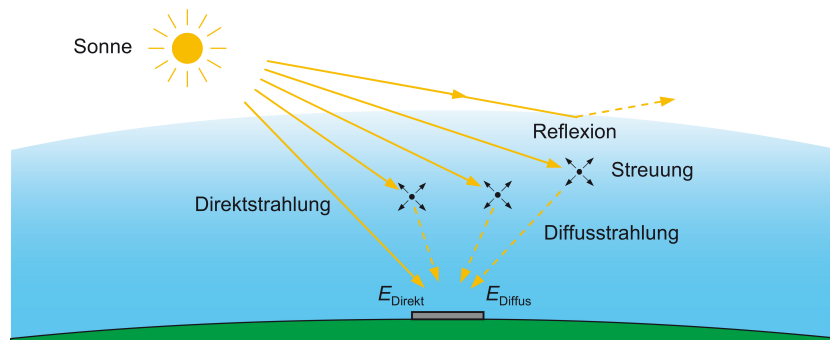


Abbildung 2.2: Unterschied zu Direkt-, Global- und Diffusstrahlung [7]

Streuung und Absorption in der Erdatmosphäre bewirken eine Abschwächung der aus dem Weltall kommenden Solarstrahlung. Am Erdboden selbst kommen bei einem $AM1.5$ Spektrum nur noch 61 % von der ursprünglichen Strahlung (61 % von $1367 \text{ W/m}^2 = 834 \text{ W/m}^2$) als Direktstrahlung an. Die Summe der gestreuten Strahlung, die auf die Erdoberfläche trifft, wird als Diffusstrahlung bezeichnet (siehe Abbildung 2.2).

Summiert man die direkte ($E_{dir,h}$) und diffuse ($E_{diff,h}$) Strahlung so erhält man die Globalstrahlung ($E_{glob,h}$) [7].

Um die Global- und Diffusstrahlung messen zu können, wird ein Sonnenschein-Pyranometer SPN1 eingesetzt. Dafür werden sieben Sensoren auf einem sechseckigen Gitter verteilt

und mit einer perforierten halbkugelförmigen Kuppel bedeckt (siehe Abbildung 2.3). Diese Kuppel wird auch Schattenmaske genannt [8].



Abbildung 2.3: Aufnahme eines Sonnenschein-Pyranometers SPN1 [8]

Die Schattenmaske in Verbindung mit einem speziellen Algorithmus stellt sicher, dass:

- mindestens ein Sensor immer dem vollen Sonnenstrahl ausgesetzt ist,
- mindestens ein Sensor vollständig abgeschattet ist und
- alle Sensoren die gleiche Menge an diffusem Licht von der restlichen Himmelshalbkugel erhalten.

Die Vorteile des SPN1 liegen darin, dass dieser ohne zusätzlichen Messaufwand Global- und Diffusstrahlung gleichzeitig messen kann [8].

Um PV-Zellen analysieren zu können werden unter anderem die Oberflächentemperatur der PV-Zelle und die Umgebungstemperatur benötigt. Die dabei verwendeten Thermo-elemente haben bei $25^{\circ} C$ einen Widerstand von 2000Ω [9]. Diese Thermo-elemente sind vom Typ K und haben bei höheren Temperaturen einen kleineren Widerstand, sprich einen negativen Temperaturkoeffizienten (NTC).

2.2 DSSC (dye-sensitized solar cell)

Die DSSC wurde nach ihrem Erfinder Michael Grätzel benannt (Grätzelzelle). Dabei handelt es sich um eine Solarzelle, welche auf Basis von Farbstoffen elektrische Energie erzeugt. Der Erfinder hat sich dabei an der Photosynthese von Pflanzen orientiert. 1992 wurde die DSSC zum Patent angemeldet [10].

Sowohl der Aufbau und die Funktionsweise, als auch die Vor- und Nachteile, werden auf den nächsten Seiten näher beschrieben.

2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Die DSSC ist aus verschiedenen Schichten zusammengesetzt (siehe Abbildung 2.4). Als Trägermaterial kann Glas oder Ähnliches verwendet werden. Auf dieses Trägermaterial wird ein transparentes, elektrisch leitfähiges Oxid (TCO - transparent conducting oxide) aufgetragen. Anstelle von Silizium, wie in herkömmlichen PV-Zellen, wird in der DSSC eine Schichtung aus Titandioxid, Farbstoff und einem Elektrolyt verwendet. Das Titandioxid hat die Aufgabe die freigesetzten Elektronen vom Farbstoff besser zur Anode zu führen und bietet dem Farbstoff besseren Halt [11].

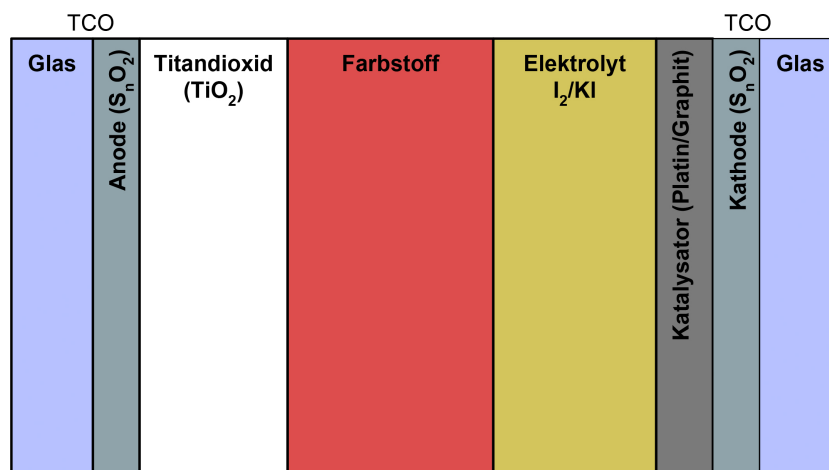


Abbildung 2.4: Aufbau einer DSSC ([12], angepasst)

Die Funktionsweise dieser DSSC erfolgt ähnlich wie die Photosynthese bei Pflanzen. Anhand der Abbildung 2.5 wird deren Funktion erklärt [11].

1. Wird die DSSC von einer Lichtquelle beschienen, so werden Photonen vom Farbstoff absorbiert und die Farbstoffmoleküle werden zu höheren Energiezuständen angeregt.
2. Da dieses Energieniveau der Farbstoffmoleküle oberhalb des Leitungsbandes des Titandioxids (TiO_2) liegt, können Elektronen übertreten und das Farbstoffmolekül fällt zurück auf einen ähnlichen Grundzustand. Dem Farbstoffmolekül fehlen Elektronen nach dessen Abgabe.

3. Das Elektrolyt (I_2/KI) reagiert darauf und oxidiert von einem Triiodid zu einem Iod. Die abgegebenen Elektronen werden vom Farbstoff aufgenommen, so dass dieser wieder in den Grundzustand übergeht.
4. Gleichzeitig werden Elektronen des Titandioxids (TiO_2) über die TCO-Schicht an die Anode weitergegeben.
5. Wird der Stromkreis zwischen Anode und Kathode geschlossen, beginnt ein Strom zu fließen und ein Verbraucher kann versorgt werden.
6. Über den geschlossenen Stromkreis werden die Elektronen über die Kathode dem Elektrolyt (I_2/KI) zugeführt. Das Elektrolyt (I_2/KI) reduziert sich von einem Iod zu einem Triiodid und ist somit wieder im Grundzustand.

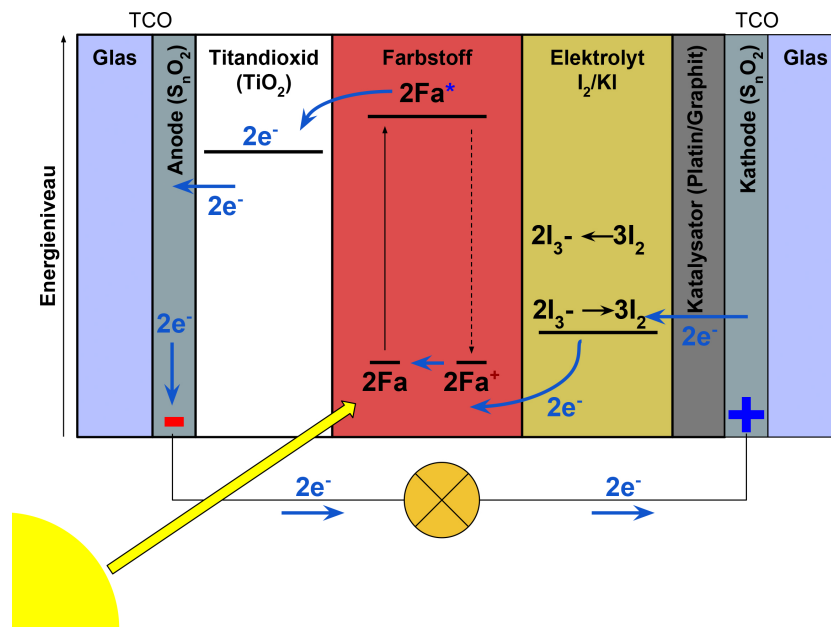


Abbildung 2.5: Funktion einer DSSC ([12], angepasst)

Aus der Funktionsweise der DSSC geht hervor, dass die Eigenschaften des Farbstoffes maßgeblich für die Energieernte sind. Diese Eigenschaften sind [13]:

- Die Injektionsrate der Elektronen hängt vom Abstand des Farbstoffes zum Halbleiter ab, weshalb eine möglichst kleine Distanz eine Grundvoraussetzung für eine gute Absorption ist.
- Die energetische Lage des angeregten Farbstoffmoleküls muss oberhalb der Unterkante vom Leitungsband des Titandioxids (TiO_2) liegen, um eine Injektion von Elektronen in den Halbleiter (TiO_2) zu ermöglichen.

- Das Redoxniveau des Elektrolyts muss unterhalb der energetischen Lage des Grundzustandes des Farbstoffmoleküls liegen, damit das Molekül vom oxidierten Zustand in den Grundzustand übergehen kann.
- Der Farbstoff muss eine hohe Lichtabsorption aufweisen und im Bereich des solaren Spektrums über ein breites Absorptionsspektrum verfügen.
- Da das Farbstoffmolekül in 20 Jahren circa 10^8 mal den Ablauf der Anregung, Oxidation und Reduktion durchläuft, ist eine hohe Stabilität Bedingung.

Diese Anforderungen werden von Farbstoffen auf Basis von Ruthenium am besten erfüllt. Die Effizienz eines Farbstoffes wird mit der Gleichung (2.1) berechnet und als externe Quanteneffizienz Φ_{ext} oder IPCE (Incident Photon to Current Conversion Efficiency) bezeichnet [13].

$$\Phi_{ext}(\lambda) = IPCE = \frac{n_{el}(\lambda)}{n_{ph}(\lambda)} \quad (2.1)$$

Φ_{ext}	externe Quanteneffizienz oder IPCE
n_{el}	Anzahl der durch den externen Stromkreis geflossenen Elektronen
n_{ph}	Anzahl der eingestrahlten Photonen

Die Gleichung (2.1) beschreibt das Verhältnis der Anzahl der abgeführten Elektronen zur Anzahl der zugeführten Photonen bei einer bestimmten Wellenlänge λ . Dies ähnelt der Beschreibung des Wirkungsgrads, welche das Verhältnis zwischen abgeführter Energie (Elektron, mechanische Leistung, ...) zu zugeführter Energie (Photon, elektrische Leistung, ...) beschreibt.

Anfang 1990 wurde im Labor durch die Verwendung von dreikernigen Rutheniumkomplexen ein Wirkungsgrad von fast acht Prozent erreicht [13]. Seither wird an Farbstoffzusammensetzungen geforscht, um den Wirkungsgrad weiter zu steigern.

2.2.2 Vor- und Nachteile

Außer den schon erwähnten Vor- und Nachteilen von DSSCs werden nachfolgend weitere aufgelistet. Vorteile von DSSCs gegenüber herkömmlichen PV-Zellen (Monokristallin, Polykristallin, ...) sind:

- geringe Schichtdicke (zwischen fünf und $20 \mu m$)
- preiswerter Herstellungsprozess
- geringer Rohstoffaufwand
- unterschiedliche Trägermaterialien möglich (wie zum Beispiel: Folien, Stoffe, ...)
- Lichtdurchlässigkeit
- Erhöhte Effizienz bei diffusem Licht und bei höheren Zelltemperaturen

Die Nachteile einer DSSC sind der bisher geringere Wirkungsgrad gegenüber den herkömmlichen verwendeten PV-Zellen, welcher auf den Entwicklungsstand der DSSC zurückzuführen ist, sowie die Langzeitstabilität von Farbstoffen, Elektrolyten und deren Versiegelung [11].

2.2.3 Einsatzmöglichkeiten

Da DSSCs lichtdurchlässig sind, und nicht nur Glas als Trägermaterial verwendet werden kann, ergeben sich weitere Optionen für deren Einsatz. So entstehen zum Beispiel neue architektonische und künstlerische Gestaltungsmöglichkeiten durch Farbvariationen des Farbstoffes und durch flexible Trägermaterialien (siehe Abbildung 2.6 und 2.7).



Abbildung 2.6: Fassade des SwissTech Convention Center von außen [14]

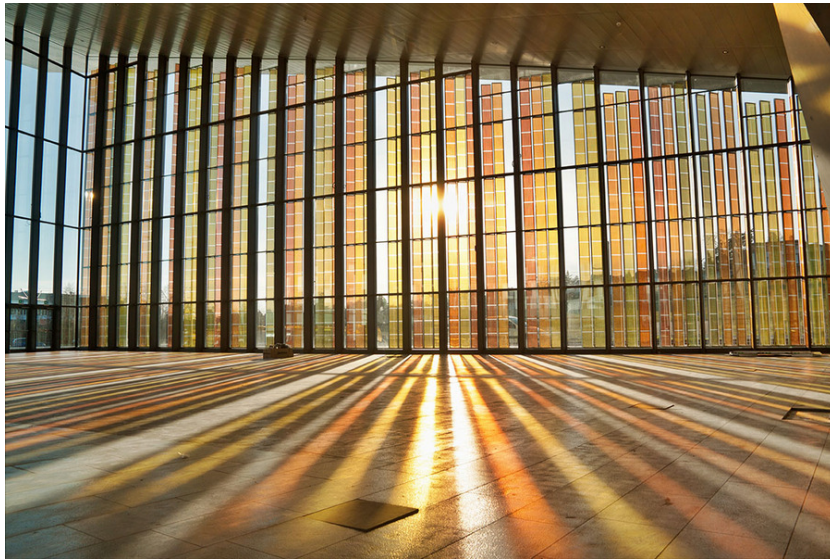


Abbildung 2.7: Fassade des SwissTech Convention Center von innen [14]

Abgesehen vom Einsatz als architektonisches Gestaltungselement gäbe es die Möglichkeit solche Zellen als Fensterscheiben zu verbauen, oder, wie es auf dem Österreich Pavillon bei der EXPO 2015 gezeigt wurde, als Kunstwerk auf dem Dach als aufgehende oder untergehende Sonne (siehe Abbildung 2.8).



Abbildung 2.8: Der Österreich Pavillon bei der EXPO 2015 in Mailand mit der "Sundisc" [15]

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist eine Absturzsicherung des Genfers Flughafens (siehe Abbildung 2.9).



Abbildung 2.9: DSSCs als Absturzsicherung am Genfer Flughafen [5] [16]

Wenn als Trägermaterial eine flexible Folie verwendet wird, könnte man die DSSC als Schutzfolie für Smartphones oder Tablets nutzen und diese damit aufladen.

Das sind nur einige Beispiele wie man die DSSCs einsetzen kann. Weitere Einsatzmöglichkeiten wären zum Beispiel Panoramadächer für Elektro- und Hybrid-Fahrzeuge, Beschattungen (wie zum Beispiel Sonnensegel, Rollläden, Raffstoren und so weiter), Überdachungen von Haltestellen des öffentlichen Verkehrs, Carports oder Abstellplätzen für einspurige Fahrzeuge (siehe Abbildung 2.10).



Abbildung 2.10: DSSC-Demonstrationsanlage in der Angergasse am Gelände der Energie Steiermark [3]

Die Abbildung 2.10 zeigt die DSSC-Demonstrationsanlage in Graz. Anhand dieser werden die DSSCs und die darin verbauten Wechselrichter analysiert und bewertet.

2.3 Wechselrichter

Um eine PV-Anlage netzgekoppelt betreiben zu können, ist der Wechselrichter neben den DSSCs eine weitere wichtige Komponente. Dabei muss der Wechselrichter folgende Aufgaben übernehmen bzw. Eigenschaften besitzen [7]:

- Umwandlung von Gleichstrom in sinusförmigen Wechselstrom
- hoher Wirkungsgrad bei Teil- und Spitzlasten
- MPP-Regelung (maximum power point)
- synchrones Einspeisen mit Netzfrequenz
- Überwachung des Netzes, um Inselbetrieb zu vermeiden
- Personenschutz
- aktuellen Status der Anlage zur Verfügung stellen

Grundsätzlich wird zwischen drei verschiedenen Wechselrichterverschaltungen unterschieden:

- Wechselrichter ohne Transformator
- Wechselrichter mit Netztransformator
- Wechselrichter mit Hochfrequenztransformator

In der DSSC-Demonstrationsanlage werden Micro-Wechselrichter mit einem Hochfrequenztransformator (HF-Transformator) verwendet. Wie diese aufgebaut sind und funktionieren wird nachfolgend beschrieben.

2.3.1 Aufbau und Funktionsweise

In Abbildung 2.11 werden der Aufbau und die dazugehörigen Spannungsverläufe eines Micro-Wechselrichters mit HF-Transformator dargestellt. Dabei handelt es sich um eine schematische Darstellung. Die prinzipielle Funktionsweise eines Micro-Wechselrichters ist, Gleichstrom in Wechselstrom mit möglichst wenigen Verlusten umzuwandeln.

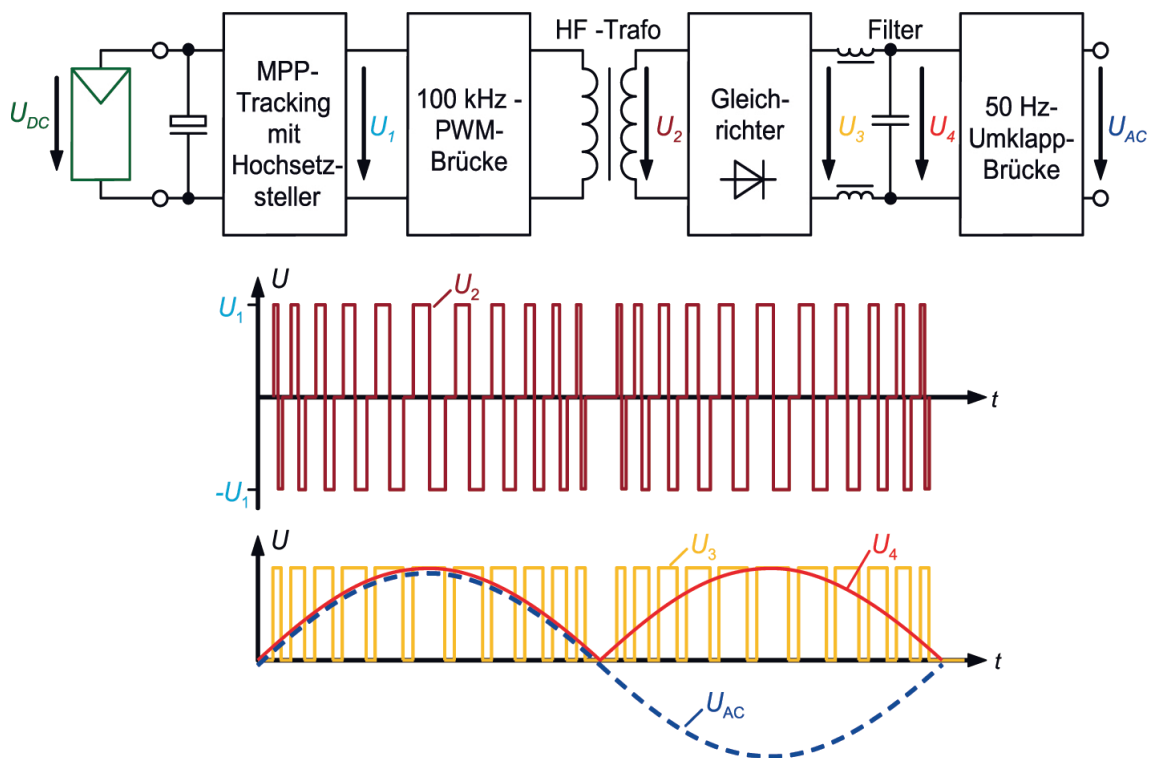


Abbildung 2.11: Aufbau und Funktionsweise eines Micro-Wechselrichters mit einem HF-Transformator [7]

Da die DSSC eine von Umwelteinflüssen abhängige Gleichspannung produziert (U_{DC}) wird mittels des Hochsetzstellers eine definierte Gleichspannung (U_1) erzeugt. Diese wird mittels einer hochfrequenten Pulsweitenmodulationsbrücke (PWM-Brücke) in eine hochfrequente Wechselspannung (U_2) gewandelt. Der HF-Transformator hat dabei nur die Aufgabe, die galvanische Trennung zu gewährleisten.

Anschließend wird die hochfrequente Wechselspannung (U_2) gleichgerichtet (U_3) und gefiltert. Damit entsteht eine pulsierende Halbwellenspannung (U_4), welche zum Schluss mittels einer 50Hz-Umklappbrücke (ändert alle 10ms die Polarität) in die gewünschte Wechselspannung (U_{AC}) und Frequenz gewandelt wird [7].

2.3.2 Vor- und Nachteile

In der folgenden Tabelle 2.1 werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Wechselrichterschaltungen dargestellt und miteinander verglichen [7].

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile von verschiedenen Wechselrichterverschaltungen [7]

Merkmal	Wechselrichter ohne Trafo	Wechselrichter mit Trafo	Wechselrichter mit HF-Trafo
Galvanische Trennung	nein	ja	ja
Fehlerstromüberwachung notwendig	ja	nein	nein
EMV-Abstrahlung	hoch	gering	gering
Einsatz bei $U_{DC} < 150 V$	kaum möglich	gut möglich	möglich
Einsatz bei Dünnschichtzellen	nein	ja	ja
Baugröße und Gewicht	gering	groß	mittel
Wirkungsgrad	hoch	schlecht	mittel

Wie schon erwähnt werden in der DSSC-Demonstrationsanlage Micro-Wechselrichter mit HF-Transformatoren verwendet, da nach Tabelle 2.1 diese für DSSC-Zellen und einer Gleichspannung (U_{DC}) kleiner 150 V gut geeignet sind und eine kleinere Baugröße zulassen. Zudem haben Micro-Wechselrichter mit HF-Transformatoren nur einen geringfügig niedrigeren Wirkungsgrad, aber Vorteile im Hinblick auf die Sicherheit (galvanische Trennung) [17].

3 DSSC Demonstrationsanlage

Im Rahmen des Projekts "Smart-City-Graz" wurde, auf dem Areal der Firma Energie Steiermark AG, von der Firma SFL Technologies GmbH eine DSSC-Demonstrationsanlage (DSSC-Anlage) errichtet.

Folgende Information ist auf einem Plakat der Energie Steiermark bei der DSSC-Anlage veröffentlicht:

*"Cleverer Technologie von Morgen!
Das ist kein normaler Radabstellplatz.*

*Es wurden aber auch keine normalen Solarzellen benützt.
Bei diesen Energie-Gläsern ("Grätzel-Zelle") wird Licht durch Farbstoffe zwischen zwei Glasscheiben eingefangen und in elektrischen Strom umgewandelt - das Prinzip ähnelt der Photosynthese bei Pflanzen. Vorteile dieser Technologie sind zum Beispiel die beidseitige Energie-Ernte bei diffusem Licht oder die unzähligen architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten.*

Diese Demonstrationsanlage wurde im Rahmen des Forschungsprojekts "Smart City" errichtet und aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert" (vgl. Facebook-Eintrag der Energie Steiermark am 19. Mai 2016 [4])

3.1 Aufbau der DSSC-Anlage

Es gibt verschiedene Arten eine netzgekoppelte PV-Anlage aufzubauen [7]:

1. Mit einem Zentral-Wechselrichter:
Die einzelnen Strings werden im Generatoranschlusskasten parallel geschaltet. Die erzeugte elektrische Energie wird über einen zentralen Wechselrichter ins Netz eingespeist (siehe Abbildung 3.1).

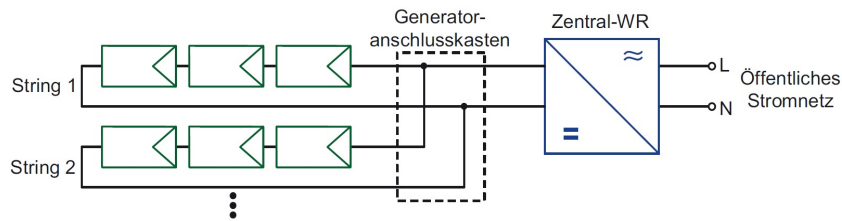


Abbildung 3.1: Aufbau einer PV-Anlage mit einem zentralen Wechselrichter [7]

Der Vorteil dieses Konzeptes liegt darin, dass nur ein einziger Wechselrichter benötigt wird. Durch unterschiedliche Verschaltungen der Strings können allerdings Verluste entstehen und ein weiterer Nachteil ist der erhöhte Aufwand der Gleichstromverkabelung [7].

2. Mit einem String-Wechselrichter:

Das auf einen String-Wechselrichter basierende Konzept entsteht, wenn pro Wechselrichter nur ein String angeschlossen wird (siehe Abbildung 3.2).

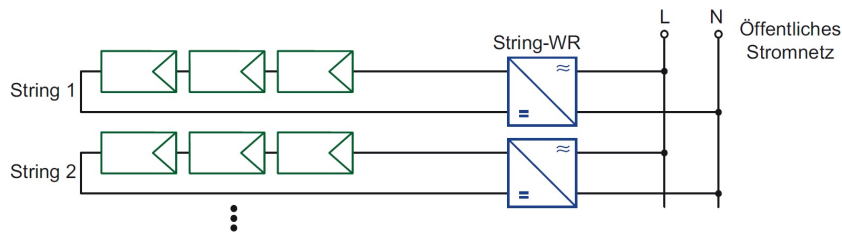


Abbildung 3.2: Aufbau einer PV-Anlage mit Wechselrichtern für jeden String [7]

Dies hat zur Folge, dass kein Generatoranschlusskasten vonnöten ist und jeder String einzeln geregelt werden kann. Außerdem lassen sich die PV-Zellen und die Wechselrichter leichter überwachen. Der reduzierte Verkabelungsaufwand der Gleichstromseite gegenüber einem Zentral-Wechselrichter ist zudem ein weiterer Vorteil des String-Wechselrichters [7].

3. Mit einem modulintegrierten Wechselrichter:

Hier wird ganz auf die Gleichstromverkabelung verzichtet. Jede PV-Zelle hat einen eigenen Wechselrichter, der direkt angebracht wird (siehe Abbildung 3.3).

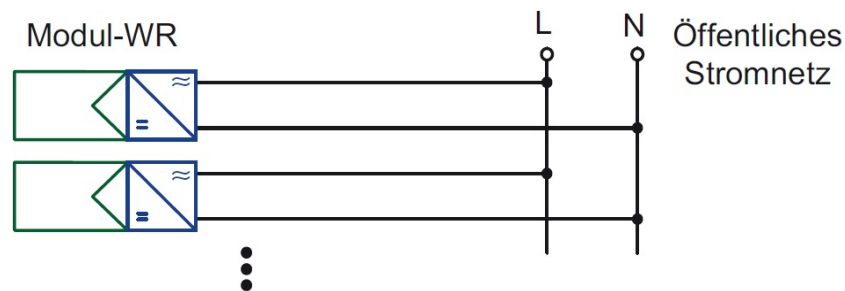


Abbildung 3.3: Aufbau einer PV-Anlage mit Wechselrichtern für jede DSSC [7]

Somit kann man jede PV-Zelle individuell überwachen und steuern. Allerdings hat diese Variante einen großen Nachteil. Da die Wechselrichter direkt an den PV-Zellen montiert werden, sind sie Umwelteinflüssen direkt ausgesetzt, was die Lebensdauer der verbauten elektronischen Bauteile erheblich senkt. Auch die Austauschbarkeit bei defekten Wechselrichtern ist erschwert, da PV-Anlagen meist auf Dächern montiert sind [7].

In dieser Anlage werden sechs Strings mit je sechs DSSCs mit drei verschiedenen Farbstoffen (rot, orange und grün) verwendet. Die Aufteilung der einzelnen Strings sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Da während der Messung die Entwicklung der DSSC weiter vorangeschritten ist, wurde die DSSC-Demonstrationsanlage angepasst und mit neuen DSSCs versehen (rechts in Abbildung 3.4).

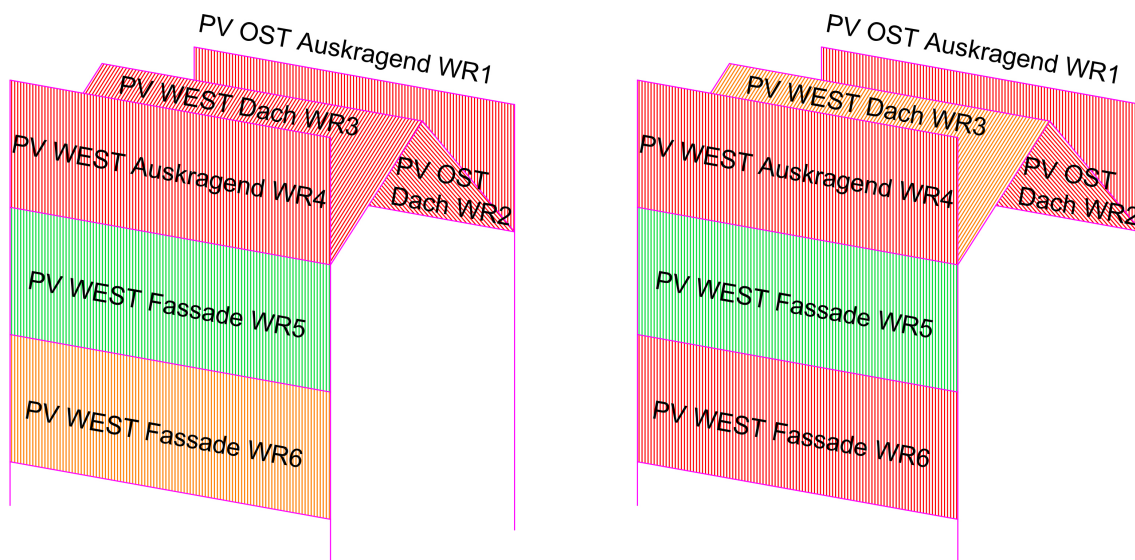


Abbildung 3.4: Links ist die ursprüngliche Konfiguration der DSSC-Demonstrationsanlage mit Level 0 DSSCs (DSSCs bei Testbeginn) abgebildet. Rechts ist die angepasste DSSC-Demonstrationsanlage mit den Level 1 DSSCs (weiterentwickelte DSSCs) zu sehen.

Dabei werden die orangenen DSSCs, welche an den Wechselrichter 6 (WR6) angeschlossen sind, gegen neue rote Level 1 DSSCs (weiterentwickelte DSSCs) getauscht, und die orangenen DSSCs werden auf das Dach montiert und an den WR3 angeschlossen.

Ein String besteht aus sechs einzelnen DSSCs, welche paarweise in Serie geschaltet sind, um das Spannungsniveau zu erhöhen. Die drei Paare werden nun parallel zueinander geschaltet, um die Fläche des Strings zu vergrößern und die erzeugte Leistung zu erhöhen (siehe Abbildung 3.5).

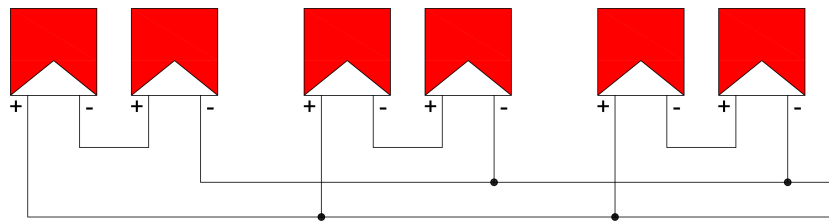


Abbildung 3.5: Verschaltung der DSSCs zu einem String

Um die Messungen für jeden einzelnen String zu ermöglichen, wird die oben beschriebene Variante 2 (mit einem String-Wechselrichter) gewählt.

3.2 Messaufbau

Bei dieser DSSC-Anlage werden sowohl elektrische als auch nicht-electrische Größen gemessen. Die nicht-electrischen Größen werden aufgenommen, um den Wirkungsgrad der einzelnen DSSCs als auch des gesamten Strings berechnen zu können.

3.2.1 Messung elektrischer Größen

Die Messung der elektrischen Größen (Strom und Spannung) erfolgt mittels eines Datenloggers (Dewetron). Dabei werden die elektrischen Ströme vor und nach dem Micro-Wechselrichter mit geeigneten Strommesszangen gemessen. Zusätzlich zu den elektrischen Strömen des jeweiligen Strings und dazugehörigen Micro-Wechselrichters wird noch der Neutralleiterstrom gemessen, um etwaige Stromverschiebungen bei Fehlern zu erkennen. Die Anschlüsse der Micro-Wechselrichter sind auf Klemmen geführt. Damit wird erreicht, dass man die Spannungen vor und nach den Micro-Wechselrichtern direkt messen kann.

Die Wechselspannung wird nach den Micro-Wechselrichtern nur einmal gemessen, die Gleichspannung jedoch vor jedem. Diese gemessenen Daten werden auf dem Datenlogger (Dewetron) zwischengespeichert.

Des Weiteren stehen gemessene Daten zur Verfügung, die vom Hersteller des Micro-Wechselrichters ("Enphase" [18]) stammen. Die Micro-Wechselrichter messen Spannung

und Strom am Eingang und Spannung und Frequenz am Ausgang. Das Kommunikationsgateway (Envoy) leitet die gemessenen Daten der Micro-Wechselrichter zu einem Webserver, um diese dort zu speichern (vgl. Abbildung 3.6).

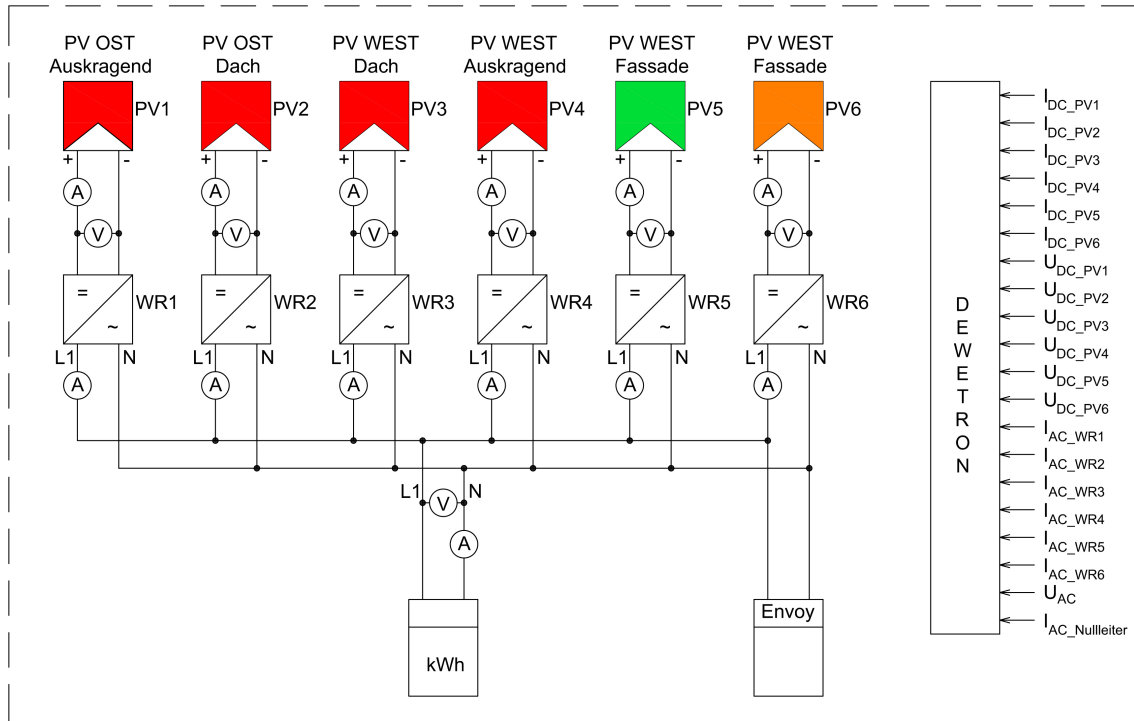


Abbildung 3.6: Messaufbau für die Messung der elektrischen Größen

Die gespeicherten Daten werden automatisch auf einen Rechner (PC) übertragen und gesichert, um Datenverluste zu vermeiden. Dabei werden die Daten des Datenloggers (Dewetron) über eine LAN-Verbindung übertragen und jene von Enphase per Skript vom Webserver heruntergeladen.

3.2.2 Messung nicht-elektrischer Größen

Mittels eines Sonnenschein-Pyranometers (SPN1) wird sowohl die Globalstrahlung als auch die Diffusstrahlung erfasst. Des Weiteren werden die Umgebungstemperatur und die Oberflächentemperaturen der DSSCs gemessen. Diese gemessenen Daten werden in einem Datenlogger (GP2) zwischengespeichert (siehe Abbildung 3.7).

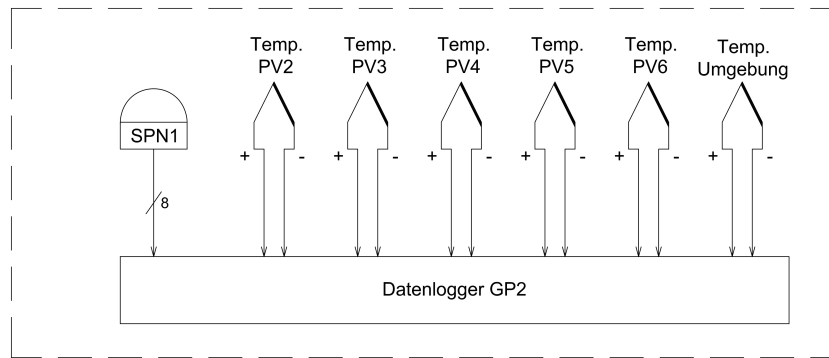


Abbildung 3.7: Messaufbau für die Messung der nicht elektrischen Größen

Der Datenlogger (GP2) ist mittels eines USB-Kabels mit dem PC verbunden, um mit dem Datenlogger zu kommunizieren und so die gespeicherten Daten auf den PC kopieren zu können.

Aus den beiden Messaufbauten 3.6 und 3.7 ergibt sich der gesamte Messaufbau der Demonstrationsanlage nach Abbildung 3.8. Die strichlierte Linie in Abbildung 3.8 soll nicht nur die Trennung der elektrischen und nicht-elektrischen Größen darstellen, sondern auch, dass sich die jeweiligen Komponenten in unterschiedlichen Schaltschränken befinden. Dies hat zur Folge, dass ein Rechner installiert werden muss, um auf einfache Art und Weise über ein lokales Netzwerk (LAN) mit den einzelnen Datenloggern zu kommunizieren und diese zu überwachen. Dieser Rechner ist auch für die automatische Sicherung der Messdaten zuständig.

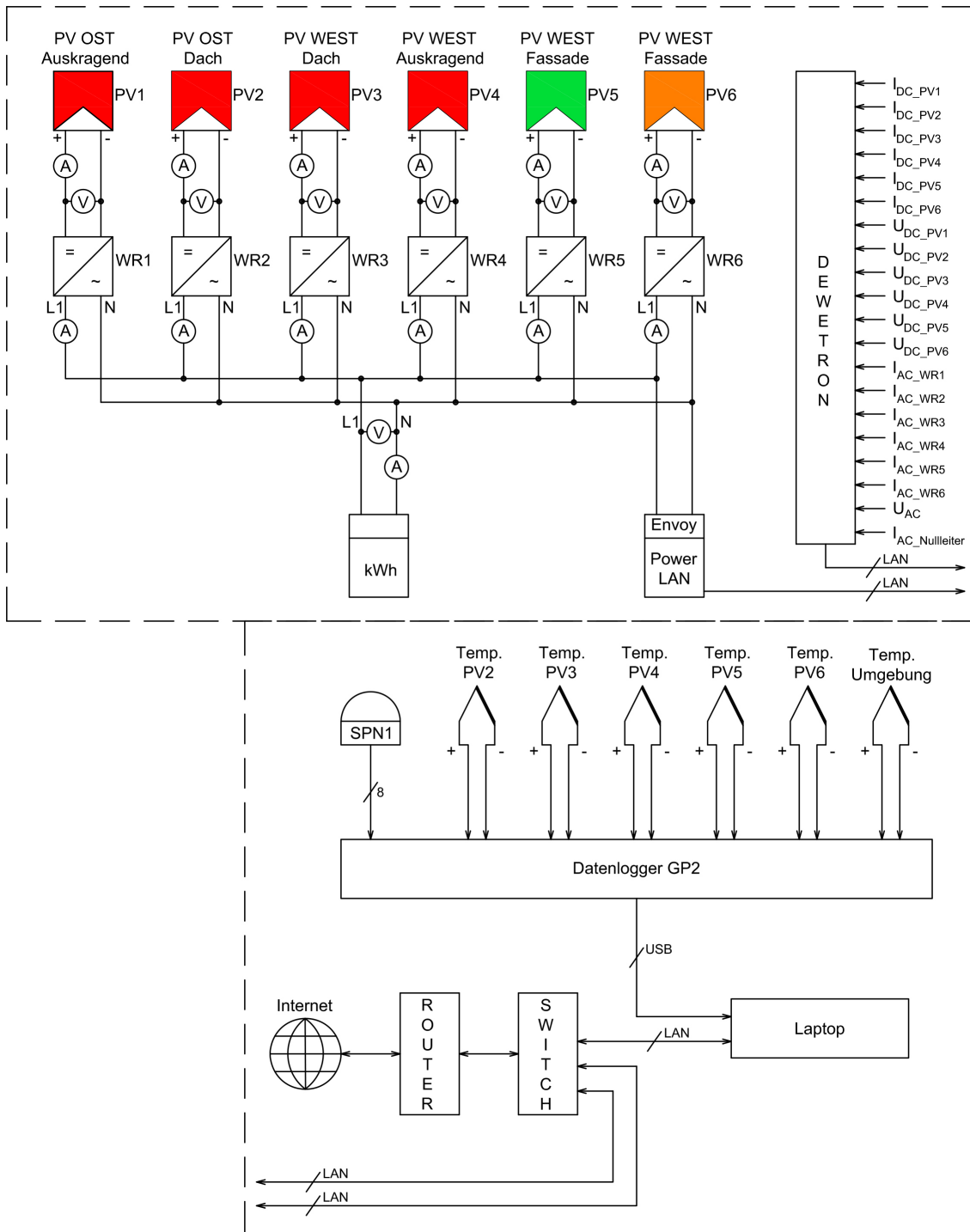


Abbildung 3.8: Messaufbau der DSSC-Demonstrationsanlage in der Angergasse

Bei der Dimensionierung und Ausstattung der Schaltschränke muss darauf geachtet werden, dass es sich, wie Anfangs erwähnt, um eine Langzeitmessung handelt. Die Hersteller definieren für jedes Betriebsmittel einen Betriebstemperaturbereich. Da die Demonstrati-

onsanlage im Freien aufgebaut ist, somit auch die Schaltschränke und die darin enthaltenen Komponenten, müssen die Schaltschränke unter Umständen beheizt beziehungsweise gekühlt werden, um die von den Herstellern angegebenen Betriebstemperaturbereiche einzuhalten.

3.2.3 Sicherung der Messdaten

Die automatische Datensicherung wird durch drei Scripten realisiert, da alle Daten über drei verschiedene Wege auf den PC geladen werden. Diese Wege sind:

1. LAN-Verbindung
2. USB-Verbindung
3. Internet-Verbindung

Die Sicherung der Daten über eine LAN-Verbindung erfolgt mit dem Windows-Befehl "Robocopy" (siehe Abbildung 3.9).

```
1 net use \\192.168.1.3\Daten /USER:Dewetron
2 Robocopy \\192.168.1.3\Daten C:\Users\Test\Desktop\Datenausgleich\Dewetron *.* /E /B
  /R:0 /W:0 /MOT:1
3 net use \\192.168.1.3\Daten /del
```

Abbildung 3.9: Skript für das Kopieren der Daten über eine LAN-Verbindung

Mit diesem Code aus der Abbildung 3.9 wird eine lokale Netzwerkverbindung zu einem Ordner (Netzwerkordner) aufgebaut (erste Code-Zeile), die neuen Daten gesichert (zweite Code-Zeile) und die Verbindung wieder getrennt (dritte Code-Zeile). Um die neuen Daten ausfindig zu machen, wird, wie oben erwähnt, der Befehl "Robocopy" verwendet. Dieser Befehl vergleicht die Dateien im Netzwerkordner mit jenen im lokalen Ordner und kopiert alle nicht vorhandenen Dateien.

Ähnlich funktioniert die Übertragung über eine USB-Verbindung, welche mit folgendem Code realisiert wird (siehe Abbildung 3.10):

```
1 taskkill /f /im "DeltaLink.exe"
2 timeout /t 2 /nobreak
3 "C:\Program Files\Delta-T\DeltaLINK 3.2\DL4CmdLine.exe" COM13
  /Dc:\Users\Test\Desktop\Datenausgleich\GP2
  /Fc:\Users\Test\Desktop\Datenausgleich\GP2\datafile %Y-%m-%d_%H-%M-%S.txt
  /Lc:\Users\Test\Desktop\Datenausgleich\GP2\logfile.log /E /R /C
4 timeout /t 2 /nobreak
5 start "" "C:\Program Files\Delta-T\DeltaLINK 3.2\DeltaLINK.exe"
```

Abbildung 3.10: Skript für das Kopieren der Daten über die USB-Verbindung

Da hier die Verbindung über USB hergestellt wird, muss sichergestellt werden, dass der dazugehörige USB-Port (Steckplatz) nicht in Verwendung ist, zum Beispiel von einem Programm. Dies geschieht in der ersten Code-Zeile, indem das Programm "Delta-Link.exe", welches die Messdatenerfassung des Sonnenscheinpyranometers und der Temperatursensoren ausführt, beendet wird. Danach wird eine Verbindung zum Datenlogger aufgebaut und die dort vorhandenen Daten auf den PC kopiert. Nach erfolgreichem Kopieren werden die Daten auf dem Datenlogger gelöscht, die Verbindung getrennt und das zuvor beendete Programm wieder gestartet.

Für die Datensicherung der Enphase-Daten wird ein umfassenderes Skript benötigt (siehe Anhang A.1 und A.2), auch wenn die Funktionsweise den schon beschriebenen ähnlich ist. Dieses Script meldet sich beim Webserver an und lädt, nach erfolgreicher Anmeldung, die Daten der einzelnen Wechselrichter als auch der gesamten Energieernte als Datei auf den PC herunter. Während des Downloads wird angezeigt, welche Dateien schon geladen wurden, und nachdem der Download abgeschlossen ist, meldet sich das Skript beim Webserver wieder ab.

3.3 Messdatenverarbeitung

Für die Berechnungen in weiterer Folge wird die Software Matlab verwendet. Um die gespeicherten Messdaten in diesem Programm nutzen zu können, müssen diese in das richtige Format konvertiert werden. Für die Konvertierung der Dewetron-Daten (*.d7d) wird die Software Dewesoft benutzt. Die Messdaten des Datenloggers GP2 (*.txt) und die Daten des Wechselrichter-Herstellers (*.csv) werden mit Hilfe eines Matlab-Skripts in das entsprechende Dateiformat (*.mat) konvertiert.

3.3.1 Messabweichung

Die Bestimmung des wahren Wertes einer physikalischen Größe mittels einer Messung ist nicht möglich. Die Differenz des Messwertes zum tatsächlichen Wert nennt man Messabweichung. Diese Abweichung hat ihren Ursprung in der Insuffizienz der Messgeräte, Einflüssen aus der Umgebung und des Messaufbaus (siehe Abbildung 3.11) [19].

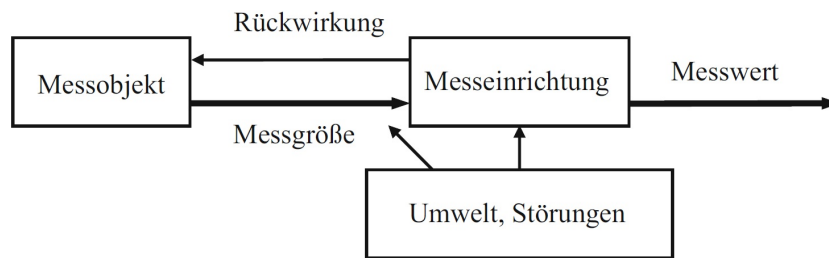


Abbildung 3.11: Schema für die Ursachen von Messabweichungen [19]

Die Messabweichung wird in den Datenblättern der jeweiligen Messinstrumente angegeben und ist für die Beurteilung des Messergebnisses wesentlich. Tragen mehrere Messinstrumente zu einem Messwert bei, muss die Gesamtmessabweichung errechnet werden. Dazu wird der Medianwert der jeweiligen Messreihe mit dem Befehl "median" in Matlab ermittelt. Der Medianwert gibt den Zentralwert einer Messreihe an. Das heißt, der Medianwert ist zum Beispiel aus einer Reihe von neun Messwerten (0 25 15 9 12 2 21 5 0) der fünfte Messwert, wobei die Messreihe zuvor sortiert werden muss (0 0 2 5 **9** 12 15 21 25) [20].

Für die Gleichstrommessung I_{AC} ergibt sich zum Beispiel der Messwert 2,15 A. Diesem Messwert wird dann die dazugehörige Messabweichung des Messgerätes beigefügt. Für die Wechselstrommesszange Fluke i5s wird eine Messabweichung von 1 % + 5 mA angegeben.

$$2.15 \text{ A} \cdot 0.01 + 0.005 \text{ A} = 0.0265 \text{ A} \quad (3.1)$$

Damit ergibt sich die Bezeichnung 2,15 A ± 0,0265 A. Da das Messmodul des Datenloggers (Dewetron) ebenfalls eine Messabweichung hat (0,04 % + 0,05 % von 2,5 V [21]), muss diese nun der Messabweichung des Messgerätes hinzugefügt werden. Zuerst wird die obere und untere Grenze des Messwertes berechnet:

$$\text{obere Grenze} = 2.15 \text{ A} + 0.027 \text{ A} = 2.177 \text{ A} \quad (3.2)$$

$$\text{untere Grenze} = 2.15 \text{ A} - 0.027 \text{ A} = 2.123 \text{ A} \quad (3.3)$$

Die Messabweichung ist beim Datenlogger in Volt angegeben, wobei 1 A pro 400 mV gilt, und muss daher umgerechnet werden.

$$\text{obere Grenze} = 2.177 \text{ A} \cdot 400 \text{ mV/A} = 0.871 \text{ V} \quad (3.4)$$

$$\text{untere Grenze} = 2.123 \text{ A} \cdot 400 \text{ mV/A} = 0.849 \text{ V} \quad (3.5)$$

Nun kann die Messabweichung des Datenloggers (0,04 % + 0,05 % von 2,5 V [21]) addiert beziehungsweise subtrahiert werden, um die gesamte Messabweichung zu berechnen.

$$\text{obere Grenze} = 0.871 \text{ V} + (0.0004 + 0.0005 \cdot 2.5 \text{ V}) = 0.872 \text{ V} \quad (3.6)$$

$$\text{untere Grenze} = 0.849 \text{ V} - (0.0004 + 0.0005 \cdot 2.5 \text{ V}) = 0.847 \text{ V} \quad (3.7)$$

Zuletzt muss man wieder in die richtige Einheit umrechnen, um die Darstellung besser lesen zu können und eventuelle Ablesefehler zu vermeiden.

$$\text{obere Grenze} = \frac{0.872 \text{ V}}{400 \text{ mV/A}} = \underline{2.18 \text{ A}} \quad (3.8)$$

$$\text{untere Grenze} = \frac{0.847 \text{ V}}{400 \text{ mV/A}} = \underline{2.12 \text{ A}} \quad (3.9)$$

Es ergibt sich somit eine Gesamtmessabweichung von $\pm 0.03 \text{ A}$, indem man die Differenz zwischen den Grenzen und dem Medianwert berechnet.

$$\Delta x_{\text{positiv}} = 2.18 \text{ A} - 2.15 \text{ A} = 0.03 \text{ A} \quad (3.10)$$

$$\Delta x_{\text{negativ}} = 2.12 \text{ A} - 2.15 \text{ A} = -0.03 \text{ A} \quad (3.11)$$

$\Delta x_{\text{positiv}}$ positive Messabweichung
 $\Delta x_{\text{negativ}}$ negative Messabweichung

Die vollständige Schreibweise für einen Messwert lautet somit $2.15 \text{ A} \pm 0.03 \text{ A}$. In der folgenden Tabelle 3.1 sind für alle Messwerte die Messabweichungen dargestellt.

Tabelle 3.1: Gesamtmessabweichung der einzelnen Parameter der DSSC-Demonstrationsanlage

Messgerät	Bezeichnung	Messgröße	Messabweichung	Quelle
Fluke i5s	Wechselstrom	I_{AC}	$\pm 0.03 \text{ A}$	[21][22]
Dewe 3020	Wechselspannung	U_{AC}	$\pm 0.52 \text{ V}$	[21]
CA E3N	Gleichstrom	I_{DC}	$\pm 0.06 \text{ A}$	[21][23]
Dewe 3020	Gleichspannung	U_{DC}	$\pm 0.03 \text{ V}$	[21]
SPN1	Globalstrahlung	E_{Glob}	$\pm 13 \text{ W/m}^2$	[8][24]
SPN1	Diffusstrahlung	E_{Diff}	$\pm 13 \text{ W/m}^2$	[8][24]
MT2	DSSC-Temperatur	θ_{DSSC}	$\pm 0.81 \text{ }^\circ\text{C}$	[9][24]
MT2	Umgebungstemperatur	θ_{Umg}	$\pm 0.81 \text{ }^\circ\text{C}$	[9][24]

Die in der Tabelle 3.1 angegebenen Messabweichungen werden systematische Messabweichungen genannt, da diese die Messgrößen mit einem konstanten Betrag verändern oder einer sehr langsamen Veränderung unterliegen. Das heißt systematische Messabweichungen sind durch wiederholte Messungen nicht erkennbar [19].

3.3.2 Globalstrahlungsumrechnung

Der Sonnenschein-Pyranometer (SPN1) ist, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, in einer horizontalen Position befestigt. Somit kann keine genaue Aussage über die tatsächlich eingestrahelte Globalstrahlung auf die unterschiedlich geneigten Strings und somit auf die einzelnen DSSCs getroffen werden.

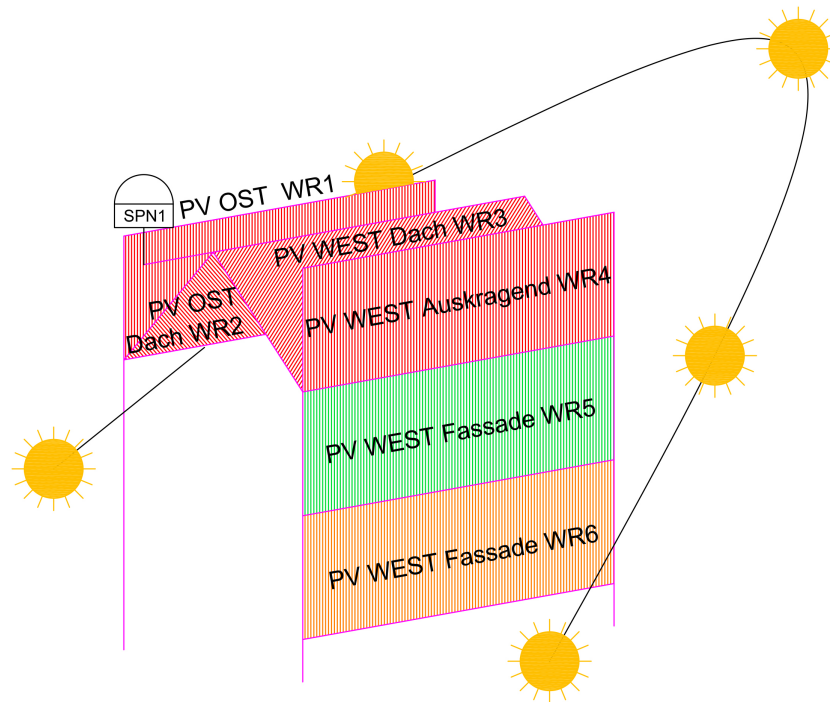


Abbildung 3.12: Verlauf der Sonne um die DSSC Demonstrationsanlage

Um die Sonneneinstrahlung auf die Strings dieser DSSC-Anlage umrechnen zu können, muss die Ausrichtung der Anlage, die Neigung der einzelnen Strings, die globale und diffuse Strahlung und die Position der Sonne bekannt sein [25]. Die globale und diffuse Strahlung sind durch die Messung des SPN1 bekannt.

Die Position der Sonne kann durch zwei Winkel beschrieben werden. Mit dem Höhenwinkel β und den Azimutwinkel Ψ_S (siehe Abbildung 3.13). Diese beiden Winkel lassen sich wie folgt berechnen:

Höhenwinkel β :

$$\sin(\beta) = \cos(\Phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) \quad (3.12)$$

β	Höhenwinkel
Φ	geograph. Breitengrad des Standortes
δ	Deklination
ω	Stundenwinkel

Die Deklination δ berücksichtigt die Erdneigung zur Sonne. Sie wird mit der Gleichung (3.13) berechnet:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin[(284 + n) \cdot 0.9863] \quad (3.13)$$

δ	Deklination
n	Tag des Jahres

Der Stundenwinkel ω , ein Maß für die Sonnenzeit, rechnet die Sonnenzeit (auch wahre Ortszeit genannt) in die jeweilige Position der Erde um.

$$\omega = 0.25 \cdot (\text{„Sonnenzeit“} - 720) \quad (3.14)$$

ω	Stundenwinkel
Sonnenzeit	tatsächliche Zeit der Sonne

Die Ortszeit, in Mitteleuropa (MEZ), ist an den 15. Längengrad gebunden. Das bedeutet, dass die Sonnenzeit nur entlang dieses Längengrades gleich der Ortszeit ist. Zum Beispiel ist am Standort Graz der Sonnenhöchststand nicht genau um 12:00 Uhr (Ortszeit), sondern um 12:03 Uhr (Sonnenzeit). Somit ergibt sich für die Berechnung der Sonnenzeit folgende Gleichung (3.15):

$$\text{Sonnenzeit} = \text{Standardzeit} + 4 \cdot (\Phi_{Lokal} - \Phi_{St}) + E \quad (3.15)$$

Sonnenzeit	tatsächliche Zeit der Sonne
Standardzeit	1440 min $\hat{=}$ 24 h
Φ_{Lokal}	geograph. Längengrad der Standortes
Φ_{St}	geograph. Längengrad des Standardmeridians der Zeitzone
E	Zeitgleichung

Die Schwankungen in der Erdrotation werden in der Zeitgleichung E berücksichtigt (siehe Gleichung (3.16)).

$$E = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \quad (3.16)$$

zur besseren Lesbarkeit mit

$$B = (n - 81) \cdot 0,989 \quad (3.17)$$

E	Zeitgleichung
n	Tag des Jahres

Der zweite Winkel für die Position der Sonne ist der Azimutwinkel Ψ_S und wird wie folgt berechnet:

$$\sin(\Psi_S) = \cos(\delta) \cdot \frac{\sin(\omega)}{\cos(\beta)} \quad (3.18)$$

Ψ_S	Azimutwinkel
δ	Deklination
ω	Stundenwinkel
β	Höhenwinkel

In der Abbildung 3.13 sind die beiden Winkel für die Position der Sonne nochmals dargestellt.

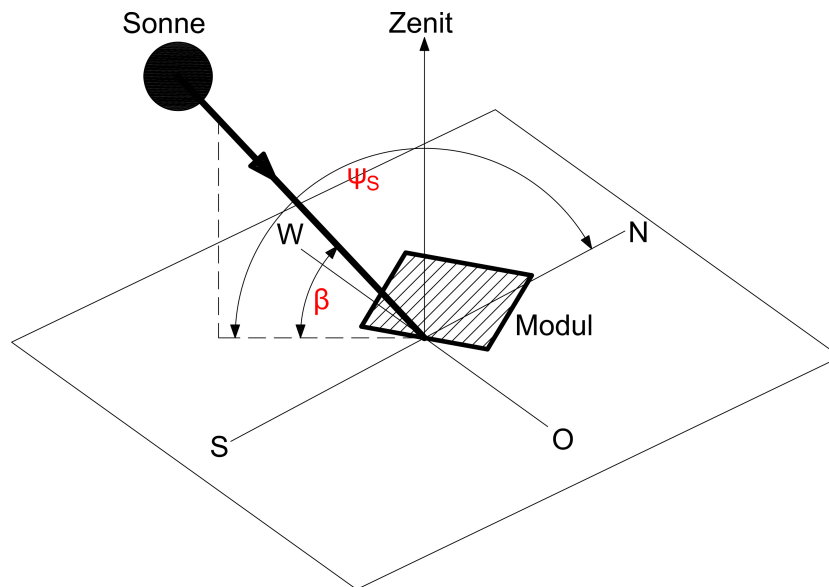


Abbildung 3.13: Position der Sonne und die dazugehörigen Winkel (Bild angepasst vgl. [25])

Da nun die Position der Sonne und die globale und diffuse Strahlung bekannt sind, muss nur noch die Orientierung der Strings bestimmt werden, um auf die gerichtete direkte Strahlung umrechnen zu können. Dazu ist der Neigungswinkel γ , der Azimutwinkel Ψ_S und der Winkel der Flächennormale zur Nordrichtung Ψ_M festzulegen (siehe Abbildung 3.14). Hierbei wird die Bezugsachse Nord gewählt und das Vorzeichen für den Azimutwinkel Ψ_S und dem Winkel zur Flächennormale Ψ_M negativ für Ost und positiv für West.

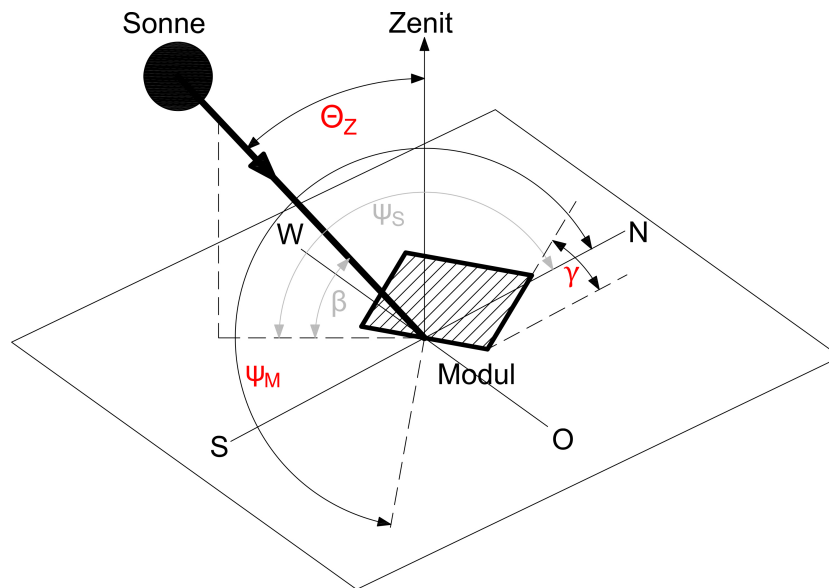


Abbildung 3.14: Position der DSSC und die dazugehörigen Winkel (Bild angepasst vgl. [25])

Des Weiteren muss noch der Einfallswinkel Θ_M der Strahlung bekannt sein. Dieser Winkel lässt sich durch folgende Formel (3.19) berechnen:

$$\cos(\Theta_M) = \cos(\beta) \cdot \cos(\Psi_S - \Psi_M) \cdot \sin(\gamma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \quad (3.19)$$

Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormalen
β	Höhenwinkel
Ψ_S	Azimutwinkel
γ	Neigungswinkel

Θ_Z ist der Supplementwinkel zum Höhenwinkel des Sonnenstandes und berechnet sich wie folgt (siehe Formel (3.20) und Abbildung 3.15):

$$\Theta_Z = 90^\circ - \beta \quad (3.20)$$

Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche
β	Höhenwinkel

Dieser Winkel Θ_Z wird benötigt, um die Ungenauigkeit der Messung zu filtern. Denn wird der Winkel Θ_Z größer $|90^\circ|$, so strahlt nur mehr die von der Atmosphäre reflektierte Strahlung auf die DSSC ein, was zu Messfehlern führen würde.

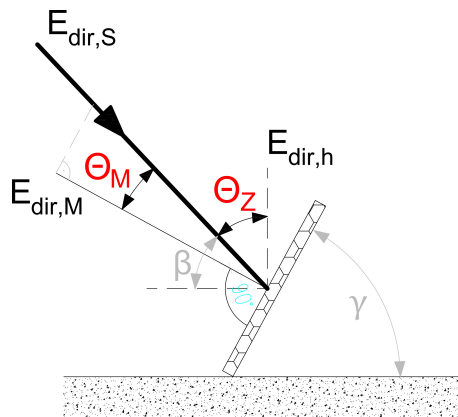


Abbildung 3.15: Einfallswinkel der Sonne auf eine DSSC (Bild angepasst vgl. [25])

$E_{dir,S}$	Direktstrahlung der Sonne
$E_{dir,M}$	Direktstrahlung auf das Modul
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche

Aus Abbildung 3.15 und aus den Winkelfunktionen ergeben sich folgende Formeln (3.21) und (3.22):

$$E_{dir,M} = E_{dir,S} \cdot \cos(\Theta_M) \quad (3.21)$$

$$E_{dir,h} = E_{dir,S} \cdot \cos(\Theta_Z) \quad (3.22)$$

$E_{dir,M}$	Direktstrahlung auf das Modul
$E_{dir,S}$	Direktstrahlung der Sonne
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche

Durch Umformen der Gleichung (3.22) und Einsetzen in Gleichung (3.21) ergibt sich:

$$E_{dir,M} = E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} \quad (3.23)$$

$E_{dir,M}$	Direktstrahlung auf das Modul
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche

Wie im Kapitel 2.1 erläutert, berechnet sich die globale horizontale Strahlung (Gleichung (3.24)) wie folgt:

$$E_{glob,h} = E_{dir,h} + E_{diff,h} \quad (3.24)$$

$E_{glob,h}$	Globalstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche

Somit sind alle Größen für die Umrechnung der tatsächlich eingestrahnten Globalstrahlung auf die Strings dieser PV-Anlage bekannt.

Bei wolkenlosen Tagen kommt der größte Teil der diffusen Strahlung aus der Richtung der direkten Strahlung. Daher kann man folgende Näherung angeben [25]:

$$E_{glob,M} = E_{glob,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} \quad (3.25)$$

$E_{glob,M}$	Globalstrahlung der Sonne auf das Modul
$E_{glob,h}$	Globalstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche

Für einen bedeckten Himmel haben Hottel und Woertz 1942 die Gleichung (3.25) angepasst, indem sie eine gleichmäßige Verteilung der diffusen Strahlung annehmen. Dabei wird aber die Orientierung der Module nicht berücksichtigt. Es gilt [25]:

$$E_{glob,M} = E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} + E_{diff,h} \quad (3.26)$$

$E_{glob,M}$	Globalstrahlung der Sonne auf das Modul
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche

Eine weitere Verbesserung der Gleichung (3.26) bewerkstelligten 1963 Liu und Jordan. Sie berücksichtigen nicht nur die Orientierung der Module, sondern auch Reflexionen der Umgebung (ρ_B^*) und, dass die geneigten Module nur in bestimmten Zeiträumen von der Sonne beschienen werden können $\left(\frac{1 + \cos(\gamma)}{2} \text{ und } \frac{1 - \cos(\gamma)}{2}\right)$. Aus diesen Annahmen folgt [25]:

$$E_{glob,M} = E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} + E_{diff,h} \cdot \frac{1 + \cos(\gamma)}{2} + E_{glob,h} \cdot \frac{1 - \cos(\gamma)}{2} \cdot \rho_B^* \quad (3.27)$$

$E_{glob,M}$	Globalstrahlung der Sonne auf das Modul
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
γ	Neigungswinkel des Moduls
ρ_B^*	Albedo Faktor

Aus der nachfolgenden Tabelle 3.2 können Richtwerte für den Reflexionsfaktor (Albedo-Faktor) entnommen werden.

Tabelle 3.2: Albedo-Faktoren für unterschiedliche Oberflächen [25]

Art	Faktor
Neuschnee	0.75 - 0.95
Altschnee	0.40 - 0.70
Sandboden	0.15 - 0.40
Wiesen und Felder	0.12 - 0.30
Straßen, Häuser	0.15 - 0.25
Wälder	0.05 - 0.20
dunkler Erdboden	0.07 - 0.10
Wasser	0.03 - 0.10

Diese Formeln kann man zur Umrechnung der Globalstrahlung für herkömmliche, beliebig orientierte Module anwenden.

Die DSSC ist lichtdurchlässig und wird somit auf beiden Seiten bestrahlt. Dafür muss man bei vertikalen Modulen die Ausrichtung fiktiv um 180° drehen. Zum Beispiel muss ein Modul, welches nach Osten ausgerichtet ist, fiktiv um 180° gedreht werden, damit nach dem Höchststand der Sonne das Modul wieder bestrahlt wird.

Die Abbildung 3.16 veranschaulicht, wie sich die Sonne über die DSSC-Anlage bewegt. Dabei ist zu erkennen, dass die Sonne, speziell bei vertikal ausgerichteten Strings, den gleichen String von östlicher als auch von westlicher Richtung bescheint.

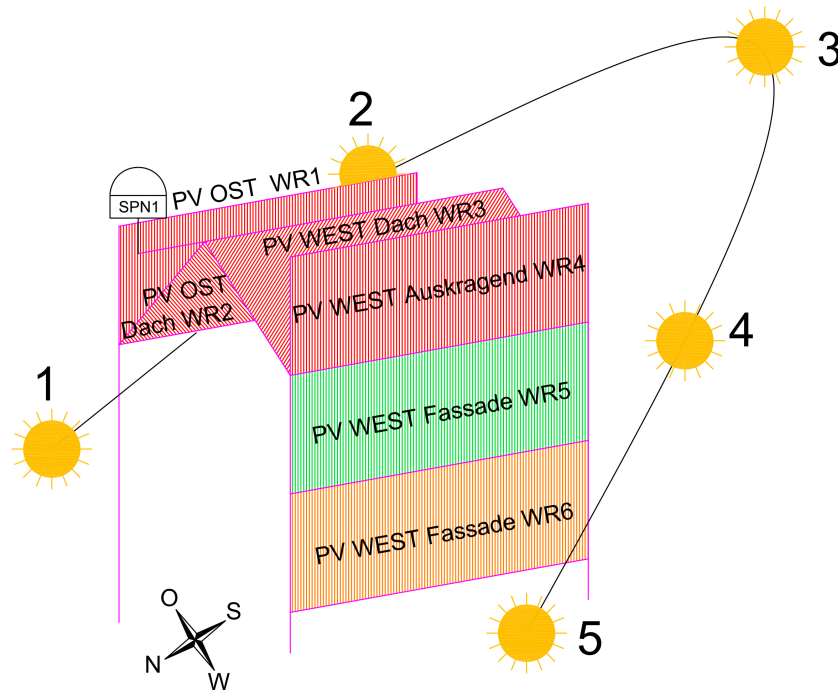


Abbildung 3.16: Schema des Sonnenverlaufs über die DSSC Demonstrationsanlage

Aber nicht nur die fiktive Drehung der DSSC ist wichtig. Ein weiterer Vorteil der Lichtdurchlässigkeit ist, dass während von einer Seite die Sonne auf die DSSC scheint, das durchfallende Licht durch Reflexion auch auf die Rückseite der DSSC strahlt. Somit wird die DSSC gleichzeitig an der sonnenzugewandten Fläche mit der Direkt-, Global- und Diffusstrahlung und an der Rückseite mit der diffusen und reflektierten globalen Strahlung beschienen. Dieser Sachverhalt wird im Vergleich zu Gleichung (3.27) in der Gleichung (3.28) mit einem zusätzlichen Faktor 2 berücksichtigt. Aber der Faktor 2 gilt nur bei freistehenden DSSC-Anlagen, ansonsten muss der Faktor der Umgebung entsprechend angepasst werden.

$$\begin{aligned}
 E_{glob,DSSC} = & E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} + E_{diff,h} \cdot \frac{1 + \cos(\gamma)}{2} \cdot 2 \\
 & + E_{glob,h} \cdot \frac{1 - \cos(\gamma)}{2} \cdot \rho_B^* \cdot 2
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

$E_{glob,DSSC}$	Globalstrahlung der Sonne auf eine DSSC
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
γ	Neigungswinkel des Moduls
ρ_B^*	Albedo Faktor

Durch Kürzen ergibt sich für die Umrechnung der Globstrahlung auf eine beliebig orientierte DSSC folgende Gleichung (3.29):

$$E_{glob,DSSC} = E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} + E_{diff,h} \cdot (1 + \cos(\gamma)) + E_{glob,h} \cdot (1 - \cos(\gamma)) \cdot \rho_B^* \quad (3.29)$$

$E_{glob,DSSC}$	Globalstrahlung der Sonne auf eine DSSC
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
γ	Neigungswinkel des Moduls
ρ_B^*	Albedo Faktor

Die Abbildung 3.17 zeigt den Vergleich der Globalstrahlungsumrechnung von einem horizontal ausgerichteten Sonnenscheinpyranometer SPN1 zu einem vertikal gerichteten String.

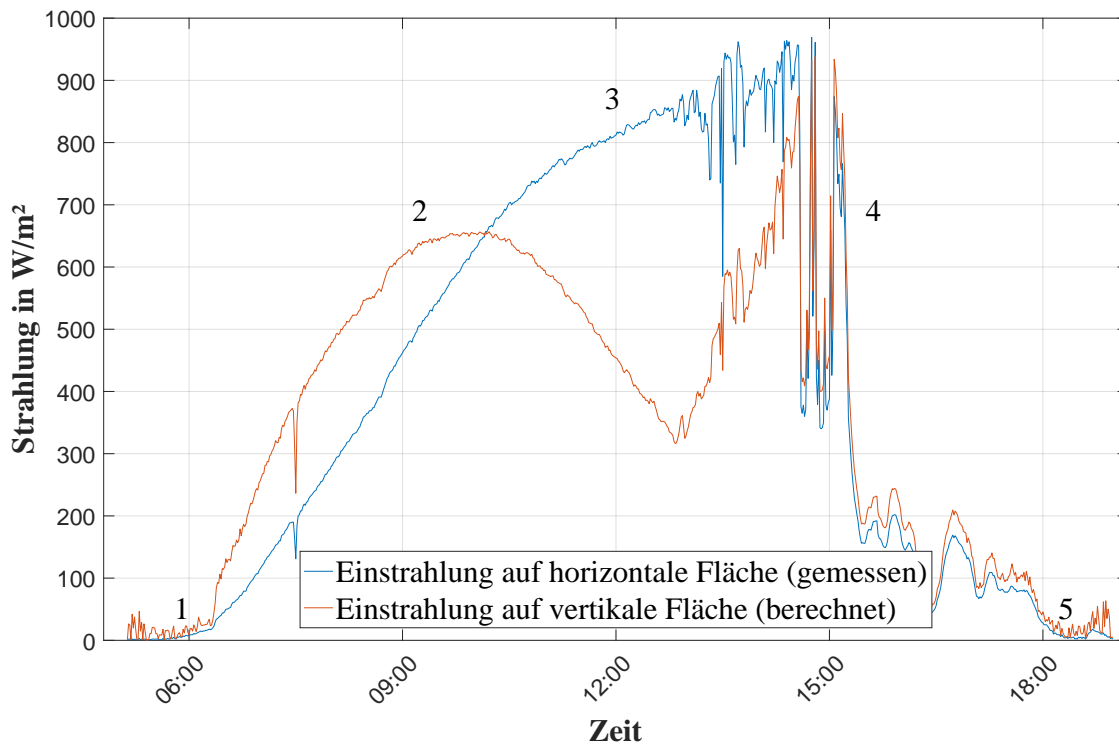


Abbildung 3.17: Vergleich horizontale gerichteter SPN1 zu einem vertikal gerichteten String

Der blaue Verlauf in Abbildung 3.17 zeigt die Globaleinstrahlung auf eine horizontale Fläche, die rote Kurve den Verlauf der Globaleinstrahlung bezogen auf einen vertikal gerichteten String. Die einzelnen Phasen (1, 2, 3, 4, 5) sollen im Vergleich zu Abbildung 3.16 verdeutlichen, wie sich die Sonne über eine vertikal gerichtete Fläche bewegt

und wie viel Strahlung auf diese Fläche einwirkt. So wird erkannt, dass bei der vertikalen Fläche beim tatsächlichen Sonnenhöchststand (3) nur Diffusstrahlung und von der Umgebung reflektierte Globalstrahlung auftritt. Weiters erkennt man zwei Maxima der Strahlung an den Punkten 2 und 4. Keinen Unterschied gibt es beim tatsächlichen Sonnenaufgang (1) beziehungsweise -untergang (5). Mit anderen Worten gibt es für vertikal gerichtete DSSC-Strings jeden Tag zwei Sonnenaufgänge (1 / 3) und -untergänge (3 / 5).

Für das bessere Verständnis wird hier eine Beispielumrechnung der Globstrahlungsdaten anhand einer vertikal nach Osten orientierten DSSC durchgeführt.

Dazu wird zuerst die Position der Sonne für den 09. August 2016 (222. Tag des Jahres) um 13:32 Uhr (812. Minute des Tages) mit dem Höhenwinkel β und dem Azimutwinkel Ψ_S bestimmt. Für dieses Ziel sind noch die standortspezifischen Koordinaten nötig. Für die Demonstrationsanlage, welche sich in der Angergasse in Graz befindet, erben sich folgende Längen- und Breitengrade:

1. Längengrad: 15.44 °
2. Breitengrad: 44.05 °

Für den Höhenwinkel β wird die Deklination δ ,

$$\begin{aligned} \delta &= 23.45 \cdot \sin[(284 + n) \cdot 0.9863] \\ &= 23.45 \cdot \sin[(284 + 222) \cdot 0.9863] = 15.36^\circ \end{aligned} \quad (3.30)$$

δ	Deklination
n	Tag des Jahres

die Zeitgleichung E ,

$$\begin{aligned} B &= (n - 81) \cdot 0.989 \\ &= (222 - 81) \cdot 0.989 = 139.45^\circ \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} E &= 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \\ &= 9.87 \cdot \sin(2 \cdot 139.45^\circ) - 7.53 \cdot \cos(139.45^\circ) - 1.5 \cdot \sin(139.45^\circ) \\ &= -5.05^\circ \end{aligned} \quad (3.32)$$

n	Tag des Jahres
E	Zeitgleichung

die Sonnenzeit,

$$\begin{aligned} \text{Sonnenzeit} &= \text{Standardzeit} + 4 \cdot (\Phi_{Lokal} - \Phi_{St}) + E \\ &= 812 + 4 \cdot (15.44^\circ - 15^\circ) + (-5.05^\circ) = 808.75^\circ \end{aligned} \quad (3.33)$$

Sonnenzeit	tatsächliche Zeit der Sonne
Standardzeit	1440 min $\hat{=}$ 24 h
Φ_{Lokal}	geograph. Längengrad der Standortes
Φ_{St}	geograph. Längengrad des Standardmeridians der Zeitzone

und der Stundenwinkel ω benötigt.

$$\begin{aligned}\omega &= 0.25(\text{"Sonnenzeit"} - 720) \\ &= 0.25(808.75^\circ - 720) = 22.19^\circ\end{aligned}\quad (3.34)$$

ω	Stundenwinkel
Sonnenzeit	tatsächliche Zeit der Sonne

Daraus folgt der Höhenwinkel β :

$$\begin{aligned}\sin(\beta) &= \cos(\Phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) \\ &= \cos(47.05^\circ) \cdot \cos(15.36^\circ) \cdot \cos(22.19^\circ) + \sin(47.05^\circ) \cdot \sin(15.36^\circ) \\ &= 36.66^\circ\end{aligned}\quad (3.35)$$

$$\Rightarrow \beta = \sin^{-1}(36.66^\circ) = 53.35^\circ \quad (3.36)$$

β	Höhenwinkel
Φ	geograph. Breitengrad des Standortes
δ	Deklination
ω	Stundenwinkel

Dementsprechend kann auch der Azimutwinkel Ψ_S wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned}\sin(\Psi_S) &= \cos(\delta) \cdot \frac{\sin(\omega)}{\cos(\beta)} \\ &= \cos(15.36^\circ) \cdot \frac{\sin(22.19^\circ)}{\cos(53.35^\circ)} \\ &= 0.61^\circ\end{aligned}\quad (3.37)$$

$$\Rightarrow \Psi_S = \sin^{-1}(0.61^\circ) = 37.59^\circ \quad (3.38)$$

Ψ_S	Azimutwinkel
δ	Deklination
ω	Stundenwinkel
β	Höhenwinkel

Da die Position der Sonne nun bekannt ist, wird die Orientierung der DSSC zur Sonne bestimmt. Diese lässt sich mit dem Neigungswinkel γ , dem Azimutwinkel Ψ_M und der Flächennormale zum Norden Ψ_M bestimmen.

$$\begin{aligned}
 \cos(\Theta_M) &= \cos(\beta) \cdot \cos(\Psi_S - \Psi_M) \cdot \sin(\gamma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) & (3.39) \\
 &= \cos(53.35^\circ) \cdot \cos(37.59^\circ - 292.5^\circ) \cdot \sin(90^\circ) + \\
 &\quad + \sin(53.35^\circ) \cdot \cos(90^\circ) \\
 &= -0.16^\circ
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Theta_M = \cos^{-1}(-0.16^\circ) = 98.64^\circ \quad (3.40)$$

Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale
β	Höhenwinkel
Ψ_S	Azimutwinkel
Ψ_M	Flächennormale zum Norden
γ	Neigungswinkel

Da hier der Einfallswinkel zur Flächennormalen Θ_M bereits größer als 90° ist, kann man davon ausgehen, dass die Direktstrahlung die DSSC nicht mehr trifft (siehe Abbildung 3.16). Es muss ein geeigneter Winkel gefunden werden, wann die DSSC fiktiv um 180° gedreht wird, sprich vom Winkel der Flächennormale zum Norden Ψ_M 180° subtrahiert wird. Damit ergibt sich ein neuer Einfallswinkel Θ_M von:

$$\begin{aligned}
 \cos(\Theta_M) &= \cos(\beta) \cdot \cos(\Psi_S - \Psi_M) \cdot \sin(\gamma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) & (3.41) \\
 &= \cos(53.35^\circ) \cdot \cos(37.59^\circ - 112.5^\circ) \cdot \sin(90^\circ) + \\
 &\quad + \sin(53.35^\circ) \cdot \cos(90^\circ) \\
 &= 0.16^\circ
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Theta_M = \cos^{-1}(0.16^\circ) = 81.06^\circ \quad (3.42)$$

Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale
β	Höhenwinkel
Ψ_S	Azimutwinkel
Ψ_M	Flächennormale zum Norden
γ	Neigungswinkel

Um die Direktstrahlung berechnen zu können muss auch der Supplementwinkel Θ_Z vom Einfallswinkel Θ_M bekannt sein. Dieser berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \Theta_Z &= 90^\circ - \beta & (3.43) \\
 &= 90^\circ - 53.35^\circ = 36.65^\circ
 \end{aligned}$$

Θ_Z	Supplementwinkel zum Einfallswinkel zur Flächennormale
β	Höhenwinkel

Für die Direktstrahlung auf die DSSC gilt:

$$\begin{aligned}
 E_{dir,M} &= E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} \\
 &= 674 \frac{W}{m^2} \cdot \frac{\cos(81.06^\circ)}{\cos(36.65^\circ)} = 130.58 \frac{W}{m^2}
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

$E_{dir,M}$	Direktstrahlung der Sonne auf die DSSC
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche (gemessen)
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale
Θ_Z	Supplementwinkel zum Einfallswinkel zur Flächennormale

mit

$$\begin{aligned}
 E_{dir,h} &= E_{glob,h} - E_{diff,h} \\
 &= 944 \frac{W}{m^2} - 270 \frac{W}{m^2} = 674 \frac{W}{m^2}
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
$E_{glob,h}$	Globalstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche (gemessen)
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche (gemessen)

wobei die Globalstrahlung ($E_{glob,h}$) und Diffusstrahlung ($E_{diff,h}$) mit dem Sonnenschainpyranometer SPN1 gemessen wird und die Werte für den Zeitpunkt 13:32 Uhr entsprechen.

Nachdem alle Parameter bekannt sind, kann man nun die Globalstrahlung auf die DSSC berechnen. Dies gelingt folgendermaßen:

$$\begin{aligned}
 E_{glob,DSSC} &= E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} + E_{diff,h} \cdot (1 + \cos(\gamma)) + \\
 &\quad + E_{glob,h} \cdot (1 - \cos(\gamma)) \cdot \rho_B^* \\
 &= 674 \frac{W}{m^2} \cdot \frac{\cos(81.06^\circ)}{\cos(36.65^\circ)} + 270 \frac{W}{m^2} \cdot (1 + \cos(90^\circ)) + \\
 &\quad + 944 \frac{W}{m^2} \cdot (1 - \cos(90^\circ)) \cdot 0.2 \frac{W}{m^2} \\
 &= 589.35 \frac{W}{m^2}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

$E_{glob,DSSC}$	Globalstrahlung der Sonne auf die DSSC
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale
Θ_Z	Supplementwinkel zum Einfallswinkel zur Flächennormale
γ	Neigungswinkel
$E_{glob,h}$	Globalstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
ρ_B^*	Albedo-Faktor
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche

Vergleicht man die Abbildung 3.17 mit dem Ergebnis, so erkennt man, dass die berechnete Strahlung an einer vertikalen DSSC circa um 08:45 auftritt. Im Vergleich dazu tritt

die gleiche Strahlungsintensität auf einer horizontalen Fläche circa eine Stunde später auf.

3.3.3 Versuche an der DSSC Demonstrationsanlage

Da man die gemessenen Daten nicht immer mit einer Vergleichsmessung verifizieren kann, müssen auch Versuche vor Ort durchgeführt werden. Diese Versuche dienen nicht nur für eine Plausibilitätskontrolle, sondern bringen auch weitere Erkenntnisse über das Verhalten bei unterschiedlich definierten Fehlern, wie zum Beispiel Ausfall, Verschattung und so weiter.

Interessant dabei ist, wie sich durch eine defekte oder verschattete DSSC die Energieernte ändert und ob man daraus Aussagen über diese treffen kann. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 3.18 gezeigt.



Abbildung 3.18: Versuchsaufbau zur Simulation einer vollkommen einseitig verschatteten DSSC

Hier wird zunächst nur eine Seite einer DSSC bedeckt. Die Idee dahinter ist herauszufinden, wie viel Energie eine DSSC bei nur direkter Sonneneinstrahlung erbringen kann. Erst einige Minuten später wird die zweite Seite der DSSC verdeckt, um einen Komplettausfall einer DSSC in einem String zu simulieren.

Die dazugehörige Auswertung wird im Diagramm 3.19 dargestellt.

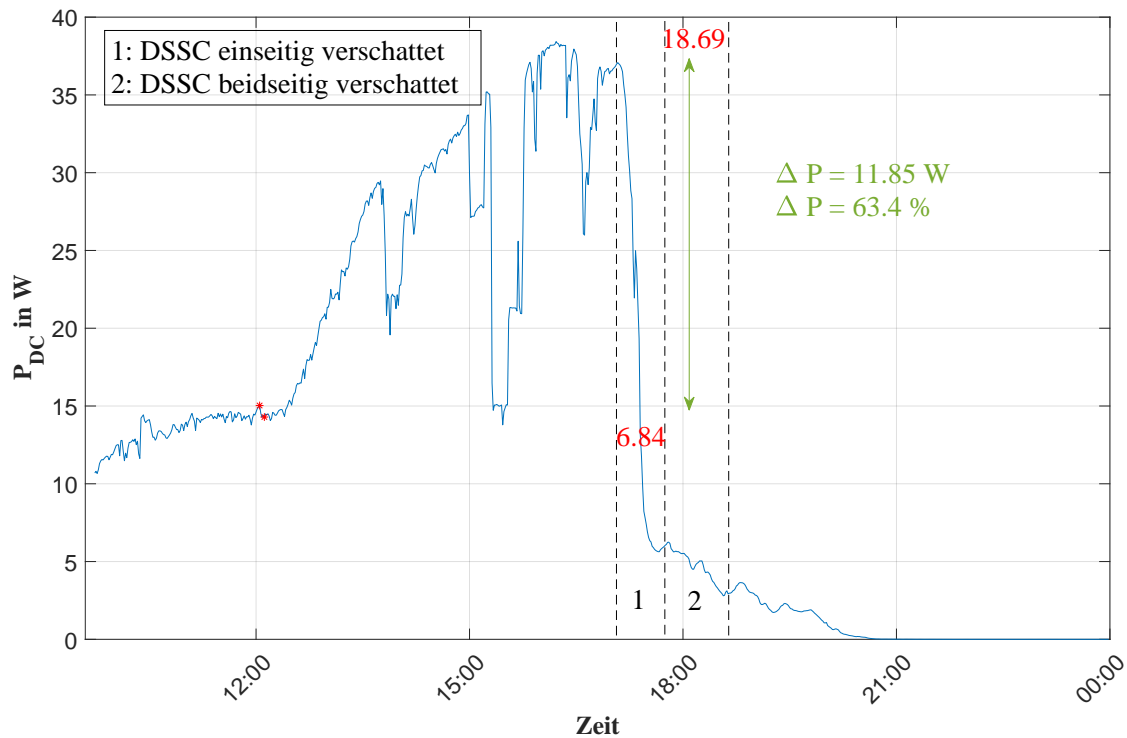


Abbildung 3.19: Diagramm des Versuchs der Simulation einer totalen Verschattung beziehungsweise einer defekten DSSC (beidseitige Verschattung)

Dabei fällt im Diagramm 3.19 auf, dass sich die Wirkleistung der DSSC nicht ändert, falls diese nur von einer Seite beschattet und die Vorderseite weiterhin mit Direktstrahlung beschienen wird (1). Erst wenn die Rückseite ebenfalls beschattet ist, fällt die Wirkleistung nach unten (2). Man kann über den Betrag, um die die Wirkleistung fällt, erkennen, wie viel Wirkleistung eine DSSC erzeugt bei gegebener Globalstrahlung.

Um diesen Effekt zu zeigen, werden mehrere DSSCs verschattet, um die Verschaltung und die Wirkleistungserzeugung einer DSSC zu verifizieren (siehe Abbildung 3.20).



Abbildung 3.20: Versuchsaufbau mit zwei vollkommen verschatteten DSSCs

Das Diagramm in Abbildung 3.21 zeigt wie viel Wirkleistung eine beziehungsweise zwei verschattete DSSCs erzeugen. Bei Ausfall einer DSSC sollte sich eine theoretische Wirkleistungsminderung von 33 % einstellen, da die zweite DSSC in Serie geschaltet ist und der intakte parallelgeschaltene Teil weiterhin Energie produziert.

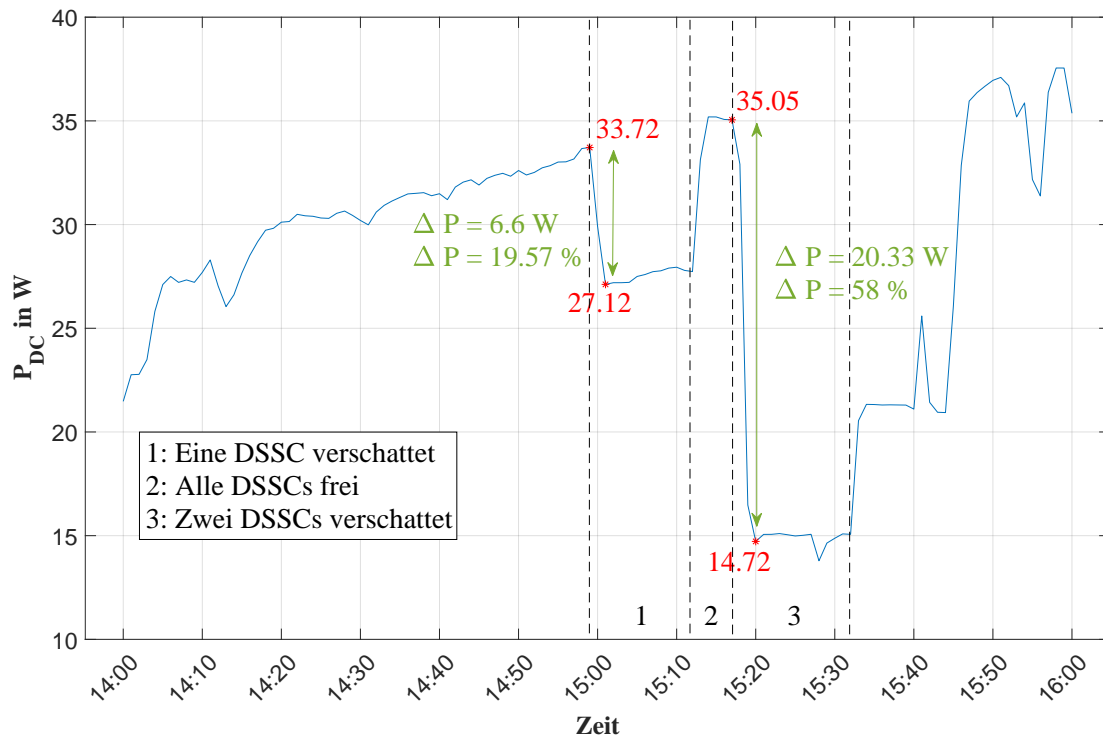


Abbildung 3.21: Diagramm des Versuchs mit zwei vollkommen verschatteten DSSCs

Vergleicht man die Abbildungen 3.19 (Bereich 2) und 3.21 (Bereich 1) so fällt auf, dass sich die Wirkleistungsminderungen, bei beidseitiger Verschattung einer DSSC, stark voneinander unterscheiden (63 % zu 20 %). Dieser Unterschied ist auf die Lage und den Aufbau der Demonstrationsanlage sowie auf den Messzeitpunkt zurückzuführen. Während die Messung des Diagramms 3.19 am Vormittag durchläuft, wird die Messung für das Diagramm 3.21 am Nachmittag durchgeführt. Aus diesem Vergleich kann man sagen, dass am Vormittag viele DSSCs verschattet sind und somit nur weniger Energie erzeugen (großes ΔP), als im Vergleich zur Messung am Nachmittag (kleines ΔP). Dies hat auch zur Folge, dass die Wirkleistungsänderung nicht exakt 33 % beträgt.

Dasselbe Verhalten ergibt sich auch, falls die DSSCs nur halb verschattet werden, wie der Versuchsaufbau in Abbildung 3.22 zeigt.



Abbildung 3.22: Abbildung des Versuchs zwei DSSCs halb zu beschatten

Aus diesen Versuchen kann man ableiten, dass die DSSCs gleichzeitig an der sonnenzugewandten und der sonnenabgewandten Seite Energie erzeugen können. Da die DSSCs in Serie geschaltet sind, fallen beide DSSCs aus, falls eine davon defekt oder komplett verschattet ist.

Des Weiteren wird auch eine Messung der Beleuchtungsstärke (Lux) vor und nach der DSSC durchgeführt, um die Absorptionsfähigkeit des Farbstoffes zu ermitteln. Diese Messung wird an einer roten und einer grünen DSSC durchgeführt um diese später vergleichen zu können (siehe Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Lux-Messung der verschiedenen DSSCs

Grüne DSSC			Rote DSSC		
vorne	hinten	Absorption	vorne	hinten	Absorption
$lx \cdot 1000$	$lx \cdot 1000$	%	$lx \cdot 1000$	$lx \cdot 1000$	%
81.3	18	77.86	84.00	16.80	80.00
81.7	19.5	76.13	84.10	13.10	84.42
82.2	20.3	75.30	84.30	13.30	84.22
82.6	20.6	75.06	84.10	12.40	85.26
80.9	22.2	72.56	84.30	12.30	85.41
82.5	21.1	74.42	84.20	12.80	84.80

Aus Tabelle 3.3 geht hervor, dass die rote DSSC mehr Licht absorbiert als die grüne. Der arithmetische Mittelwert dieser Werte ergibt sich aus der Formel (3.47) [20]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.47)$$

\bar{x} arithmetisches Mittel
 n Anzahl der Proben

In der Tabelle 3.4 ist die mittlere Absorptionsfähigkeit der verschiedenen Farbstoffe dargestellt.

Tabelle 3.4: Arithmetisches Mittel der Lux-Messung von verschiedenen DSSCs

Grüne DSSC			Rote DSSC		
vorn	hinten	Absorption	vorne	hinten	Absorption
$lx \cdot 1000$	$lx \cdot 1000$	%	$lx \cdot 1000$	$lx \cdot 1000$	%
81.87	20.28	75.22	84.17	13.45	84.02

Da die rote DSSC mehr Licht absorbiert als die grüne, kann man daraus schließen, dass die rote DSSC mehr Energie erzeugen kann als die grüne. Des Weiteren kann man die Aussage treffen, dass weniger Licht absorbiert und weniger Energie erzeugt werden kann, je geringer die Farbsättigung und je höher die Farbhelligkeit des Farbstoffes ist (siehe Kapitel 4.1.3).

Vergleicht man dies mit dem 3D-HSB-Farbmodell (Hue, Saturation und Brightness) in Abbildung 3.23 so erkennt man, dass jeder Farbton mit geringer Sättigung und hoher Helligkeit weniger Licht absorbieren kann.

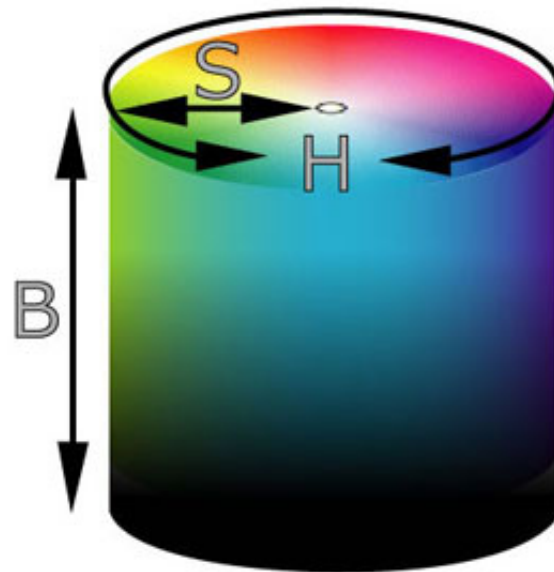


Abbildung 3.23: 3D-HSB Farbmodell: Jede Farbe lässt sich durch diese drei Zustände beschreiben (Farbe, Sättigung und Helligkeit) [26].

H	Hue (Farbton)
S	Saturation (Farbsättigung)
B	Brightness (Farbhelligkeit)

Daraus lässt sich schließen, dass nicht nur der Farbton eine wichtige Rolle bei der Umwandlung von Globalstrahlung in elektrische Energie spielt, sondern auch die Sättigung und Helligkeit des Farbtons. Somit könnte man auch grüne Farbstoffe herstellen, welche die gleiche Absorptionsfähigkeit erreichen wie die roten. Dies würde aber mit der Minderung der Lichtdurchlässigkeit einhergehen.

3.3.4 Datenverifikation

Da die elektrischen Größen durch zwei unterschiedliche Messsysteme (Dewetron und Enphase) aufgezeichnet werden, wird hier anhand eines Vergleichs die Plausibilität der Messwerte kontrolliert. Der Vergleich der relevanten Messwerte am Micro-Wechselrichter 6 (WR6) der DSSC-Anlage wird in Abbildung 3.24 dargestellt.

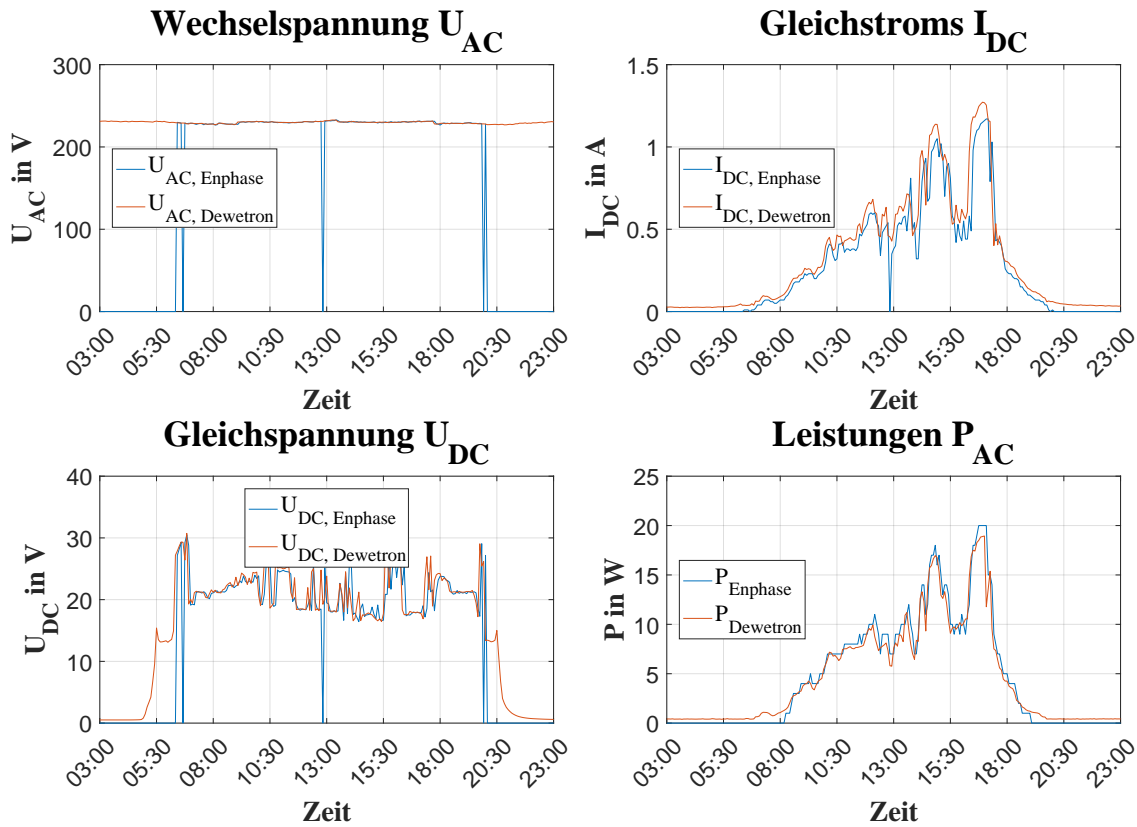


Abbildung 3.24: Vergleich der gemessenen Daten am Micro-Wechselrichter 6 (WR6)

Damit die DSSC-Anlage nicht in den Inselbetrieb übergehen kann, müssen, um die Synchronizität gewährleisten zu können, die Micro-Wechselrichter permanent elektrische Netz verbunden sein. Dies muss zum Beispiel auch in der Nacht sichergestellt sein, wenn von den DSSCs keine elektrische Energie erzeugt wird. Diese von den Micro-Wechselrichtern verbrauchte Energie ist in der Abbildung 3.24 (Vergleich der Leistung am WR6) am Anfang und Ende des Kurvenverlaufs ersichtlich. Eigentlich sollte diese Leistung aber negativ sein, da Energie verbraucht wird. Es handelt sich bei dieser Darstellung aber um RMS-Werte (Root Mean Square) und daraus ergibt sich das positive Vorzeichen der Leistung.

Die kleine Verschiebung der beiden Kurvenverläufe in allen Diagrammen entsteht nicht alleine durch die Darstellung der RMS-Werte, sondern auch dadurch, dass die Enphase-Daten in einem Fünfminuten - Intervall gemessen und gespeichert werden und der Datenlogger (Dewetron) jede Sekunde einen Messwert liefert. Diese Verschiebung erkennt

man auch in der Tabelle 3.5. Trotz dieser kleinen Verschiebung ist ersichtlich, dass sich die Kurvenverläufe gleich verhalten und somit die gemessenen Werte der beiden Messsysteme als plausibel angesehen werden können.

Tabelle 3.5: Tabelle zur Veranschaulichung der Abweichung zwischen den Messreihen der Datenlogger (Dewetron und Enpahse)

Bezeichnung	Messgröße	Zeit	Dewetron	Envoy	Abweichung
		HH:MM	WR6	WR6	%
Wechselspannung	U_{AC} in V	09:00	227.42	227.80	0.17
		12:00	230.74	230.80	0.03
		15:00	230.14	229.90	0.10
		18:00	228.51	226.60	0.84
Gleichspannung	U_{DC} in V	09:00	23.63	22.22	5.97
		12:00	18.42	18.42	0.00
		15:00	17.52	18.79	7.22
		18:00	24.22	23.78	1.82
Gleichstrom	I_{DC} in A	09:00	0.24	0.20	15.36
		12:00	0.65	0.60	8.24
		15:00	1.06	0.94	11.68
		18:00	0.30	0.24	21.03
Leistung	P in W	09:00	3.76	4.00	6.43
		12:00	9.40	10.00	6.42
		15:00	15.33	17.00	10.93
		18:00	4.26	5.00	17.48

Die Umrechnung der Globalstrahlungsdaten ist schwieriger zu verifizieren. In Bezug auf das eben Gesagte müssen hier Vergleichsmessungen, durch Drehung und Ausrichtung des Globalstrahlungs-pyranometers SPN1, für die unterschiedlichen Winkel der DSSCs durchgeführt werden. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die Vergleichsmessungen bei gleichen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Da sich die DSSC-Anlage im Freien befindet, wird die Bedingung "in etwa gleich schöner Tag" innerhalb einer Woche für die Messungen als ausreichend erachtet.

Abbildung 3.25 zeigt den Vergleich der Globalstrahlungsumrechnung mit den gemessenen Daten einer vertikal ausgerichteten DSSC.

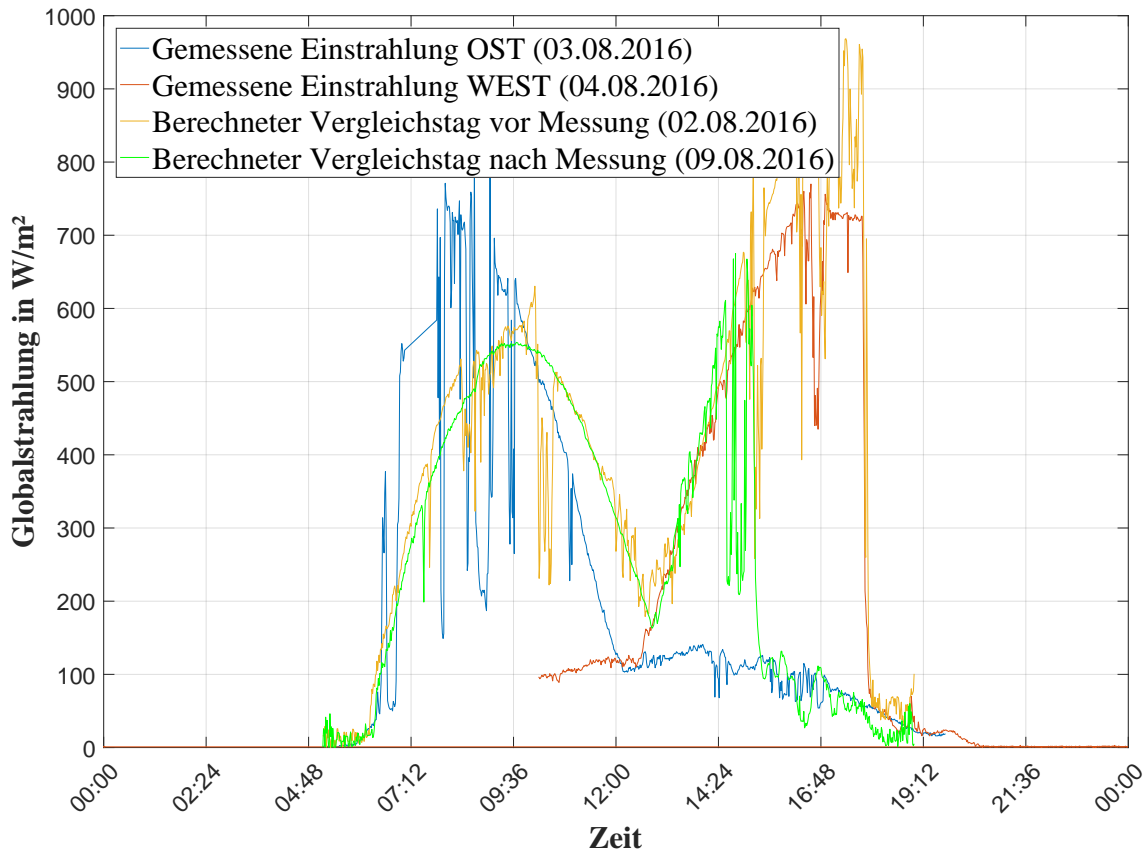


Abbildung 3.25: Vergleich der gemessenen und berechneten Globalstrahlungsdaten

Der Vergleich der gemessenen und umgerechneten Kurvenverläufe der Globalstrahlung zeigt sehr ähnliche Verläufe. Es ist zu erkennen, dass es beim Mittagsminimum eine zeitliche Verschiebung von circa 45 Minuten zwischen den gemessenen und berechneten Kurvenverläufen gibt. Ansonsten stimmen die Kurvenverläufe, außer dem Versatz zu Mittag, sehr gut überein. Der Versatz kann durch die Toleranz der Montage der DSSCs erklärt werden, das heißt nicht alle DSSCs stehen genau vertikal sondern können nach vor oder nach hinten geneigt sein.

Berücksichtigt man, dass eine DSSC lichtdurchlässig ist und somit gleichzeitig von beiden Seiten mit unterschiedlicher Strahlungsintensität beschienen wird, ergibt sich die Abbildung 3.26.

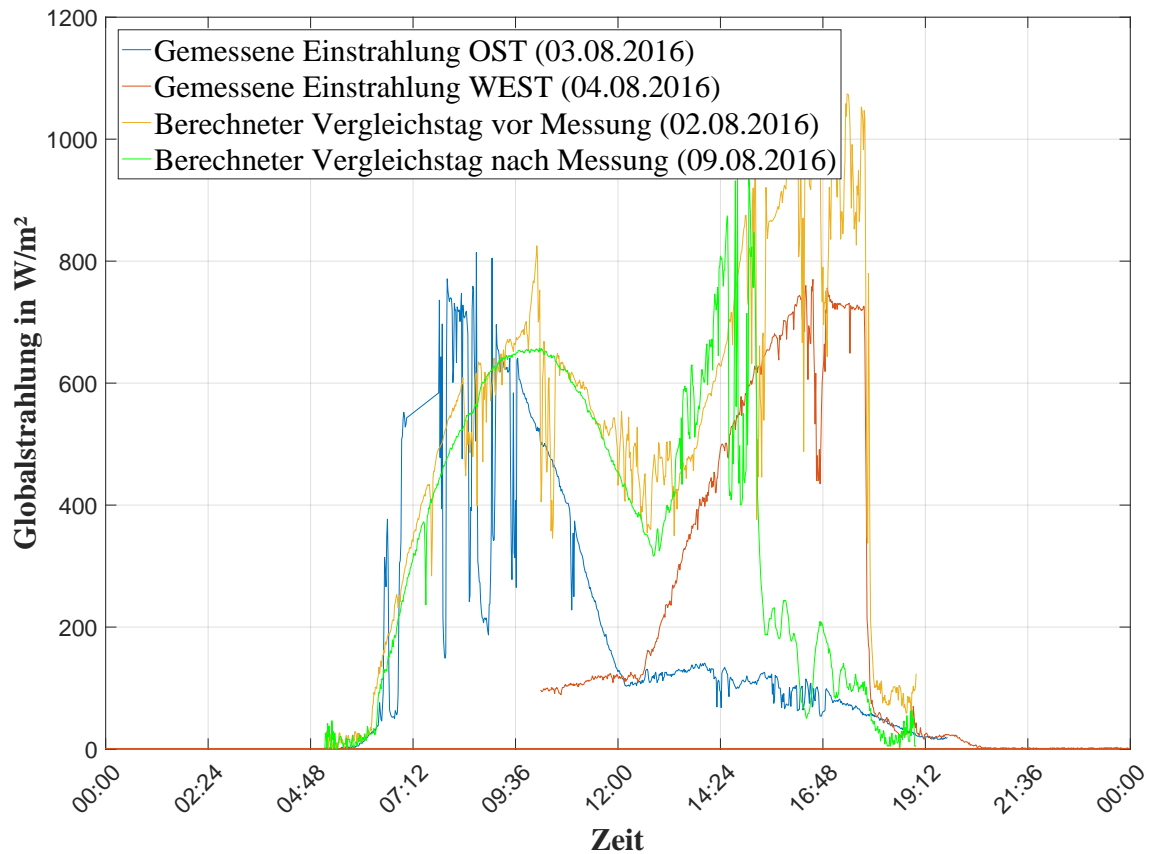


Abbildung 3.26: Vergleich der gemessenen und berechnete Globalstrahlungsdaten

Da der Globalstrahlungspyranometer SPN1 Strahlung aus nur einer Richtung messen kann, ergibt sich bei der Umrechnung eine etwas geänderte Kurvenform. Das heißt der SPN1 misst nicht die auf die Rückseite der DSSC auftretende Strahlung, sondern nur die Strahlung, welche auf der sonnenzugewandten Seite der DSSC auftrifft.

4 Datenauswertung und Analyse

Nach der Verifikation der elektrischen und nicht-elektrischen Messdaten aus Kapitel 3.3.4, werden diese ausgewertet und analysiert.

Das Resultat dieser Arbeit soll den Wirkungsgrad der DSSCs und Micro-Wechselrichter, in Abhängigkeit verschiedener Einflüsse und Modelle, zeigen.

4.1 Wirkungsgradbestimmung der DSSC

Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, werden aufgrund der stetigen Weiterentwicklung während der Testlaufzeit einige DSSCs ausgetauscht. Daher werden in den folgenden Abschnitten nur Level 0 DSSCs (DSSCs bei Testbeginn) behandelt. Es folgt erst nach diesen Untersuchungen der Vergleich zwischen Level 0 und Level 1 DSSCs (weiterentwickelte DSSCs).

Für die Wirkungsgradbestimmung einer DSSC müssen folgende elektrische und nicht-elektrische Größen bekannt sein:

- die Fläche einer DSSC (A_{DSSC})
- die Oberflächentemperatur einer DSSC (θ_{DSSC})
- die auf die Neigung eines DSSC-String umgerechnete Globalstrahlung ($E_{glob,DSSC}$)
- die erzeugte Gleichspannung (U_{DC}) eines DSSC-Strings
- der erzeugte Gleichstrom (I_{DC}) eines DSSC-Strings

Die Werte dieser Größen werden direkt aus den Messungen oder aus den davor durchgeführten Berechnungen entnommen und der Wirkungsgrad η kann nach der Gleichung (4.1) berechnet werden.

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \cdot 100 \% = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \cdot 100 \% \quad (4.1)$$

η	Wirkungsgrad in %
P_{ab}	abgegebene Wirkleistung in W
P_{zu}	zugeführte Wirkleistung in W

Die abgegebene Wirkleistung P_{ab} wird nach der Formel (4.2) berechnet, welche im Datenlogger (Dewetron) hinterlegt ist. Dabei ist zu bemerken, dass hier die abgegebene Wirkleistung P_{ab} gleich der erzeugten Wirkleistung P_{DC} ist.

$$P_{DC} = U_{DC} \cdot I_{DC} \quad (4.2)$$

P_{DC}	erzeugte Wirkleistung in W
U_{DC}	erzeugte Gleichspannung in V
I_{DC}	erzeugter Gleichstrom in A

Für die zugeführte Wirkleistung P_{zu} wird die gesamte Solarstrahlung herangezogen, wobei diese, wie im Kapitel 3.3.2 erläutert, auf die jeweilige Ausrichtung und Neigung der DSSC-Stings, wie in Gleichung (3.29) angeführt, umgerechnet werden.

$$E_{glob,DSSC} = E_{dir,h} \cdot \frac{\cos(\Theta_M)}{\cos(\Theta_Z)} + E_{diff,h} \cdot (1 + \cos(\gamma)) \quad (4.3)$$

$$+ E_{glob,h} \cdot (1 - \cos(\gamma)) \cdot \rho_B^*$$

$E_{glob,DSSC}$	Globalstrahlung der Sonne auf die DSSC
$E_{dir,h}$	Direktstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
Θ_M	Einfallswinkel zur Flächennormale auf das Modul
Θ_Z	Einfallswinkel zur Flächennormale auf die Erdoberfläche
$E_{diff,h}$	Diffusstrahlung der Sonne auf eine horizontale Fläche
γ	Neigungswinkel des Moduls
ρ_B^*	Albedo Faktor

Aus der Multiplikation der Globalstrahlung und der Fläche der DSSC ergibt sich die zugeführte Wirkleistung P_{zu} für eine DSSC.

$$P_{zu} = E_{glob,DSSC} \cdot A_{DSSC} \quad (4.4)$$

P_{zu}	zugeführte Wirkleistung
$E_{glob,DSSC}$	Globalstrahlung der Sonne auf die DSSC
A_{DSSC}	Fläche einer DSSC

Da aber die erzeugte Wirkleistung P_{DC} für einen DSSC-String gemessen wird, muss die Gleichung (4.4) mit der Anzahl der verschalteten DSSCs für diesen String multipliziert werden. Wie in Kapitel 3.1 erklärt, sind bei der Demonstrationsanlage sechs DSSCs zu einem String verschalten und daraus folgt die Gleichung (4.5) für die zugeführte Wirkleistung P_{zu} .

$$P_{zu} = E_{glob,DSSC} \cdot A_{DSSC} \cdot 6 \quad (4.5)$$

P_{zu}	zugeführte Wirkleistung
$E_{glob,DSSC}$	Globalstrahlung der Sonne auf die DSSC
A_{DSSC}	Fläche einer DSSC

Für die Auswertung und Analyse der DSSCs wird der Wirkungsgrad einer DSSC in Abhängigkeit verschiedener Einflüsse berechnet. Somit kommt man zu verschiedenen Erkenntnissen über die DSSC.

4.1.1 Diffus- und Direktstrahlung

Die DSSCs haben bei diffuser Strahlung, also an bewölkten Tagen, einen höheren Wirkungsgrad als bei klarem Wetter. Diese Tatsache liegt an der Fähigkeit der DSSCs unabhängig vom Einfallswinkel der Strahlung arbeiten zu können und an deren Lichtdurchlässigkeit. Denn wie schon erwähnt gelingt der DSSC eine beidseitige Energieernte. In der Abbildung 4.1 wird der Wirkungsgrad einer DSSC in Abhängigkeit der Globalstrahlung bei einer konstanten DSSC-Oberflächentemperatur dargestellt. Für eine bessere Bewertung der Abbildung 4.1 wird eine sogenannte Trendlinie verwendet.

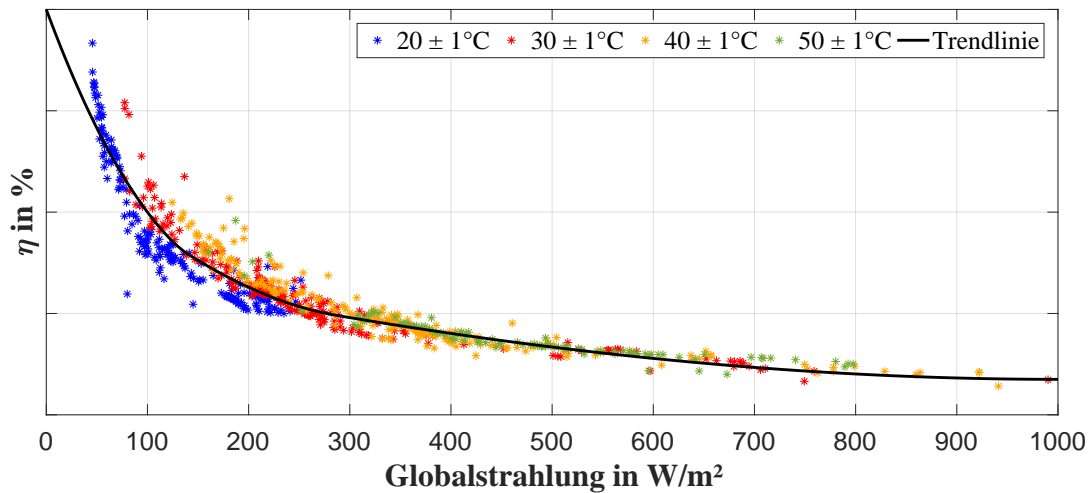


Abbildung 4.1: Wirkungsgrad der DSSCs in Abhängigkeit der Globalstrahlung

Die Trendlinie in Abbildung 4.1 zeigt, dass die DSSC bei geringerer Strahlung einen besseren Wirkungsgrad aufweist. Somit ist die DSSC eine PV-Zelle, welche bei schlechteren Wetter (bewölkt) und bei künstlichem Licht - diffuser Strahlung - besonders gut arbeitet. Die Tabelle 4.1 macht diese Tatsache noch deutlicher.

Tabelle 4.1: Durchschnittlicher Wirkungsgrad bei variabler Globalstrahlung und DSSC-Oberflächentemperatur

$E_{glob,DSSC}$	$\varnothing \eta_{20^\circ}$	$\varnothing \eta_{30^\circ}$	$\varnothing \eta_{40^\circ}$	$\varnothing \eta_{50^\circ}$
W/m^2	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0-200	1.00	0.99	0.78	0.76
900-1000	-	0.16	0.17	-

Die grüne Markierung in Tabelle 4.1 weist auf einen guten Wirkungsgrad hin, die rote auf einen schlechten. Diese Tabelle 4.1 bekräftigt die oben getätigte Aussage, dass die DSSCs bei diffusem Licht einen höheren Wirkungsgrad aufweisen.

4.1.2 Temperaturabhängigkeit

Nachfolgend wird die Temperaturabhängigkeit der DSSC dargestellt (siehe Abbildung 4.2). Dabei wird untersucht, wie sich der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur und bei konstanter Globalstrahlung einer DSSC verändert.

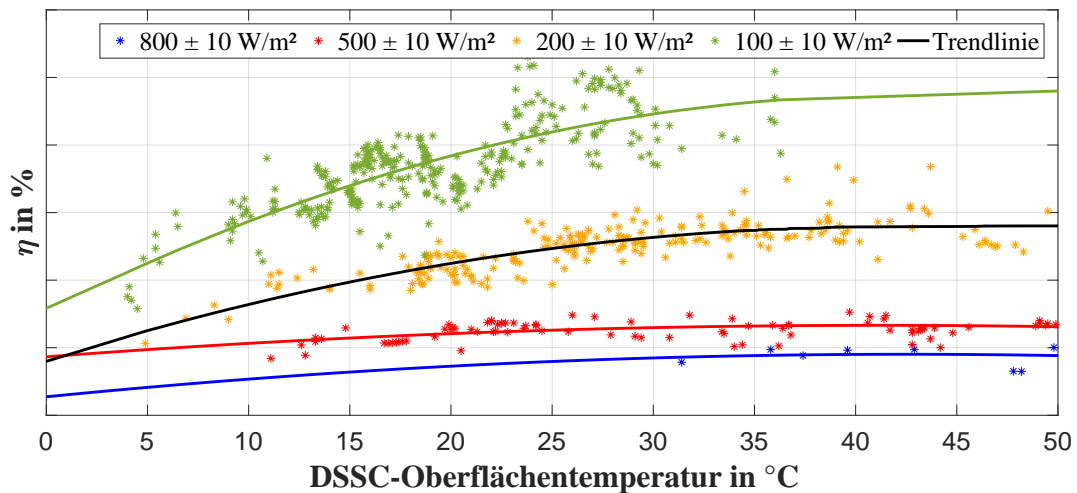


Abbildung 4.2: Wirkungsgrad der DSSC in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur

Aus Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad der DSSC mit Erhöhung der Oberflächentemperatur steigt, jedoch ab einer Oberflächentemperatur von 30 ° bis 40 ° nahezu konstant bleibt. Eine weitere Beurteilung über die Temperaturabhängigkeit einer DSSC ist mit der Tabelle 4.2 möglich. In der Tabelle 4.2 ist gut ersichtlich, dass die DSSC bei höherer Globalstrahlung einen nahezu konstanten Wirkungsgrad hat.

Tabelle 4.2: Durchschnittlicher Wirkungsgrad bei unterschiedlicher DSSC-Oberflächentemperatur und Globalstrahlung

ϑ_{DSSC}	$\varnothing \eta_{100} \text{ W/m}^2$	$\varnothing \eta_{200} \text{ W/m}^2$	$\varnothing \eta_{500} \text{ W/m}^2$	$\varnothing \eta_{800} \text{ W/m}^2$
$^{\circ} C$	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0-10	0.61	0.32		
10-20	0.81	0.49	0.26	
20-30	0.97	0.57	0.30	
30-40	1.00	0.64	0.29	0.21
40-50		0.64	0.30	0.19
50-60		0.64	0.32	0.22

Des Weiteren stützt die Tabelle 4.2 die in Kapitel 4.1.1 gewonnene Erkenntnis, dass die DSSC bei diffusem Licht einen bessere Wirkungsgrad aufweist, als bei Direktstrahlung. Außerdem geht aus der Tabelle 4.2 hervor, dass die DSSC bei einer Oberflächentemperaturbereich zwischen 20° und 40° den besseren Wirkungsgrad besitzt.

4.1.3 Effizienzunterschied verschiedener Farbstoffe

Da die DSSC-Anlage mit unterschiedlichen DSSCs hinsichtlich des Farbstoffes (rot, orange, grün, wie in Kapitel 2.2.3 erklärt) ausgestattet ist, werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Farbstoffe auf den Wirkungsgrad untersucht und in Abbildung 4.3 dargestellt.

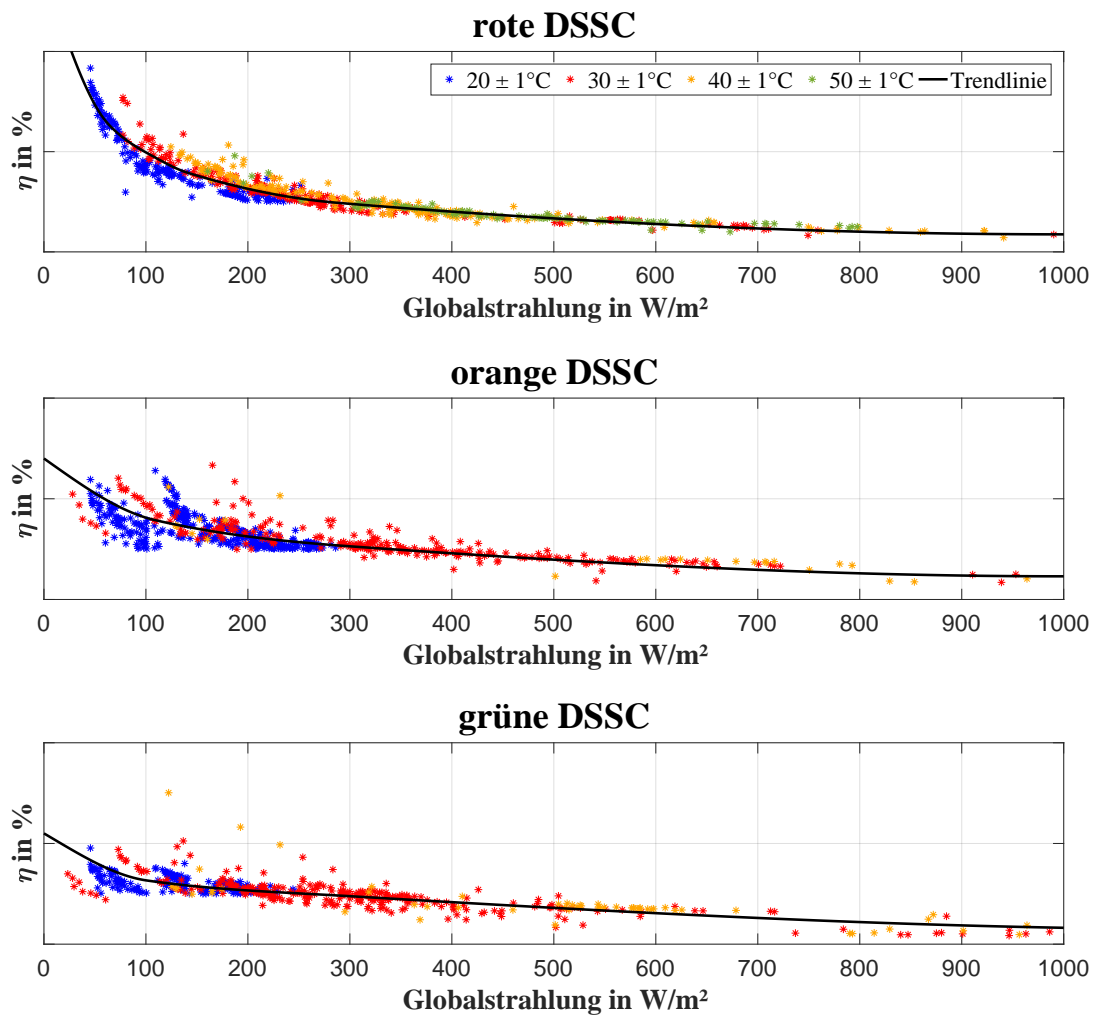


Abbildung 4.3: Wirkungsgrad der unterschiedlich gefärbten DSSCs

In Abbildung 4.3 erkennt man, dass der Wirkungsgrad anhand der verwendeten Farbstoffe variiert. Die DSSC mit dem roten Farbstoff ist am effizientesten, da dieser Farbstoff mehr Globalstrahlung absorbieren kann. Umgekehrt gilt, je weniger Licht absorbiert wird, desto weniger Energie kann geerntet werden. Daraus folgt, dass die am wenigsten effiziente DSSC jene mit dem grünen Farbstoff ist. Diese Erkenntnis spiegelt sich in Tabelle 4.3 wieder, in welcher der Wirkungsgrad der verschieden gefärbten DSSCs in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur und Globalstrahlung aufgelistet ist.

Tabelle 4.3: Durchschnittlicher Wirkungsgrad von DSSCs mit verschiedenen Farbstoffen (rot, orange, grün)

DSSC Art	E_{glob}	$\varnothing \eta_{20^\circ}$	$\varnothing \eta_{30^\circ}$	$\varnothing \eta_{40^\circ}$	$\varnothing \eta_{50^\circ}$
Farbstoff	W/m^2	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
rot	0-200	1.00	0.99	0.78	0.76
	200-300	0.50	0.52	0.56	0.64
	600-700	0.27	0.24	0.26	0.25
	700-800	0.19	0.19	0.21	0.25
	800-900	-	-	0.19	-
	900-1000	-	0.16	0.17	-
orange	0-200	0.73	0.79	0.75	-
	200-300	0.51	0.62	1.00	-
	600-700	0.15	0.34	0.38	-
	700-800	-	0.33	0.34	-
	800-900	-	-	0.17	-
	900-1000	-	0.22	0.20	-
grün	0-200	0.80	0.88	1.00	-
	200-300	0.60	0.71	0.91	-
	600-700	0.19	0.48	0.48	-
	700-800	-	0.32	0.15	-
	800-900	-	0.19	0.28	-
	900-1000	-	0.15	0.19	-

Aus der Tabelle 4.3 kann man, wie auch in Abbildung 4.3 dargestellt, erkennen, dass der Wirkungsgrad der DSSCs vom Farbstoff abhängig ist. Das wiederum bestätigt die in Kapitel 3.3.3 getätigte Behauptung, dass die rote DSSC mehr Energie erzeugen kann als die grüne.

4.1.4 Effizienzunterschied zwischen Level 0 und Level 1 DSSC

Um den Fortschritt der kontinuierlichen Verbesserungen von DSSCs aufzuzeigen, wird in diesem Abschnitt der Wirkungsgradunterschied und somit die Effizienzsteigerung zwischen zwei Entwicklungsstufen (Level 0 zu Level 1) dargestellt und analysiert.

In Abbildung 4.4 werden rote Level 0 und Level 1 DSSCs verglichen.

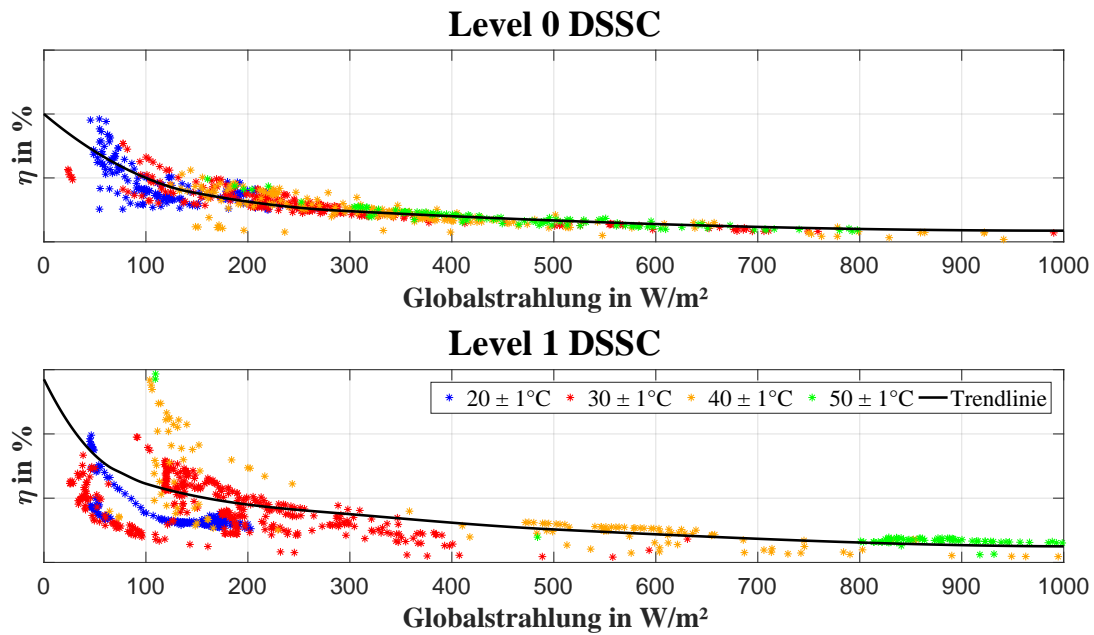


Abbildung 4.4: Vergleich der roten Level 0 DSSC mit der roten Level 1 DSSC

Folgt man dem Verlauf der Trendlinie in der Abbildung 4.4 und vergleicht man die beiden Trendlinien an beliebigen Stellen, so erkennt man, dass die Level 1 DSSC einen durch den ganzen Verlauf verfolgbareren besseren Wirkungsgrad aufweist als die Level 0 DSSC. Dieser Umstand ist auch in der Tabelle 4.4 ersichtlich.

Tabelle 4.4: Durchschnittlicher Wirkungsgrad der Level 0 und Level 1 DSSCs bei einer Oberflächentemperatur von 40 °C und unterschiedlicher Globalstrahlung

DSSC Art	E_{glob}	$\varnothing \eta_{40^\circ}$	$\varnothing \eta_{40^\circ}$	E_{glob}	DSSC Art
Level	W/m^2	p.u.	p.u.	W/m^2	Level
0	0-200	0.45	1.00	0-200	1
	200-300	0.40	0.73	200-300	
	300-400	0.27	0.51	300-400	
	400-500	0.21	0.36	400-500	
	500-600	0.17	0.32	500-600	
	600-700	0.18	0.26	600-700	
	700-800	0.09	0.12	700-800	
	800-900	0.08	0.18	800-900	
	900-1000	0.07	0.06	900-1000	

Aus den vorhergegangenen Erkenntnissen geht hervor, dass die DSSCs bei diffuser Strahlung und einer Oberflächentemperatur zwischen 20 °C bis 40 °C den größten Wirkungsgrad aufweisen. Daher wird in der Tabelle 4.4 nur der durchschnittliche Wirkungsgrad bei einer Oberflächentemperatur von 40 °C dargestellt.

Vergleicht man nun die Spalten in der Tabelle 4.4 der zwei verschiedenen DSSCs, so erkennt man den deutlichen höheren Wirkungsgrad der Level 1 DSSC gegenüber der Level 0.

4.2 Wirkungsgradbestimmung der Micro-Wechselrichter

Die Berechnung des Wirkungsgrades der Micro-Wechselrichter erfolgt über die gemessenen Daten des Datenloggers (Dewetron) und die Plausibilitätskontrolle der Daten des Datenloggers von Enphase. Dafür werden die Ströme und Spannungen vor (DC) und nach (AC) den Micro-Wechselrichtern gemessen.

Auch hier gilt die Gleichung (4.1) aus Kapitel 4.1. Dabei ist die zugeführte Wirkleistung P_{zu} gleich der erzeugten Wirkleistung P_{DC} der DSSC (siehe Gleichung (4.2)). Die abgegebene Wirkleistung P_{ab} ist ident der erzeugten Wirkleistung P_{AC} (siehe Gleichung (4.7)) des Micro-Wechselrichters. Somit ergibt sich die Formel (4.6):

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \cdot 100 \% = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \cdot 100 \% \quad (4.6)$$

η	Wirkungsgrad in %
P_{AC}	abgegebene Wirkleistung in W
P_{DC}	zugeführte Wirkleistung in W

Die abgegebene Wirkleistung P_{AC} wird, gleich wie die Wirkleistung der DSSC, bereits im Datenlogger (Dewetron) ermittelt. Die dafür benötigte Formel (4.7) ergibt sich aus

den Grundlagen der Elektrotechnik wie folgt:

$$P_{AC} = U_{AC} \cdot I_{AC} \cdot \cos(\varphi) \quad (4.7)$$

P_{AC}	abgegebene Wirkleistung in W
U_{AC}	erzeugte Wechselspannung in V
I_{AC}	erzeugter Wechselstrom in A
φ	Phasenverschiebung

Somit kann der Wirkungsgrad unter den verschiedenen Aspekten berechnet und dargestellt werden.

4.2.1 Diffus- und Direktstrahlung

Um den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Globalstrahlung darstellen zu können, wird die zugeführte Leistung P_{DC} als auch der Wirkungsgrad η mittels einer Indexierung der Globalstrahlung gefiltert und anschließend sortiert (vgl. Abbildung 4.5).

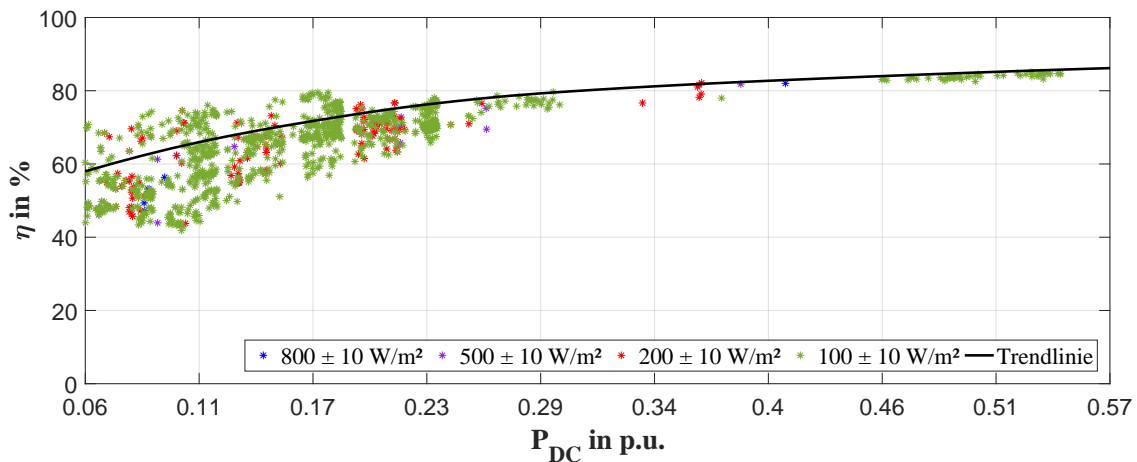


Abbildung 4.5: Wirkungsgrad eines Micro-Wechselrichters in Abhängigkeit der Globalstrahlung

Betrachtet man die Trendlinie, so wird ersichtlich, dass sich der Wirkungsgrad des Micro-Wechselrichters steigert, je mehr Wirkleistung zugeführt wird.

In der Tabelle 4.5 wird der durchschnittliche Wirkungsgrad bei unterschiedlich zugeführter Wirkleistung P_{DC} dargestellt, um die Abbildung 4.5 besser zu beschreiben.

Tabelle 4.5: Durchschnittlicher Wirkungsgrad eines Micro-Wechselrichters in Abhängigkeit der Globalstrahlung

P_{DC}	$\emptyset \eta_{100 \text{ W/m}^2}$	$\emptyset \eta_{200 \text{ W/m}^2}$	$\emptyset \eta_{500 \text{ W/m}^2}$	$\emptyset \eta_{800 \text{ W/m}^2}$
p.u.	%	%	%	%
0-0.14	55.66	69.05	79.00	73.63
0.14-0.29	75.62	78.93	72.34	80.64
0.29-0.43	77.88	80.79	78.05	76.54
0.43-0.57	83.42	82.21	84.95	84.73
0.57-0.71	-	83.37	86.57	-
0.71-0.86	-	85.69	86.65	-
0.86-1	86.89	86.94	-	87.03

Aus der Tabelle 4.5 geht hervor, dass, je höher die zugeführte Wirkleistung P_{DC} , umso besser der Wirkungsgrad der Micro-Wechselrichter. Dass der Wirkungsgrad der Micro-Wechselrichter nicht über 90 % steigt, liegt an der Tatsache, dass die DSSCs zu wenig elektrische Energie für die hier verwendeten Micro-Wechselrichter liefern. Dieses Verhalten ist typisch für diesen Micro-Wechselrichter, da sich die empfohlene Eingangsleistung (P_{DC}) laut Datenblatt [27] zwischen 210 W und 310 W befindet und hier nur circa zehn Prozent der Eingangsleistung (P_{DC}) von den DSSCs erzeugt werden.

4.2.2 Temperaturabhängigkeit

In der Abbildung 4.6 wird der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Micro-Wechselrichtertemperatur dargestellt. Diese Darstellung ist für die Bewertung des Micro-Wechselrichters wesentlich, da hier deutlich wird, wie sich der Micro-Wechselrichter anhand der von Enphase gemessenen Wechselrichtertemperatur verhält.

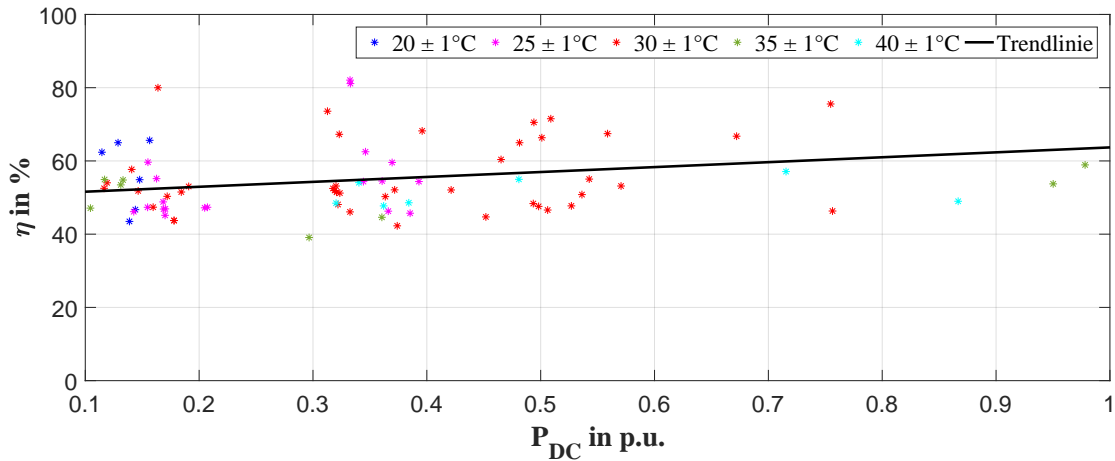


Abbildung 4.6: Wirkungsgrad eines Micro-Wechselrichters in Abhängigkeit der Micro-Wechselrichtertemperatur

In Abbildung 4.6 zeigen die Trendlinien eindeutig, dass der Micro-Wechselrichter bei höheren Temperaturen einen besseren Wirkungsgrad aufweist als bei niedrigeren. Die Tabelle 4.6 zeigt die Wirkungsgradmittelwerte der Abbildung 4.6.

Tabelle 4.6: Durchschnittlicher Wirkungsgrad eines Micro-Wechselrichters in Abhängigkeit der Micro-Wechselrichtertemperatur

P_{DC}	$\varnothing \eta_{20^\circ}$	$\varnothing \eta_{25^\circ}$	$\varnothing \eta_{30^\circ}$	$\varnothing \eta_{35^\circ}$	$\varnothing \eta_{40^\circ}$
p.u.	%	%	%	%	%
0.06-0.86	56.34	57.45	56.85	54.26	55.04

Dabei erkennt man, dass sich der Wirkungsgrad hinsichtlich der Temperatur konstant Verhält. Dies lässt sich auf die Verfügbarkeit von neuen Leistungshalbleitern aus Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) zurückführen. Zum Beispiel hat Siliziumcarbid eine große Bandlücke von $3,2 \text{ eV}$, was sich auch bei hohen Temperaturen in einer geringen Eigenleitungsichte niederschlägt. Dies hat den Vorteil, dass die Freilaufdioden in den Wechselrichtern, welche SiC verwenden, einen kleineren Kühlkörper benötigen und dem zu Folge auch verringerte Schaltverluste aufweisen. Ein weiterer Vorteil von SiC sind der geringe Durchlasswiderstand, die hohen möglichen Sperrspannungen und die hohen Schaltfrequenzen, was wiederum kleinere Drosselspulen ermöglichen [7].

4.2.3 Effizienzunterschied zwischen Level 0 und Level 1 DSSC

Auch beim Micro-Wechselrichter wird die effizientere Energieernte der Level 1 DSSC sichtbar (siehe Abbildung 4.7). In der Abbildung 4.7 wird ein Micro-Wechselrichter mit unterschiedlichen Entwicklungsstufen der DSSC verglichen.

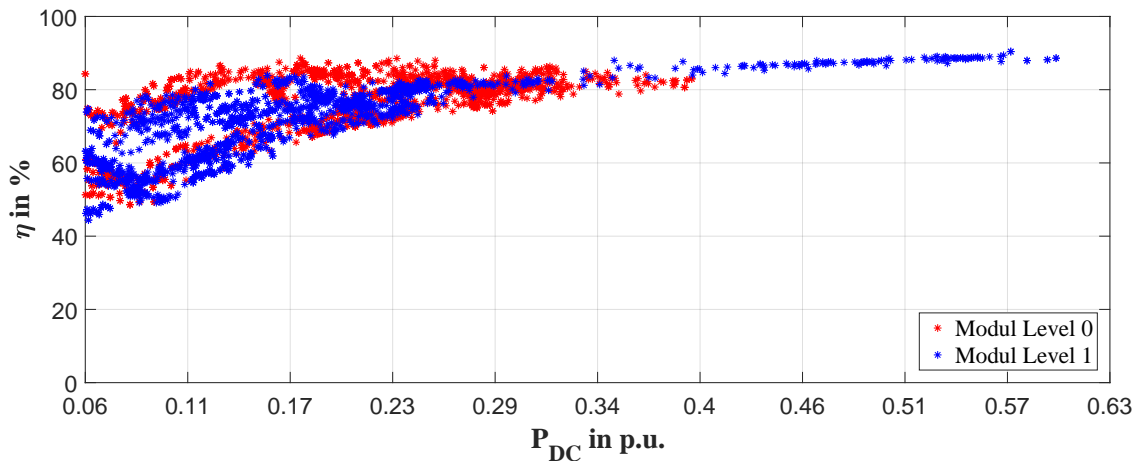


Abbildung 4.7: Vergleich des Wirkungsgrades eines Micro-Wechselrichters bei unterschiedlichem Entwicklungsgrad der DSSC (Level 0 / Level 1)

Dabei geht hervor, dass die Level 1 DSSC wesentlich mehr Leistung erzeugt als die Level 0 DSSC. Somit arbeitet auch der Micro-Wechselrichter mit einem besseren Wirkungsgrad, aber immer noch nicht im, laut Datenblatt [27] angegebenen optimalen Bereich. Der hier verbaute Micro-Wechselrichter (Enpahse M250) hat, laut Datenblatt [27], einen Wirkungsgrad von $\eta = 95,7\%$.

In Tabelle 4.7 wird der Wirkungsgradunterschied des Micro-Wechselrichters bei den verschiedenen DSSCs deutlicher dargestellt.

Tabelle 4.7: Vergleich des maximalen und minimalen Wirkungsgrades eines Micro-Wechselrichters bei unterschiedlichen Entwicklungsstufen der DSSC (Level 0 / Level 1)

DSSC - Art	η_{max}	η_{min}
Level	%	%
0	88.61	48.60
1	90.41	44.38

Um den Wirkungsgrad des Micro-Wechselrichters weiter steigern zu können, muss die zugeführte Wirkleistung P_{DC} erhöht werden. Wie das gelingen kann wird im Kapitel 5 näher erklärt.

5 Zusammenfassung

Der stetige Ausbau von erneuerbaren Energien stellt nicht nur Netzbetreiber vor neue Herausforderungen, sondern auch die Hersteller erneuerbarer Energiequellen. Während in Österreich zum Großteil Windkraftanlagen gebaut werden (2015 über 20 % mehr erzeugte Energie als im Jahr 2014 [28]), nimmt allmählich auch die Stromerzeugung durch Photovoltaik zu. 2015 wurden in Österreich 1424 mehr PV-Anlagen in Betrieb genommen als im Vergleich zu 2014 [28]. Die Abbildung 5.1 zeigt die Anzahl von PV-Anlagen in Österreich (Stand 07.2016) [28].

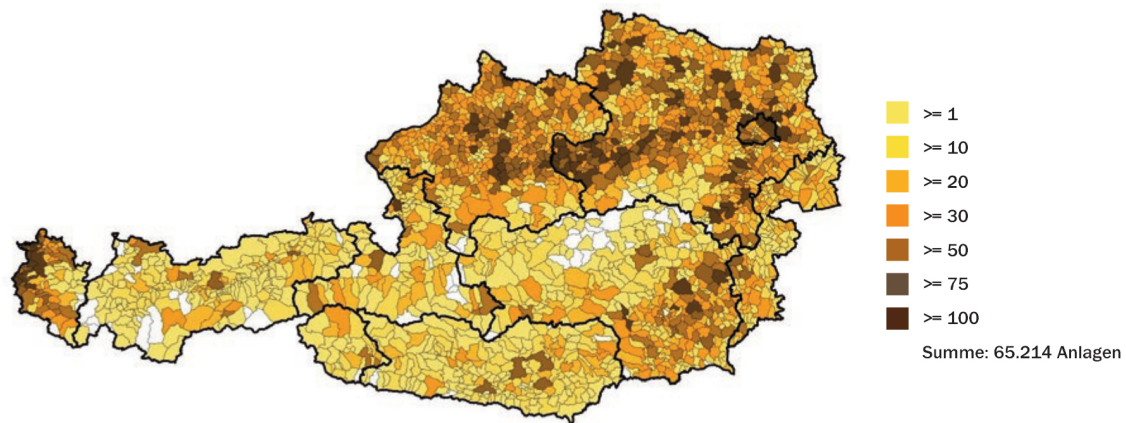


Abbildung 5.1: Regionale Verteilung nach Anzahl der Photovoltaikanlagen [28]

Die steigenden Wirkungsgrade von PV-Zellen machen diese Art von Energieernte zunehmend attraktiver und erschließen eine weitere Möglichkeit zur Energieerzeugung. Leider bieten die topographischen Gegebenheiten Österreichs nicht die idealsten Bedingungen dafür, da, wie Anfangs erwähnt, für die Erzeugung der notwendigen Energie große Flächen benötigt werden.

Darum wird an neuen Technologien beziehungsweise an der Weiterentwicklung existierender Technologien gearbeitet. In Zusammenarbeit mit den Firmen Energie Steiermark AG [4], SFL Technologies GmbH [3], g2e glass2energy SA [5] und der Technische Universität Graz [6] wird im Rahmen des "Smart City Graz" [2] Projekts der Stadt Graz an der DSSC (dye-sensitized solar cell) geforscht.

Die Auswertung der DSSCs und der verwendeten Micro-Wechselrichter basiert auf einer Langzeitmessung, bei der sowohl elektrische Größen wie Spannung und Strom, als auch

nicht-elektrische Größen wie Temperatur und Strahlung gemessen werden. Dabei kann der Großteil der gemessenen Daten für die Berechnung des Wirkungsgrades und somit für die Analyse direkt verwendet werden. Nur die Globalstrahlung muss, für die Berechnung des Wirkungsgrades, von einer horizontalen auf eine beliebig orientierte Fläche umgerechnet werden, wobei sich zeigt, dass dies die umfangreichste Aufgabe ist.

Die Analyse der DSSC zeigt einen besseren Wirkungsgrad bei niedrigen Temperaturen (siehe Tabelle 4.1) und diffuser Strahlung (siehe Tabelle 4.2). In den Abbildungen 5.2 und 5.3 wird gezeigt, wie viel Wirkleistung P_{DC} ein DSSC-String bei gegebener diffuser beziehungsweise direkter Einstrahlung erzeugt.

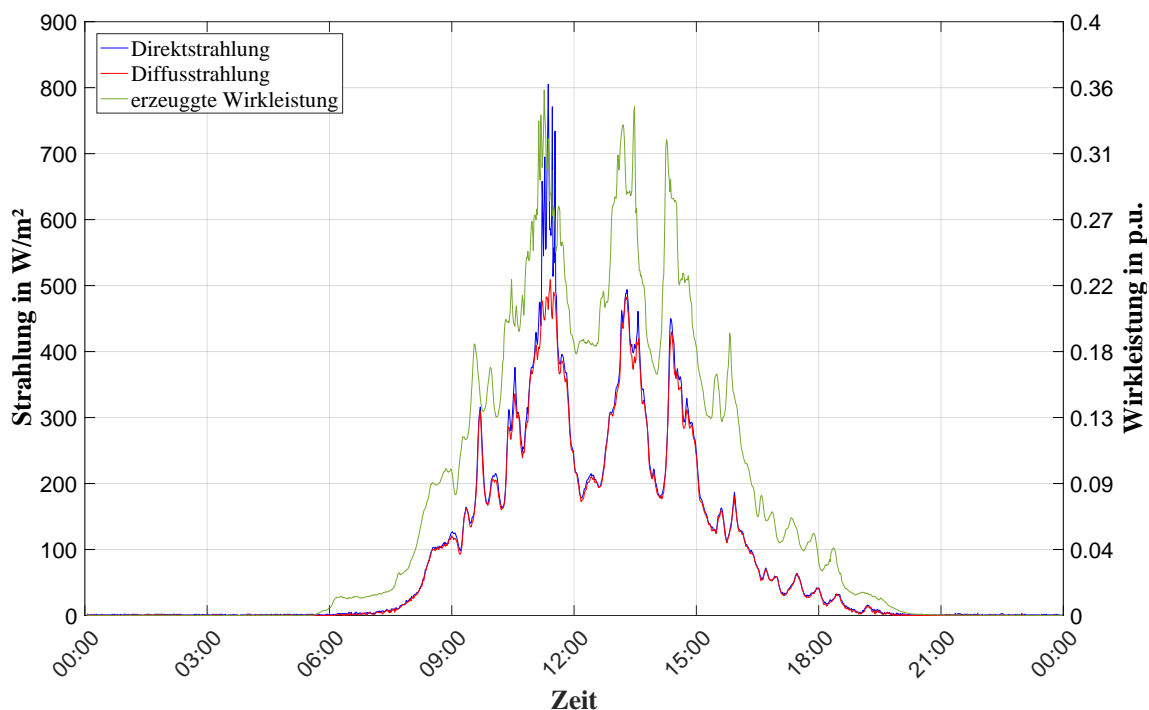


Abbildung 5.2: Vergleich der erzeugten Wirkleistung gegenüber der Einstrahlung an einem bewölkten Tag (diffuse Einstrahlung)

Der Verlauf der erzeugten Wirkleistung folgt jener der Diffusstrahlung. Vergleicht man die Abbildung 5.2 mit der Abbildung 5.3, so erkennt man gleich, dass die DSSC bei Direktstrahlung mehr Leistung erzeugt, weil mehr Leistung zugeführt wird. Immerhin erzeugt die DSSC bei Diffusstrahlung noch circa 50 % Wirkleistung gegenüber einer von Direktstrahlung beschienenen DSSC.

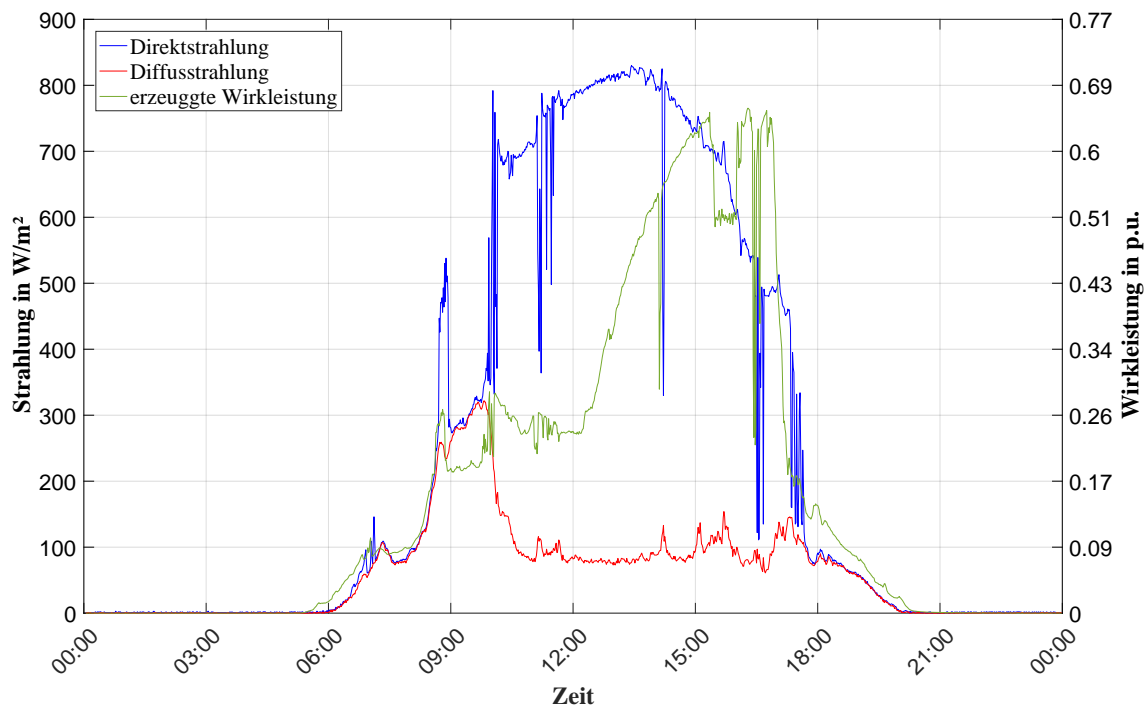


Abbildung 5.3: Vergleich der erzeugten Wirkleistung gegenüber der Einstrahlung an einen klaren Tag (direkte Einstrahlung)

Diese Tatsache lässt darauf schließen, dass die DSSC auch bei künstlichem Licht einen guten Wirkungsgrad aufweist und somit auch im Inneren von Gebäuden verwendet werden kann. Dies wiederum schafft neue effektiv nutzbare Flächen für DSSCs zur Energiegewinnung.

Auch der Vergleich von unterschiedlichen Farbstoffen zeigt deutlich, dass, je mehr Licht absorbiert wird, umso mehr elektrische Energie erzeugt werden kann (siehe Abbildung 4.3), ohne dabei die Lichtdurchlässigkeit zu verlieren.

Da die verwendeten DSSCs allesamt Prototypen sind, kann noch keine Aussage über die Langzeitstabilität gemacht werden. Die stetige Weiterentwicklung von DSSCs während der Langzeitmessung ergibt eine Wirkungsgradverbesserung von circa 60 % zwischen Level 0 (DSSCs bei Testbeginn) und Level 1 DSSCs (weiterentwickelte DSSCs, siehe Abbildung 4.4).

Da die Micro-Wechselrichter (Enphase M250) für diese Demonstrationsanlage zu groß dimensioniert sind, erreichen diese nicht den angegebenen Wirkungsgrad laut Datenblatt des Herstellers [27] ($\eta = 95,7\%$). Aber man erkennt in den Abbildungen 4.5 und 4.7, dass der Wirkungsgrad steigt je mehr Leistung zugeführt wird.

Des Weiteren zeigen die Trendlinien in Abbildung 4.6 einen höheren Wirkungsgrad bei höheren Temperaturen des Micro-Wechselrichters.

Damit die Micro-Wechselrichter im optimalen Betriebsbereich arbeiten können, müssen

die DSSCs mehr Energie erzeugen beziehungsweise muss man den Micro-Wechselrichtern mehr Leistung zuführen. Dies kann durch Parallelschalten zweier Strings in Verbindung mit Akkumulatoren und dazugehörigen Ladereglern und der ausgangseitigen Serienschaltung der Laderegler realisiert werden (siehe Abbildung 5.4).

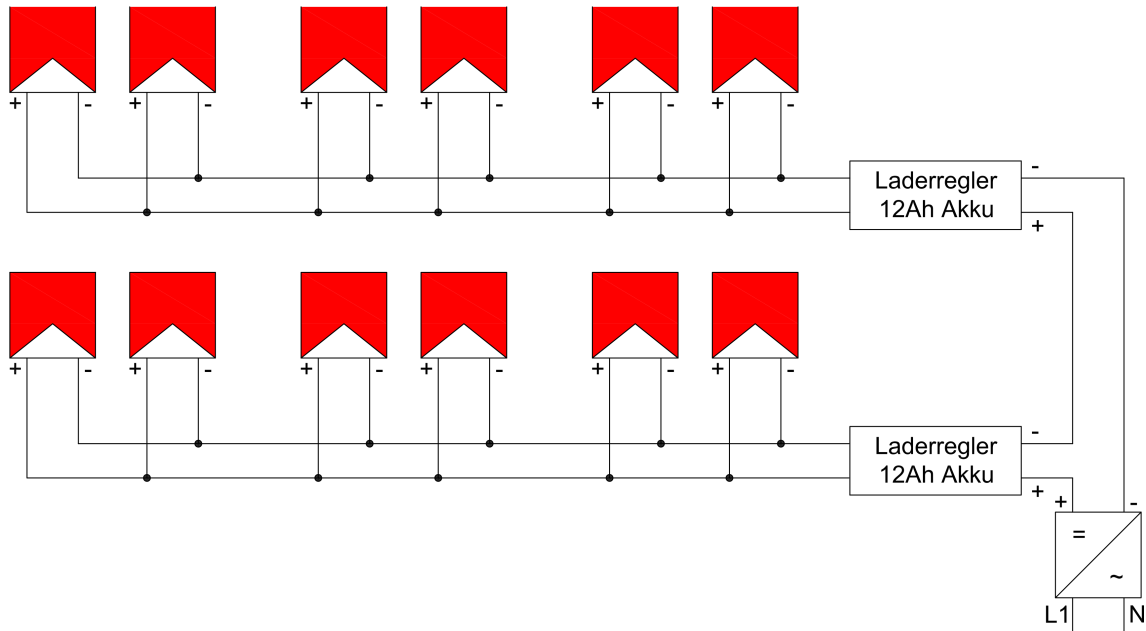


Abbildung 5.4: Eine Möglichkeit der Verschaltung von DSSCs, damit der Micro-Wechselrichter im optimalen Betriebsbereich arbeitet

Bei dieser Verschaltung ist es nun möglich den Micro-Wechselrichter in den optimalen Betriebsbereich zu bringen und somit den Wirkungsgrad zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Kommission, „*Klima- und Energiepaket 2030*“, http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_de.htm, zuletzt gesehen am 26. Okt. 2016.
- [2] Stadtbaudirektion Graz, „*Smart City Graz*“, <http://www.smartcitygraz.at/>, zuletzt gesehen am 07. Dez. 2016.
- [3] SFL Technologies GmbH, „*Aktuelles*“, <http://www.sfl-technologies.com/unternehmen/aktuelles/>, zuletzt gesehen am 29. Nov. 2016.
- [4] Energie Steiermark AG, „*Facebook: Energie Steiermark*“, <https://goo.gl/mqbXyi>, zuletzt gesehen am 10. Okt. 2016.
- [5] glass 2 energy, „*Geneva Airport*“, <http://www.g2e.ch/references/geneva-airport>, zuletzt gesehen am 26. Sept. 2016.
- [6] Technische Universität Graz, „*Institut für Elektrische Anlagen*“, <http://www.ifea.tugraz.at/>, zuletzt gesehen am 29. Nov. 2016.
- [7] K. Mertens, „*Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen Technologie und Praxis*“, Carl Hanser Verlag, München, 2015, 3. Auflage.
- [8] N. Webb, „*SPN1 Technical Fact Sheet*“, Datenblatt, 2014, Version 2.
- [9] AT Delta-T Devices Ltd, „*Temperature Sensors*“, Datenblatt, 2014, Version 1.2d.
- [10] U. Acker, „*Grätzelzelle*“, <http://www.photovoltaik.org/wissen/graetzelzelle>, zuletzt gesehen am 26. Sept. 2016.
- [11] V. Wesselak und S. Voswinkel, „*Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, 1. Auflage.
- [12] J. Gabriel, „*Animierte Funktionsweise der Grätzel-Zelle*“, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Funktionsweise_Graetzelzelle.gif, zuletzt gesehen am 11. Nov. 2016.
- [13] B. Macht, „*Degradationsprozesse in Ru(bpca)₂(NCS)₂-sensibilisierten Farbstoffsolarmzellen auf Titandioxidbasis*“, Dissertation, 2002.
- [14] Solaronix SA, „*Solar Cells*“, <https://www.solaronix.com/solarcells/>, zuletzt gesehen am 26. Sept. 2016.

- [15] N. Seeger, „*Breath Austria*“, <http://breatheaustria.at/sund-disk-gratzel-cell/>, zuletzt gesehen am 26. Sept. 2016.
- [16] H. Höllwart, „*Weltpremiere - Grätzelzelle am Genfer Flughafen*“, <http://www.fibag.at/>, zuletzt gesehen am 26. Sept. 2016.
- [17] J. Arp und F. Schmidt, „*Leistungs- und Ertragsmessung von Solarmodulen und Modultests*“, Bericht, 2009.
- [18] Enphase Energy Inc., „*Enphase*“, <https://enphase.com/de-de>, zuletzt gesehen am 10. Okt. 2016.
- [19] T. Mühl, „*Einführung in die elektrische Messtechnik*“, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, 4. Auflage.
- [20] L. Papula, „*Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler - Band 3*“, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008, 5. Auflage.
- [21] R. Jeutter, „*DEWE-Modules*“, Technisches handbuch, 2010.
- [22] Fluke, „*Gebrauchsanweisung i5s AC Current Clamp*“, Gebrauchsanweisung, 2005.
- [23] Chauvin Arnoux, „*AC/DC current clamps*“, Datenblatt, 2010.
- [24] AT Delta-T Devices Ltd, „*GP2 Data Logger Controller - User Manual*“, Technisches handbuch, 2014.
- [25] H. Drück, „*Solarthermie I*“, Vorlesungsskriptum, 2012.
- [26] Win-Seminar Schulungen, „*HSB-Farbmodell*“, <http://www.win-seminar.de/adobe/hsb-farbmodell.php>, zuletzt gesehen am 29. Dez. 2016.
- [27] Enphase Energy Inc., „*Enphase Mikrowechselrichter Enphase M250*“, Datenblatt, 2015.
- [28] A. Eigenbauer und W. Urbantschitsch, „*Ökostrombericht 2016*“, Bericht, 2016.
- [29] H. Wagemann und H. Eschrich, „*Photovoltaik - Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben*“, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010, 2. Auflage.
- [30] A. Wagner, „*Photovoltaik Engineering - Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015, 4. Auflage.
- [31] M. Bartelmann, B. Feuerbacher, T. Krüger, D. Lüst, A. Rebhan, und A. Wipf, „*Theoretische Physik*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015, 1. Auflage.

A Anhang

```
1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  import urllib, http.cookiejar, re, datetime, ssl
4
5  url1 = "https://enlighten.enphaseenergy.com"
6  url2 = "https://enlighten.enphaseenergy.com/login/login"
7  url3 = "https://enlighten.enphaseenergy.com/systems/871896/generate_rpt.csv"
8  url4 =
9      "https://enlighten.enphaseenergy.com/systems/871896/inverters/{}/generate_report.csv"
10
11 auth_token = None
12 curr_datetime = datetime.datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
13
14 gcontext = ssl.SSLContext(ssl.PROTOCOL_TLSv1)
15
16 handlers = [
17     urllib.request.HTTPHandler(),
18     urllib.request.HTTPSHandler(debuglevel=0, check_hostname=False),
19     urllib.request.HTTPCookieProcessor(http.cookiejar.CookieJar())
20 ]
21 opener = urllib.request.build_opener(*handlers)
22
23 # Authentifizierungstoken auslesen
24 def get_auth_token():
25     global auth_token
26
27     httpReq = urllib.request.Request("https://enlighten.enphaseenergy.com")
28     page = opener.open(httpReq)
29
30     reg = re.compile(b'<input name="authenticity_token" type="hidden"
31     value="([^\"]*)" />')
32     res = page.read()
33     matches = reg.search(res)
34     if matches:
35         auth_token = matches.group(1)
36         print("Auth token: <{}>".format(auth_token))
37     else:
38         print("No auth token!")
39
40 # Automatischer Log-In
41 def sign_in():
42     global auth_token
43
44     data = urllib.parse.urlencode({
45         "authenticity_token": auth_token,
46         "commit": "Sign In",
47         "user[email]": "BN",
48         "user[password]": "PW",
49         "utf8": ""
50     })
51
52     httpReq = urllib.request.Request(
53         "https://enlighten.enphaseenergy.com/login/login",
54         data=bytes(data, "utf-8"),
55         method="POST"
56     )
57     page = opener.open(httpReq)
58
59 # Doanload Stromerzeugung der gesamten Anlage
60 def dwn_site_recent_power_production():
61     global auth_token
62
63     data = urllib.parse.urlencode({
64         "action": "generate_rpt",
65         "authenticity_token": auth_token,
```

Abbildung A.1: Skript für das automatische herunterladen der Enphase-Daten Teil 1

```

64         "commit": "Submit",
65         "controller": "site",
66         "id": "871896",
67         "osv": "1",
68         "report[title]": "Site Recent Power Production",
69         "report[type]": 2,
70         "utf8": "√"
71     })
72     httpReq = urllib.request.Request(
73         "https://enlighten.enphaseenergy.com/systems/871896/generate_rpt.csv",
74         data=bytes(data, "utf-8"),
75         method="GET"
76     )
77     page = opener.open(httpReq)
78
79     with open("{}_report_site_recent_power_production.csv".format(curr_datetime),
80             'wb+') as f:
81         f.write(page.read())
82         print("File: Site Recent Power Production written ...")
83
84     # Doanload Stromerzeugung der einzelnen Wechselrichter
85     def dwn_microinverters():
86         global auth_token
87
88         microinverters = (
89             '19454134',
90             '19454136',
91             '19454138',
92             '19454140',
93             '19454142',
94             '19454376'
95         )
96
97         for idx in microinverters:
98             url =
99                 "https://enlighten.enphaseenergy.com/systems/871896/inverters/{}/generate_repo
100                 rt.csv".format(idx)
101
102             data = urllib.parse.urlencode({
103                 "action": "generate_rpt",
104                 "authenticity_token": auth_token,
105                 "commit": "Submit",
106                 "controller": "inverters",
107                 "id": idx,
108                 "osv": "1",
109                 "report[title]": "Microinverter Recent Power Production",
110                 "report[type]": 2,
111                 "system_id": "871896",
112                 "utf8": "√",
113                 "osv": "1"
114             })
115
116             httpReq = urllib.request.Request(url, data=bytes(data, "utf-8"), method="GET")
117             page = opener.open(httpReq)
118
119             with open("{}_report_microinverter_{}.csv".format(curr_datetime, idx),
120                     'wb+') as f:
121                 f.write(page.read())
122                 print("File: Microinverter <{}> Recent Power Production written
123                       ...".format(idx))
124
125     if __name__ == "__main__":
126         get_auth_token()
127         sign_in()
128
129         if auth_token:
130             dwn_site_recent_power_production()
131             dwn_microinverters()

```

Abbildung A.2: Skript für das automatische herunterladen der Enphase-Daten Teil 2

Tabelle A.1: Durchschnittlicher Wirkungsgrad von DSSCs mit verschiedenen Farbstoffen

DSSC Art	E_{glob}	$\varnothing \eta_{20^\circ}$	$\varnothing \eta_{30^\circ}$	$\varnothing \eta_{40^\circ}$	$\varnothing \eta_{50^\circ}$
Farbstoff	W/m^2	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
rot	0-200	1.00	0.99	0.78	0.76
	200-300	0.50	0.52	0.56	0.64
	300-400	0.35	0.39	0.40	0.42
	400-500	0.29	0.31	0.33	0.34
	500-600	0.28	0.29	0.30	0.29
	600-700	0.27	0.24	0.26	0.25
	700-800	0.19	0.19	0.21	0.25
	800-900	-	-	0.19	-
	900-1000	-	0.16	0.17	-
orange	0-200	0.73	0.79	0.75	-
	200-300	0.51	0.62	1.00	-
	300-400	0.38	0.51	-	-
	400-500	0.24	0.43	-	-
	500-600	-	0.36	0.33	-
	600-700	0.15	0.34	0.38	-
	700-800	-	0.33	0.34	-
	800-900	-	-	0.17	-
	900-1000	-	0.22	0.20	-
grün	0-200	0.80	0.88	1.00	-
	200-300	0.60	0.71	0.91	-
	300-400	0.45	0.63	0.58	-
	400-500	0.29	0.51	0.55	-
	500-600	-	0.44	0.50	-
	600-700	0.19	0.48	0.48	-
	700-800	-	0.32	0.15	-
	800-900	-	0.19	0.28	-
	900-1000	-	0.15	0.19	-

Tabelle A.2: Durchschnittlicher Wirkungsgrad bei variabler Globalstrahlung und DSSC-Oberflächentemperatur

$E_{glob,DSSC}$	$\varnothing \eta_{20^\circ}$	$\varnothing \eta_{30^\circ}$	$\varnothing \eta_{40^\circ}$	$\varnothing \eta_{50^\circ}$
W/m^2	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0-200	1.00	0.99	0.78	0.76
200-300	0.50	0.52	0.56	0.64
300-400	0.35	0.39	0.40	0.42
400-500	0.29	0.31	0.33	0.34
500-600	0.28	0.29	0.30	0.29
600-700	0.27	0.24	0.26	0.25
700-800	0.19	0.19	0.21	0.25
800-900	-	-	0.19	-
900-1000	-	0.16	0.17	-

Tabelle A.3: Durchschnittlicher Wirkungsgrad der Level 0 und Level 1 DSSCs bei unterschiedlicher Oberflächentemperatur und Globalstrahlung

DSSC Art	E_{glob}	$\varnothing \eta_{20^\circ}$	$\varnothing \eta_{30^\circ}$	$\varnothing \eta_{40^\circ}$	$\varnothing \eta_{50^\circ}$
Level	W/m^2	p.u.	p.u.	p.u.	p.u.
0	0-200	1.00	0.96	0.74	0.96
	200-300	0.64	0.63	0.67	0.83
	300-400	-	0.44	0.46	0.51
	400-500	-	0.32	0.36	0.37
	500-600	-	0.29	0.28	0.31
	600-700	-	0.21	0.30	0.25
	700-800	-	0.18	0.15	0.20
	800-900	-	-	0.13	-
	900-1000	-	0.15	0.12	-
1	0-200	0.27	0.34	0.52	1.00
	200-300	0.18	0.23	0.38	-
	300-400	-	0.15	0.27	-
	400-500	-	0.05	0.19	0.13
	500-600	-	0.05	0.17	-
	600-700	-	0.12	0.13	-
	700-800	-	-	0.06	-
	800-900	-	-	0.10	0.12
	900-1000	-	-	0.03	0.10