



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Korrelation zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Stromumwandlungseffizienz von Dünnschichtphotovoltaik

Verfasserin

Maryam Nikbakhti

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, Dezember 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 411

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Diplomstudium Physik UniStG

Betreuer:

Ass.-Prof. Dr. Viktor Schlosser

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht die verschiedenen Einflüsse des Wetters, insbesondere der relativen Luftfeuchtigkeit auf das auf der Erdoberfläche ankommende Sonnenspektrum. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Sonnenspektren auf die Stromumwandlungseffizienz von Photovoltaik-Modulen zu 3 unterschiedlichen Fertigungstechnologien werden untersucht.

Die gängigen Photovoltaikmodultechnologien werden vor allem aufgrund der verwendeten Halbleiter unterschieden. Der Ertrag einzelner Module ändert sich dabei je nach Halbleitertyp mit den Einstrahlungsverhältnissen auf der Erdoberfläche.

Im Rahmen des nationalen Projektes PV-SPEC wurden verschiedene Modultypen (Mono, CdTe und a-Si) hinsichtlich ihres Verhaltens bezüglich spektraler Änderungen des einfallenden Sonnenlichtes und klimatischer bzw. meteorologischer Parameter untersucht. Schlussfolgerungen über die Umwandlungseffizienz der Module konnten getroffen werden. Dazu wurden Module jeder Type mit 35° Neigungswinkel zu der horizontalen nach Osten, Süden und Westen an einem Flachlandstandort (170 m über Meer) über einen Zeitraum von $2 \frac{1}{2}$ Jahren untersucht.

Der Schwerpunkt der präsentierten Arbeit ist der Einfluss der relativen Feuchtigkeit der Luft sowie globale Einstrahlung - E - und spektral aufgelöste Einstrahlung $E(\lambda)$ auf die elektrischen Parameter der Module. Eine Veränderung der Wetter, oder feuchtebedingten spektralen Anteile der auf ein Modul treffenden Einstrahlung hin zum Roten (IR) oder Blauen (UV) Spektralbereich bedingt eine unmittelbare Änderung der Strom-Umwandlungseffizienz κ_{ISC} : über die spektrale Empfindlichkeit (SR) beeinflusst eine solche Änderung den im Modul aus dem Licht generierbaren Strom.

Es wurden die Einflüsse der relativen Feuchtigkeit auf Bodenniveau in diesem Zeitraum mit jenen der relativen Feuchtigkeit des atmosphärischen Höhenprofils verglichen. Durch eine Simulation wurden die theoretischen Werte der Feuchteabhängigkeit mit den gemessenen Werten verglichen. Die Analyse aller Parameter gibt ein Maß für die Abhängigkeit der system- und klimarelevanten elektrischen Messgrößen von der relativen Feuchtigkeit der Luft.

Für diese Arbeit wurden eine kristalline Modultechnologie (ein monokristallines Siliziummodul) und Dünnschichtmodule (ein amorphes Siliziummodul, und ein Kadmiumtellurid-Modul, CdTe) untersucht.

Anwendung können die Ergebnisse dieser Arbeit in Planungsbüros für Photovoltaikanlagen finden, da sich gewisse Modultypen für einzelne Wetterbedingungen und bei einem bestimmten Maß der relativen Luftfeuchtigkeit besser eignen als andere.

Abstract

This thesis investigates different influences of the weather, primarily relative air-humidity on the on the earth's surface incoming solar spectrum. The impact of different solar spectra on the current conversion efficiency of 3 popular module technologies was investigated.

The common different PV module technologies are distinguished primarily by the semiconductors used. The outcome of individual modules varies, depending on the type of semiconductor with the radiation conditions on the Earth's surface.

As a part of the national project PV-SPEC, different types of modules (mono, CdTe and a-Si) were with respect to their spectral behavior with respect to the changes in the incident sunlight and climatic and meteorological parameters studied. Conclusions about the current output of the modules were made. Modules of each type were mounted of 35° angle of inclination (from the horizontal surface) to the east, south and west on a lowland site (170 m AMSL (Above Mean Sea Level)) over a period of 2 $\frac{1}{2}$ years.

The focus of the presented work is the influence of the relative humidity of the air on the global irradiance, E and spectrally resolved irradiance $E(\lambda)$ on electrical modul- parameters. A change due to the weather, or due to humidity on the spectral components of the irradiation through to Red (IR) or Blue (UV) spectral ranges causes an immediate change in the current conversion efficiency κ_{ISC} : through the spectral responsivity (SR) influences such a change the module output, that can be generated from the light.

The influences of the relative humidity at ground level are during this period compared with those of the relative humidity of the atmospheric height profiles. Through a simulation the theoretical values of the humidity dependence are compared with the which of the measured values. The analysis of all datas gives a parameter for the dependence of the system-and climate-related electrical measurands and the relative humidity of the air.

For this work were a crystalline module technology (a monocrystalline silicon module) and thin film modules (an amorphous silicon module, and a module Cadmiumtellurid, CdTe) examined.

The application of the results of this work is in planning offices for photovoltaic systems. Because certain types of modules are more appropriate for individual weather conditions and at a certain degree of relative humidity than the others.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	13
1.0.1	Der innere Photoeffekt in Halbleitern	13
1.0.2	Kurze Halbleitertheorie	16
1.0.3	Absorptionskoeffizient	17
1.0.4	Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom	20
1.0.5	Strom- Spannungs- kennlinie der Solarzellen	20
1.0.6	Aufbau eines Systems	20
1.0.7	Kenngrößen der Solarzelle	22
1.0.8	STC –Bedingungen	23
1.0.9	Photostrom und Quantenausbeute	23
1.1	Meteorologische und physikalische Grundlagen	26
1.1.1	Air Mass	26
1.1.2	Spektrum	27
1.1.3	Strahlung von der Sonne bis zur Erdoberfläche	27
1.1.4	Physikalische Basis für Streuung	31
1.1.5	Extinktion, Absorption und Streuung und der Einfluss der Wellenlänge der einfallenden Einstrahlung	32
1.1.6	Konzept der Gleichgewichtswellenlänge	32
2	Experimentelle Grundlagen und Methoden	36
2.1	Verwendete Modultechnologien	37
2.1.1	Monokristalline Solarzelle	37
2.1.2	Amorphes Silizium-Solarzelle	38
2.1.3	CdTe- Solarzelle	38
2.1.4	Messaufbau	39
2.1.5	Messwiderstände	39
2.2	Verwendete Geräte	40
2.2.1	Pyranometer	40
2.2.2	Spektrometer	41
2.2.3	Wetterstation	45
2.2.4	I/O -Karte und Datenlogger	46

2.3	Datengüte	46
2.4	Kalibrierungen	48
2.4.1	Kalibrierung der Pyranometer	48
2.4.2	Kalibrierung und Bestimmung der Alterung der Module	49
2.5	Abschätzen der Fehlerquellen	53
3	Auswertungen und Ergebnisse	55
3.1	Methoden der Auswertungen	55
3.2	Auswertungen und Ergebnisse der Daten des ausgewählten Zeitraums März 2011 bis Juni 2011	59
3.2.1	Auswertungen anhand der Daten der relativen Luft- feuchtigkeit auf 200 m Höhe (über Meereshöhe)	59
3.2.2	Auswertungen anhand der Daten der relativen Luft- feuchtigkeit von 200m bis 3000m Höhe (über Meeres- höhe)	68
3.2.3	Auswertungen anhand der Daten der absoluten Luft- feuchtigkeit entlang der Atmosphäre	73
3.3	Auswertungen und Ergebnisse der Daten des Monats Juli 2012	80
3.3.1	Auswertungen und Ergebnisse der Daten der “clear –sky ”Tage	80
3.3.2	Auswertungen und Ergebnisse der Daten der bewölk- ten und regnerischen Tage	90
3.3.3	Auswertungen und Ergebnisse der Daten aller ausge- suchten Tage aus der Tagesklassifikation	93
3.4	Simulationen	105
4	Resümee	109
4.1	Zusammenfassung der Diskussion der Analyse der Korrelatio- nen mit der Luftfeuchtigkeit	109
4.2	Zusammenfassung der Diskussion des Einflusses der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Stromumwandlungseffizienz der PV –Module	113
A	Anhänge	115
A.1	Zusammenfassung	115
A.2	Referenzen	117
A.3	Danksagung	122
A.4	Lebenslauf	123
	Tabellenverzeichnis	130

Einleitung

Jedes Jahr sinkt die Menge an vorhandenen fossilen Energiequellen und die Energienachfrage steigt. Länder wie China oder Indien sind auf dem Weg des wirtschaftlichen Fortschritts. Dieser Weg ist nicht ohne den stetig steigenden Verbrauch an fossilen Energiereserven zu bewältigen. [1]

Im Durchschnitt werden in China pro Woche zwei neue Kohlenkraftwerke in Betrieb genommen. [2] Es stellt sich daher nicht die Frage, ob die fossilen Energieträger jemals erschöpft sein werden, sondern wann dieser Zeitpunkt erreicht sein wird.

Die Lösung für diese Probleme ist die Verwendung von erneubaren Energieressourcen. Es wurden viele Konzepte aus erneubaren Energieressourcen entwickelt, die Photovoltaik (PV) kann allerdings mit weltweiten Wachstumsraten um die 40% pro Jahr in Zukunft sogar eine zentrale Rolle spielen. Dabei sind die Module die kritischsten Komponenten einer Photovoltaik (PV)-Anlage.

Die Dünnschichtzellen sind aufgrund ihres geringen Material- und Energiebedarfs (die Dicke der aktiven Schicht beträgt dabei nur $1\mu\text{ m}$ - $10\mu\text{ m}$) bei der Herstellung deutlich kostengünstiger als die häufige kristallinen PV-Zellen. Die Dünnschichtzellen aus Silizium, besitzen keine kristallstruktur, sondern sind amorph und werden auf eine Fläche aufgedampft. Andere sind aus kristallinen oder teilkristallinen Schichten. Deshalb spielen die Dünnschichtzellen in der Zukunft eine große Rolle. [3]

In der Leistungsmessung und Vorhersage des Ertrages der Dünnschichtmodule sind viele Fragestellungen noch ungeklärt. Die Wichtigkeit dieser Vorhersagen wird alleine anhand eines Beispiels klar, wenn man sich vor Augen hält, dass die PV-Produktion in Deutschland bei einem Verkaufspreis an Anlagenerrichter von unter 4.000 EUR je Watt im GW-Bereich liegt und eine Mess- oder Vorhersageunsicherheit von 1% somit eine Kostendifferenz für Anlagenerrichter von 40 Mio. EUR bedeuten. [3]

Die Dünnschichtmodule verhalten sich anders als kristalline Module. Das geht von günstigerer spektraler Empfindlichkeit im Diffuslicht bis hin zu geringeren Leistungseinbussen bei erhöhten Temperaturen im Sommer und geringerem Materialeinsatz in der Produktion. Dem gegenüber stehen für die Energieausbeute wesentliche, großteils nicht genügend untersuchte Mechanismen wie Einfluss von Temperatur, Bestrahlungsstärke und Klimabedingungen.

Im Projekt PV-SPEC untersuchen die AIT (Austrian Institute of Technology), das Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur Wien und das Austrian Clean Technology Zentrum zusammen, die mit verschiede-

nen PV-Technologien erzielbare Energieausbeute abhängig von den meteorologischen und klimatischen Gegebenheiten.

Dieses Team will im Rahmen des Projekts herausfinden, ob und in welchem Ausmaß sich die Erträge von PV-Dünnschichtmodulen unter unterschiedlichen klimatischen und Einstrahlungs –Bedingungen von denen kristalliner Module unterscheiden. [3]

3 PV-Module unterschiedlicher Technologien wurden auf der Freifeldprüf­fläche des AIT - Austrian Institute of Technology (Techbase Vienna), montiert. Die Modul­ständer sind nach Süden, Westen, Osten ausgerichtet und wurden in einen Neigungswinkel von 35° gebracht. Zusätzlich wurde auf dem Ständer in Modulebene je ein Diodenpyranometer angebracht, um die Einstrahlungswerte in Modulebene zu bestimmen. Zur Messung des Sonnenspektrums in der Horizontalen wurde ein Halbraumquarzdom mit einem Diffuser sowie ebenfalls ein Pyranometer angebracht. Der Dom wurde über eine Glasfaser mit einem Gitterspektrometer verbunden. Alle beschriebenen Geräte, bis auf das Spektrometer, wurden mit einem Datenlogger verbunden und die Messungen über den Computer aufgezeichnet. Alle Messungen wurden in 1-Minutenintervallen durchgeführt.

Im Zeitraum von Jänner 2010 bis August 2012 wurden die Kurzschlussströme der PV –Module, die Spektralverteilungen der Tage und die weiteren Faktoren aufgezeichnet. Es wurde dann zur weiteren Auswertung der Zeitraum März 2011 bis Juni 2011 für die erste Hauptreihe der Auswertungen ausgewählt (es wird im Kapitel 3 genau beschrieben). Die Auswertung wurde anhand dreier charakteristischer Tag-Typen durchgeführt, an denen die Einstrahlungsverhältnisse möglichst verschieden waren (an Tagen mit durchgehendem Sonnenschein “clear sky”, an teilweise bewölkten Tagen und an Regentagen). Als Daten für die relative Luftfeuchte (RH) wurden für die ersten Auswertungen die Werte aus 200-Meter Höhe eines meteorologischen Tageshöhenprofils herangezogen. Für die weitere Auswertungen wurden die RH Werte aus 200 bis 3000 –Meter Höhe desselben Tageshöhenprofils herangezogen. Die korrelierenden Umgebungs –und Modulparameter wurden aus den Tagesgängen entsprechend mit dem 13h (Ortszeit –Wien) –Momentanwert für eine Auswahl an Tagen je Tagesklasse ausgesucht.

Es wurden die Korrelationen zwischen mehrerer Modul und Umgebungsparameter für die oben beschriebenen Klassifikation und die ausgewählten

Tage untersucht und analysiert. Vor allem die Korrelation zwischen Kurzschlussstrom I_{SC} , relativer Luftfeuchtigkeit RH, Einstrahlung E und der Gleichgewichtswellenlänge haben interessante Ergebnisse geliefert.

Weiters wurden die Werte der absoluten Feuchtigkeit, entlang der Atmosphäre aus demselben Tageshöhenprofile entnommen und die Korrelationen zwischen absoluter Feuchtigkeit (F_a), RH und den Umgebungs –und Modulparametern gesucht.

Anhand einer Wetterstation wurden von April 2012 laufend alle Wetterfaktoren direkt am Ort im 1 –Minutenintervall gemessen. Für den zweiten Haupt- Teil der Untersuchungen, wurden mehrere Tage vom Juli 2012 aus derselben Tagesklassifikation ausgesucht (wird im Kapitel 3 genau beschrieben). Es wurden dieselben Korrelationen im täglichen Verlauf von 9h bis 17h für die ausgesuchte Tage untersucht und analysiert.

Durch eine Simulation wurden die theoretischen Werte der Feuchteabhängigkeit mit den gemessenen Werten verglichen.

Das erste Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen (Photovoltaikspezifische Begriffe, Halbleitertheorie, Quantenausbeute, und die meteorologische und physikalische Grundlagen, die Einflüsse auf die Sonnenstrahlung entlang der Atmosphäre).

Das zweite Kapitel beschäftigt sich dann mit dem experimentellen Teil dieser Arbeit und beschreibt die verwendete Modultechnologien, verwendete Geräte und ihre Kalibrierungen und die vorhandene Datenbanken und ihre Ressourcen.

In dem dritten Kapitel werden die Auswertungen und ihre Ergebnisse beschrieben. Die Auswertungen und die daraus gefolgte Schlussfolgerungen wurden für die gesuchte Korrelation in 2 Haupt- Reihen durchgeführt. Die untersuchte Korrelationen werden anhand Graphiken dargestellt und einzeln analysiert und diskutiert.

In dem letzten und vierten Kapitel (Resümee) werden die Diskussionen im dritten Kapitel zusammengefasst und Schlussfolgerungen über die Korrelationen mit der relativen Luftfeuchtigkeit und über den Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Stromumwandlungseffizienz der PV- Module getroffen.

Kapitel 1

Theoretische Grundlagen

1.0.1 Der innere Photoeffekt in Halbleitern

Darstellung wurde entnommen aus [4]:

“Bei Solarzellen aus Halbleitermaterialien ist der innere Photoeffekt wichtig. Ein Photon, das genügend Energie $E = h\nu$ mitbringt, kann ein Elektron aus der Kristallbindung herauslösen oder vom Valenzband ins Leitungsband anheben. In Halbleitern sind normalerweise die Elektronen auf der äussersten Schale (Valenzelektronen) fest im Kristallgitter gebunden. Zum Verlassen ihres Gitterplatzes ist eine gewisse minimale Zusätzliche Energie erforderlich (Bandlückenenergie E_G). Diese Verhältnisse zeigt das Bändermodell des Halbleiters (Abbildung 1.1).

Die oben dargestellten Verhältnisse gelten streng genommen nur bei Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes. Steigt die Temperatur des Halbleiters an, so werden die Atome des Kristallgitters zu Schwingungen um ihre Gleichgewichtslage angeregt, was dazu führt dass einige der Valenzbindungen aufbrechen und die frei werdenden Elektronen ins Leitungsband gelangen können (Eigenleitfähigkeit). Je höher die Bandlückenenergie, desto weniger Elektronen gelingt dies, d.h. desto geringer ist die elektrische Leitfähigkeit des Materials bei einer bestimmten Temperatur. Je höher andererseits die Temperatur bei einem bestimmten Halbleitermaterial steigt, desto mehr Elektronen können ins Leitungsband gelangen, d.h. desto grösser wird die elektrische Eigenleitfähigkeit.”[4]

Es ist weiters fürs Verständnis vorliegender Arbeit wichtig zu wissen, daß die verschiedenen Bandlückenenergien (E_G) bei verschiedenen Halbleitern zu unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten (spectral Responsivity = SR, die später in diesem Kapitel genau beschrieben wird) und zu unterschiedlichen Quantum –Effizienzen (die auch später in diesem Kapitel genau beschrieben wird) führen. Die Grundlagen dazu wurden aus [4] wie folgt entnommen:

“Wo durch Aufbrechen einer Valenzbindung ein Elektron frei geworden ist, entsteht im Kristallgitter ein sogenanntes Loch. In ein solches Loch kann ein Elektron aus einer Valenzbindung eines benachbarten Atoms hinein fallen, wodurch das Loch am alten Ort verschwindet, jedoch am neuen Ort wieder ein Loch entsteht. Ein Loch kann sich also wie ein freies Elektron frei im Halbleiter bewegen und trägt auch zur Leitfähigkeit bei. Trifft ein freies Elektron zufällig auf ein Loch, so fällt es in dieses Loch, d.h. das Elektron und das Loch rekombinieren. Bei Bestrahlung des Halbleitersmaterials können Photonen mit genügender Energie $h\nu > E_G$ ein Elektron aus dem Valenzband ins Leitungsband anheben. Das Photon wird dabei absorbiert. Im Valenzband entsteht dabei ein Loch, im Leitungsband ein freies Elektron (siehe die Abb. 1.1). ”[4]

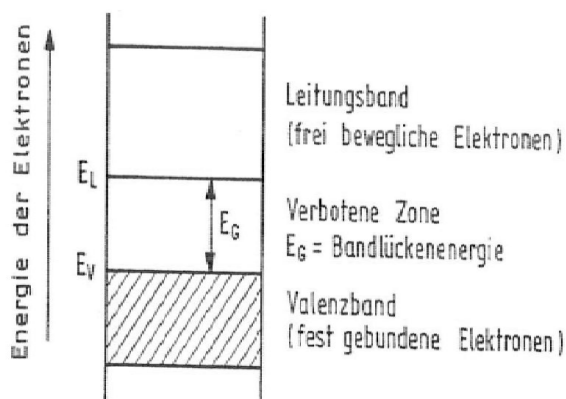


Abbildung 1.1: Einfaches Bändermodell des Halbleiters.

In einem Festkörper sind die zulässigen Energiestufen nicht mehr diskret wie bei einzelnen Atomen, sondern sie verbreiten sich wegen der Nähe anderer Atome zu Energiebändern. Die Breite der verbotenen Zone, die Bandlückenenergie ist abhängig vom verwendeten Halbleitermaterial. Die untere Grenze des Valenzbandes und die obere Grenze des Leitungsbandes werden oft nicht gezeichnet. In dieser Abbildung ist allerdings das Valenzband besetzt und das Leitungsband leer. [4]

“Bei den direkt absorbierenden Halbleitern ist zur vollständigen Absorption aller genügend energiereichen Photonen nur eine sehr geringe Materialdicke notwendig (Größenordnung $1\mu\text{m}$). Bei den indirekt absorbierenden Halbleitern (z.B. kristallines Silizium) ist dagegen eine vom Licht im Halbleitermaterial durchlaufene Strecke von mindestens $100\mu\text{m}$ erforderlich, damit auch die energieärmeren Photonen (Rotlicht und nahes Infrarot) noch sicher absorbiert werden. Direkt absorbierende Halbleiter sind deshalb prinzipiell zur Herstellung von Dünnschicht-Solarzellen mit geringem Materialaufwand geeignet. Bei indirekt absorbierenden Halbleitern ist dagegen wegen der erforderlichen Minimalstrecke der Materialaufwand höher, oder es müssen bei geringerer Materialdicke spezielle Tricks zur Verlängerung des effektiven Lichtwegs angewendet werden.”

Weiters sind die Dotierung von Halbleitern und der p/n –Übergang fürs Verständnis der Funktion einer Solarzelle sehr wichtig. Es folgt weiter in [4]:

“In Halbleitern können jedoch unter gewissen Umständen (an einem Übergang zwischen p- und n-dotiertem Halbleitermaterial) starke innere elektrische Felder entstehen, die auch ohne Anlegen einer äusseren Spannung vorhanden sind. Es liegt deshalb nahe, diese inneren elektrischen Felder für die Trennung der durch Photonen erzeugten Elektron-Loch-Paare auszunutzen und damit die Energie der getrennten Elektronen und Löcher auszunutzen. Dies ist das Grundprinzip, das in der Solarzelle praktisch realisiert ist. Um die Funktion einer Solarzelle zu verstehen, müssen wir uns deshalb kurz mit der Dotierung von Halbleitern und mit den Verhältnissen am p/n-Übergang befassen.”

“Wenn im Halbleiter kein elektrisches Feld vorhanden ist, das Elektron und Loch voneinander entfernt, fällt das Elektron nach kurzer Zeit wieder ins Loch zurück, d.h. die Energie des Photons verpufft nutzlos und heizt bloss den Halbleiter auf. Photonen mit Energien $h\nu < E_G$ vermögen kein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband-abzuheben und werden deshalb nicht absorbiert.

Wird durch eine äussere Spannungsquelle im bestrahlten Halbleiter ein elektrisches Feld erzeugt, so trennt dieses die von den absorbierten Photonen erzeugten Elektronen und Löcher. Wir haben dann einen Photoleiter oder Photowiderstand, dessen Leitfähigkeit proportional der Bestrahlungsstärke ist.”[4]

1.0.2 Kurze Halbleitertheorie

Weiters folgt aus [4]:

“Halbleiter sind Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit kleiner ist als die von Leitern, aber grösser als die von Nichtleitern. Der heute am meisten verwendete Halbleiterwerkstoff ist das Silizium (Si). Es ist auf der Erde sehr reichlich vorhanden und ökologisch unbedenklich. Weitere Halbleiterwerkstoffe mit einer gewissen technischen Bedeutung sind Germanium (Ge), Selen (Se), Galliumarsenid (GaAs), Galliumphosphid (GaP), Indiumphosphid (InP), Cadmiumsulfid (CdS), Cadmiumtellurid (CdTe) und Kupferindiumdiselenid (CuInSe_2 oder kurz CIS, manchmal auch mit einem gewissen Gallium-Anteil Kupferindiumgalliumdiselenid Cu(In,Ga)Se_2 kurz CIGS). Eine sehr wichtige Grösse zur Charakterisierung der Halbleitereigenschaften ist die Bandlückenenergie E_G .”

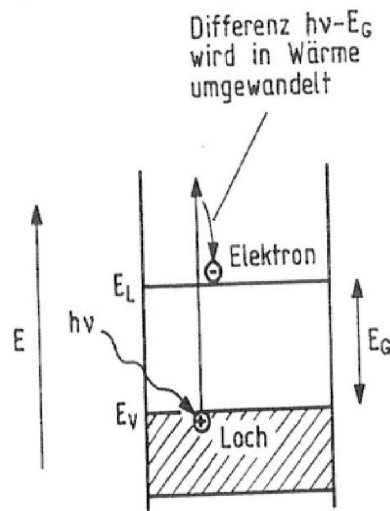


Abbildung 1.2: Innerer Photoeffekt: Ein Photon mit $h\nu > E_G$ hebt ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband und wird dabei absorbiert. [4]

“Silizium hat vier Valenzelektronen auf der äussersten Schale. Um eine stabile Elektronenkonfiguration (‘‘Edelgas Konfiguration’’ mit 8 Elektronen) zu erreichen, geht jedes Si –Atom mit 4 Nachbaratomen eine sogenannte kovalente Bindung ein. Jedes Atom steuert dabei an eine Bindung je ein Elektron bei, d.h eine Bindung besteht aus 2 Elektronen. Im Siliziumkristall ist jedes Si-Atom somit von 8 Elektronen umgeben und hat damit seine gewünschte Elektronenkonfiguration erreicht.”[4]

1.0.3 Absorptionskoeffizient

Der Absorptionskoeffizient, zeigt an, wie viele Photonen einer bestimmten Wellenlänge pro Zentimeter Halbleitermaterial von diesem absorbiert werden. In der Abbildung 1.3 ist die y-Achse logarithmisch skaliert.

Es ist auch in Abb. 1.3 der Unterschied zwischen einem indirekten Halbleiter und einem direkten Halbleiter zu erkennen. Wie es erkennbar ist, absorbiert das Kristalline Silizium oberhalb 1,5 eV um ungefähr einen Zehnerfaktor weniger Photonen als die Halbleiter die in Dünnschichtmodulen verwendet werden. Zur 90 %igen Lichtabsorption benötigt ein Gallium-Arsenid-Halbleiter, als ein direkter Halbleiter, eine Schichtdicke von 1 μm . Im Gegensatz dazu benötigt ein Siliziumhalbleiter eine Schichtdicke von 100 μm . [14]

Dotierung von Halbleitern

Es ist weiters fürs Verständnis einer Solarzelle, und im häufigen Fall, einer Silizium –Solarzelle wichtig, sich mit den Begriffen n –Leitender und p –Leitender Halbleiter zu beschäftigen. Die Grundlagen dazu wurden wie folgt aus [4] entnommen:

“Die bereits erwähnte Eigenleitfähigkeit von Halbleitermaterialien bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt liegt bei Raumtemperatur zwar deutlich über der Leitfähigkeit von Isolatoren, ist aber immer noch sehr gering. Durch Zusatz einer geringen Menge von geeigneter Menge von geeigneten Fremdatomen (Dotierung) kann sie wesentlich gesteigert werden.”

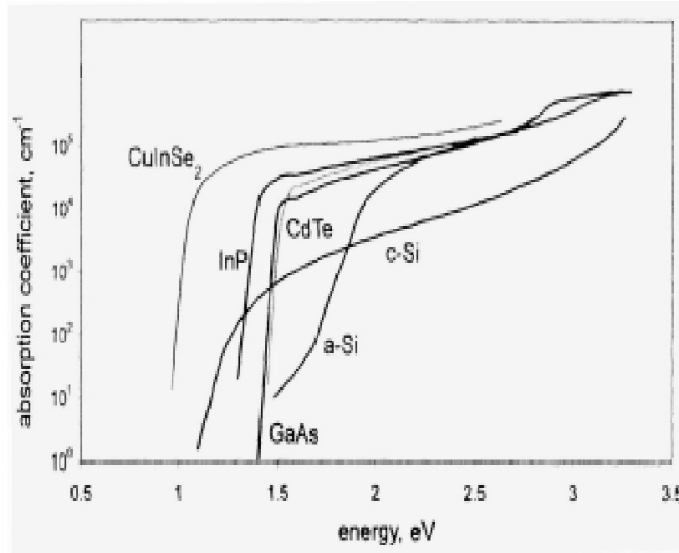


Abbildung 1.3: Absorptionskoeffizienten der verschiedenen Halbleiter als Funktion der Photonenenergie. [8]

“ Ersetzt man ein Siliziumatom durch ein Phosphoratom mit 5 Valenzelektronen auf der äussersten Schale, so kann eines dieser Elektronen keine Bindung mit einem der 4 Nachbaratome eingehen. Es löst sich deshalb sehr leicht von seinem Atomkern und lässt diesen positiv geladen zurück. Ein Phosphoratom gibt also ein Elektron an Kristallgitter ab und wird deshalb Donator oder auch Donor genannt. Das entsprechende Elektron heisst Donatorelektron. Im Bändermodell liegt das Donatorelektron energiemäßig nur wenig (um E_D) unter der unteren Bandgrenze des Leitungsbandes. Es braucht also nur wenig Energie aus der Temperaturbewegung zu gewinnen, um ins Leitungsband zu gelangen. Donatorelektronen bewirken eine Leitfähigkeit durch negative Ladungsträger, der Halbleiter ist deshalb n -leitend.

Ersetzt man dagegen ein Siliziumatom durch ein Boratom mit nur 3 Valenzelektronen auf der äussersten Schale, so können vom Boratom nur drei der vier Bindungen zu den benachbarten Si-Atomen mit Elektronen abgesättigt werden. Bei einer der vier Bindungen fehlt ein Elektron; es ist ein sogenanntes Loch vorhanden. In dieses Loch kann ein Elektron aus der Valenzbindung eines benachbarten Atoms hereinfallen, wodurch das Loch am alten Ort verschwindet, jedoch am neuen Ort wieder ein Loch entsteht. Das Boratom erhält bei diesem Vorgang eine negative Ladung.”[4]

“Im Bändermodell liegt der Platz für das vom Akzeptoratom nicht gelieferte Elektron für das vierte Nachbaratom energiemäßig nur wenig (um E_A) über der oberen Kante des Valenzbandes. Ein Elektron im Valenzband braucht also nur wenig Energie aus der Temperaturbewegung zu gewinnen, um diesen Platz unter Hinterlassung eines Lochs im Valenzband aufzufüllen.

Ein Loch kann sich im Valenzband genauso frei bewegen wie ein freies Elektron im Leitungsband; es heisst deshalb auch Defektelektron. Das Boratom ist in der Lage, ein Elektron “aufzunehmen” und wird deshalb Akzeptor genannt. Akzeptoren bewirken also eine Leitfähigkeit durch Löcher im Valenzband, also eigentlich positive Ladungsträger; der Halbleiter ist deshalb p-leitend.”[4]

“Wichtig für das Verständnis der Vorgänge am p/n-Übergang ist die Tatsache, dass Donatoratome, die ein Elektron abgegeben haben, im Kristallgitter fest eingebaute positive Ladungen (Ionen) darstellen. Umgekehrt stellen Akzeptoratomatome, die ein Elektron aufgenommen haben, im Kristallgitter fest eingebaute negative Ladungen (Ionen) dar.

Als Donatoren können neben P auch andere 5-wertige Elemente verwendet werden, beispielsweise As, Sb oder Bi. Als Akzeptoren eignen sich neben B auch Al, Ga oder In.”[4]

Der p/n –Übergang

Weiter wurde aus [4] entnommen:

“Für das Verständnis der prinzipiellen Funktion von Solarzellen genügt es, den Übergang zwischen p –und n –leitenden Halbleitern aus chemisch gleichartigem Basismaterial (homogener Übergang) zu untersuchen. In ihm entsteht auf natürliche Art eine Raumladungszone und damit ein starkes elektrisches Feld, das zur Trennung der durch den inneren Photoeffekt erzeugten ElektronLoch-Paare eingesetzt werden kann. Dafür eignen sich selbstverständlich aber auch die Raumladungszonen und elektrischen Felder bei p/n-Übergängen, wo der p –und der n –dotierte Teil aus chemisch verschiedenen Materialien besteht (heterogene Übergänge) oder bei Übergängen zwischen Halbleitern und Metallen (Schottky-Übergänge).”

“Bei einem p/n-Übergang ohne äussere Spannung, diffundieren aus dem n-Gebiet Elektronen ins p-Gebiet und füllen dort Löcher auf. Dadurch entsteht an der Grenzschicht im n-Gebiet durch die zurückbleibenden, positiv geladenen Donatoratome eine positive, im p-Gebiet durch die nun negativ geladenen Akzeptoratomatome eine negative RaumLadung.

Diese RaumLadungen haben ein elektrisches Feld in der Grenzschicht

zur Folge, welche die Diffusion weiterer Elektronen zunächst erschwert und schliesslich ganz zum Erliegen bringt. In der so entstandenen Sperrschicht an der Grenze zwischen dem n- und dem p-Material sind keine frei beweglichen Ladungsträger mehr vorhanden.”[4]

1.0.4 Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom

Wenn ein Photon , das genügend Energie besitzt, auf ein Valenzelektron in der Grenzschicht trifft, wird dieses über die Bandlücke in das Leitungsband gehoben. Das entstandene freie Elektron wandert auf die n-Seite, da es durch die positive Raumladungszone angezogen wird.

Das im Valenzband zurückbleibende Loch wandert auf die p-Seite. Wenn nun die Zelle kurzgeschlossen wird, fließen die Elektronen von der n-Seite über den elektrischen Leiter zur p-Seite. Dieser beschriebene Elektronenfluss bezeichnet den Kurzschlussstrom I_{SC} . Wird der elektrische Leiter von der Schaltung weggenommen und die Elektronen der n-Seite haben keine Möglichkeit zur p-Seite zu gelangen, baut sich eine Spannung auf, die Leerlaufspannung V_{OC} . [6]

1.0.5 Strom- Spannungs- kennlinie der Solarzellen

Werden die zwei Pole einer Solarzelle mit einem Leiter verbunden, der in der Mitte einen Widerstand besitzt, stellt sich ein Spannungswert ein, der kleiner ist als die Leerlaufspannung und ein Stromwert, der ebenfalls kleiner ist als der Kurzschlussstrom. In dem Fall aber daß dieser Widerstandvariable wäre, misst man den Strom und die Spannung bei verschiedenen Widerstandswerten, also von einem sehr kleinen Widerstand bis zu einem sehr großen, und erhält damit die in Abbildung 1.4 sichtbare grüne Kurve. Diese wird als Strom- Spannungs- Kennlinie des PV-Moduls oder der PV-Zelle bezeichnet. [6]

1.0.6 Aufbau eines Systems

Abbildung 1.5 zeigt den typischen Aufbau eines netzgekoppelten Photovoltaik-Systems bestehend aus dem PV-Generator, der die Solarstrahlung in Gleichstromenergie umwandelt und sie dem Wechselrichter zur Netzeinspeisung zur Verfügung stellt. [5]

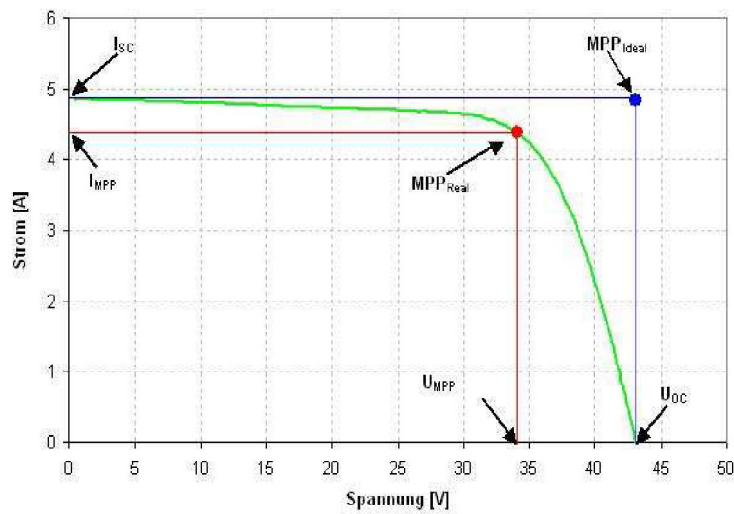


Abbildung 1.4: Strom- Spannungs- Kennlinie einer PV- Zelle. [6]

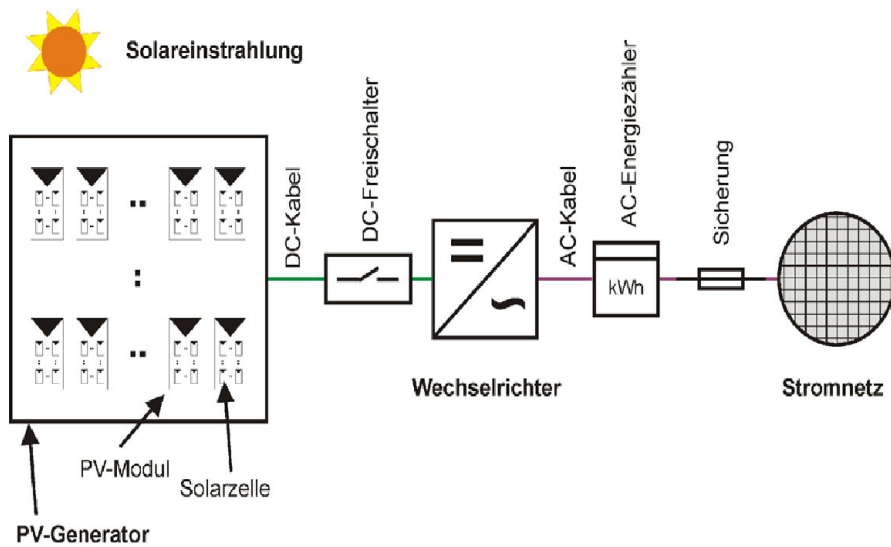


Abbildung 1.5: Ein typisches PV-System

besteht aus dem PV-Generator, welcher aus einer Reihen und Parallelschaltung von PV-Modulen besteht. Das PV-Modul wiederum besteht aus einer Reihen- und Parallelschaltung von einzelnen Solarzellen. Der vom PV-Generator erzeugte Gleichstrom fließt über ein DC-Kabel und DC-Freischalter zum Wechselrichter, der den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Der Wechselstrom wird über AC-Kabel, einen Energiezähler und Sicherungen in das Stromnetz eingespeist. [5]

1.0.7 Kenngrößen der Solarzelle

Jeder eingestellte Widerstandswert besitzt einen zugehörigen P –Wert auf der Kennlinie und einen bestimmten Stromwert. Durch die Formel 1.1 kann die Leistung berechnet werden.[7]

$$P = U \cdot I \quad (1.1)$$

Der Punkt der Kurve, an dem das Produkt aus Spannung und Strom, also die Leistung, am höchsten ist, wird **MPP-Punkt**, Maximal Power Point genannt. Wobei I_{MPP} der Strom am MPP –Punkt und U_{MPP} die Spannung am MPP –Punkt bezeichnen. Da die Leistung am MPP –Punkt am höchsten ist, versucht der Wechselrichter den Widerstand so zu wählen, sodass der MPP –Punkt erreicht wird. Das Produkt aus I_{SC} und V_{OC} wird als idealer MPP-Punkt bezeichnet. Der maximale Leistungspunkt ist bei realen PV –Modulen immer niedriger als der ideale MPP –Punkt. [6]

Der **Füllfaktor** bezeichnet das Verhältnis zwischen $P_{MPP-Real}$ und

$P_{MPP-Ideal}$. Die Formel zur Berechnung ist in Gleichung (1.2) zu finden. Der theoretische Leistungspunkt $P_{MPP-Ideal}$ wird in der Realität nie erreicht. Der Grund dafür sind der Widerstand des Halbleiters, durch den die Elektronen fließen müssen, der Widerstand des Vorder- und Rückseitenkontaktes der PV- Zelle, die Widerstände der Leitungsbahnen, die Leckströme an den Zellkanten und die Inhomogenitäten im Zellmaterial. Der Füllfaktor zeigt an, wie groß das Verhältnis des theoretisch höchsten Leistungspunktes der Zelle zu dem tatsächlich erreichten höchsten Leistungspunkt ist. Wenn die Verluste sehr gering sind, ist der Füllfaktor nahe bei 1. Wenn die Zelle schlecht gebaut ist, liegt er allerdings weit unter 1. [8]

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (1.2)$$

FF Füllfaktor []
 I_{MPP} Strom am Punkt maximaler Leistung [A]
 U_{MPP} Spannung am Punkt maximaler Leistung [V]
 I_{SC} Kurzschlussstrom [A]
 V_{OC} (wird auch mit U_{OC} bezeichnet) Leerlaufspannung [V]

Der **Wirkungsgrad** einer PV-Zelle oder eines PV-Moduls gibt an, wie viel elektrische Energie durch die Zelle oder das Modul im Verhältnis zur

gesamt eingestrahlten Energiemenge produziert wird. Formel (1.3) beschreibt die Berechnung des Wirkungsgrades. [9]

$$\eta = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{P_{Einstrahlung}} \cdot 100\% = \frac{P_{PV-Modul}}{P_{Einstrahlung}} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

ηWirkungsgrad [%]

$P_{Einstrahlung}$ Einstrahlungsleistung [W]

$P_{PV-Modul}$ abgegebene elektrische Leistung des Moduls [W]

1.0.8 STC –Bedingungen

Zur Ermöglichung des Vergleichs von PV-Modulen werden die Strom- Spannungs- Kennlinien in der Regel unter bestimmten Messbedingungen aufgenommen. Diese werden “Standard Test Conditions ”, abgekürzt STC-Bedingungen, genannt. Wobei die Strom- Spannungs- Kennlinie des Moduls bei 25 °C Modultemperatur und $1.000 \frac{W}{m^2}$ Einstrahlung aufgenommen wird. Außerdem muss die spektrale Zusammensetzung des Lichts mit dem AM 1,5 Spektrum in einem kleinen Toleranzbereich übereinstimmen. [6]

1.0.9 Photostrom und Quantenausbeute

Die externe Quantenausbeute (extern quantum efficiency):

$$EQE(\lambda) = \frac{\frac{\text{Elektronen}}{t}}{\frac{\text{Photonen}}{t}} = \frac{\frac{I_{SC}}{q}}{\frac{E(\lambda)}{h\nu}} = \frac{\frac{I_{SC}}{q}}{\frac{E(\lambda)\lambda}{hc}} \quad (1.4)$$

einer Solarzelle gibt an, wie viele Elektronen im Verhältnis zu den eingestrahlten Photonen angeregt werden und zu den Kontakten fließen. Wobei h das Planck’sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit, also Naturkonstanten sind. t ist die Zeit, q der Betrag der elektrischen Ladung

[C] der angeregten Elektronen. $E(\lambda)$ bezeichnet die eintreffende spektral-aufgelöste Einstrahlung, ν die Frequenz und λ die Wellenlänge der jeweiligen Einstrahlung. [5 , 10]

In der Gleichung 1.4 wird die Beziehung 1.8 (Siehe den Abschnitt 1.1.2) vorausgesetzt.

Die Strahlung mit Wellenlängen λ größer als die Bandlücke E_g des jeweiligen Halbleiters wird nicht mehr absorbiert. Das verursacht den Abfall der EQE auf der rechten Seite bei großen Wellenlängen λ .

Der oben liegende Emitter der Si-Solarzellen absorbiert die kurzwellige Strahlung fast komplett. Die hier erzeugten Ladungspaare rekombinieren vor Erreichen der Kontakte, und tragen damit nicht zum Strom I_{ph} bei. Bei den Dünnschichtzellen absorbiert auch der transparente leitfähige Kontakt auf der Vorderseite der Solarzelle die kurzwellige Strahlung. Außerdem nimmt die Reflexion bei kurzen Wellenlängen zu. All dies verursachen den Abfall der EQE auf der linken Seite bei kurzen Wellenlängen. [5]

Wenham et al. beschreibt in [10] die Umrechnung der EQE in die Spektralempfindlichkeit (Spectral Responsivity = SR).

$$SR(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} \cdot EQE(\lambda) \quad (1.5)$$

welche die unterschiedlichen Energien der einzelnen Wellenlängen berücksichtigt.

Die Werte von $EQE(\lambda)$ und b.z.w auch SR liegen zwischen 0 und 1. Der ideale theoretische Wert für die beiden Parameter wäre also 1.

Der Kurzschlussstrom:

$$I_{SC} = \int SR(\lambda)E(\lambda)Ad\lambda \quad (1.6)$$

einer Solarzelle ergibt sich aus der Überlappung der Spektralempfindlichkeit, SR mit der einfallenden Einstrahlung E auf der Fläche A. [11]

Die Abbildung 1.6, die spektrale Empfindlichkeit für die drei unterschiedlichen Modultypen (amorphes Silizium –a-Si, monokristallines Silizium –c-Si und Cadmium-Tellur –CdTe) wurde aus [37] übernommen.

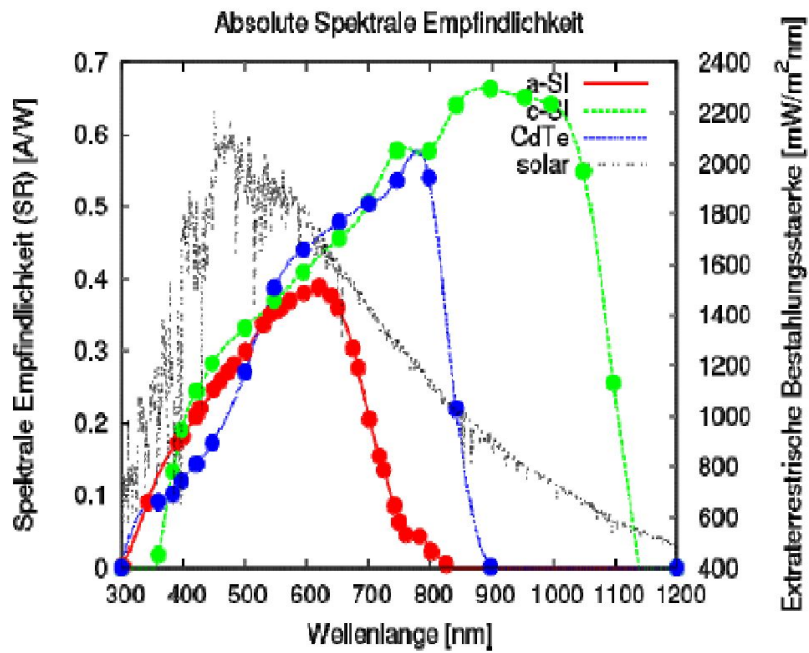


Abbildung 1.6: Die spektrale Empfindlichkeit für die drei unterschiedlichen Modultypen (amorphes Silizium –a-Si, monokristallines Silizium –c-Si und Cadmium-Tellur –CdTe) ist dargestellt (linke Ordinate).

Punkte stellen im Labor vermessene Werte, Linien wurden durch Splineinterpolation erzeugt. Die extraterrestrische Bestrahlungsstärke ist als dünne gestrichelte Linie eingetragen. [37]

1.1 Meteorologische und physikalische Grundlagen

1.1.1 Air Mass

Das Sonnenlicht durchquert auf dem Weg von der Sonne bis zum Erdboden die Erdatmosphäre. Das wird entlang der Atmosphäre absorbiert, bzw. auch gestreut. Deshalb kommt am Erdboden weniger Strahlung an als anfangs von der Sonne ausgesendet wurde und die spektrale Zusammensetzung der Sonnenstrahlung verändert sich auch. Die spektrale Zusammensetzung ändert sich je nach den in der Atmosphäre existenten Teilchen und der Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre.

Bei senkrechtem Stand der Sonne über einem bestimmten Punkt auf der Erde ist der Weg durch die Atmosphäre kürzer, als bei einem Winkel von zum Beispiel $60,1^\circ$ (entfernt vom senkrechten). Das Spektrum mit AM 0 wird für Oberhalb der Erdatmosphäre angegeben. Wenn die Sonne senkrecht oberhalb eines Punktes auf der Erde steht, wird das Spektrum mit AM 1 angegeben. Je nach Winkel der Sonne zum senkrechten Stand der Sonne kann der AM-Koeffizient mit Formel (1.7) berechnet werden. [13]

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (1.7)$$

AM..... Air Mass []

θ Winkel zwischen senkrechtem Sonnenstand zur Erde und tatsächlichem Sonnenstand [°]

Da der Winkel θ nie 90° wird, b.z.w die Sonne nie zu einem Standort absolute horizontal steht, kann der AM- Faktor für jeden Sonnenstand laut Formel 1.7 berechnet werden.

Der AM-Koeffizient gibt also an, um Wievielfache der Weg der Sonnenstrahlung länger ist als im Vergleich zu AM 1. [6]

1.1.2 Spektrum

Das Licht der Sonne, bestehend aus Photonen, besitzt unterschiedliche Wellenlängen und Energien. Die Wellenlänge eines Photons ist bekanntlich von der Frequenz abhängig. Den Zusammenhang der Wellenlänge und Frequenz beschreibt die Formel (1.8) [4]

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.8)$$

Diese Beziehung wurde auch bereits in der Gleichung 1.4 vorausgesetzt.

Die Energie eines Photons ist auch bekanntlich von der Frequenz abhängig und steht somit mit der Wellenlänge auch in einer Beziehung. Den Zusammenhang der Energie und Frequenz beschreibt die Formel (1.9). [14]

$$E = h\nu \quad (1.9)$$

Somit gilt, dass kurzwellige Photonen energiereicher sind als langwellige Photonen. In Abbildung 1.7 ist das auf der Erde einfallende Sonnenspektrum bei AM 1,5, also die Energie, die pro Wellenlänge und pro Quadratmeter Fläche auf die Erde eintrifft, zu sehen. Die Kurve beginnt bei circa 300 nm und endet bei 4.000 nm. In der Abbildung ist sie aber nur bis 2.500 nm dargestellt, da im Bereich von 2.500 nm bis 4.000 nm nur sehr wenige Photonen vorhanden sind und der Bereich damit eine sehr geringe Energie besitzt. Die sichtbare Sonnenstrahlung liegt zwischen 380 nm und 780 nm. Ungefähr in diesem Bereich befindet sich auch das Maximum des Sonnenspektrums. [6]

1.1.3 Strahlung von der Sonne bis zur Erdoberfläche

Atmosphäre

Die bodennahen Schichten der Erdatmosphäre bestehen aus Luft, welche aus ungefähr 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 0,9 % Argon und anderen Edelgasen besteht. Hinzukommt Kohlendioxid, Wasserdampf und viele verschiedene Spurengase, wie etwa Methan, Ozon, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid und Stickstoffverbindungen. [16]

Die Atmosphäre enthält aber auch kleine feste Teilchen, die sogenannten Aerosole. Ein Beispiel für die Aerosole ist der Staub. Die oberen Atmosphärenschichten bestehen aus dünnem Gas, welches in Atomen und Ionen vorliegt.

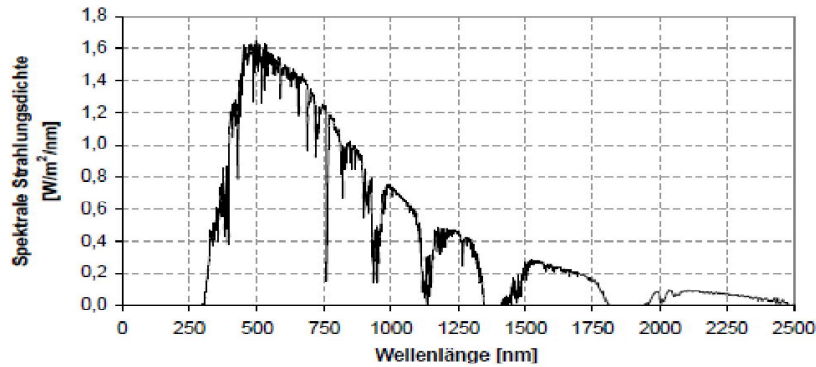


Abbildung 1.7: Sonnenspektrum bei AM 1,5. [14]

Passiert die Sonnenstrahlung die Erdatmosphäre, so tritt die Strahlung mit einigen der bereits erwähnten Komponenten der Atmosphäre in Wechselwirkung.

Vor allem Ozon, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf absorbieren spezielle spektrale Bereiche. [17]

In Abbildung 1.8 sind die im Spektrum sichtbaren Einschnitte den Atomen und Molekülen zugeordnet, die Photonen bei dieser Wellenlänge absorbieren. Besonders im Bereich der UV-Strahlung werden viele Photonen vom Ozon absorbiert. Dies ist in Abbildung 1.9 ersichtlich. Neben der Absorption wird die Strahlung auch von Wolken reflektiert. Es werden dabei drei Wetterbedingungen unterschieden. Dies sind wolkenloser Himmel mit starkem Sonnenschein, teilweise bewölkter Himmel und ganz bewölkter Himmel. Je nach Stärke der Bewölkung wird auch mehr oder weniger Strahlung reflektiert. [8] Der dritte Effekt, der das einfallende Sonnenspektrum beeinflusst, ist die Streuung von Strahlung. Vor allem kurzwelliges Licht wird an Luftmolekülen, wie etwa Stickstoff, Sauerstoff, Edelgasen und Kohlenstoffdioxid, gestreut.

Langwelliges Licht unterliegt einer eher geringen Streuung, wie in Abbildung 1.9 zu sehen ist. Dies begründet, warum der Himmel blau strahlt (kurzwelliges Licht), die Sonnenstrahlen jedoch gelb (langwelliges Licht) erscheinen. Wenn der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre zunimmt, wird der AM-Faktor größer, und wird auch mehr kurzwelliges Licht gestreut. Es

kann so erklärt werden, warum die tiefstehende Sonne rötlich erscheint. Luftfeuchtigkeit, Wassertropfen und Staub verstärken die Streuung von Licht. Aus diesem Grund gibt es in Gegenden mit hoher Luftfeuchtigkeit einen hohen Diffusstrahlungsanteil. [17], [18]

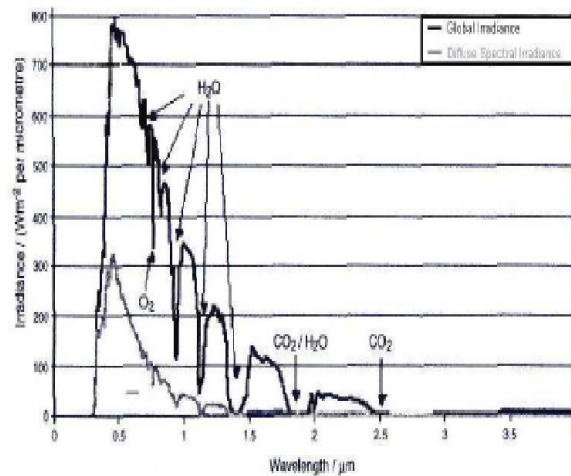


Abbildung 1.8: Absorptionseinschnitte verursacht von Gasen in der Erdatmosphäre. [8]

Absorptions -vermögen, $A(\lambda, T)$, ist ein Maß für die Fähigkeit eines Körpers, auffallende elektromagnetische Strahlung zu absorbieren, das heißt, die auffallende Strahlungsenergie in andere Energieformen umzuwandeln.

Das Absorptionsvermögen ist von der Wellenlänge λ der Strahlung und in geringem Maß von der Temperatur T des Körpers abhängig. Das ist durch das Verhältnis der absorbierten Strahlungsleistung der Wellenlänge λ zur auffallenden Strahlungsleistung der Wellenlänge λ definiert.

Nach dieser Definition liegen alle Werte für $A(\lambda, T)$ zwischen 0 und 1. [18]

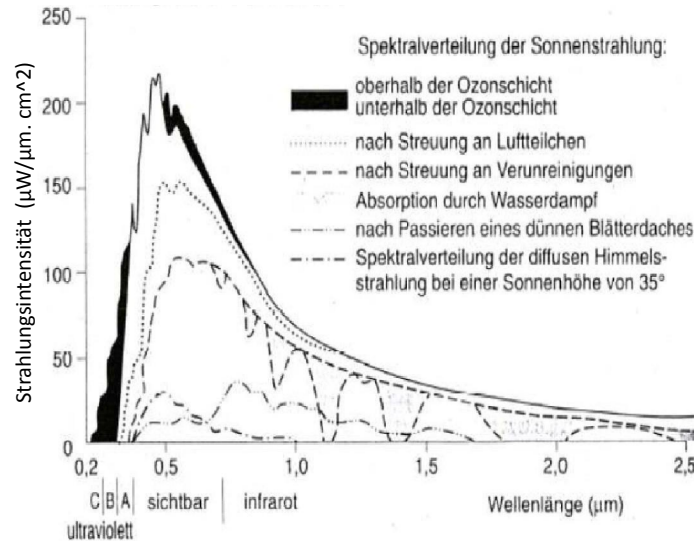


Abbildung 1.9: Veränderung der Spektralverteilung durch die Erdatmosphäre. [1]

Globalstrahlung – direkte Strahlung – Diffusstrahlung

Die auf der Erdoberfläche einfallende Strahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet. Die direkte Strahlung ist die Strahlung, welche ohne Umwege den Erdboden erreicht. Die diffuse Strahlung ist jener Strahlenanteil, welcher in der Atmosphäre gestreut wird und auf Umwegen den Erdboden erreicht.

Die Diffusstrahlung beträgt bei wolkenlosem Himmel etwa 10 - 20 % der Globalstrahlung. Der Rest der Globalstrahlung besteht aus direkter Strahlung und aus Boden- und Vegetationsreflexionen.

Bei wolkenlosem Himmel erreicht die Globalstrahlung einen Wert von ungefähr $1.000 [W/m^2]$. [1]

Das ist weiter klar, daß eine klare Atmosphäre zu einer höheren Einstrahlung und damit einem geringeren diffuse Anteil der Globalstrahlung führt. Die Luftreinheitsvariabilität hängt vor allem mit der Variabilität der Menge an Wasserdampf und Aerosolen in der Atmosphäre zusammen. Diese ändert sich von Ort zu Ort, aber auch von Jahreszeit zu Jahreszeit.

Die Kurzwelleneinstrahlungsvariabilität an wolkenlosen Tagen hängt vor allem mit der Bewegung der Sonne über dem Horizont zusammen. Die Wetteränderungen ändern die Gesamtmenge an eingestrahelter Sonnenenergie und auch das Verhältnis zwischen direkter und diffuser Strahlung. Bei ganz bewölktem Wetter gibt es keine direkte Strahlung mehr und das gesamte auf der Erdoberfläche ankommende Licht besteht aus diffusem Licht. [8, 17]

1.1.4 Physikalische Basis für Streuung

Die Streuung wird mit kürzerer Wellenlänge immer stärker, das heißt, daß der Anteil der Strahlen, der an den Teilchen gestreut wird, zunimmt.

Der Himmel erscheint blau, weil innerhalb des sichtbaren Bereichs blaues Licht die kürzeste Wellenlänge hat und daher am meisten an den Molekülen und Atomen in der Luft gestreut wird.

Mie–Streuung oder auch Lorenz–Mie–Streuung ist die elastische Streuung elektromagnetischer Wellen an sphärischen Objekten, deren Durchmesser ungefähr der Wellenlänge der Strahlung entspricht. Für die Objekte mit dem Objektdurchmesser $d < 0,2\lambda$ kann die Mie–Streuung durch die Rayleigh–Streuung identifiziert werden, für große Objekte mit dem Objektdurchmesser $d > 2...10\lambda$ wird die Mie–Theorie durch die klassische Lösung der Brechung an einer Kugel identifiziert. Man spricht dann häufig von Mie–Streuung, wenn sich der Objektdurchmesser in dem Bereich zwischen Rayleigh–Streuung und klassischer Streuung befindet.

Die Streuung an den Luftmolekülen wird als Rayleigh–Streuung bezeichnet, die an den Regentropfen und Nebeltröpfchen als klassische Streuung und die an Fetttröpfchen (Z.B in Form des Aerosols) als Mie–Streuung, obwohl alle 3 Fälle durch die Mie–Theorie exakt beschrieben werden können. Man kann durch den unterschiedlichen Polarisationsgrad und die Streuverteilung auch die drei Fälle gut unterscheiden:

- * Rayleigh–Streuung ist stark wellenlängenabhängig, bei senkrechter Streuung ist die linear polarisiert.

- * Mie–Streuung ist leicht wellenlängenabhängig, bei senkrechter Streuung ist die leicht bis mittel polarisiert.

- * klassische Streuung an kleinen Tröpfchen ist nicht wellenlängenabhängig, auch nicht polarisiert, und hat einen begrenzten Streuwinkel in Vorwärts-

richtung.

* klassische Streuung an großen Tropfen ist nicht wellenlängenabhängig, auch nicht polarisiert, und hat einen sehr begrenzten Streuwinkel. [18]

1.1.5 Extinktion, Absorption und Streuung und der Einfluss der Wellenlänge der einfallenden Einstrahlung

$$Q_{abs} \propto \frac{1}{\lambda} \quad (1.10)$$

$$Q_{sca} \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (1.11)$$

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca} \quad (1.12)$$

Wobei Q_{abs} die Absorptionseffizienz, Q_{ext} die Extinktionseffizienz, und Q_{sca} die Streueffizienz der einfallenden elektromagnetischen Welle an dem jeweiligen sphärischen Körper sind. [19]

Wenn Auslöschung durch Absorption dominiert, wird das Extinktionsspektrum mit $\frac{1}{\lambda}$ variieren; und wenn Auslöschung durch Streuung dominiert, wird das Extinktionsspektrum mit $\frac{1}{\lambda^4}$ variieren. [19]

Craig F. Bohren und Donald R. Huffman beschreiben in Referenz [19], alle weitere Überlegungen und Rechnungen und die Mathematik der Streuung und Absorption und Extinktion der elektromagnetischen Wellen, b.z.w, die optische Eigenschaften der Materie und der Teilchen, und unter anderem die Rayleigh-Gans und die Mie-Theorie.

1.1.6 Konzept der Gleichgewichtswellenlänge

Nur das Licht mit einer Wellenlänge λ zwischen 300 nm und 1200 nm trägt zu einem Kurzschlussstrom I_{SC} (siehe Abbildung 1.6 und Gleichung 1.6) bei den in der Studie (in der die vorliegende Arbeit durchgeführt wurde) untersuchten Technologien (aSi, cSi und CdTe) bei. Aus technischen Gründen wurde in dieser Studie nur das Spektrum zwischen 351 nm und 899 nm minutlich mit einer spektralen Auflösung von 0,47 nm erfasst. Um die gemessenen Spektren mit einer Masszahl zu charakterisieren, wurde die Gleichgewichtswellenlänge λ_{ave} eingeführt (siehe Abbildung 1.10). Zu der Berechnung der

Gleichgewichtswellenlänge wird die Fläche der Kurve der spektral aufgelösten Einstrahlung (E_λ) halbiert, so daß die beiden Flächen $E_1 = E_2$ in Abb. 1.10 gleich sind. Dann wird der Wert der Wellenlänge an diesem Punkt abgelesen und diese Wellenlänge ist die Gleichgewichtswellenlänge. Es wird also jene Wellenlänge aus dem Spektrum ermittelt, für die gilt:

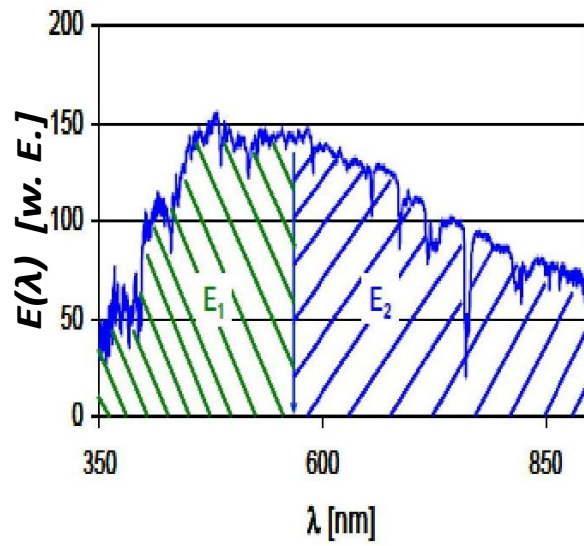
$$\int_{351}^{\lambda_{ave}} E(\lambda)d\lambda = \int_{\lambda_{ave}}^{899} E(\lambda)d\lambda$$

Eine hohe Gleichgewichtswellenlänge von $\lambda_{ave} > 597$ nm würde also eine Verschiebung des Spektrums in den roten Bereich bedeuten, eine niedrige Gleichgewichtswellenlänge von $\lambda_{ave} < 597$ nm dagegen einen zunehmenden Blauanteil. [20, 21]

Aus den Gleichungen 1.8 und 1.9 folgt hier:

$$\lambda_{ave} = \frac{hc}{APE} \quad (1.13)$$

$\implies \lambda_{ave}$ und APE = average photon energy = durchschnittliche Photon-Energie in dem jenigen Spektralbereich, stehen also miteinander in einem Zusammenhang und sind umgekehrt proportional.



$$\lambda_{\text{ave}} \iff E_1 = E_2$$

$$\lambda_{\text{ave}}(\text{AM1.5}) = 597 \text{ nm}$$

Abbildung 1.10: Berechnung der Gleichgewichtswellenlänge λ_{ave} . [20]

Kapitel 2

Experimentelle Grundlagen und Methoden

Methodik

3 PV-Module unterschiedlicher Technologien (ein monokristallines Siliziummodul und 2 Dünnschichtmodule (ein amorphes Siliziummodul, a-Si, und ein Kadmiumtellurid-Modul, CdTe)) wurden auf der Freifeldprüffläche des Unternehmens Austrian Institute of Technology^a, welche sich am Dach des Gebäudes mit dem Namen "Techbase Vienna" befindet, auf einem Modulständer montiert. Diese Modulständer sind nach Süden, Westen, Osten ausgerichtet und wurden in einen Neigungswinkel von 35° von der horizontalen gebracht.

Die Monokristalline Module wurden jeweils zur Kurzschlussstrommessung und die Dünnschicht Module zu einer Strommessung nahe am I_{SC} , der einem Spannungswert von $\frac{1}{3} \cdot U_{OC}$ entspricht (siehe Abb. 1.4), verbunden. Da der verwendete Datenlogger (Agilent), der später in diesem Kapitel genauer beschrieben wird, nur die Spannungswerte im Bereich von 0 bis 250mV registriert, sollte dieser Stromwert so gewählt werden daß die Spannungswerte die sich dann über die Shunt und Last- Widerstände mittels ohmschen Gesetz ergeben, in dem Spannungsbereich des Datenloggers sind (siehe dazu die Messwiderstände 2.2.4). Zusätzlich wurde auf dem Ständer in Modulebene und auch in horizontaler Ebene ein Pyranometer angebracht, um die Einstrahlungswerte auf jedes einzelne Modul aber auch in horizontaler Ebene und ohne Neigung zu bestimmen. Zur Messung des Sonnenspektrums in der Modulebene wurde die Mess-Anordnung auf dem Dach mit dem Spektrometer in einer Messzentrale verbunden.

Die unterschiedliche Umgebungsparameter wurden durchgehend mittels einer Wetterstation in der Messzentrale aufgezeichnet. Alle beschriebenen

^aAIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria.

Geräte, bis auf das Spektrometer, wurden an eine I/O Karte zugeschlossen, welche mit einem Datenlogger verbunden war.

Im Zeitraum von Jänner 2010 bis August 2012 wurden die Kurzschlussströme der PV-Module, die Spektralgänge der Tage und die Einstrahlungswerte und von April 2012 laufend die einzelnen Wetterfaktoren in einem Minuten-Intervall vorbereitet.

Die 4 Dioden-Pyranometer wurden kalibriert.

Die Kalibrierung (Bestimmung der Alterung) der PV-Module hat das ermöglicht, die neuen und alten Werte für alle Modulparameter der jeweiligen Module und ihre Abweichungen innerhalb des Zeitraumes zu bestimmen.

2.1 Verwendete Modultechnologien

Unterschieden werden die Modultechnologien nach ihren Halbleitern. Je nach Halbleiter wird ein anderer spektraler Bereich der Sonnenstrahlung verarbeitet.

2.1.1 Monokristalline Solarzelle

Bei der Herstellung von monokristallinem Silizium wird ein Impfkristall in einen Behälter mit flüssigem Silizium gegeben und dann langsam unter Drehung herausgezogen. Durch das Erstarren des flüssigen Siliziums bildet sich ein Kristall aus. Während des Erstarrens wird die homogene Anordnung des Impfkristalls fortgesetzt, so daß sich ein Einkristall ausbildet. [6]

Monokristalline Zellen werden aus sogenannten Wafern (einkristalline Siliziumscheiben) hergestellt, wie sie auch für die Halbleiterherstellung verwendet werden.

Die hier verwendete monokristalline Technologie, war von dem Hersteller "SolarWatt". Zertifiziert von ESTI ^b, mit der Modulfläche $1,66m^2$. Die spektrale Empfindlichkeit (SR) des Modultyps ist bei $\lambda = 900 \text{ nm}$ am größten (Siehe Abbildung 1.6.). Damit sind in diesem Bereich die Quantenausbeute und der Photostrom am größten und die Stromumwandlungseffizienz κ_{ISC} wird ebenfalls am größten erwartet. Die Monokristalline- Technologie wurde in dieser Arbeit, nur zwecks eines direkten Vergleichs ihrer Ergebnisse mit denen aus den Dünnschicht- Technologien verwendet.

^bEuropean Solar Test Installation in ISPRA.

2.1.2 Amorphes Silizium-Solarzelle

Amorphes Silizium besteht ebenso wie kristallines Silizium aus demselben Element, jedoch unterscheidet sich amorphes von kristallinem Silizium in der Atom- und Molekülstruktur, welche nicht periodisch, sondern ungeordnet aufgebaut ist. Dadurch besitzt es auch andere Eigenschaften.

Hergestellt wird amorphes Silizium durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) bei Temperaturen unterhalb von 200°C . Dies macht die Herstellung von amorphem Silizium wesentlich billiger als jene von kristallinem. In amorphem Silizium brechen viele Verbindungen auf. Aufgebrochene Verbindungen verstärken allerdings die Rekombination von Ladungsträgern, weshalb amorphes Silizium mit Wasserstoff geflutet wird, sodass sich an den früheren gebrochenen Siliziumverbindungen Silizium-Wasserstoffverbindungen bilden. Dadurch wird die Rekombination von Ladungsträgern verringert. [6]

Amorphe Solarzellen bestehen also aus einer dünnen, nichtkristallinen (amorphen) Siliziumschicht und werden daher auch als Dünnschichtzellen bezeichnet. Zu finden sind die amorphen Zellen beispielsweise auf Taschenrechnern oder Uhren.

Die hier verwendete amorphe Silizium-Technologie (a-Si), war von dem Hersteller "Schott-Solar". Zertifiziert von ESTI, und mit der Modulfläche $1,447\text{m}^2$. Die spektrale Empfindlichkeit (SR) des Modultyps ist bei $\lambda = 621\text{nm}$ am grössten. (Siehe Abbildung 1.6.)

2.1.3 CdTe- Solarzelle

CdTe ist ein direkter Halbleiter, was der Grund dafür ist, dass in der Produktion im Gegensatz zu Siliziumzellen an Material eingespart werden kann. CdTe steht als Abkürzung für die Elemente Cadmium und Tellur. Der große Vorteil dieses Halbleiters gegenüber anderen Halbleitertechnologien ist, dass die Bandlücke dieses Materials ganz nah am Optimum der Bandlücken für die Energieumwandlung liegt. Hinzu kommt, dass die Herstellung einer Zelle durch einfache Ablagerungsschritte erfolgt, welche eine billige Produktion ermöglichen. [6]

Die hier verwendete Cadmiumtellurid-Technologie, war von dem Hersteller "First-Solar". Zertifiziert von ESTI, mit der Modulfläche $0,72\text{m}^2$. Die spektrale Empfindlichkeit (SR) des Modultyps war bei $\lambda = 790\text{nm}$ am grössten (Siehe Abbildung 1.6), was unter dem Maximum der Monokristallinen Technologie, aber deutlich über dem Maximum der amorphen Silizium-Technologie liegt.

2.1.4 Messaufbau

Die Module konnten sich nicht selbst verschatten und wurden zu den Kernzeiten, welche analysiert wurden, auch nicht von anderen Gegenständen der Freifeldprüffläche verschattet. Es sind 3 Module in jede Richtung montiert worden. Es wurden also insgesamt 9 PV-Module untersucht.

Zur Messung des Sonnenspektrums in der Horizontalen Ebene (ohne den 35° Neigungswinkel, b.z.w mit 0° Neigungswinkel) wurde ein Halbraumquarzdom mit einem Diffuser sowie ebenfalls ein Diodenpyranometer angebracht. Der Dom wurde über eine Glasfaser mit einem Gitterspektrometer verbunden und zu der Messzentrale verbunden. Damit kann man auch die gemessene Einstrahlungswerte in anderen Richtungen mit den Werten von der horizontalen Ebene vergleichen.

Zur Temperaturmessung der jeweiligen 9 Module wurden PT 100-Sensoren verwendet, welche auf der Modulrückseite, hinter einer der mittleren Zellen des Moduls, befestigt wurden.

So konnte die tatsächliche Temperatur jedes Moduls ermittelt und der gemessene Kurzschlussstrom auf den Kurzschlussstrom bei 25°C , der bei unter STC- Bedingungen ermittelt wird, rückgerechnet werden.

2.1.5 Messwiderstände

Die verwendeten handelsüblichen Messwiderstände (Shunts) wurden in geeigneten Messgehäusen montiert. Der Nennwiderstand dieser Messwiderstände beträgt $0,01\ \Omega$. Die Messwiderstände wurden kalibriert. Die größte gemessene Abweichung vom angegebenen Widerstandswert betrug $0,08\ \%$. Die Messwiderstände wurden im Gehäuse mit einer speziellen thermisch leitenden, aber elektrisch isolierenden Folie ausgekleidet. Zudem wurden die Messwiderstände in einem großen Behälter im Schatten verwahrt. So konnten die Messwiderstände vor Überhitzung geschützt werden. Der Aufbau dieser Messwiderstände sieht folgendermaßen aus: Es gibt je zwei Anschlüsse für die stromführenden Leitungen und zwei Anschlüsse, um die Spannung, die über dem Widerstand herrscht, abzugreifen. Durch das bekannte Ohmsche Gesetz, kann durch die aufgezeichnete Spannung auf den Strom rückgerechnet werden.

In Abbildung 2.2 werden also der Shuntwiderstand und der Lastwiderstand miteinander Serie mit dem jeweiligen Modul in einer Schaltung zusammengebaut. Die Spannungsmessung wird parallel zum Shuntwiderstand durchgeführt und wird mit dem Datenlogger Agilent verbunden.



Abbildung 2.1: Der Messaufbau: Der Modulständer am Dach des Gebäudes “Techbase Vienna”. [a]

Der verwendete Shuntwiderstand für die CdTe- Technologie beträgt: $R_S = 200m\Omega$, für die a- Si Technologie: $R_S = 40m\Omega$. Der verwendete Lastwiderstand für die CdTe- Technologie beträgt: $R_L = 24,28\Omega$, für die a- Si Technologie: $R_L = 1,18\Omega$. Der verwendete Shuntwiderstand für die Monokristalline-Technologie beträgt: $R_S = 10m\Omega$.

2.2 Verwendete Geräte

2.2.1 Pyranometer

Ein Pyranometer erfasst die einfallende Solarstrahlung. Das Messprinzip basiert auf den Temperaturunterschied, der bei der Erwärmung einer schwarzen und einer weißen Fläche entsteht, welche auf einer Thermosäule angebracht sind. Die Thermosäule erzeugt ein zur Einstrahlung E proportionales Spannungssignal im Millivoltbereich.

Mittels eines Pyranometers können aus den gemessenen Spannungen, die Einstrahlungswerte ermittelt werden.

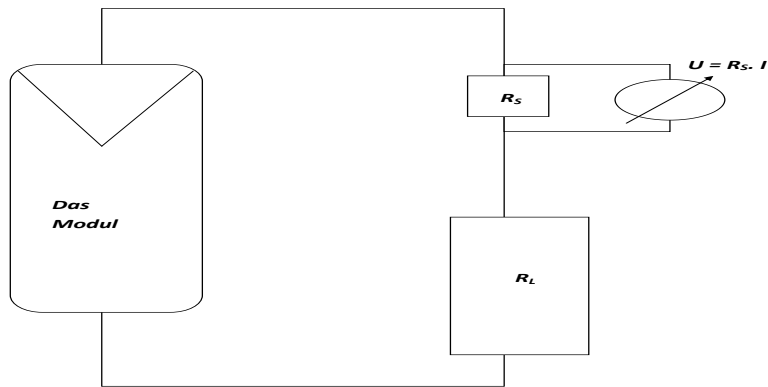


Abbildung 2.2: Die Schaltung bestehend aus dem Modul, R_S =Shuntwiderstand, R_L =Lastwiderstand, und der Spannungsmessung am R_S . Die Spannungsmessung wird weiter mit dem Datenlogger verbunden.

Die 4 Pyranometer wurden im Mai 2012 an der Universität Boden- Kultur- Wien kalibriert.

2.2.2 Spektrometer

Das HR2000+ Spektrometer wurde in einem Raum innerhalb des Gebäudes montiert. Vom Spektrometer führte ein 40 Meter langer Lichtleiter bis zum Modulständer, an welchem ein Quartzdom installiert war. Der Lichtleiter wurde an diesem Glasdom angeschraubt. Innerhalb des Glasdoms befand sich ein Kosinuskorrektor. Dieser gewährleistete, dass Strahlung aus einem Raumwinkel von 2π (entsprechend einer Halbkugel) in den Lichtleiter aufgenommen wurde. Am Ende des Lichtleiters trat die Strahlung in das Spektrometer ein. [22]

In Abbildung 2.4 ist der Aufbau des Spektrometers zu sehen, aus der der Strahlengang durch den Spektrometer und die Funktionsweise des Spektrometers ersichtlich sind.

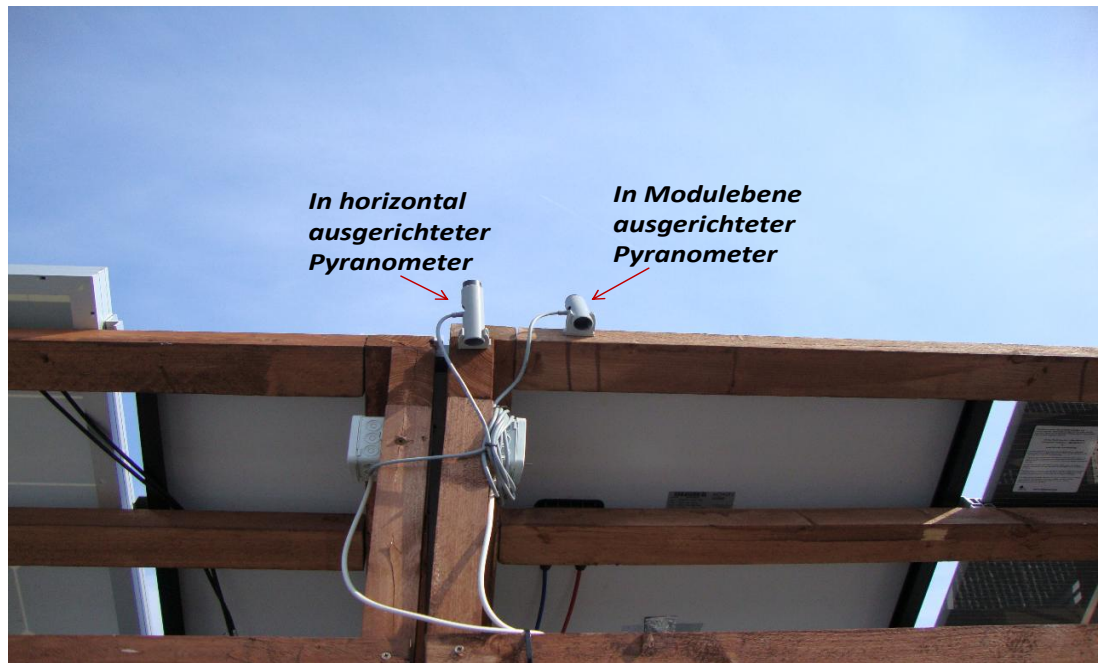


Abbildung 2.3: Die Diodenpyranometer am Dach des Gebäudes "Techbase Vienna". [a] zur Messung der einfallenden Einstrahlung.

Der CCD-Detektor (Charge- Coupled- Device) wandelt das optische Signal in ein digitales Stromsignal um. Die jeweilige Stromstärke ist proportional zur Intensität der Strahlung bei einer bestimmten Wellenlänge. Der CCD-Detektor hat 2048 Pixel und somit 2048 Kanäle. Das ergibt die Auflösung von 0,47 nm/Kanal.

Im Jahr 2010 wurde das Spektrometer kalibriert. Andreas Bamberger beschreibt in [6] den genauen Verlauf der beiden Kalibrationen des Spektrometers.

Referenz [22] beschreibt nähere Auskünfte über den Spektrometer und über die entsprechende Software (Ocean Optics Spectra Suite), die das Signal des Spektrometers verarbeitet und die Daten über den Computer speichert.

Es hat sich dann heraus gestellt, daß die Kalibrierungen der Intensitäten des Spektrometers nicht ganz korrekt waren.

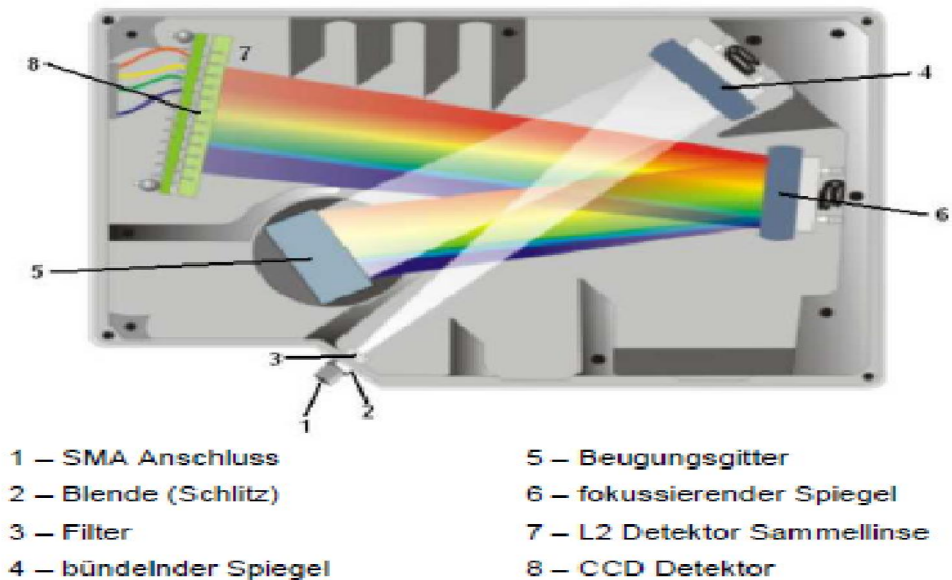


Abbildung 2.4: HR 2000+ Spektrometer von innen mit den Komponenten [22].

Die waren nicht ausreichend um die richtige Intensität für jede Wellenlänge des Spektrums aus dem Spektrometer zu liefern und die Kalibrierfaktoren waren nicht ganz korrekt:

Es wurde zunächst in absoluter Intensität der Einstrahlung gemessen. Auf die gemessenen Daten wurden dann die Kalibrier- Files verwendet.

Da die Kalibration fehlerhaft war, wurden über eine primäre Referenz-Strahlungsquelle (die sogenannte Nist- Lampe der Boku Wien ^c) die Korrekturfunktion berechnet, die auf alle gemessenen Files angewendet wurde.

Durch den Vergleich der Kalibrierkurve der AIT-Lampe und Planckkurve in einer Modellierung wurden die Abweichungen ausgewertet und die neue richtige Kalibrierfaktoren der einzelnen Wellenlängen bestimmt, aus denen das Spektrum der Kalibrierlampe und die Intensität mit der Planck´schen Kurve übereinstimmt.

^cInstitut der Meteorologie, Universität der Boden- Kultur, Peter Jordan Str. 82, 1190 Wien, Österreich;

$$I(\lambda)[Counts].K_i = I(\lambda)[W/m^2.nm]$$

Die zweite Korrektur, die mit den kalibrierten Spektrometer-Rohdaten durchgeführt werden musste, war die Korrektur der Kalibrierung der Wellenlängen und die Korrektur der daraus bestimmten Korrekturfaktoren. Die Korrekturen wurden auch im Jahr 2010 durchgeführt. Die Kalibrierung selbst wird in der Referenz [6, S33] beschrieben.

Da die Korrekturfaktoren nicht korrekt waren, wurden bei der letzten Korrektur, die richtige Korrekturfaktoren K_i bestimmt und mit den neuen K_i - Werten dann die korrigierte Intensität $I(\lambda)[W/m^2.nm]$.

Weiter wurde aus der spektral aufgelösten absoluten Intensität $E(\lambda)$ das absolute Integral E wie folgt berechnet:

korrigierter Integrand $E(\lambda)[W/m^2]$ der Intensität 's Kurve: $I(\lambda)$ gegen λ .

$$E(\lambda) = I(\lambda).\Delta\lambda = I(\lambda).(\lambda_{i+1} - \lambda_i)$$

korrigierter Integral $E[W/m^2]$ der Intensität 's Kurve.

$$E = \sum_i E(\lambda)$$

Da die Beziehung zwischen Einstrahlung und spektral-ausgelöster Einstrahlung wie folgt definiert ist:

$$E[W/m^2] = \int_0^{\infty} E(\lambda).d\lambda \quad (2.1)$$

Weiter wurde mit den kalibrierten Daten aus dem Spektrometer noch eine Korrektur durchgeführt:

Es wird bei der Spektrenanalyse nur der Wellenlängenbereich zwischen 350nm und 900nm als sinnvoll auswertbar betrachtet, da es im Spektralbereich ausserhalb dieses Bereiches starkes Rauschen gibt.

Um eine Vergleichbarkeit der errechneten E - Werte mit den Pyranometerdaten oder AM 1,5- Werten zu erreichen, musste die außerhalb des Bereichs von [350 - 900]nm liegende Intensität durch eine lineare Näherung 1. Ordnung geschätzt werden.

Im weiteren wird das Integral der Intensität ´skurve $E[W/m^2]$ im Bereich 0 bis 350 nm, mit I bezeichnet, das Integral der Kurve im Bereich 350 bis 900 nm, mit II und das Integral der Kurve im Bereich 900 bis circa. 4000 nm, mit III bezeichnet. Das Integral der Kurve beim AM 1,5 wird hier so definiert:

$$\int_0^{4000} E(\lambda)d\lambda = I + II + III \quad (2.2)$$

Bei dem linearen Korrekturfaktor liegen 71,5 % von E in II. Daraus folgt:

$$C = \frac{\int_0^{4000} E(\lambda)d\lambda}{II} \simeq 1,4 \quad (2.3)$$

Um die Einstrahlung aufgeteilt im ganzen Spektralbereich zu berechnen, muss das gemessene Integral also mit dem Wert C multipliziert werden.

Es wurde der Wert C für alle Wetterbedingungen und bei allen AM-Faktoren als ein fixer Wert angenommen.

Das Konzept der Gleichgewichtswellenlänge (λ_{ave} benannt) und ihre Berechnung wurde bereits im Kapitel 1 beschrieben.

Durch Auswertungen mittels einer am AIT [a] entwickelten Software wurden die Realdaten aus den Rohdaten wie oben beschrieben sowie die λ_{ave} -Werte berechnet.

2.2.3 Wetterstation

Eine Wetterstation der Marke DAVIS INSTRUMENTS wurde im April 2012 in Betrieb genommen und misst seither laufend. Sie misst die Umgebungs- und Klima-Parameter in Abständen von 1 Minute. Die Wind-Richtung und Wind-Geschwindigkeit, Umgebungstemperatur, relative Feuchtigkeit, Luftdruck, Gesamtniederschlag, Niederschlagsrate, UV –Strahlung, Sonnen-Einstrahlung, Luftdichte und weitere Umgebungsparameter wurden von der Wetterstation erfasst. Die führte wie alle anderen Geräte zu einer I/O –Karte und zu dem Datenlogger und wurde weiter mit dem Computer verbunden. Auf der Wetterstation- Anzeige wurden die gemessene Werte angezeigt und über eine entsprechende Software über den Computer aufgezeichnet und gespeichert.

2.2.4 I/O -Karte und Datenlogger

Alle verwendeten Geräte, bis auf das Spektrometer, wurden an eine I/O-Karte angeschlossen. Diese war mit einem Datenlogger mit der Bezeichnung 34970 A des Unternehmens Agilent verbunden. Es wurde über den ganzen Tag jede Minute eine punktweise Aufzeichnung aller Messwerte durchgeführt. Die Messung des Datenloggers und des Spektrometers waren über die Systemuhr des Steuer-PCs synchronisiert.

2.3 Datengüte

Es wurden, wie bereits beschrieben, die Modultemperaturen [$^{\circ}\text{C}$], der Kurzschlussstrom I_{SC} [A] der Module, Modul-Spannungen [V], und die Widerstände [Ω] der jeweiligen insgesamt 9 Module, außerdem die globale Einstrahlung $E[W/m^2]$ aus den 4 Pyranometer in den 4 Richtungen ausgerichtet und die Spannungen der jeweiligen Pyranometer [V] pro Minute seit Mai 2010, täglich in einer Datei gespeichert.

Aus den ausgewerteten korrigierten kalibrierten Spektrometer –Daten , wie bereits beschrieben, wurden schließlich die $\lambda[nm]$, die korrigierte Einstrahlungsintensität [$W/m^2.nm$], der Integrand der Intensität ´s Kurve $E(\lambda)[W/m^2]$, die Einstrahlung $E[W/m^2]$, und die $\lambda_{ave}[nm]$ pro Minute und seit Mai 2010, täglich in einer Datei gespeichert.

Aus der Wetterstation wurden die Umgebungsparameter pro Minute seit April 2012, monatlich in einer Datei gespeichert.

Mit Hilfe des Computer –Programms MATLAB wurden der tägliche Ablauf der Modul –Temperaturen, der Kurzschlussströme der jeweiligen 9 Module und der gemessenen Einstrahlungen aus dem Spektrometer und der gemessenen Einstrahlungen mit den Pyranometer und der Gleichgewichtswellenlänge gegen die Uhrzeit für den Zeitraum Mai2010 –Februar 2012, in jeweils einer monatlichen Übersicht zwecks Übersicht und eines klaren Vergleichs dargestellt.

Ein Beispiel davon ist die Darstellung der $E[W/m^2]$ gegen die Uhrzeit für den Monat Juli 2011 mit den Daten aus den 4 Pyranometer in Abbildung 2.5 (die Daten vom 01, 02, 03, 04, 29, 30, 31 Juli haben hier allerdings in der Datenbank gefehlt).

Um die monatlich –maximale Einstrahlung, gemessen vom Pyranometer, für jede Richtung zu bestimmen, wurde bei jeder monatlichen Darstellung (so wie in der Abbildung 2.5) ein “clear –sky ”Tag ausgesucht.

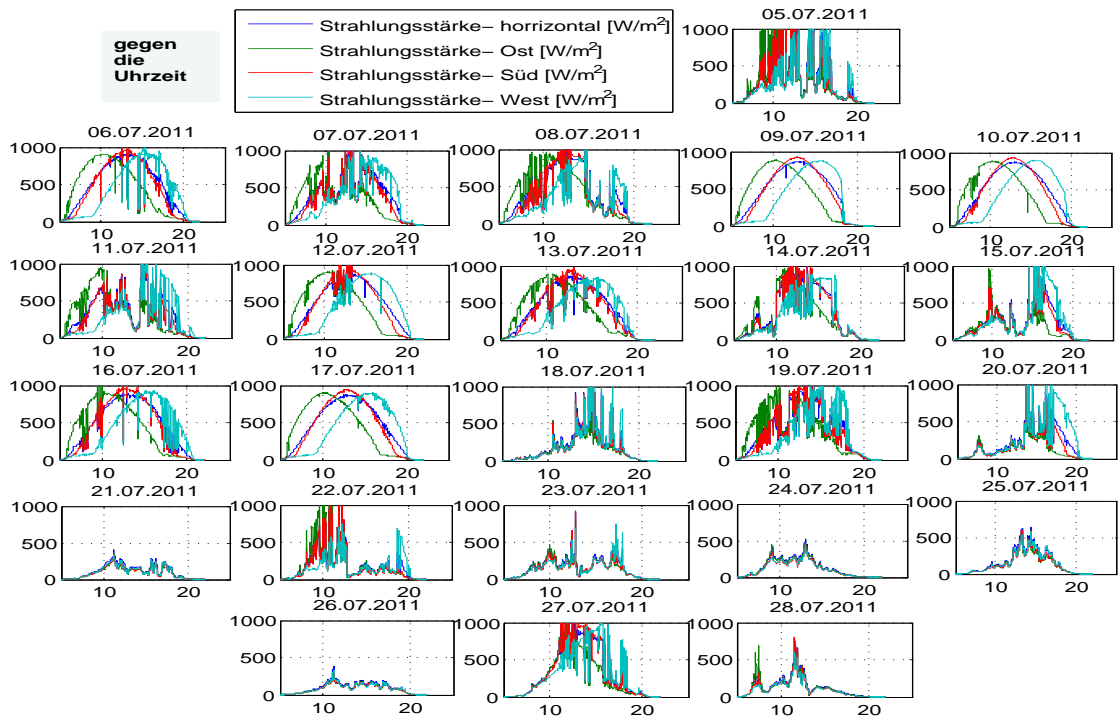


Abbildung 2.5: Der Tagesablauf der Strahlungsstärke Richtung Süden, Osten, Westen, und Horizontal für den Monat Juli 2011 mit den Daten aus den 4 Pyranometer.

“Clear –sky”Tage sind Tage mit harmonischen Einstrahlungskurven, mit durchgehendem Sonnenschein und ohne Regen und Wolken. Bei demjenigen Tag und für diejenige Richtung wurde dann der Maximal –Wert abgelesen.

2.4 Kalibrierungen

2.4.1 Kalibrierung der Pyranometer

Die 4 Dioden-Pyranometer (Ost, West, Süd, Horizontal) wurden im November 2009 und wieder im Mai 2012 bei der Universität für Bodenkultur Wien [c] kalibriert und jeweils die neue und alte Kalibrierfaktoren [$W/(m^2.mV)$] bestimmt. Mit den jeweiligen neuen Kalibrierfaktoren wurden die gemessenen Spannungswerte an den Pyranometern multipliziert und somit die korrigierten Einstrahlungswerte berechnet.

Ausrichtungen der Pyranometer	Süden	Osten	Horizontale	Westen
Kalibrierfaktoren im Jahr 2009 [$W/(m^2.mV)$]	34,429	35,311	38,674	39,128
Kalibrierfaktoren im Jahr 2012 [$W/(m^2.mV)$]	40,040	43,635	45,527	45,527
Abweichung (Verschlechterung) [%]	14%	19%	15%	17%

Tabelle 2.1: Übersicht der Kalibrierfaktoren der 4 Pyranometer und ihre Verschlechterung von November 2009 bis Mai 2012.

Um festzustellen, wie sich der Kalibrierfaktor innerhalb dieses Zeitraums geändert hat, wurden die monatlich maximale Einstrahlungswerte in jede der 4 erwähnten Richtungen von der Website eines meteorologischen Profils des PVGIS [23] bestätigt vom JRC und European Commission, für die Monate Jänner bis Dezember entnommen. Die monatlich maximale Einstrahlungswerte aus den 4 Pyranometer wurden so wie bereits beschrieben bestimmt. Aus allen diesen Daten wurden für alle Monate Mai 2010 bis Februar 2012, das Verhältnis

$$\frac{E[W/m^2](PVGIS)}{E[W/m^2](Pyranometer)}$$

berechnet und für jede Richtung gegen die Zeit aufgetragen. Damit konnte bestimmt werden ob sich die gemessenen Einstrahlungswerte aus den Pyranometer kontinuierlich oder sprunghaft geändert haben. Es hat sich gezeigt

daß sich dieses Verhältnis für alle Richtungen innerhalb der Zeit Mai 2010 bis Februar 2012 nahezu linear geändert hat. Ein dargestelltes Beispiel für die Richtung Süden sieht man in Abbildung 2.6.

Da es angenommen werden konnte daß sich die Kalibrierfaktoren mit einem linearen Verlauf geändert haben, haben sich die monatliche Faktoren (als monatlicher Mittelwert) berechnen lassen, siehe dazu die Abb.2.7 . Es wurde für jeden Monat vom Mai 2010 bis Februar 2012 ein monatlicher Kalibrierfaktor bestimmt, der für den ganzen Monat gilt, da die Änderung innerhalb eines Monats sehr gering und vernachlässigbar war. Der alte und neue Faktor wurde jeweils für jede Richtung dargestellt, siehe dazu die Abb.2.7 .

2.4.2 Kalibrierung und Bestimmung der Alterung der Module

Im April 2012 wurden die 9 Module auf dem Modulständer auf dem Dach des Gebäudes "Techbase Vienna " abmontiert. Alle 3 'Süd '-Module wurden zur Präzisionskalibration auf einen manuellen Tracker auf dem Dach gebracht und wurden im freien unter der Sonneneinstrahlung "outdoor " kalibriert. Die 6 'West ' und 'Ost '-Module wurden zur Leistungsmessung und zur Messung der Kennlinien und zur Kalibration unter den STC -Bedingungen ins Labor des Gebäudes "Techbase Vienna " gebracht und "indoor " kalibriert. Die 3 Süd -Module wurden auch nach circa. 6 Wochen zur Leistungsmessung und zur Messung der Kennlinien und zur indoor -Kalibration ins Labor gebracht. Letztes Mal waren die 9 Module im Jahr 2009 kalibriert worden.

In den Referenzen [24, 25] sind das genaue Verfahren aller PV -Modul -Kalibrationen beschrieben.

Durch die Modul -Kalibrationen wurden die neuen und alten Werte für alle Modulparameter b.z.w für I_{SC} [A] , U_{OC} [V] , FF[%] , P_{MPP} [W] , I_{MPP} [A] und U_{MPP} [V] der jeweiligen Module und ihre Abweichungen innerhalb des Zeitraumes bestimmt.

Es wurden auch Elektrolumineszenz- Messungen (Bestimmung der optischen Alterung der 9 PV -Module) durchgeführt. Ein Beispiel dafür ist der Vergleich des optischen Zustands eines CdTe -Moduls (auf dem Dach nach Westen gerichtet) nach 2 Jahren. Es ist in der Abbildung 2.8 zu sehen, daß sich das Modul innerhalb der 2 Jahren verändert hat.

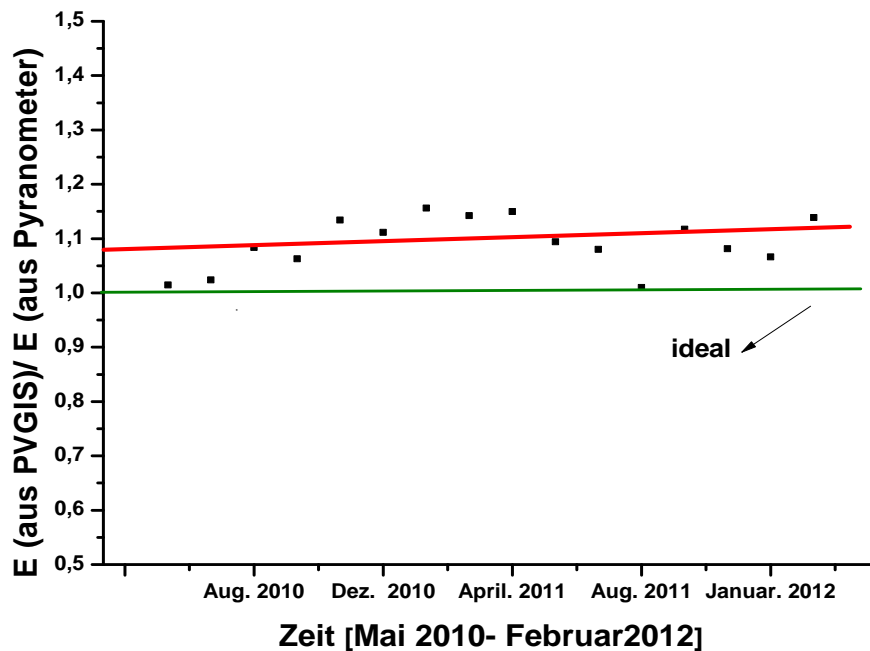


Abbildung 2.6: Die monatliche Änderung der Abweichung der Einstrahlungswerte aus den Pyranometer und aus dem PVGIS für die Richtung Süden. Die Änderung ist linear.

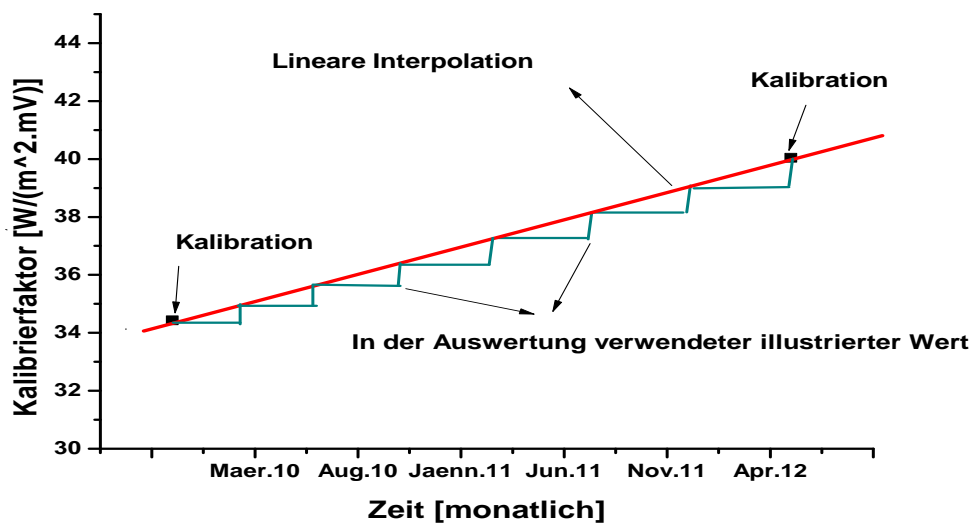


Abbildung 2.7: Die alte und neue Kalibrierfaktoren des Pyranometers für Richtung Süden.

Monokristalline			
Modulparameter	Im Jahr 2009	Im Jahr 2012	Abweichung [%]
I_{SC} [A]	8,52	8,4	-1,41
U_{OC} [V]	35,70	35,6	-0,28
FF [%]	74,14	73,76	-0,51
P_{MPP} [W]	227,70	221,8	-2,59
I_{MPP} [A]	7,96	7,89	-0,88
U_{MPP} [V]	28,38	28,09	-1,04
a- Si			
Modulparameter	Im Jahr 2009	Im Jahr 2012	Abweichung [%]
I_{SC} [A]	7,51	6,48	-13,72
U_{OC} [V]	24,7	23,06	-6,63
FF [%]	71,8	64,50	-10,17
P_{MPP} [W]	103	96,99	-5,83
I_{MPP} [A]	6,76	5,46	-19,23
U_{MPP} [V]	20,25	17,70	-12,59
CdTe			
Modulparameter	Im Jahr 2009	Im Jahr 2012	Abweichung [%]
I_{SC} [A]	1,2	1,21	0,83
U_{OC} [V]	90,4	88,88	-1,68
FF [%]	63,4	60,95	-3,86
P_{MPP} [W]	68,8	65,96	-4,13
I_{MPP} [A]	0,95	1,02	7,37
U_{MPP} [V]	65,5	64,5	-1,53

Tabelle 2.2: Übersicht der Modulparameter der 3 untersuchten Technologien und ihre Abweichungen vom Jahr 2009 bis Juni 2012.

Die Bilder in Abbildung 2.8 sind bei verschiedenen Bedingungen aufgenommen worden: a) unter 0,1A zugeführtem Strom und 200s Beleuchtungszeit. b) unter 0,15A zugeführtem Strom und 180s Beleuchtungszeit. Das Bild a) wurde unter schlechtem Fokus, das Bild b) aber mit einer anderen Kamera und unter günstigerer Beleuchtungszeit und gutem Fokus aufgenommen.

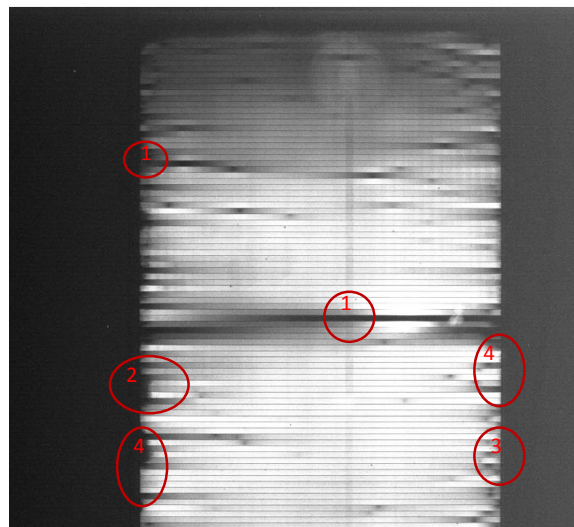
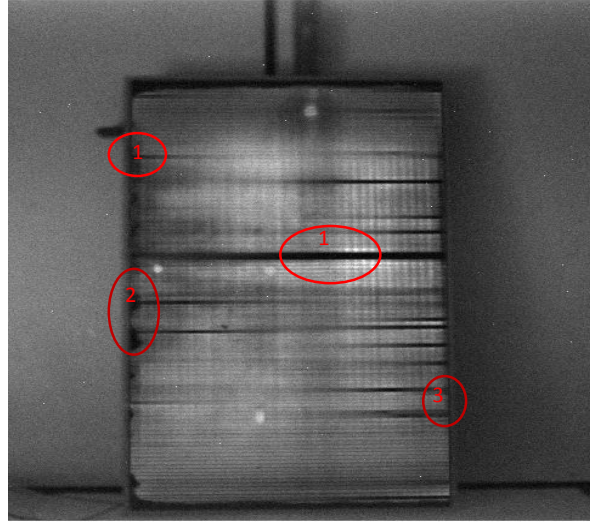


Abbildung 2.8: Elektrolumineszenz mit einem CdTe- Modul nach Westen gerichtet: a) (oben) im Jahr 2009. b) (unten) im Jahr 2012.

Punkte 1 wurden im a) wegen schlechterem Kontrast stark überbetont. Bei den Punkten 2 und 3 sind die Fehler im a) und b) identisch. Punkte 4 sind neue Fehler im b) und von Kontrastunterschieden innerhalb Zellen zum Rand hin verstärkt. Siehe auch dazu die

Tabelle 2.2.

2.5 Abschätzen der Fehlerquellen

Die Messung des Kurzschlussstroms der Module war mit einem sehr geringen relativen Fehler von kleiner als 0,1% verbunden. Die größte gemessene Abweichung vom angegebenen Mess –Widerstandswert betrug 0,08 %. Die Messunsicherheit handelsüblicher Temperatursensoren zur Messung der Modultemperaturen lag unter 1°C. Die Schwankung des Aufzeichnungsintervalls des Datenloggers war im Wesentlichen durch die Verzögerung des seriellen Auslesens der Anschlüsse des Datenloggers mit circa. 2 –3 s auf allen Kanälen gegeben.

Der absolute Fehler des Pyranometers kann bei einer Einstrahlungsleistung von 1.000 [W/m^2] bis zu $\pm 10W/m^2$ (1%) abweichen. Bei der Wetterstation war das Aktualisierungsintervall der Wettervariablen der darin integrierten Sensoreinheit durchschnittlich 10s.

Die Präzisionsmessung der outdoor –Kalibration der Module ist mit circa. 2,5% Fehler verbunden. Die indoor –Kalibration der Module unter den STC –Bedingungen ist auch immer mit einem geringen relativen Fehler von unter 1% verbunden, da die Temperatur bei der Messung sehr leicht um 25°C und die Einstrahlung sehr leicht um 1000 [W/m^2] schwankt.

Die Berechnung der monatlichen Kalibrierfaktoren für die 4 Pyranometer war die nächste Fehlerquelle, da sich der Kalibrierfaktor innerhalb der ganzen Zeit in der Wahrheit nicht mit einer linearen Funktion geändert hat, sondern mit einem relative linearen Verlauf.

Die Bestimmung von neuen Kalibrierfaktoren und Korrekturfaktoren bei den Korrekturen der kalibrierten Spektrometer –Rohdaten ist auch mit einem gewissen Fehler verbunden.

Bei der 3ten letzten Korrektur der Spektrometerdaten ist die Annahme daß der fixe Wert C für alle Wetterbedingungen gelten würde, nicht ganz korrekt. Im Kapitel Ergebnisse wird beschrieben, daß sich der Wert von λ_{ave} bei verschiedenen Wetterbedingungen und am wichtigsten beim unterschiedlichen Maß der relativen Luftfeuchtigkeit ändert. Die Korrektur ist deshalb fürs Spektrum AM 1,5 korrekt. Für die spektrale Outdoor- Messungen stimmt aber die Annahme, daß die Fläche I bis III, der Fläche der Kurve beim AM 1,5 ähnlich wäre, nicht mehr (wegen spektralen Verschiebungen). Der aus diesem Grund eingeschätzte Fehler für die berechnete Einstrahlungswerte lag bei 4 –5% Abweichung von Pyranometer- Werten.

Kapitel 3

Auswertungen und Ergebnisse

3.1 Methoden der Auswertungen

Es wurde untersucht ob die relative Luftfeuchtigkeit und die Modulparameter, oder die relative Luftfeuchtigkeit und die Umgebungsparameter miteinander in Beziehung stehen.

Die Auswertungen und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen wurden für die gesuchte Korrelationen in 2 Haupt –Reihen durchgeführt.

Die Auswertung wurde anhand dreier charakteristischer Tag-Typen durchgeführt, an denen die Einstrahlungsverhältnisse möglichst verschieden waren um die gesuchte Korrelationen bei unterschiedlichen Wetterbedingungen zu untersuchen(an Tagen mit durchgehendem Sonnenschein “clear sky”,also an den Tagen ohne Wolken und Regen, mit harmonischen Einstrahlungskurven auf den monatlichen Übersichten, an teilweise bewölkten Tagen mit sehr unharmonischen Einstrahlungskurven, mit wechselnden Einstrahlungswerten und an Regentagen mit den durchgehend niedrigen Einstrahlungskurven, wo aber die Einstrahlung nicht niedriger war als $150 [W/m^2]$).

(1) Es wurde dann nach weiteren Auswertungen der Zeitraum März 2011 bis Juni 2011 mit durchgehender Datenlage für die erste Reihe der Auswertungen ausgewählt.

Als Daten für die relative Luftfeuchte (RH = relative humidity) wurden für die ersten Auswertungen die Werte aus 200-Meter Höhe eines meteorologischen Tages- höhenprofiles, für Radiosondendaten von Wien und dem Rest der Welt [26] ^d herangezogen. Für die weitere Auswertungen wurden die RH Werte aus 200 bis 3000 Meter Höhe desselben Tageshöhenprofiles her-

^dUniversity of Wyoming, online unter: <http://www.uwyo.edu/>

angezogen. Die anderen Umgebungs und Modulparameter wurden aus den Tagesgängen entsprechend mit dem 13h (Ortszeit Wien) Momentanwert für eine Auswahl an Tagen je Tagesklasse ausgesucht.

Weiters wurden die Werte der absoluten Luftfeuchtigkeit (Fa), entlang der Atmosphäre (bis zu der Höhe, auf der je welche Feuchtigkeit vorhanden war, meistens bis zur 10.000 –15.000m Höhe) aus demselben Tageshöhenprofile entnommen. Aus den RH –Werten von 200 bis 3000m Höhe und Fa –Werten von 200m bis zur höchsten feuchtebesitzenden Höhe wurde jeweils der Mittelwert berechnet. Es wurde das gewichtete arithmetische Mittel der Werte als der hier sinnvolle Mittelwert ausgewählt. Da die entnommene Feuchtwerte den verschiedenen Höhen zugeordnet waren, und damit den verschiedenen Luftdrücken, Luftdichten und Temperaturen, sollte bei der Berechnung des Mittelwerts die Höhe einbezogen werden. Da aber die sehr große Höhen in der Berechnung nicht überschätzt werden sollten und nicht einen zu großen Einfluss auf den Mittelwert haben sollten, wurde $\Delta H = H_i - H_{i-1}$ als Gewichtung verwendet, also die Differenz 2er aufeinander folgenden Höhen, von denen die Feuchtwerte entnommen wurden. i ist der Index derjenigen Höhe beginnend bei $H_{200} = 200m$. Diese Differenz war nicht durchgehend gleich und wurde mit größeren Höhen immer größer. Bei niedrigeren Höhen war die circa. 100m, bei größeren Höhen circa. 600m. Die Formeln zur Berechnung des Mittelwerts der Feuchtwerte aus dem Höhenprofile lauten also:

$$\bar{RH} = \frac{\sum_{i=200} RH_i \cdot (H_i - H_{i-1})}{\sum_{i=200} (H_i - H_{i-1})} \quad (3.1)$$

$$\bar{Fa} = \frac{\sum_{i=200} Fa_i \cdot (H_i - H_{i-1})}{\sum_{i=200} (H_i - H_{i-1})} \quad (3.2)$$

(2) Anhand einer Wetterstation wurden wie bereits im letzten Kapitel beschrieben von April 2012 laufend alle Wetterfaktoren und die relative Feuchtigkeit (RH) auf der Boden –Höhe (170m über Meereshöhe) direkt am Ort im Gebäude “Techbase Vienna ”[a] im 1 Minutenintervall gemessen. Aus den Daten aus der Wetterstation wurden dann die dazugehörige Werte der absoluten Feuchtigkeit auf der Boden Höhe berechnet. Für den zweiten Teil der Untersuchungen, wurden mehrere Tage vom Juli 2012 wiederum aus der Tagesklassifikation ausgesucht. Es wurden die Daten vom täglichen Verlauf von 9h bis 17h pro Minute für die ausgesuchte Tage verwendet und die Korrelationen untersucht und analysiert.

Weitere Methodik: Es wurden bei jeder Reihe der Auswertungen die Korrelationen zwischen mehrerer Modul und Umgebungsparameter für die oben beschriebenen Klassifikation und die ausgewählten Tage untersucht und analysiert. Vor allem die Korrelation zwischen I_{SC} , RH, Fa, E und der Gleichgewichtswellenlänge haben interessante Ergebnisse geliefert. Dabei sollte bei der Analyse, nicht der absolute Stromwert der Module miteinander verglichen werden, sondern die relative Änderung des Stromwerts zu einem festgelegten Bezugspunkt, der hier als Kurzschlussstrom der jeweiligen Module unter den Standardbedingungen also I_{STC} gewählt wurde. Also für die gesuchte Korrelationen wurde der Parameter $\frac{I_{SC}}{I_{STC}}$ verwendet.

Es wurde dann die Stromumwandlungseffizienz der untersuchten Module κ laut folgender Formel berechnet:

$$\kappa = \frac{\left(\frac{I_{SC}}{E_{EXP}}\right)}{\left(\frac{I_{STC}}{E_{STC}}\right)} \quad (3.3)$$

Wobei $E_{STC} = 1000[W/m^2]$, und I_{STC} der Kurzschlussstrom unter STC –Bedingungen aus den aktuellen Kennlinien –Messungen der Module bekannt war. E_{EXP} war die gemessene Einstrahlung aus den kalibrierten Pyranometer in Modulebene.

Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit, die Korrelation zwischen κ und Luftfeuchtigkeit ist, wurden die Korrelationen mit κ untersucht und analysiert. Es wurde außerdem die Stromumwandlungseffizienz der Dünnschicht –Module auf die Stromumwandlungseffizienz des Monokristalline –Moduls normiert und die Verhältnisse $\kappa(CdTe)/\kappa(Mono)$ und $\kappa(a-Si)/\kappa(Mono)$ zwecks eines genauen Vergleichs der Feuchte –Abhängigkeit der Stromumwandlungseffizienz der jeweiligen Technologien berechnet und ihre Korrelationen mit RH und Fa dargestellt.

In der Referenz [27] wird die genaue Berechnung des AM –Faktors beschrieben, dessen Korrelationen auch untersucht wurden.

Für den Kurzschlussstrom der Module standen die Daten der Module in 3 Richtungen ausgerichtet wie bereits im letzten Kapitel beschrieben zur Verfügung. Für alle Auswertungen und Untersuchungen wurde die Richtung Süden ausgewählt, da diese für den Gesamtertrag einer PV- Anlage am aussagekräftigsten ist. Durch 2 Simulationen wurden die theoretischen Werte der Feuchteabhängigkeit mit den ausgewerteten Korrelationen verglichen.

Die Korrelationsanalyse untersucht lineare statistische Zusammenhänge zwischen zwei oder mehr Variablen. Es wird analysiert, ob ein Zusammenhang besteht und wie stark dieser Zusammenhang ist.

Zwecks genauer Bestimmung des Korrelationsgrades der Parameter, wurde das Korrelationsmass (r) verwendet. *Korrelationsmass*; ist ein Maß, mit dem in der Korrelationsanalyse die "Stärke" eines Zusammenhangs (Korrelation) zwischen zwei Variablen gemessen werden kann. Ein aus einer Zufallsstichprobe berechneter Korrelationskoeffizient stellt jeweils eine Punktschätzung für den entsprechenden Koeffizienten in der Grundgesamtheit dar.

Es wurde Referenz [28] zur Korrelationsanalyse für die Auswahl des passenden Korrelationskoeffizientes verwendet.

Nach dem empirischen Korrelationskoeffizient, wenn (x_i, y_i) die n beobachteten Wertepaare zweier Variablen sind, ist der Korrelationskoeffizient durch:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.4)$$

definiert, wobei \bar{x} und \bar{y} die arithmetischen Mittel der Werte der beiden Variablen bezeichnen. [28] Der empirische Korrelationskoeffizient ist ein Maß für die relative Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs zwischen den Variablen x und y . Er kann alle Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen. Bei $r < 0$ spricht man von negativer Korrelation und bei $r > 0$ von positiver Korrelation.

In allen linearen Regressionen in diesem Kapitel, besitzen die RH die Einheit [%], die E die Einheit $[W/m^2]$, κ [-], und die λ_{ave} die Einheit [nm].

3.2 Auswertungen und Ergebnisse der Daten des ausgewählten Zeitraums März 2011 bis Juni 2011

3.2.1 Auswertungen anhand der Daten der relativen Luftfeuchtigkeit auf 200 m Höhe (über Meereshöhe)

Als Daten für die relative Luftfeuchte (RH = relative humidity) wurden, wie bereits erwähnt, für die ersten Auswertungen die Werte aus 200 –Meter Höhe eines meteorologischen Tages –höhenprofiles, für Radiosondendaten von Wien und dem Rest der Welt [26, d] herangezogen. Die Korrelationen der Umgebungs und Modul –Parameter und der entsprechenden RH –Werten wurden dann analysiert.

In Abbildung 3.1, ist die Abhängigkeit der RH (200m) von E dargestellt. Die lineare Regression ergibt : $RH(\text{auf } 200\text{m Höhe}) = (-4,9 \pm 0,5) * 10^{-2} * E + (91 \pm 4)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,94$. Die relative Luftfeuchtigkeit auf 200m Höhe und die Einstrahlung korrelieren also wie erwartet sehr stark miteinander und es besteht eine negative Korrelation. Das bedeutet daß die relative Feuchte die Absorption der einfallenden Sonnen –Einstrahlung sehr stark beeinflusst und damit auch stark beeinflusst, wie intensive die Einstrahlung ist, die am Boden ankommt.

In Abbildung 3.2, ist die Abhängigkeit der λ_{ave} von RH(200m) dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (-0,3 \pm 0,1) * RH(\text{auf } 200\text{m Höhe}) + (594 \pm 7)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,6$. Die Gleichgewichtswellenlänge und die relative Luftfeuchtigkeit auf der (fast) Bodenhöhe korrelieren also miteinander und es besteht eine negative Korrelation. Das bedeutet daß die Gleichgewichtswellenlänge mit zunehmender RH weiter in den Bereich des kurzwelligen Spektrums verschoben wird und bei unterschiedlichen RH –Werten auf jeden Fall nicht konstant bleibt.

In Abbildung 3.3, ist die Abhängigkeit der λ_{ave} von E dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (5 \pm 4) * 10^{-3} * E + (572 \pm 3)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,37$. Die Gleichgewichtswellenlänge und die Einstrahlung korrelieren schlecht miteinander. Bei unterschiedlichen Einstrahlungs –Werten bleibt aber die Gleichgewichtswellenlänge auf jeden Fall nicht konstant.

Bei hoher RH wäre die λ_{ave} weiter im kurzwelligen Bereich und die durchschnittlich benötigte Photon –Energie der Einstrahlung (die dann in den PV –Modulen zur Stromproduktion benötigt wird) laut Formel 1.13 höher. Die Einstrahlung selbst ist bei hoher RH sehr niedrig. Da aber λ_{ave} und E miteinander nicht direkt korrelieren, wäre also die Messung der relativen Feuchte ein geeigneter Mittel, um den Wert und die Verschiebung der

Gleichgewichtswellenlänge einzuschätzen.

In Abbildung 3.4, ist als Beispiel die Abhängigkeit des Kurzschlussstroms der Technologie "Schott" von λ_{ave} und auch im Zusammenhang mit RH (auf 200 m Höhe) dargestellt. I_{SC} steigt mit steigender λ_{ave} . Bei hoher λ_{ave} und der daraus niedrigeren durchschnittlich benötigten Photon –Energie der Einstrahlung laut Gleichung 1.13, steigt die Stromproduktion des PV –Moduls. In Abbildung 3.4 ist durch den direkten Vergleich der 3 aufgetragenen Parameter deutlich zu sehen, daß wie erwartet die Stromproduktion mit sinkender RH steigt.

In Abbildung 3.5, ist die Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} der 3 untersuchten Technologien: First, Schott und Solarwatt von RH (auf der 200m Höhe) dargestellt. Der Korrelationskoeffizient der Technologie "First" beträgt hier $r = -0,67$, der Technologie "Schott" $r = -0,66$, und der Technologie "Solarwatt" $r = -0,68$. Die Stromproduktion aller 3 Technologien korreliert also sehr stark mit RH und die Stromproduktion aller 3 Technologien korreliert gleich stark mit RH und es besteht wie erwartet eine negative Korrelation.

In Abbildung 3.5 haben die Korrelationen zwischen I_{SC}/I_{STC} und der relativen Luftfeuchtigkeit aller Technologien einen ähnlichen aber nicht ganz identen Verlauf. Es wird aber nicht die Korrelation zwischen I_{SC} und RH direkt gesucht, weil I_{SC} je Technologie stark unterschiedlich ist, und relative Technologieunterschiede so nicht sichtbar werden. Weil aber bei jeder Technologie ein anderer Teil des Sonnenspektrums am meisten zur Stromproduktion beiträgt, ergeben sich die beobachteten Unterschiede. Das, da weiter RH die Stärke der Streuung und der Absorption des Lichtes beeinflusst und damit bewirkt, welcher Teil des Spektrums am meisten am Boden ankommt. Folglich wird also das Verhältnis vom I_{SC} zu einem Bezugspunkt (hier der jeweilige I_{STC}) berechnet und dann die Korrelation zu RH bestimmt. Insgesamt sinkt die Stromproduktion jeder Modultechnologie mit steigender RH.

In Abbildung 3.6 ist die Abhängigkeit der κ von RH(200m) dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\kappa = (25 \pm 5) * 10^{-4} * RH$ (auf 200m Höhe) $+ (0,92 \pm 0,03)$ für die Technologie First. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,77$. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie Schott ist $r = 0,76$. Die lineare Regression: $\kappa = (32 \pm 7) * 10^{-4} * RH + (0,95 \pm 0,04)$. Und der Korrelationskoeffizient für die Technologie Solarwatt ist $r = 0,65$. Die lineare Regression: $\kappa = (8 \pm 2) * 10^{-4} * RH + (1,11 \pm 0,01)$. Die relative Luftfeuchtigkeit auf der (fast) Bodenhöhe und die Stromumwandlungseffizienz der 2 Dünnschicht –PV –Module korrelieren also stark miteinander und die beiden Dünnschicht –Technologien korrelieren fast gleich stark mit RH und es besteht unerwartet eine positive Korrelation. Die relative Luftfeuchtigkeit auf

der (fast) Bodenhöhe und die Stromumwandlungseffizienz der Monokristalline –PV –Technologie korrelieren miteinander. Diese Korrelation ist deutlich kleiner als bei den Dünnschicht –Technologien und es besteht auch unerwartet eine positive Korrelation.

Die Stromumwandlungseffizienz jeder Modultechnologie steigt mit steigender RH. Diese Steigung ist laut angegebener linearen Regressionen sehr klein und bei der monokristallinen Technologie am geringsten. Bei den Dünnschichttechnologien ist die Steigung 3 bis 4 mal größer als bei der monokristallinen Technologie. Es ist allerdings überraschend, dass es an Tagen, wo die vorhandene Wassermenge in der Luft relativ hoch ist, zu einer erhöhten Stromumwandlungseffizienz aus den PV-Modulen führen kann. Es ist aber aus dem Verhalten von λ_{ave} in Abhängigkeit von RH, der E in Abhängigkeit von RH, und der (I_{SC}/I_{STC}) in Abhängigkeit von RH erklärbar. Ein ähnliches Ergebnis wurde von Mohring [29] beobachtet. Der hat beobachtet daß es im Bereich der niedrigen E von circa 300 bis 400 [W/m^2] die Stromumwandlungseffizienz mit steigender RH steigen würde (für ganz geringe E von $E < 150$ [W/m^2] würde κ aber gegen Null sinken). Zu beachten ist, dass Werte mit $E < 150 W/m^2$ nicht berücksichtigt wurden.

Wie bereits erwähnt, führt es beim kurzwelligen Licht, durch die Absorption durch den Wasserdampf am wenigsten zur Einstrahlung´s –Schwäche oder Einstrahlung´s –Extinktion (siehe Abbildung 1.9). Und das kurzwellige Licht wird stärker gestreut, als das langwellige und außerdem wird beim größeren AM –Faktor mehr kurzwelliges Licht gestreut als langwelliges. Es wird also bei hoher RH mehr langwelliges Licht absorbiert und mehr kurzwelliges gestreut, es gibt also bei höherer Luftfeuchte mehr kurzwelliges Licht als langwelliges. Da die spektrale Empfindlichkeit (SR) der Technologie Schott ihr Maximal bei $\lambda = 621nm$ hat (also relative zu den beiden anderen untersuchten Technologien im kurzwelligeren Bereich), ist diese Technologie beim Streulicht (hoher RH) am effizientesten und die lineare Regression (κ gegen RH) hat die höchste Steigung. Da die spektrale Empfindlichkeit (SR) der Technologie First ihr Maximal bei $\lambda = 790nm$ hat (also relative zu den beiden anderen untersuchten Technologien im mittelwelligen Bereich), ist diese Technologie beim Streulicht (hoher RH) auch effizient (nicht ganz so wie Schott) und die lineare Regression (κ gegen RH) hat die mittlere Steigung. Da die spektrale Empfindlichkeit (SR) der Technologie Solarwatt ihr Maximal bei $\lambda = 900nm$ hat (also relative zu den beiden anderen untersuchten Technologien im langwelligeren Bereich), ist diese Technologie beim Streulicht (hoher RH) viel weniger effizient und die lineare Regression (κ gegen RH) hat die niedrigste Steigung. Da bei dieser Reihe der Auswertungen, die Stromumwandlungseffizienz der 3 Technologien circa. zwischen 1 und 1,2 liegt, haben alle 3 Technologien in dem Zeitraum März 2011 bis Juni 2011

eine hohe Effizienz besessen.

Da sich die κ nach Gleichung 3.3 aus der Multiplikation der Stromproduktion (I_{SC}/I_{STC}) und der Einstrahlung E (normiert auf die Einstrahlung unter den STC –Bedingungen) ergibt, und die beiden Parameter, wie schon bereits beschrieben, mit RH negative korrelieren, und die beiden Parameter miteinander positive korrelieren würden, korreliert κ als die Multiplikation der beiden mit einem weiteren Parameter positive. Daraus steigt κ aller 3 Technologien mit steigender RH.

Abbildung 3.7 zeigt das Verhältnis

$$\frac{\kappa_{Duenschicht}}{\kappa_{Monokristalline}}$$

relative zu der RH auf der 200m Höhe. Das liegt im Bereich zwischen 0.9 und 1.0. Das bedeutet dass κ der verschiedenen Technologien relative zu RH sehr gering voneinander abweichen. Die Abweichung der κ_{a-Si} von κ_{Mono} ist allerdings kleiner als die Abweichung der κ_{CdTe} von der κ_{Mono} . Die Änderung dieser Abweichung ist aber bei $a-Si$ größer als bei $CdTe$. Die Abweichungen der Dünnschichttechnologien von der monokristallinen Technologie sowie die Abweichungen voneinander sind im Wesentlichen auf die Unterschiede der SR der jeweiligen Technologien zurückzuführen.

Um festzustellen, ob die gemessenen Einflüsse nur von RH verursacht wurden, oder möglicherweise auch anhand einer AM- Abhängigkeit, hervorgerufen durch den langen untersuchten Zeitraum, wurde der AM- Faktor untersucht.

In Abbildung 3.8 ist die Abhängigkeit des AM- Faktors von der Tag-Nummer dargestellt. Der AM –Faktor korreliert mit der Tag –Nummer im Jahr von März bis Juni am Ort der Messung (Stadt Wien) und sinkt vom März bis Juni immer. Das bedeutet daß die Sonne immer weiter senkrechter über dem Ort steht und der Weg der Einstrahlung entlang der Atmosphäre kürzer wird. Das Ziel war dann in Abbildung 3.9 zu bestimmen ob diese weiter sinkende AM –Faktoren (während der untersuchten Zeit) mit RH (fast auf Bodenhöhe) korrelieren. Wenn ja, könnten die bereits definierte Korrelationen mit RH zum Teil des AM –Faktors und der Sonnenhöhe zugeschrieben werden oder könnten einfach nur mit der dazugehörigen Sonnenhöhe begründet werden. Da es aber auf der Abbildung 3.9 eindeutig nicht so ist (AM –Faktor und RH korrelieren nicht miteinander), sind die bereits definierte Korrelationen den Änderungen der relativen Luftfeuchte selbst zuzuordnen.

Die Zunahme b.z.w Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit steht eher mit der Stärke des Luftdrucks, des Wasserdampfdrucks in der Luft, des Sättigungsdampfdrucks in der Luft bei verschiedenen Höhen und in verschiedenen Orten in der Atmosphäre u.s.w, in einer Beziehung. Deshalb steht die mit dem AM- Faktor, wie es in Abbildung 3.9 zu sehen ist, nicht unmittelbar und zwanglos in einer Beziehung.

Bisher konnte also aus den Auswertungen gezeigt werden, dass:

Die Korrelation von RH und unterschiedlichen Modulparametern sowie Umgebungsvariablen deutlich beobachtbar sind.

Für die untersuchten Dünnschichttechnologien stärker mit RH steigt, als für die monokristalline Technologie.

Für die untersuchten Dünnschichttechnologien untereinander sich deutlich unterscheidet, je nach der spezifischen SR.

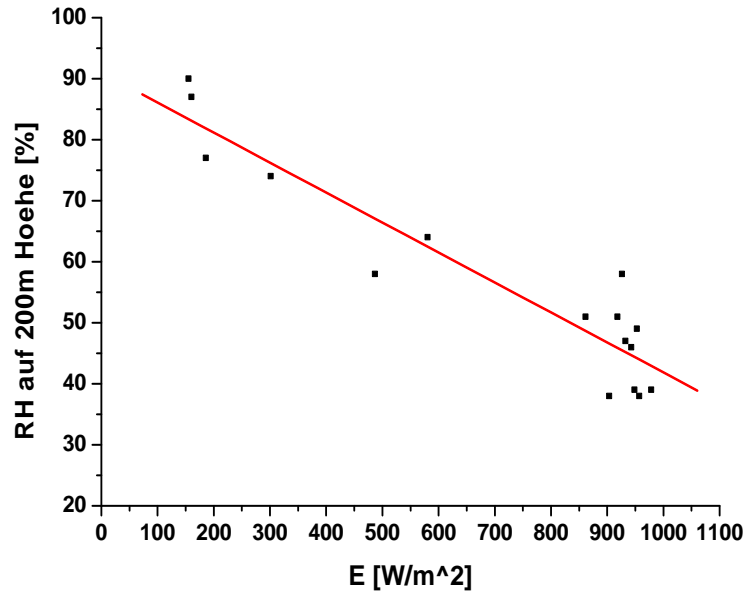


Abbildung 3.1: Korrelation zwischen RH[%] auf 200m Höhe (aus den Daten des meteorologischen Tageshöhenprofiles) und der Einstrahlungsstärke. Die Linie ist die lineare Regression.

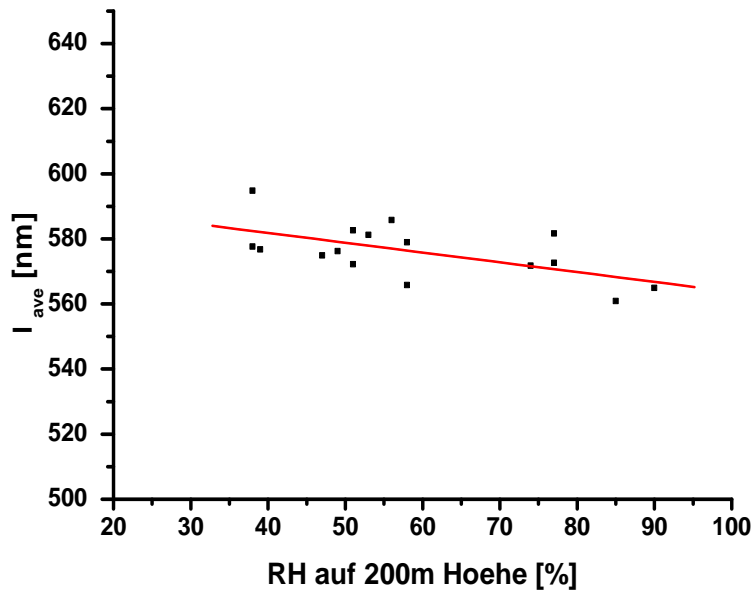


Abbildung 3.2: Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der RH auf 200m Höhe. Die Linie ist die lineare Regression.

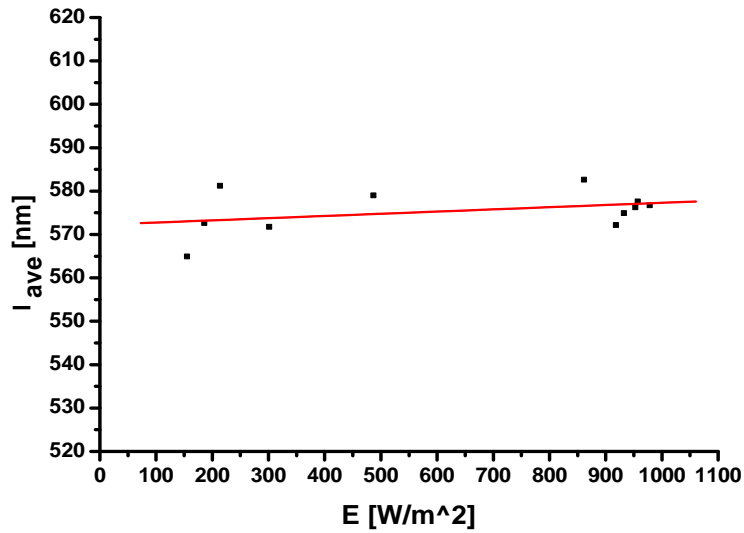


Abbildung 3.3: Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der Einstrahlungsstärke. Die Linie ist die lineare Regression.

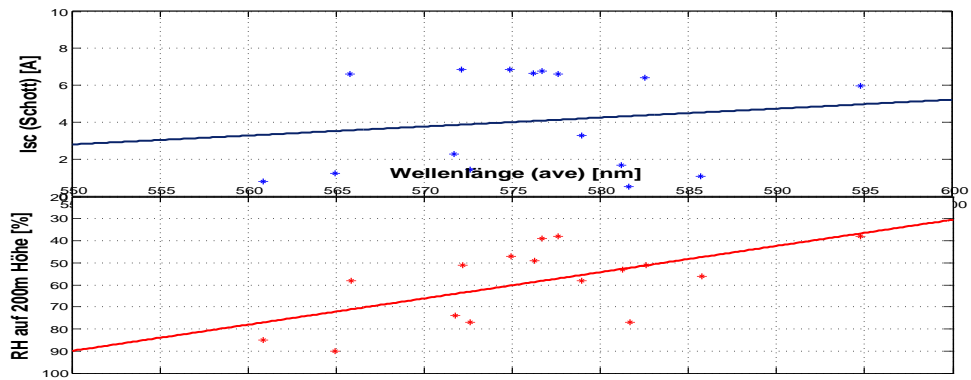


Abbildung 3.4: Korrelation zwischen I_{SC} (Schott)[A] und RH auf 200m Höhe und λ_{ave} in einer Übersicht zum direkten Vergleich. Die Linien sind die lineare Regressionen.

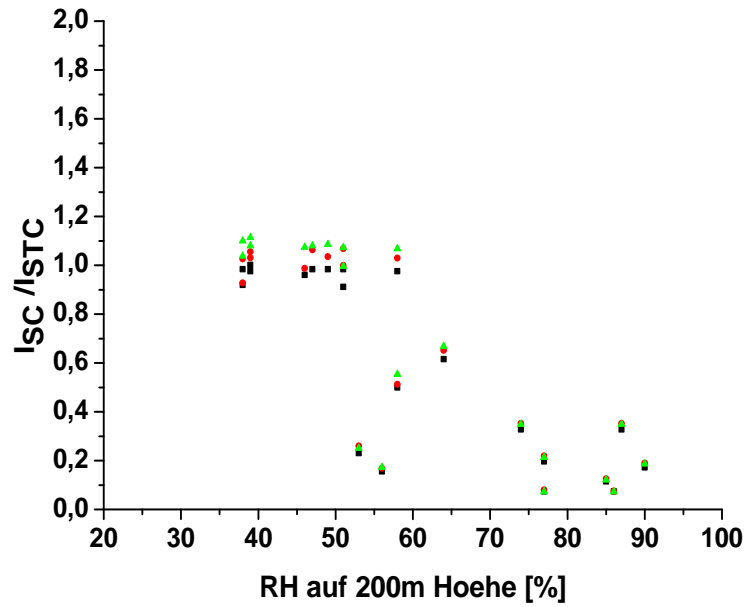


Abbildung 3.5: Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono.

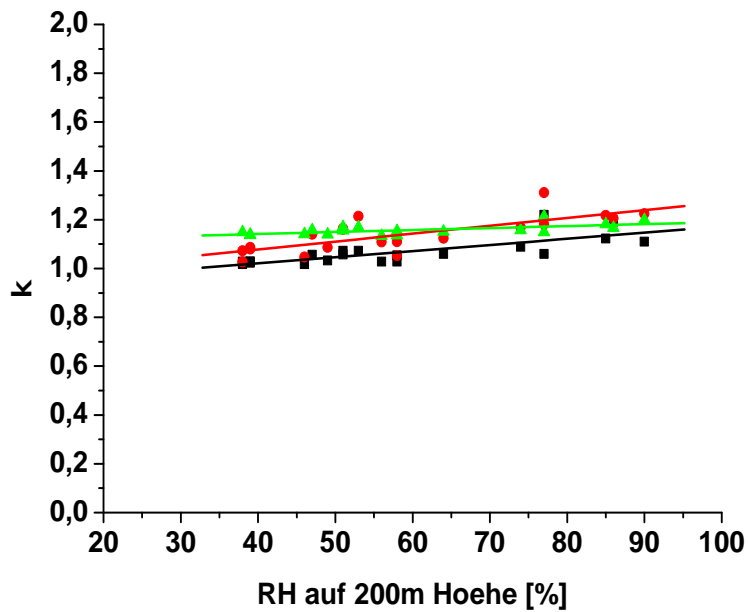


Abbildung 3.6: Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

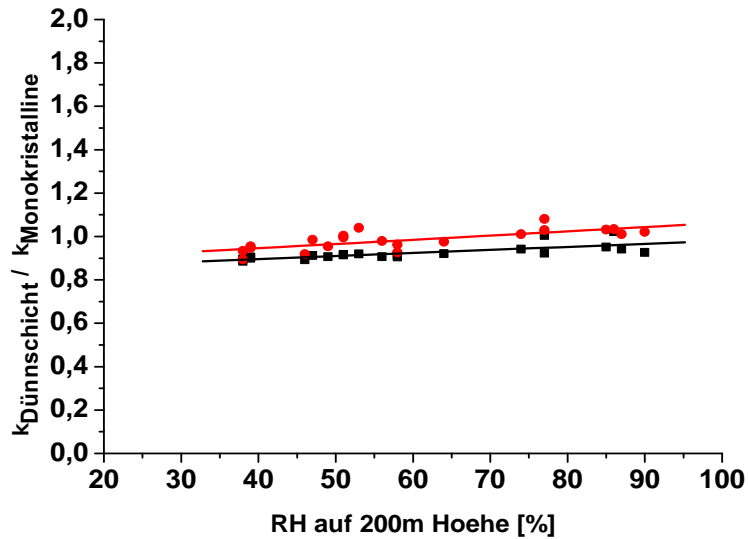


Abbildung 3.7: Korrelation zwischen $\kappa_{Dünnschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der relativen Luftfeuchtigkeit für beide Dünnschicht-Technologien: (■) $\kappa_{CdTe}/\kappa_{Monok.}$, und (●) $\kappa_{a-Si}/\kappa_{Monok.}$. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

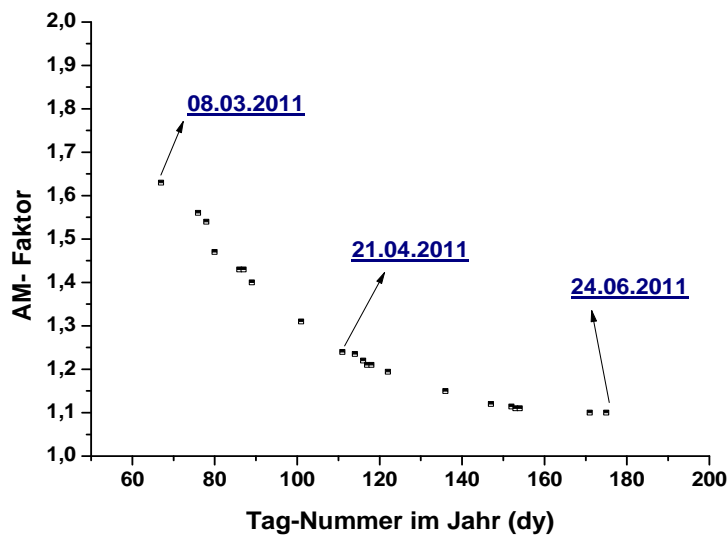


Abbildung 3.8: Korrelation zwischen AM-Faktor und Tagnummer im Jahr (1 bis 365) für die Stadt Wien für die Uhrzeit (13h Ortszeit) für den Zeitraum vom 08.03.2011 bis 24.06.2011.

Die Werte des AM- Faktors wurden für die Stadt Wien, und dasjenige Datum und die 13h Ortszeit berechnet. Referenz [27] beschreibt die genaue Berechnung des AM-Faktors.

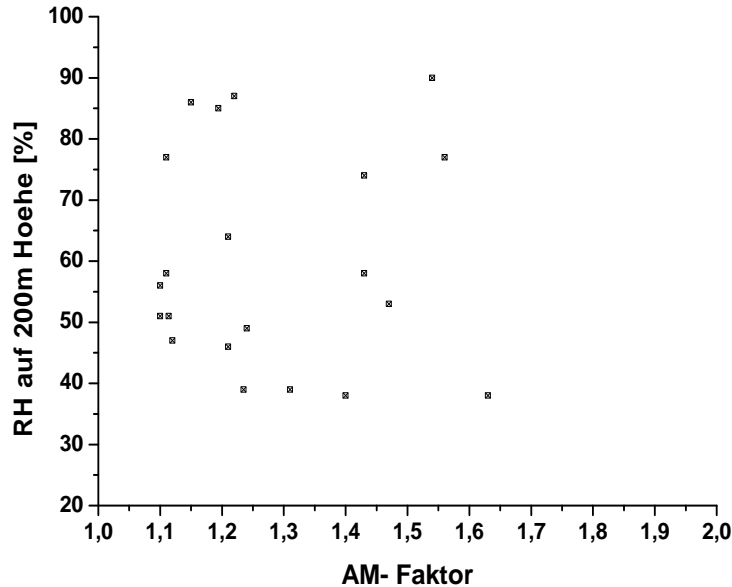


Abbildung 3.9: Korrelation zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und AM-Faktor.

3.2.2 Auswertungen anhand der Daten der relativen Luftfeuchtigkeit von 200m bis 3000m Höhe (über Meereshöhe)

Für die weiteren Auswertungen wurden, wie bereits beschrieben, die RH Werte aus 200 bis 3000 Meter Höhe desselben Tageshöhenprofils [26, d] herangezogen. Die anderen Umgebungs und Modulparameter wurden aus den Tagesgängen entsprechend mit dem 13h (Ortszeit Wien) Momentanwert für eine Auswahl an Tagen je Tagesklasse ausgesucht. Die Korrelationen der Umgebungs und Modul –Parameter und der entsprechenden RH –Werten wurden dann analysiert.

In Abbildung 3.10 ist die Abhängigkeit der \bar{RH} von E dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\bar{RH} = (-45 \pm 6) * 10^{-3} * E + (89,8 \pm 4,3)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,85$. Die relative Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre (da die RH über 3000m Höhe relative zu der RH bis 3000m Höhe vernachlässigbar ist) und die Einstrahlung korrelieren also auch wie erwartet sehr stark miteinander und es besteht eine negative Korrelation, genau sowie die RH auf Bodenhöhe und die Einstrahlung. Das bedeutet daß die relative Feuchte tatsächlich die Streuung (Mie –Streuung und klassische Streuung) und die Absorption der einfallenden Sonnen –Einstrahlung sehr stark beein-

flusst und damit auch stark beeinflusst, wie intensive die Einstrahlung ist, die am Boden ankommt.

In Abbildung 3.11 ist die Abhängigkeit der λ_{ave} von \bar{RH} dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (-0,15 \pm 0,1) * \bar{RH} + (585,7 \pm 6,6)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,38$. Die Gleichgewichtswellenlänge und die relative Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre korrelieren also schwach miteinander. Anders als die Korrelation zwischen der RH auf der Bodenhöhe und λ_{ave} . Bei unterschiedlichen RH –Werten entlang der Atmosphäre bleibt auf jeden Fall die λ_{ave} nicht konstant.

In Abbildung 3.12 ist die Abhängigkeit der \bar{RH} von RH (auf 200m Höhe) dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\bar{RH} = (1,02 \pm 0,11) * RH$ (auf 200m Höhe) $+ (1,97 \pm 6,8)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,82$. Die relative Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre und die auf der Bodenhöhe korrelieren also sehr stark miteinander und es besteht eine positive Korrelation. Im Rahmen der Unsicherheit (Fehlerangaben) der linearen Regression ergibt sich eine Identität zwischen \bar{RH} und RH (auf 200m Höhe). Jeden Falls könnte der eine Parameter wegen der vorhandenen starken Korrelation eingeschätzt werden, wenn der andere bekannt wäre.

Der Korrelationskoeffizient der Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von \bar{RH} der Technologie First ist hier $r = -0,82$, der Technologie Schott $r = -0,82$, und der Technologie Solarwatt $r = -0,83$. Siehe dazu die Abbildung 3.5. Die Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von RH (entlang der Atmosphäre) hat einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von RH (auf 200m Höhe) und der Verlauf der Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von \bar{RH} wäre auf der Abbildung 3.5 nachvollziehbar. Die Stromproduktion aller 3 Technologien korreliert also sehr stark mit RH entlang der Atmosphäre und die Stromproduktion aller 3 Technologien korreliert gleich stark mit RH und es besteht wie erwartet eine negative Korrelation. Die Korrelation ist hier fast genauso groß wie die zwischen I_{SC}/I_{STC} und RH auf Bodenhöhe. Jeden Falls bedeutet das, daß die Stromproduktion laut bisheriger Auswertungen nur Anhand der RH sehr gut eingeschätzt werden kann.

In Abbildung 3.13 ist die Abhängigkeit der κ von \bar{RH} dargestellt. Die lineare Regression beträgt: $\kappa(First) = (16,8 \pm 5,2) * 10^{-4} * \bar{RH} + (0,96 \pm 0,03)$ für die Technologie First. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,55$. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie Schott ist $r = 0,62$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Schott) = (22 \pm 7) * 10^{-4} * \bar{RH} + (99,9 \pm 4,4) * 10^{-2}$. Und der Korrelationskoeffizient für die Technologie Solarwatt ist $r = 0,19$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Solarwatt) = (1,3 \pm 1,6) * 10^{-4} * \bar{RH} + (1,14 \pm 0,01)$. Die relative Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre und die Stromumwandlungseffizienz der 2 Dünnschicht –PV –Module korrelieren also miteinander, diese Korrelation ist aber deutlich kleiner als die zwischen κ und RH auf

der Bodenhöhe und es besteht wieder eine positive Korrelation. Die relative Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre und die Stromumwandlungseffizienz der Monokristalline -PV -Technologie korrelieren aber sehr schwach miteinander, ganz anders als die Korrelation zwischen κ und RH auf der Bodenhöhe. Der Korrelationskoeffizient ist auch wieder deutlich kleiner als bei den Dünnschicht -Technologien. Die Steigung der κ aller 3 Technologien mit steigender RH (dem Mittelwert) ist sehr klein und auch kleiner als die Steigung mit steigender RH (auf Bodenhöhe). Die Steigung ist aber hier bei den Dünnschichttechnologien 13 bis 17 Fach größer als bei Monokristalline -Technologie. Das bedeutet dass die Messung der relativen Feuchte auf der Bodenhöhe wegen der viel stärkeren Korrelation mit κ viel geeigneter wäre, um die Stromumwandlungskoeffizient der PV -Technologien, und besonders der Dünnschicht -Technologien einzuschätzen.

Abbildung 3.14 zeigt das Verhältnis

$$\frac{\kappa_{\text{Dünnschicht}}}{\kappa_{\text{Monokristalline}}}$$

relative zu der RH entlang der Atmosphäre. Dieses Verhältnis liegt im Bereich zwischen 0.9 und 1.0 genau so wie bei der Korrelation zwischen

$$\frac{\kappa_{\text{Dünnschicht}}}{\kappa_{\text{Monokristalline}}}$$

und RH auf der Bodenhöhe. Das bedeutet dass die κ der verschiedenen Technologien relative zu RH Mittelwert auch sehr gering voneinander abweichen. Die Abweichung der κ_{a-Si} von κ_{Mono} ist allerdings kleiner als die Abweichung der κ_{CdTe} von der κ_{Mono} . Die Änderung dieser Abweichung ist aber bei $a - Si$ größer als bei $CdTe$.

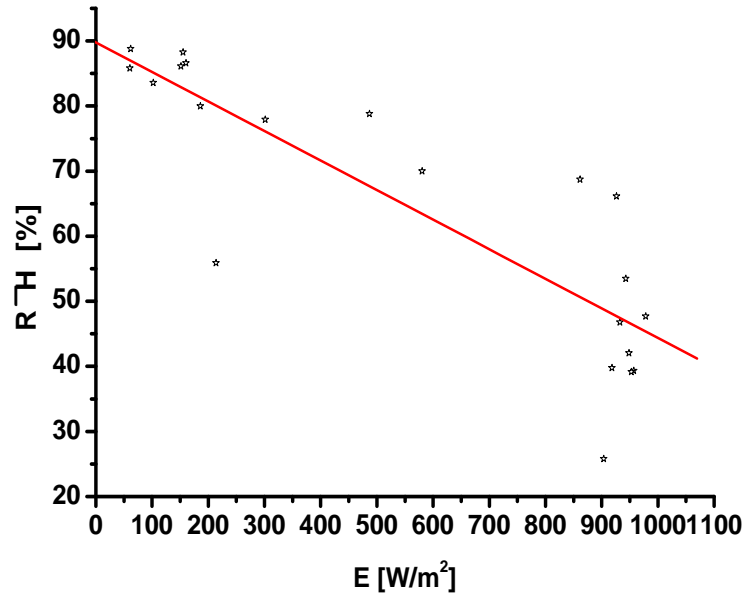


Abbildung 3.10: Korrelation zwischen $R\bar{H}[\%]$ dem Mittelwert (aus den Daten des meteorologischen Tageshöhenprofils) und der Einstrahlungsstärke. Die Linie ist die lineare Regression.

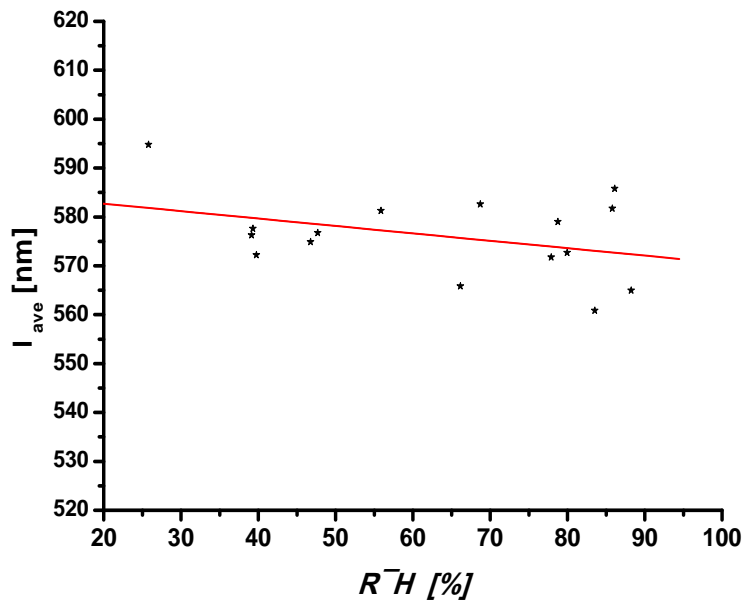


Abbildung 3.11: Korrelation zwischen $\lambda_{ave} [nm]$ und der $R\bar{H} [\%]$ dem Mittelwert. Die Linie ist die lineare Regression.

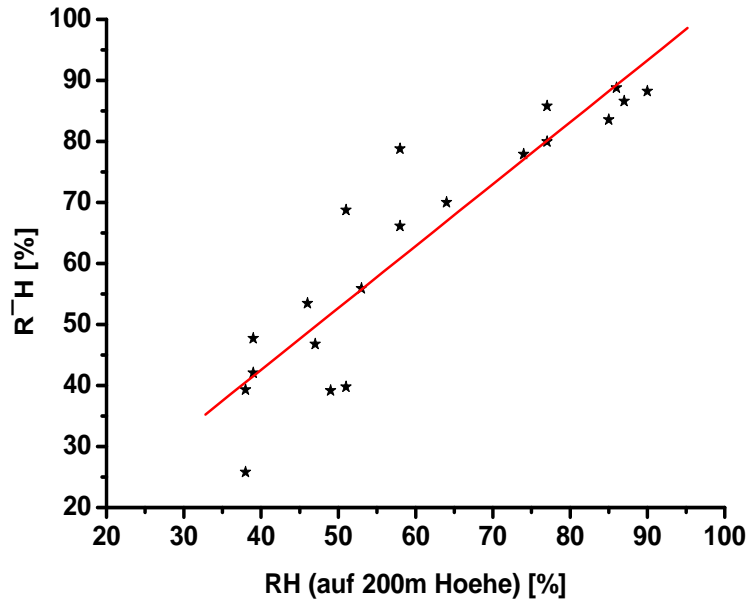


Abbildung 3.12: Korrelation zwischen der RH [%] dem Mittelwert und der RH [%] auf 200m Höhe. Die Linie ist die lineare Regression.

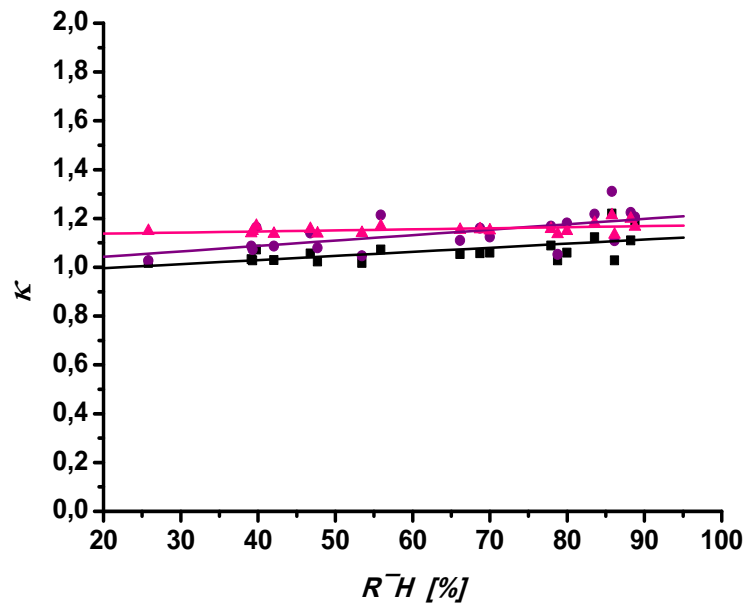


Abbildung 3.13: Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

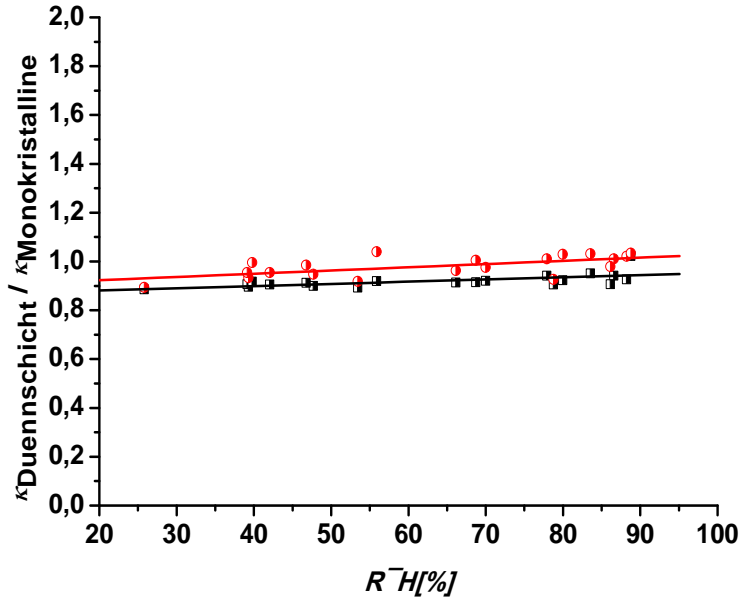


Abbildung 3.14: Korrelation zwischen $\kappa_{Duennschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der relativen Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert, für beide Dünnschicht-Technologien: (■) $\kappa_{CdTe}/\kappa_{Monok}$, und (●) $\kappa_{a-Si}/\kappa_{Monok}$. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

3.2.3 Auswertungen anhand der Daten der absoluten Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre

Für die dritte Reihe der Auswertungen wurden, wie bereits beschrieben, die Werte der absoluten Luftfeuchtigkeit (F_a), entlang der Atmosphäre (bis zu der Höhe, auf der je welche Feuchtigkeit vorhanden war, meistens bis zur 10.000 –15.000 m Höhe) aus dem Tageshöhenprofile [26, d] entnommen. Die Werte der F_a waren allerdings in der Einheit $[g/kg]$ vorhanden und wurden über die folgende Gleichung in die IS- Einheit $[g/m^3]$ gebracht:

$$F_a(H_i) \left[\frac{g}{m^3} \right] = \frac{F_a(H_i) [g/kg] * P(H_i)}{T(H_i) * R} \quad (3.5)$$

Wobei P, der Druck [Pa], T, die Temperatur [K], und $R = 287,06 \left[\frac{J}{kg * K} \right]$ die Gaskonstante der Luft sind. Die anderen Umgebungs und Modulparameter wurden aus den Tagesgängen entsprechend mit dem 13h (Ortszeit Wien) Momentanwert für eine Auswahl an Tagen je Tagesklasse ausgesucht. Die Korrelationen der Umgebungs und Modul –Parameter und der entsprechenden F_a –Werten wurden dann analysiert.

In Abbildung 3.15 Links, ist die Abhängigkeit der Fa von E dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $Fa = (-3,7 \pm 4,3) \cdot 10^{-4} \cdot E + (1,55 \pm 0,33)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,15$. Die absolute Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre und die Einstrahlung korrelieren also sehr schwach miteinander, ganz anders als die RH und die Einstrahlung. Bei hohen Temperaturen sind mehr Staub und Aerosole in der Luft vorhanden und damit auch mehr Wassertröpfchen und absolute Feuchtigkeit. Das weil sich die Wasserteilchen meistens um die Aerosolteilchen Sammeln und bei hoher Temperatur mehr Wasserdampf vorhanden ist. Und das weil mehr Wasser verdampfen kann und die Luft mehr Dampf enthalten kann bei höherer Temperatur, ist bei höherer Temperatur die Fa höher. Das hängt in der Regel mit einer höheren Sonnenstrahlung zusammen. Auf der anderen Seite Korreliert die Luftfeuchte negative mit der Einstrahlung (weil die Feuchte, die Streuung und Absorption des Lichtes entlang der Atmosphäre verstärkt.) Das bedeutet daß die Fa aus physikalischen Gründen mit steigender Einstrahlung steigen aber auch sinken könnte.

Daraus kommt es zu kaum Korrelation der Fa und Einstrahlung, b.z.w: zu $r = -0,15$. Fa und Einstrahlung korrelieren nicht miteinander und wenn ja, sehr schwach.

In Abbildung 3.15 Rechts, ist die Abhängigkeit der λ_{ave} von Fa dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (-6,77 \pm 2,91) \cdot Fa + (584,8 \pm 4,1)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,57$. Die Gleichgewichtswellenlänge und die absolute Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre korrelieren also miteinander. Genau sowie die Korrelation zwischen der RH auf der Bodenhöhe und λ_{ave} . Aber anders als die zwischen λ_{ave} und RH, Mittelwert. Bei unterschiedlichen Fa -Werten entlang der Atmosphäre bleibt auf jeden Fall die λ_{ave} nicht konstant. Bei hoher Wassermenge in der Luft, wird die λ_{ave} in den kurzwelligen Bereich verschoben.

In Abbildung 3.16 Links, ist die Abhängigkeit der Fa von RH (auf 200m Höhe) dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $Fa = (0,021 \pm 0,005) \cdot RH$ (auf 200m Höhe) $+(-0,02 \pm 0,31)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,72$. Die absolute Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre und die RH auf der Bodenhöhe korrelieren also stark miteinander und es besteht eine positive Korrelation.

In Abbildung 3.16 Rechts, ist die Abhängigkeit der Fa von \bar{RH} dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $Fa = (0,015 \pm 0,005) \cdot \bar{RH} + (0,37 \pm 0,39)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,68$. Die absolute Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre und die RH entlang der Atmosphäre korrelieren also auch ziemlich stark miteinander und es besteht eine positive Korrelation.

Das Sättigungswassergehalt [g/m^3] der Luft und die Temperatur [$^{\circ}C$] korrelieren miteinander positive, stark und exponentiell. Bei höheren Tem-

peraturen ist die Fa höher, wie bereits beschrieben, aber das Sättigungswassergehalt der Luft steigt stärker mit höherer Temperatur und daraus wird die RH mit steigender Temperatur kleiner, da RH definiert wird als:

$$\varphi = \frac{\rho_{\omega}}{\rho_{\omega,max}} * 100\% \quad (3.6)$$

Wobei φ , die relative Luftfeuchtigkeit [%], ρ_{ω} , die absolute Luftfeuchtigkeit [g/m^3], und $\rho_{\omega,max}$, das Sättigungswassergehalt der Luft [g/m^3] sind.

Das bedeutet daß, RH und Fa sich etwas anders verhalten bei unterschiedlichen Temperaturen, b.z.w bei den Temperaturänderungen. Außerdem hängen die Fa und die RH über weitere Wetterfaktoren (Luftdruck, Luftdichte bei verschiedenen Höhen und Temperaturen, und Dampfdruck, Sättigungsdampfdruck...) zusammen und das hindert daran, nur aus einem bekannten Fa –Wert, den dazugehörigen RH –Wert ohne Berücksichtigung anderer Parameter zu bestimmen. Daraus ergeben sich die beobachtete Unterschiede der RH –Werte von den jeweiligen Fa –Werten.

Der Korrelationskoeffizient der Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von Fa (entlang der Atmosphäre) der Technologie First beträgt hier $r = -0,15$, der Technologie Schott $r = -0,14$, und der Technologie Solarwatt $r = -0,16$. Siehe dazu die Abbildung 3.5. Die Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von Fa (entlang der Atmosphäre) hat einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von RH (auf 200m Höhe) und der Verlauf der Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von Fa (entlang der Atmosphäre) wäre auf der Abbildung 3.5 nachvollziehbar.

Die Stromproduktion aller 3 Technologien korreliert also nicht mit Fa entlang der Atmosphäre. Das ist ganz anders als die Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und RH auf der Bodenhöhe oder RH entlang der Atmosphäre. Jeden Falls bedeutet das, daß die Stromproduktion laut bisheriger Auswertungen Anhand der absoluten Luftfeuchte definitive nicht eingeschätzt werden kann.

In Abbildung 3.17 ist die Abhängigkeit der κ von Fa dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(First) = (0,024 \pm 0,022) * Fa + (1,04 \pm 0,03)$ für die Technologie First. Der korrelationskoeffizient ist $r = 0,25$. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie Schott ist $r = 0,41$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Schott) = (0,051 \pm 0,027) * Fa + (1,07 \pm 0,04)$. Und der Korrelationskoeffizient für die Technologie Solarwatt ist $r = 0,33$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Solarwatt) = (0,012 \pm 0,008) * Fa + (1,14 \pm 0,01)$. Die absolute Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre und die Stromumwandlungseffizienz aller 3 PV –Module korrelieren also schwach miteinander. Die Korrelation der κ der Monokristalline –Technologie und die absolute Luftfeuchte sind allerdings hier nicht viel kleiner als die zwischen κ der Dünnschichttechnologien und absoluter Luftfeuchte. Die Steigung ist allerdings

laut der linearen Regressionen bei den Dünnschichttechnologien 2 bis 4 Mal größer als bei der Monokristalline –Technologie. Die Tatsache daß κ der 3 Technologien nicht wirklich mit der absoluten Luftfeuchte korreliert ist verständlich, da die absolute Luftfeuchte, wie bereits beschrieben, nicht mit der Einstrahlung korreliert. Die korreliert auch nicht mit der I_{SC}/I_{STC} . Die Stromumwandlungseffizienz ergibt sich laut der Gleichung 3.3 aus der Überlagerung der I_{SC}/I_{STC} und Einstrahlungskurve und daraus ergibt sich die Korrelation zwischen κ und absoluter Luftfeuchte aus der Überlagerung der Korrelationen ein mal zwischen I_{SC}/I_{STC} und Fa und noch zwischen E und Fa. Daraus folgt daß die κ mit der Fa nicht korreliert.

Abbildung 3.18 zeigt das Verhältnis

$$\frac{\kappa_{Duennschicht}}{\kappa_{Monokristalline}}$$

$$\frac{\kappa_{Monokristalline}}{\kappa_{Duennschicht}}$$

relative zu der Fa entlang der Atmosphäre im Bereich zwischen 0.9 und 1.0 genau so wie bei der Korrelation zwischen

$$\frac{\kappa_{Duennschicht}}{\kappa_{Monokristalline}}$$

$$\frac{\kappa_{Monokristalline}}{\kappa_{Duennschicht}}$$

und RH. Das bedeutet dass die κ der verschiedenen Technologien relative zu Fa, Mittelwert auch sehr gering voneinander abweichen. Die Einstrahlung, Stromproduktion und κ selbst, korrelieren nicht (korrelieren schwach) mit der Fa. Trotzdem hat die Korrelation zwischen

$$\frac{\kappa_{Duennschicht}}{\kappa_{Monokristalline}}$$

$$\frac{\kappa_{Monokristalline}}{\kappa_{Duennschicht}}$$

und Fa einen ähnlichen Verlauf, wie die mit der RH, weil die Stromumwandlungseffizienz der 3 untersuchten Technologien selbst, laut den bisherigen Auswertungen Wetter und Feuchte –unabhängig einen Wert zwischen 1 und 1,2 besitzt. Es ist in Abbildungen 3.6, 3.13, 3.17 zu sehen. Innerhalb dieses Bereiches haben sich allerdings die κ , wie bereits gesehen, abhängig von relativer Luftfeuchte verhalten (besonders die Dünnschichttechnologien). Die verhalten sich aber innerhalb dieses Bereiches eben nicht wirklich abhängig von absoluter Luftfeuchte.

Zusammenfassung der Interpretation der physikalischen Einflüsse auf die Korrelationen aus dem Zeitraum März bis Juni 2011

λ_{ave} steigt leicht im Zeitraum März bis Juni 2011 von circa. 570nm weiter mit steigender Einstrahlung, und sinkt von circa. 590nm weiter mit steigender Luftfeuchte und variiert höchstens um 30nm.

Je mehr relative Feuchtigkeit in der Luft vorhanden ist, desto stärker wird die Sonneneinstrahlung entlang der Atmosphäre gestreut. Deshalb ist mehr kurzwelliges Licht in der Atmosphäre vorhanden, je mehr der Maß der RH steigt. Die Steigung der Stromumwandlungseffizienz einer Technologie mit steigender RH ist deshalb größer, je weiter die spektrale Empfindlichkeit der jeweiligen Technologie im kurzwelligeren Bereich liegt und besonders ihr Maximum. Genau das wurde bei den Ergebnissen beobachtet. Die κ der Technologie Schott (am weitesten im kurzwelligen Bereich) hat überall die höchste Steigung, die der Technologie First (im mittleren Bereich) die mittelhohe Steigung, und die der Technologie Solarwatt (relative im langwelligen Bereich) die niedrigste Steigung mit steigender Luftfeuchte.

Die Änderung der F_a und die Änderung der RH unter verschiedenen herrschenden Wetterbedingungen weichen, wie bereits beschrieben, deutlich voneinander ab. Um diese Änderungen zu analysieren, sollten weitere Wetterfaktoren, wie Luftdruck, Luftdichte bei verschiedenen Höhen und Temperaturen, und Dampfdruck, Sättigungsdampfdruck... berücksichtigt werden. Um vermutlich eine Korrelation zwischen F_a und E oder zwischen F_a und κ zu finden, sollten die Werte der absoluten Luftfeuchte mit den Faktoren wie Luftdruck, Luftdichte, Umgebungstemperatur...gewichtet werden. Aus diesem Grund gibt es laut bisherigen Beobachtungen keine direkte Korrelation zwischen F_a und E oder zwischen F_a und κ .

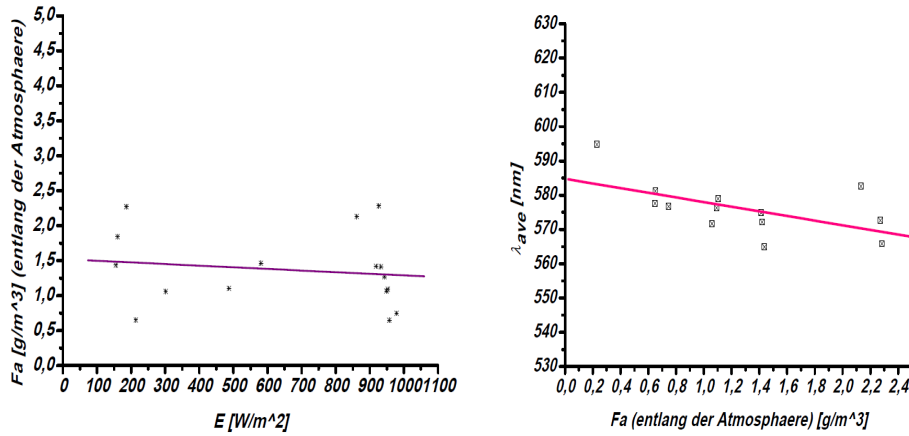


Abbildung 3.15: Korrelation zwischen Links: $Fa[g/m^3]$ (entlang der Atmosphäre), dem Mittelwert (aus den Daten des meteorologischen Tageshöhenprofils) und der Einstrahlungsstärke. Rechts: λ_{ave} [nm] und der $Fa [g/m^3]$, dem Mittelwert. Die Linie ist jeweils die lineare Regression.

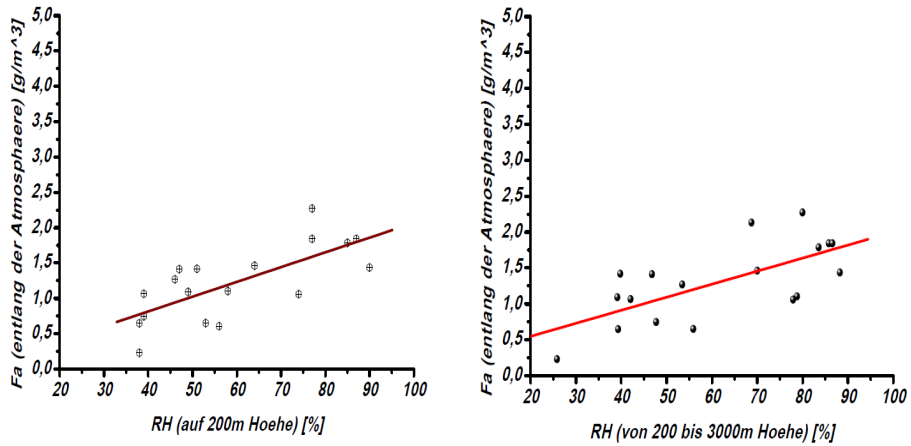


Abbildung 3.16: Korrelation zwischen Links: der $Fa [g/m^3]$, dem Mittelwert und der RH [%] auf 200m Höhe. Rechts: der $Fa [g/m^3]$, dem Mittelwert und der RH [%], dem Mittelwert. Die Linie ist jeweils die lineare Regression.

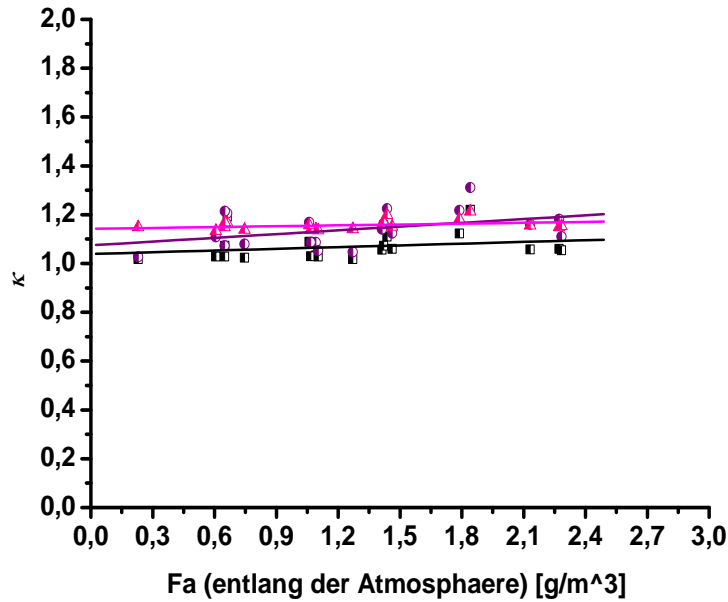


Abbildung 3.17: Korrelation zwischen κ und der absoluten Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

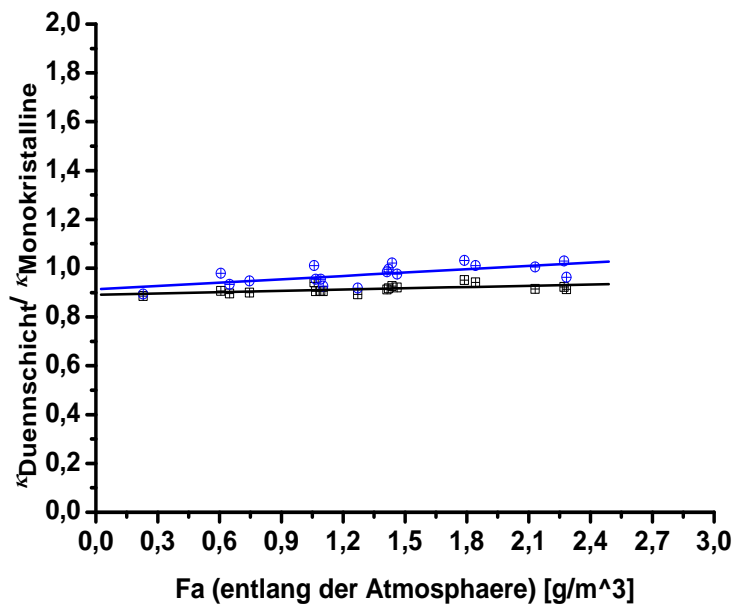


Abbildung 3.18: Korrelation zwischen $\kappa_{Duennschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der absoluten Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert, für beide Dünnschicht-Technologien: (■) $\kappa_{CdTe}/\kappa_{Monok}$, und (●) $\kappa_{a-Si}/\kappa_{Monok}$. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

3.3 Auswertungen und Ergebnisse der Daten des Monats Juli 2012

Um eine statistisch große Datenbasis zu haben, sowie eine mit eingeschränktem jahres- zeitlichem ΔAM Intervall (siehe Abbildung 3.8) , wurden die Daten aus nur einem Monat zur Auswertung herangezogen.

3.3.1 Auswertungen und Ergebnisse der Daten der “clear –sky ”Tage

Anhand einer Wetterstation wurden, wie bereits im letzten Kapitel beschrieben, von April 2012 laufend alle Wetterfaktoren und die relative Feuchtigkeit (RH) auf der Boden –Höhe (auf der 170m über der Meereshöhe) direkt am Ort im Gebäude “Techbase Vienna ”[a] am Dach (circa. 2m über dem Dach) im 1 Minutenintervall gemessen. Für die nächste Reihe der Untersuchungen, wurden einige “clear sky ”Tage vom Juli 2012 von der monatlichen Übersicht der Einstrahlungskurven ausgesucht. Es wurden die Daten der korrelierenden Parameter vom täglichen Verlauf von 9h bis 17h pro Minute für die ausgesuchte Tage verwendet und die Korrelationen der Modul und Umgebungsparameter untersucht und analysiert.

In Abbildung 3.19 ist die Abhängigkeit der RH von E dargestellt. Die relative Luftfeuchtigkeit an den clear sky Tagen korreliert nicht mit der Einstrahlungsstärke, wenn die Messpunkte des täglichen Verlaufs (von 9h bis 17h) beobachtet werden. Die Messwerte spalten sich in 2 Hauptteile auf, die sich unterschiedlich verhalten: die des Vormittags (von 9h bis 12h) und die des Nachmittags (von 12h bis 17h). Die Einstrahlungswerte des Nachmittags schwanken sehr stark, verhalten sich aber fast Feuchteunabhängig, die des Vormittags sind aber allerdings abhängig von RH. Aus diesem Grund werden alle weitere Korrelationen an den clear sky Tagen auch getrennt für den Vormittag und für den Nachmittag analysiert. Die Korrelation zwischen RH (auf 200m Höhe) [%] und $E[W/m^2]$ aus den letzten Auswertungen um 13h Ortszeit, Nachmittag war allerdings sehr stark. Der Grund für die schwache Korrelation zwischen RH und E hier im Laufe des ganzen Nachmittags (von 12h bis 17h) ist vermutlich der starken Änderung des AM- Faktors zuzuschreiben.

In Abbildung 3.20 Links und Rechts wurden die Abhängigkeit der λ_{ave} von RH nur aus den Daten des Vormittags oder Nachmittags dargestellt. In Abbildung 3.20 Links, für den Vormittag, beträgt der Korrelationskoeffizient $r = 0,75$. λ_{ave} und RH korrelieren also an den clear sky Tagen positiv und stark miteinander, wenn nur Vormittag beobachtet wird. In Abbildung 3.20

Rechts, für den Nachmittag, beträgt der Korrelationskoeffizient $r = -0,04$. λ_{ave} und RH korrelieren also an den clear sky Tagen am Nachmittag nicht miteinander. Der Schwerpunkt der Messdaten liegt in den beiden Abbildungen im Bereich von circa. 580 bis 585nm. Also relative zu der λ_{ave} des AM 1,5 –Spektrums auch an den clear sky Tagen blau verschoben.

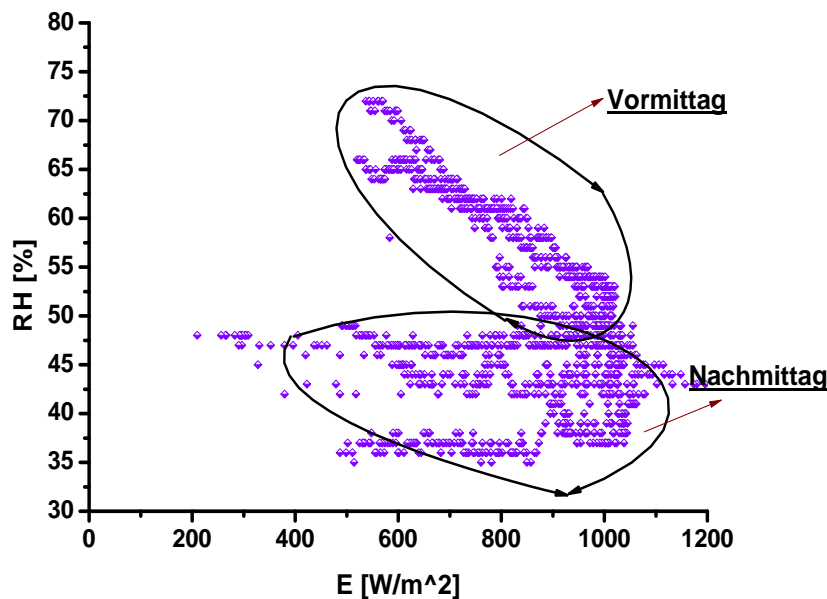


Abbildung 3.19: Korrelation zwischen RH[%] (aus den Daten der Wetterstation) und der Einstrahlungsstärke.

In Abbildung 3.21 ist die Abhängigkeit der λ_{ave} von E dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (-0,013 \pm 0,003) * E + (593 \pm 3)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,11$. λ_{ave} und E korrelieren also an den clear sky Tagen sehr schwach miteinander. Es wurden 2 Gebiete mit höheren Strahlungsstärken von E: 850 –950 [W/m^2] mit λ_{ave} im Bereich von circa. 578 –589nm und E: 950 –1050 [W/m^2] mit λ_{ave} im Bereich von circa. 578 –586nm und ein Gebiet mit niedrigen Strahlungsstärken von E: 550 –650 [W/m^2] mit λ_{ave} im Bereich von circa. 581 –590nm herausgesucht um das Verhalten der Parameter in einzelnen Gebieten genauer zu beobachten. Jeden falls sind fast alle Messdaten in blau verschoben und liegen unter 597nm (relative zu dem

AM1,5 –Spektrum). Da in den ausgewählten Bereichen sehr viele Messwerte vorkommen, wurde dann die Stromumwandlungseffizienz der Module auch getrennt in den jeglichen Bereichen analysiert. Die Einstrahlungswerte reichen an den clear sky Tagen, wie es in der Abbildung 3.19 auch zu sehen ist, von circa 500 bis 1100 $[W/m^2]$.

Die I_{SC}/I_{STC} und RH korrelieren an den clear sky Tagen nicht miteinander. Deshalb wurde in Abbildung 3.22 und 3.23 die Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von RH nur am Vormittag oder am Nachmittag gesucht. In Abbildung 3.22 (nur aus den Daten des Vormittags) beträgt der Korrelationskoeffizient für die Technologie First: $r = -0,9$, für die Technologie Schott: $r = -0,91$ und für die Technologie Solarwatt: $r = -0,91$. I_{SC}/I_{STC} und RH korrelieren also an den clear sky Tagen sehr stark und wie erwartet negative miteinander, wenn man nur die Daten des Vormittags betrachtet. In Abbildung 3.23 verhält sich I_{SC}/I_{STC} aber feuchteunabhängig und korreliert nicht mit RH, wenn nur die Daten des Nachmittags an den clear sky Tagen betrachtet werden.

In Abbildung 3.24 ist die Abhängigkeit der κ von RH an clear sky Tagen dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(First) = (97 \pm 10) * 10^{-5} * RH + (0,714 \pm 0,005)$ für die Technologie First. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,25$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Schott) = (3,4 \pm 1,3) * 10^{-4} * RH + (1,002 \pm 0,007)$ für die Technologie Schott. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,07$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Solarwatt) = (4,1 \pm 1,3) * 10^{-4} * RH + (1,017 \pm 0,006)$ für die Technologie Solarwatt. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,09$. Die κ und RH korrelieren also an den clear sky Tagen nicht miteinander. Aus diesem Grund wurden weiters die Korrelation zwischen κ und RH nur aus den Daten des Vormittags oder nur des Nachmittags oder aus den Daten entsprechend der Einstrahlungswerte in einem bestimmten Intervall analysiert. Die Stromumwandlungseffizienz der Technologien a-Si und Monokristalline betragen weiterhin einen Wert zwischen 1 und 1,2. Die der Technologie CdTe beträgt aber einen niedrigen Wert (und relative zu dem Wert aus den vorigen Auswertungen des Zeitraums März bis Juni 2011 einen viel niedrigeren Wert) von circa 0,77.

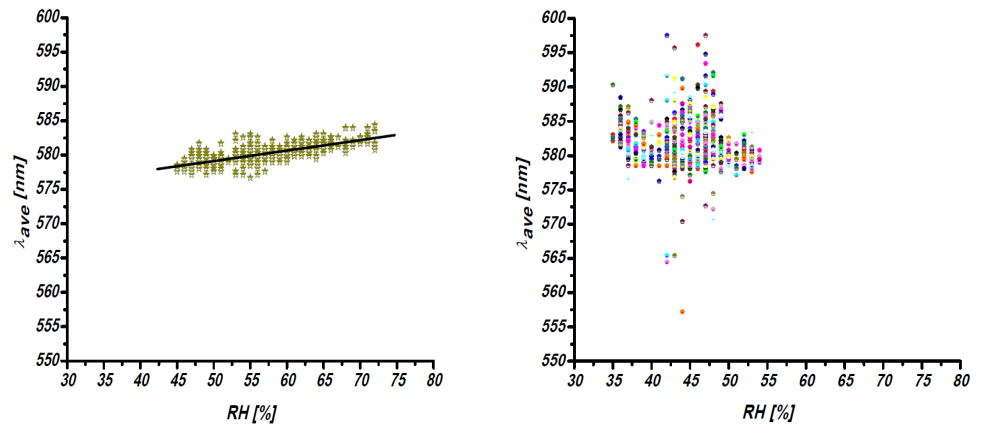


Abbildung 3.20: Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der RH [%], Links: aus den Daten des Vormittags (von 9h bis 12h). Die Linie ist die lineare Regression. Rechts: aus den Daten des Nachmittags (von 12h bis 17h).

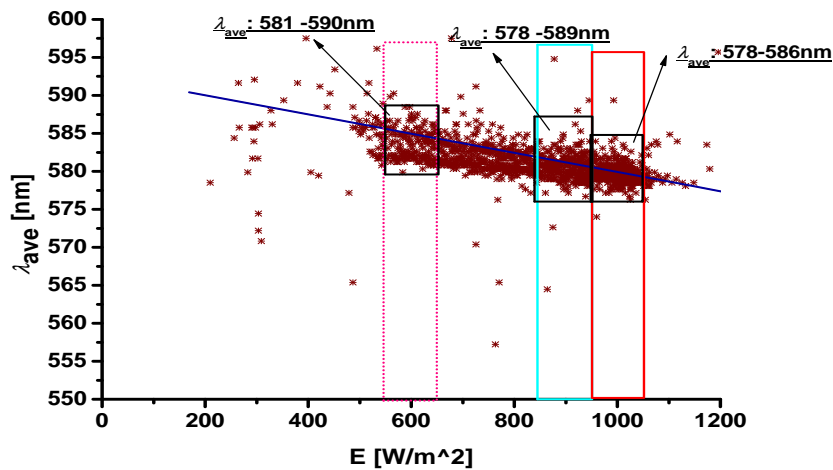


Abbildung 3.21: Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der Einstrahlungsstärke. Die Linie ist die lineare Regression.

Die 2 aufgezeichnete Gebiete haben hohe Strahlungsstärken von 850-950 [W/m²] und von 950-1050 [W/m²], und das 1 aufgezeichnete Gebiet hat niedrige Strahlungsstärken von 550-650 [W/m²]. Die wurden zwecks weiterer genauerer Auswertungen herausgesucht.

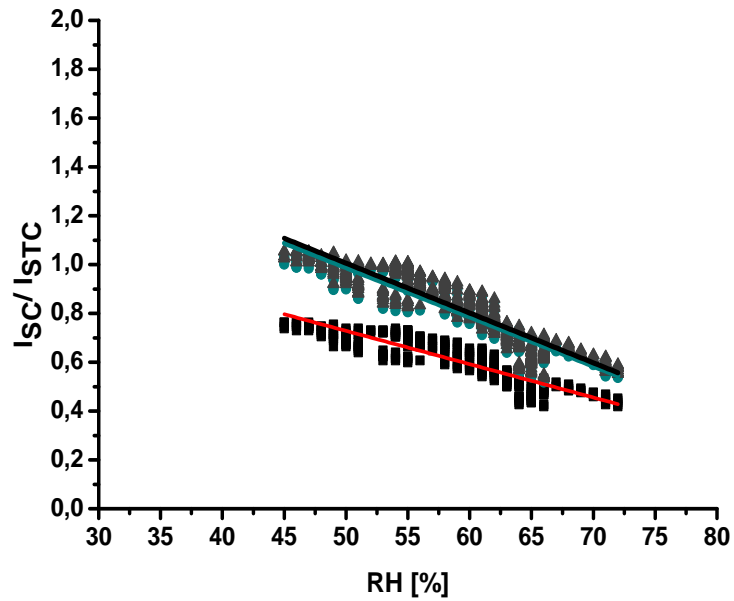


Abbildung 3.22: Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono.

Allerdings nur aus den Daten des Vormittags (von 9h bis 12h).

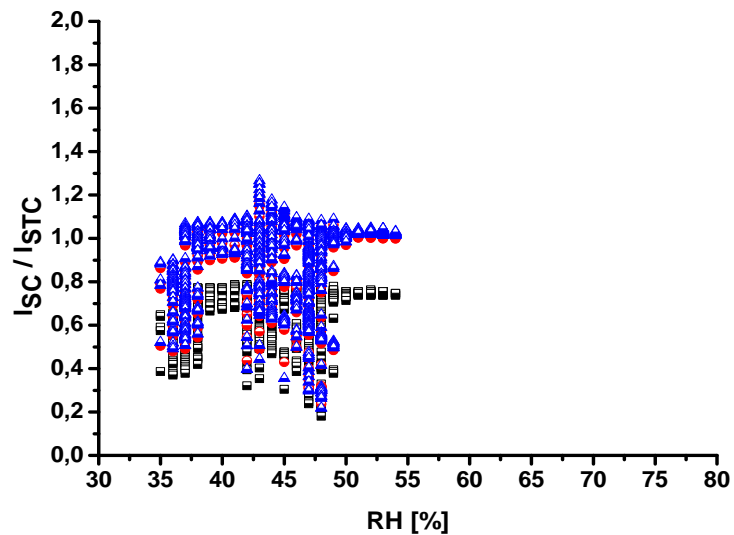


Abbildung 3.23: Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono.

Allerdings nur aus den Daten des Nachmittags (von 12h bis 17h).

Es wurde dann in Abbildung 3.25 Links, die Korrelation zwischen κ und RH nur für den Vormittag dargestellt. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie First ist hier $r = 0,47$, für die Technologie Schott $r = -0,19$ und für die Technologie Solarwatt $r = -0,13$. Es wurde dann in Abbildung 3.25 Rechts, die Korrelation zwischen κ und RH nur für den Nachmittag dargestellt. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie First ist hier $r = 0,01$, für die Technologie Schott $r = 0,05$ und für die Technologie Solarwatt $r = 0,002$. Die κ und RH korrelieren also nur am Vormittag oder nur am Nachmittag auch nicht. Die Korrelationen sind allerdings am Vormittag am größten und nur am Vormittag für die Technologien Schott und Solarwatt negative. Aus diesem Grund wurde eine weitere Parameter- Beschränkung vorgenommen und die jenigen Einstrahlungsintervalle gesucht, in denen die κ und RH korrelieren. Die folgende Bereiche wurden analysiert: a) $E = 550$ bis $650 [W/m^2]$. b) $E = 850$ bis $950 [W/m^2]$. c) $E = 950$ bis $1050 [W/m^2]$.

Es wurde dann in Abbildung 3.26 die Korrelation zwischen κ und RH dann nur für das Einstrahlungsintervall von 550 bis $650 [W/m^2]$ dargestellt. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie First ist hier $r = 0,7$, für die Technologie Schott $r = 0,67$,und für die Technologie Solarwatt $r = 0,8$. Das Gebiet mit niedrigen Strahlungsstärken von $E: 550 - 650 [W/m^2]$ mit λ_{ave} im Bereich von circa $581 - 590\text{nm}$, besitzt RH -Werte von circa $35 - 50 [\%]$ und $63 - 75 [\%]$. Die κ und RH korrelieren laut Korrelationskoeffizienten in diesem Gebiet stark und, wie aus den vorigen Auswertungen erwartet, positiv miteinander.

Es wurde dann in Abbildung 3.27 die Korrelation zwischen κ und RH dann nur für das Einstrahlungsintervall von 850 bis $950 [W/m^2]$ dargestellt. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie First ist hier $r = 0,32$, für die Technologie Schott $r = 0,27$,und für die Technologie Solarwatt $r = 0,22$. Das Gebiet mit hohen Strahlungsstärken von $E: 850 - 950 [W/m^2]$ mit λ_{ave} im Bereich von circa. $578 - 589\text{nm}$, besitzt RH -Werte von circa. $35 - 62 [\%]$. Die κ und RH korrelieren laut Korrelationskoeffizienten in diesem Gebiet sehr schwach miteinander.

Es wurde dann in Abbildung 3.28 die Korrelation zwischen κ und RH dann nur für das Einstrahlungsintervall von 950 bis $1050 [W/m^2]$ dargestellt. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie First ist hier $r = 0,12$, für die Technologie Schott $r = 0,102$,und für die Technologie Solarwatt $r = 0,01$. Das Gebiet mit sehr hohen Strahlungsstärken von $E: 950 - 1050 [W/m^2]$ mit λ_{ave} im Bereich von circa. $578 - 586\text{nm}$, besitzt RH -Werte von circa. $35 - 56 [\%]$. Die κ und RH korrelieren nicht laut Korrelationskoeffizienten in diesem Gebiet miteinander.

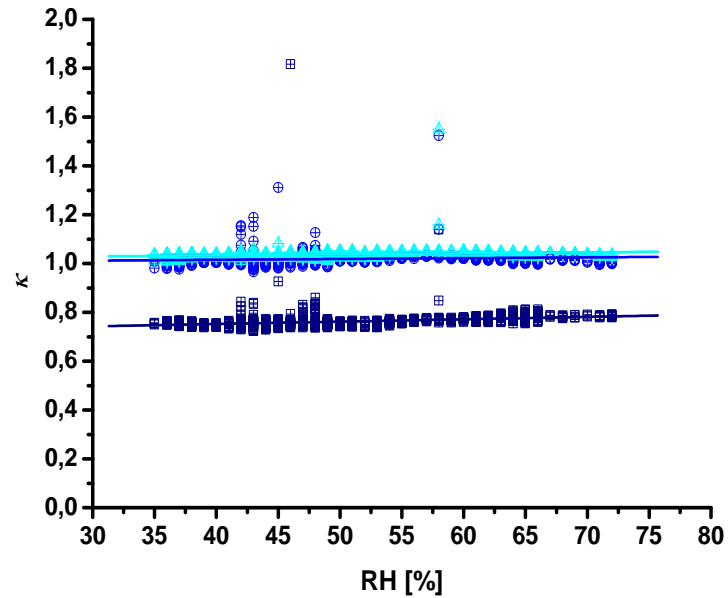


Abbildung 3.24: Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

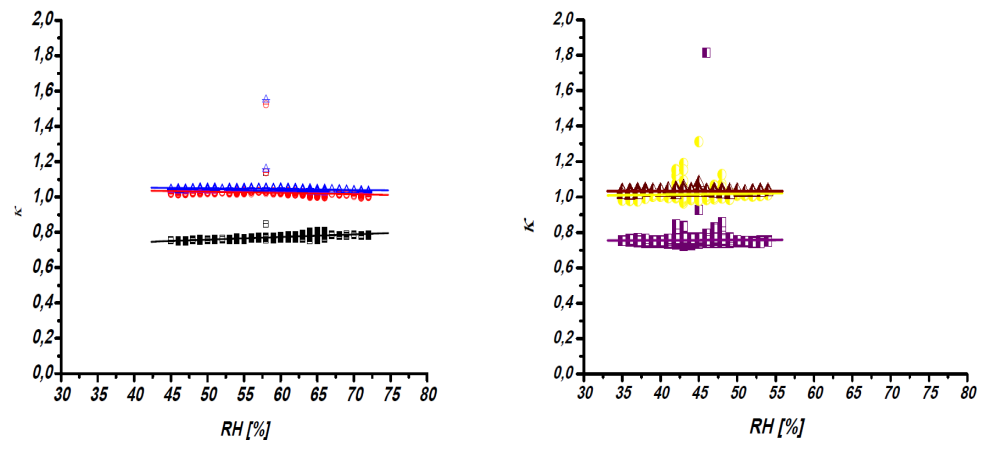


Abbildung 3.25: Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Links: aus den Daten des Vormittags (von 9h bis 12h). Rechts: aus den Daten des Nachmittags (von 12h bis 17h). Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

Es gibt also anhand der Auswertungen, nur aus den Daten entsprechend der niedrigen Einstrahlungswerte größer als $550 [W/m^2]$ und kleiner als $800 [W/m^2]$ an den clear sky Tagen, eine starke und positive Korrelation zwischen der κ und RH für alle 3 untersuchten Technologien.

In Abbildung 3.29 wurde noch die Korrelation zwischen λ_{ave} und E an einem clear sky Tag dargestellt. Die Werte der Gleichgewichtswellenlänge während des clear sky Tages bleiben für alle Strahlungswerte zwischen 580 und 590nm (immer noch etwas blau verschoben). Die λ_{ave} Werte für die Einstrahlungswerte zwischen 500 und $700 [W/m^2]$ sind allerdings circa. gegen 585nm. Ein vergleichbares Ergebnis wurde in [30, 31] beobachtet.

Anhand der Abbildung 3.21 und 3.29 sinkt λ_{ave} mit steigender E. Das ist im Gegensatz zu der Abbildung 3.3. Laut der Ergebnisse verhält sich die Änderung der λ_{ave} mit steigender E an den nur clear sky Tagen anders als an den Tagen aller Tagesklassifikationen. Der Grund dafür ist daß an den clear sky Tagen wegen dem durchgehenden Sonnenschein andere Strahlungsverhältnisse in der Atmosphäre herrschen. Der Maß der RH ist ziemlich niedrig und es gibt viel weniger diffuses Licht und Streuung und Absorption des Lichts entlang der Atmosphäre. Die Lufttemperatur und ihre Schwankungen sind auch an einem durchgehend sonnigen Tag verschieden als an anderen Tagestypen. Das Verhalten der λ_{ave} ist anders als an den Tagen aller Tagesklassifikationen mit gemischten und auch regnerischen und wechselnd bewölkten Wetterbedingungen.

Anhand der Abbildung 3.21 und 3.29 ist die $\Delta\lambda_{ave}$ abhängig von E an clear sky Tagen viel kleiner als die $\Delta\lambda_{ave}$ aus den Daten aller Tage (siehe dazu den letzten Teil dieses Kapitels und auch die Abbildung 3.36). Es sind trotzdem aus den Daten aller Tage für den Einstrahlungsbereich der 950 bis $1050 [W/m^2]$ keine Korrelation zwischen κ und RH sichtbar = $\Delta\kappa$ ist klein (siehe den letzten Teil dieses Kapitels und die Abbildung 3.41), obwohl dieser Strahlungsbereich hauptsächlich aus den Daten der clear sky Tage besteht. Der Grund dafür ist vermutlich dass, in diesem Bereich RH schwach variiert und dass ΔAM groß ist. Wegen kleiner ΔRH kann κ schwierig mit RH stark variieren und weil eine große ΔAM die Abhängigkeit der κ von RH schwächt, wird insgesamt in diesem Bereich keine starke κ - RH Korrelation beobachtet. (siehe dazu die Tabelle der Hauptgebiete der Parameter im Resümee)

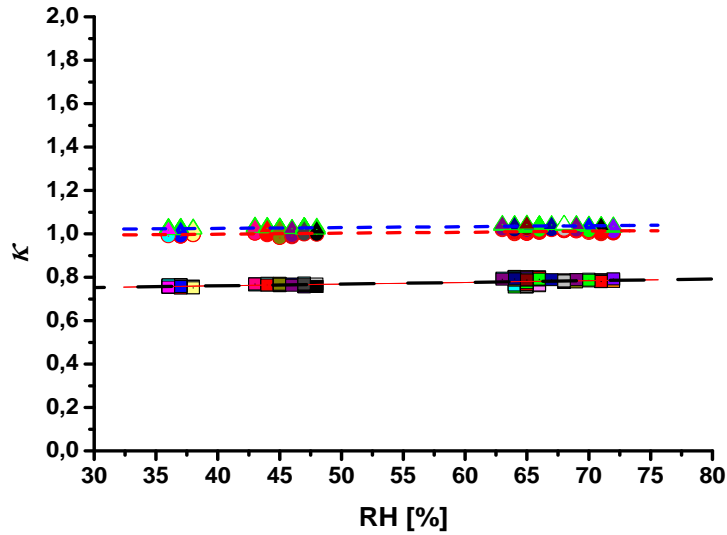


Abbildung 3.26: Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien aus den Daten entsprechend den Einstrahlungswerten im Intervall von 550 bis 650 $[W/m^2]$: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

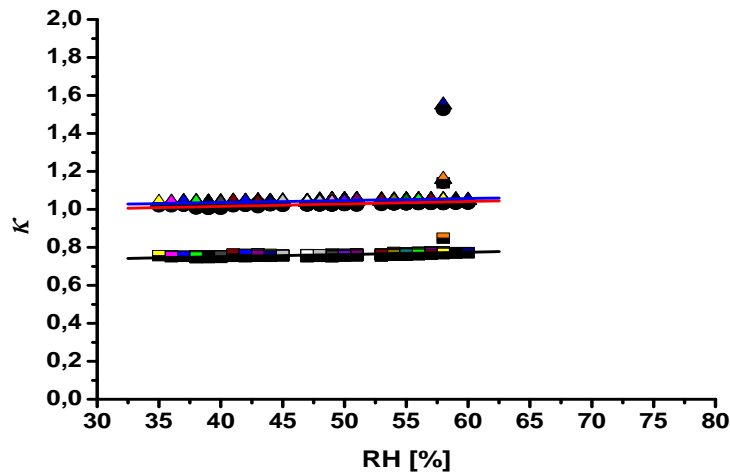


Abbildung 3.27: Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien aus den Daten entsprechend den Einstrahlungswerten im Intervall von 850 bis 950 $[W/m^2]$: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

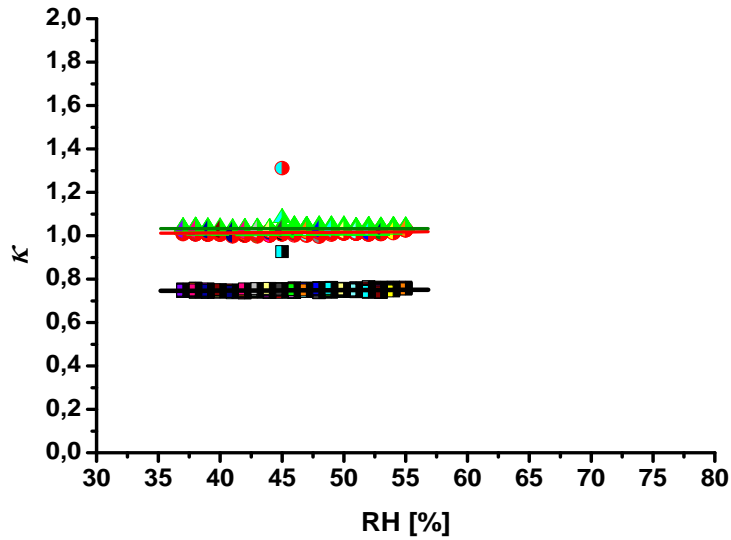


Abbildung 3.28: Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien aus den Daten entsprechend den Einstrahlungswerten im Intervall von 950 bis 1050 $[W/m^2]$: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

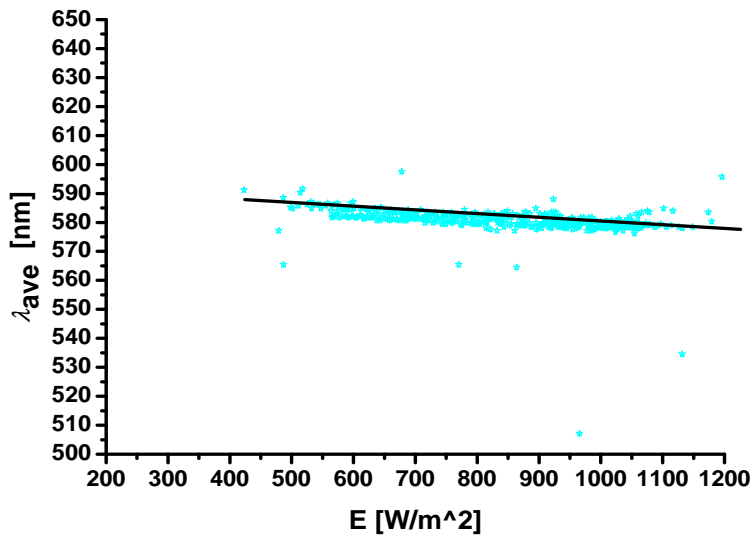


Abbildung 3.29: Die Korrelation zwischen λ_{ave} und Einstrahlung an einem clear-sky Tag: 23.07.2012. Die Linie ist die lineare Regression.

3.3.2 Auswertungen und Ergebnisse der Daten der bewölkten und regnerischen Tage

Zur weiteren Analyse, wurden einige “bewölkte Tage ”und “regnerische Tage ”vom Juli 2012 von der monatlichen Übersicht der Einstrahlungskurven ausgesucht. Es wurden die Daten der korrelierenden Parameter vom täglichen Verlauf von 9h bis 17h pro Minute für die ausgesuchte Tage verwendet und die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit aus den Daten der Wetterstation und die Korrelationen der Modul und Umgebungsparameter untersucht und analysiert.

In Abbildung 3.30 Links, und 3.30 Rechts, ist die Abhängigkeit der RH von E und der λ_{ave} von RH dargestellt. Die RH –Werte betragen an den bewölkten und regnerischen Tagen, Werte von unter 30 bis über 90 [%], also sehr unterschiedliche RH –Werte (vermutlich je nachdem, ob regnerische Bedingungen oder schwache Bewölkung oder starke Bewölkung). An den bewölkten und regnerischen Tagen, wird ein großer Teil der Einstrahlung an Wolken reflektiert, wie bereits im ersten Kapitel beschrieben. Außerdem sind die Streuung des Lichtes an den Wassertröpfchen und die Absorption des Lichtes durch die Wassertröpfchen stark. Aus diesen Gründen ist der diffuse Anteil der am Boden ankommende Einstrahlung und die Differenz der diffusen und der globalen Einstrahlung sehr groß. Trotzdem können am Boden ganz unterschiedliche Einstrahlungsstärken erreicht werden, die mit dem Maß der relativen Luftfeuchtigkeit nicht korrelieren (siehe Abbildung 3.30 Links). Die hohe aber auch niedrige Einstrahlungswerte können an bewölkten und regnerischen Tagen bei jeder RH vorkommen.

Durch die starke Streuung und Absorption wird das Spektrum der am Boden ankommenden Einstrahlung, wie bereits erwähnt, blau und weiter in den kurzwelligen Bereich verschoben. Das Verhalten der λ_{ave} und ihre Änderung war an den nur clear sky Tagen (Z.B in Abbildung 3.29, wo die λ_{ave} mit steigender E sinkt oder in Abbildung 3.20 Links, wo λ_{ave} mit steigender RH steigt) anders als an den regnerischen und bewölkten Tagen. Der Grund dafür sind, wie bereits erwähnt, die anderen Sonnenstrahlungsverhältnisse in der Atmosphäre an einem Tag mit nur durchgehendem Sonnenschein. An den clear sky Tagen war der Schwerpunkt der Werte der λ_{ave} bei über 580nm und an den bewölkten und regnerischen Tagen ist der gegen 575 nm (siehe auch Abbildung 3.31 Links). Die λ_{ave} und RH korrelieren an den bewölkten und regnerischen Tagen nicht miteinander, auch wenn der Bereich der λ_{ave} , wie in Abbildung 3.31 auf 500 bis 650nm beschränkt wird. λ_{ave} kann an den bewölkten Tagen niedrige Werte von unter 450 nm aber auch hohe Werte von über 700nm erreichen. Ein vergleichbares Ergebnis wurde auch in den Referenzen [30, 31] beobachtet.

Es gibt keine Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und RH an den bewölkten oder regnerischen Tagen für alle 3 untersuchten Technologien. In Abbildung 3.31 Rechts ist die Abhängigkeit der κ von RH an den bewölkten oder regnerischen Tagen dargestellt. Der Korrelationskoeffizient, für die Technologie First ergibt: $r = 0,27$, für die Technologie Schott ergibt: $r = 0,05$, und für die Technologie Solarwatt: $r = -0,101$. Die κ und RH korrelieren also an den bewölkten oder regnerischen Tagen nicht miteinander, b.z.w. korrelieren nur für die Technologie First, sehr schwach. Das ist nicht überraschend, da hier RH und E, aber auch I_{SC}/I_{STC} und RH miteinander nicht korrelieren. Der Korrelationskoeffizient ist hier für die Monokristalline, negative, anders als bei den bisherigen Ergebnissen (die κ der Monokristalline sinkt mit höherer RH). Die κ –Werte der Technologie First bleiben wie an den clear sky Tagen deutlich unter den Werten der beiden anderen Technologien.

Es ist also an den bewölkten oder regnerischen Tagen aufgrund der sehr starken Streuung der Sonneneinstrahlung, kaum möglich, Korrelationen zwischen RH und Umgebungs –und Modulparameter festzustellen. Alle untersuchte Parameter erreichen unterschiedliche hohe aber auch niedrige Werte bei allen möglichen RH –Werten, ganz anders als an den clear sky Tagen.

Die Korrelationen der Modul und Umgebungsparameter und RH wurden an den ausgesuchten clear sky Tagen , aber auch an den bewölkten oder regnerischen Tagen getrennt untersucht und analysiert, um das Verhalten der Parameter bei ganz unterschiedlichen Wetterbedingungen zu beobachten. Das wurde aber auch durchgeführt um bei der nächsten und der letzten Reihe der Auswertungen festzustellen, welchen Bereich der Daten aller ausgesuchten Tage aus der Tagesklassifikation, die clear sky Tage und welchen Bereich die bewölkte Tage bedecken.

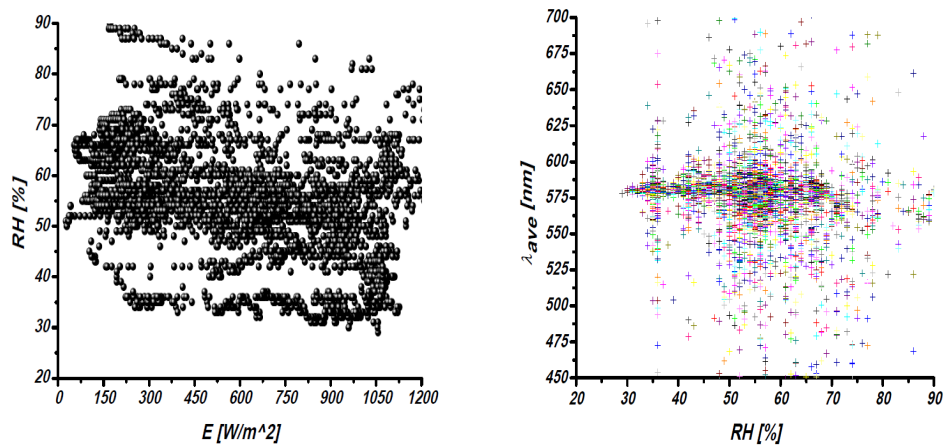


Abbildung 3.30: Korrelation zwischen Links: RH[%] (aus den Daten der Wetterstation) und der Einstrahlungsstärke, Rechts: λ_{ave} [nm] und der RH [%], an den bewölkten und regnerischen Tagen.

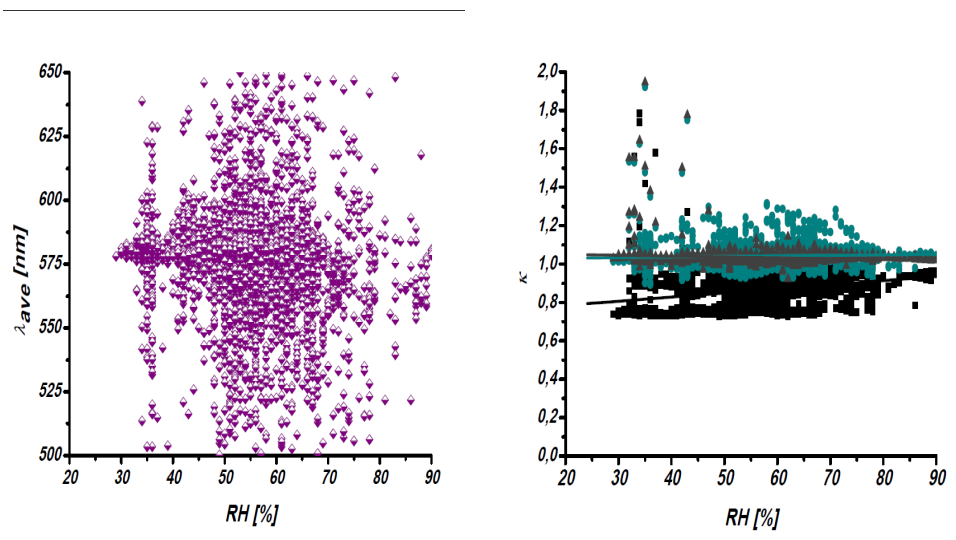


Abbildung 3.31: Korrelation zwischen Links: λ_{ave} [nm] und der RH [%] an den bewölkten und regnerischen Tagen, für den λ_{ave} - Bereich von 500 bis 650[nm], Rechts: κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

3.3.3 Auswertungen und Ergebnisse der Daten aller ausgesuchten Tage aus der Tagesklassifikation

Es wurden für die letzte Reihe der Auswertungen die Daten der korrelierenden Parameter vom täglichen Verlauf von 9h bis 17h pro Minute für alle ausgesuchte "clear sky" und bewölkte oder regnerische Tage vom Juli 2012 verwendet und die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit aus den Daten der Wetterstation. Aus den Daten aus der Wetterstation wurden dann die dazugehörige Werte der absoluten Luftfeuchtigkeit auf der Boden-Höhe berechnet. Die Korrelationen der Modul und Umgebungsparameter wurden daraus untersucht und analysiert.

In Abbildung 3.32 ist die Abhängigkeit der RH von E dargestellt. Die lineare Regression ergibt : $RH = (-134 \pm 4) * 10^{-4} * E + (62,5 \pm 0,3)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = -0,39$. Die RH und E korrelieren also hier schwach und negative miteinander. Dieses Verhalten ist dem Verhalten bei der Korrelation zwischen E und RH auf 200m Höhe, aus vorigen Auswertungen ähnlich. Die lineare Regression besitzt allerdings hier eine etwas (circa. um das 4 Fache) schwächere Steigung. Der Korrelationskoeffizient ist auch hier deutlich kleiner als bei der Korrelation zwischen E und RH auf 200m Höhe. Es sind die Gebiete der verschiedenen Tagestypen aus der Tagesklassifikation aus den letzten Reihen der Ergebnisse und der Abbildungen in Abbildung 3.32 festgelegt worden.

Es sind auch die Einstrahlungsintervalle festgelegt worden, deren Verhalten dann genauer beobachtet wird. Es sind auch darin die RH- Gebiete der hohen Daten-Konzentration festgelegt worden. Es wurde dann in Abbildung 3.33 Links, in der Mitte und Rechts, RH gegen E nur im E-Bereich von 200 bis 300 [W/m^2], b.z.w von 550 bis 650 [W/m^2], und von 950 bis 1050 [W/m^2] dargestellt. RH variiert hauptsächlich im ersten E- Bereich von 50 bis 70 [%], im zweiten Bereich in einem großen RH- Bereich von circa. 35 bis 70 [%], und im dritten Bereich in einem kleineren RH- Intervall von circa. 35 bis 55 [%].

In Abbildung 3.34 ist die Abhängigkeit der λ_{ave} von RH dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (0,02 \pm 0,06) * RH + (583 \pm 3)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,003$. Die λ_{ave} und RH korrelieren nicht miteinander. Es ist anders als die Korrelation zwischen RH auf 200m Höhe und λ_{ave} . Bei ganz unterschiedlichen RH -Werten, gibt es auch total unterschiedliche λ_{ave} -Werte von unter 450 bis über 700 [nm], wenn die Daten aller Tagestypen betrachtet werden.

In Abbildung 3.35, wurde dann die Abhängigkeit der λ_{ave} von RH, in dem dichten λ_{ave} -Bereich der Abbildung 3.34 dargestellt (Es wurden die gefilterten Daten des beschränkten λ_{ave} -Bereichs von 500 bis 650 nm

dazu verwendet). Der Vergleich der Vorigen Ergebnisse zeigen, daß λ_{ave} der bewölkten Tage zum großen Teil bei $RH > 50$ [%] unter 580[nm] liegt und sehr stark schwankt. Die der clear sky Tage liegt bei $RH < 60$ [%] allerdings zum großen Teil über 580 [nm] und variiert viel schwächer.

In Abbildung 3.36 ist die Abhängigkeit der λ_{ave} von E dargestellt.

Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (39 \pm 9) * 10^{-4} * E + (575,5 \pm 0,6)$. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,06$. Die λ_{ave} und E korrelieren auch nicht miteinander. Die Korrelation zwischen E und λ_{ave} aus den vorigen Ergebnissen war größer aber auch schwach.

In Abbildung 3.37 ist die Abhängigkeit der I_{SC}/I_{STC} von RH dargestellt. Der Korrelationskoeffizient für die Technologie First ergibt: $r = -0,72$, für die Technologie Schott: $r = -0,71$, und für die Technologie Solarwatt: $r = -0,702$. Es besteht also für alle Technologien eine starke, wie erwartet, negative und für alle 3 ziemlich gleiche Korrelation. Das bedeutet, daß die I_{SC}/I_{STC} und RH miteinander stark korrelieren könnten, auch wenn die RH und E miteinander schwach korrelieren würden, und RH und λ_{ave} gar nicht miteinander korrelieren würden. Die gefundene Korrelation hier zwischen I_{SC}/I_{STC} und RH verhält sich ähnlich wie die bekannte Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und RH auf der 200m Höhe.

In Abbildung 3.38 ist die Abhängigkeit der κ von RH aus den Daten aller ausgesuchten Tage des Monats Juli dargestellt. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(First) = (302 \pm 9) * 10^{-5} * RH + (0,669 \pm 0,005)$. Der Korrelationskoeffizient ist für die Technologie First $r = 0,4$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Schott) = (70 \pm 4) * 10^{-5} * RH + (0,992 \pm 0,002)$. Der Korrelationskoeffizient ist für die Technologie Schott $r = 0,21$. Die lineare Regression ergibt: $\kappa(Solarwatt) = (-3,1 \pm 2,2) * 10^{-5} * RH + (1,034 \pm 0,001)$. Der Korrelationskoeffizient ist für die Technologie Solarwatt, $r = -0,013$. Die κ korreliert für alle 3 Technologien schwach mit RH, wenn die Daten aller Tagestypen betrachtet werden, es ist trotzdem bei den Dünnschicht- Technologien bei der linearen Regression eine Steigung sichtbar (es ist also eine Korrelation vorhanden, die kleiner ist als die aus der ersten Reihe der Auswertungen). Das ist nicht überraschend, weil κ nur an den clear sky Tagen und nur für den Einstrahlungsbereich von 550 bis 650 [W/m^2] mit RH stark korreliert hat (siehe dazu die Abbildung 3.26). Außerdem hat die RH mit E schwach korreliert und mit λ_{ave} gar nicht, wo alle Tagestypen betrachtet worden sind. Dieses Ergebnis ist aber ganz unterschiedlich als die Korrelation zwischen RH auf 200m Höhe und κ aus den bereits bekannten Ergebnissen.

Die weitere Betrachtung zeigt in der Folge den Grund für die eben bereits beobachtete κ - RH- Abhängigkeit:

In Abbildung 3.39 wurde die Abhängigkeit der κ von RH im E –Bereich von 200 bis 300 [W/m^2] dargestellt. Dieser E –Bereich besteht nur aus den Daten der regnerischen und bewölkten Tagen. In diesem Bereich variiert κ stark und κ der Monokristalline sinkt sogar mit steigender RH. κ der Monokristalline sinkt ja mit steigender RH auch, wenn die Daten aller ausgesuchten Tage beobachtet werden und der ganze beobachtete Einstrahlungsbereich (in Abbildung 3.38).

In Abbildung 3.40 wurde die Abhängigkeit der κ von RH im E –Bereich von 500 bis 650 [W/m^2] dargestellt. Dieser Bereich besteht aus den Daten der clear sky Tage aber auch der bewölkten Tage. Der Korrelationskoeffizient in diesem Bereich, beträgt für die Technologie First, $r = 0,31$, für die Technologie Schott, $r = 0,35$, und für die Technologie Solarwatt, $r = 0,68$. Die κ und RH korrelieren also auch nicht in diesem Bereich stark wenn die Daten aller Tagestypen betrachtet werden, außer bei der Monokristalline –Technologie (anders als nur an den clear sky Tagen). In Abbildung 3.41 wurde die Abhängigkeit der κ von RH im E –Bereich von 950 bis 1050 [W/m^2] dargestellt. Dieser Bereich besteht im RH –Bereich von circa. 40 bis 55 [%] aus den Daten der clear sky Tage.

Es wurde schließlich noch die absolute Luftfeuchtigkeit [g/m^3] auf der Boden –Höhe, aus den vorhandenen Umgebungsdaten der Wetterstation berechnet und ihre Korrelation zu der relativen Luftfeuchtigkeit auf der Boden –Höhe in Abbildung 3.43 dargestellt. Die Umgebungstemperaturen wurden aus den Daten der Wetterstation entnommen. Aus dem bekannten meteorologischen (Sättigungswassergehalt der Luft- Temperatur) Diagramm wurden aus den bekannten Temperaturen die entsprechenden Werte des Sättigungswassergehalts der Luft entnommen. Mit Hilfe dieser Werte und der Werte der RH aus der Wetterstation wurden anhand der Gleichung 3.6 die Werte der F_a berechnet. Der Korrelationskoeffizient beträgt hier $r = 0,22$. Die F_a und RH (beide auf der Boden –Höhe) korrelieren also sehr schwach miteinander.

Der Einfluss des AM- Faktors auf die Abhängigkeiten der Parameter von RH und eventuelle andere Einflüsse

Es wurde noch in Abbildung 3.44 untersucht, ob der AM –Faktor und RH vom täglichen Verlauf (9h bis 17h) miteinander korrelieren, wenn die Daten aller Tagestypen betrachtet werden und der Einstrahlungsbereich von 500 bis 650 $[W/m^2]$. In diesem Bereich, also hauptsächlich im Hauptgebiet 2 (siehe dazu die Tabelle der Parameter- Bereiche im Resümee) ist, die ΔRH sehr groß und schwankt sehr stark und daraus war jegliche Korrelation mit RH sehr schwach. Außerdem war die λ_{ave} sehr groß, und der Bereich besteht aus den clear sky Tagen und auch bewölkten Tagen, außerdem war es der einzige Bereich, wo es an nur clear sky Tagen eine starke κ - RH Korrelation gab, obwohl es an allen Tagen in diesem Bereich auch keine starke κ - RH Korrelation gab. Aus diesen Gründen hat sich die Frage gestellt, wie groß der Einfluss vom AM –Faktor auf die Parameter in diesem Bereich wäre. Um dies zu überprüfen, wurde zunächst untersucht, ob der AM –Faktor mit der RH korreliert. Wie es zu erkennen ist, korrelieren die beiden Parameter nicht miteinander. Dieses Ergebnis ist dem bereits bekannten Ergebnis aus der Korrelation zwischen RH auf 200m Höhe und AM –Faktor ähnlich. Die Variation des AM- Faktors ist allerdings hier sehr groß und circa. um 1,2.

Da AM –Faktor und RH miteinander nicht korrelieren, hat sich die Frage gestellt ob die λ_{ave} mit dem Parameter “AM*RH ” stärker korrelieren würden, der sich aus der Überlagerung des Einflusses des AM –Faktors und der relativen Luftfeuchtigkeit ergibt. Das würde auch die Ergebnisse der Bereiche E: 200- 300 $[W/m^2]$, E: 500- 650 $[W/m^2]$, und E: 950- 1050 $[W/m^2]$ und der zugehörigen angebotenen Variationsbreite von RH und λ_{ave} erklären (siehe dazu die Tabelle der Parameter- Bereiche in der Resümee). Es wurde schließlich aus diesem Grund in Abbildung 3.45 die Abhängigkeit der λ_{ave} von AM*RH untersucht. Die lineare Regression ergibt: $\lambda_{ave} = (0,1 \pm 0,13) * AM * RH + (577 \pm 10)$. Der Korrelationskoeffizient ist hier $r = 0,04$. Wie es zu erkennen ist, korrelieren die λ_{ave} und AM*RH nicht miteinander. Da aber der Korrelationskoeffizient hier circa. um einen 10 –er Faktor größer ist als der zwischen λ_{ave} und RH selbst, und die Steigung der linearen Regression 5 Mal größer ist als die aus der Korrelation der λ_{ave} und RH, folgt daraus ein verstärkender Einfluss des AM –Faktors auf die λ_{ave} und damit auf die andere Parameter. Der Parameter AM*RH wäre vermutlich ein geeigneterer Parameter für die weitere Untersuchungen als RH selbst.

Es hat sich außerdem die Frage gestellt, ob die beobachtete Steigung der Stromumwandlungseffizienz mit steigender RH nicht aus folgendem Grund verursacht wurde: Die Einstrahlung sinkt mit steigender RH und damit sinkt der Kurzschlussstrom auch mit steigender RH. Daraus folgt die Erhöhung des gesamt-Messwiderstands in der Messschaltung (siehe dazu den Teil 2.1.5 im Kapitel 2 und die Abbildung 2.2), was wiederum die Erhöhung des Einflusses des Shunt- Widerstands zur Folge hat. Das würde zur Steigerung der Modul-Leistung und der Stromumwandlungseffizienz führen.

Das wurde auf 2 Wege ausgeschlossen:

1) Alle geringe Einstrahlungsstärken von $E < 150[W/m^2]$ wurden in die Auswertungen nicht einbezogen. Also der Einfluss kann nicht von sehr geringen Einstrahlungen verursacht sein.

2) Durch eine verfeinerte Analyse durch Beschränkung der Einstrahlungsintervalle, wurde beobachtet daß die Stromumwandlungseffizienz der PV- Module auch in einem kleinen beschränkten Einstrahlungsbereich und auch nur bei hohen Einstrahlungen mit steigender RH steigt (zumindest bei den Dünnschicht- Technologien gibt es immer eine Steigung).

Ein ähnliches Ergebnis wurde auch in der Referenz [29] beobachtet.

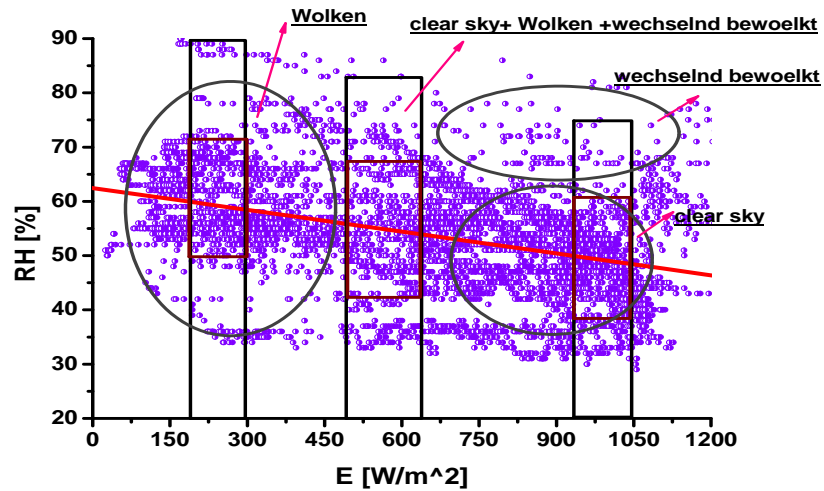


Abbildung 3.32: Korrelation zwischen RH[%] (aus den Daten der Wetterstation) und der Einstrahlungsstärke, an allen ausgesuchten Tagen aus der Tagesklassifikation.

Die Linie ist die lineare Regression. Es sind die Gebiete der verschiedenen Tagestypen und verschiedenen Einstrahlungsintervallen laut bisherigen Auswertungen festgelegt worden. Es sind auch darin die RH- Gebiete der hohen Daten-Konzentration festgelegt worden.

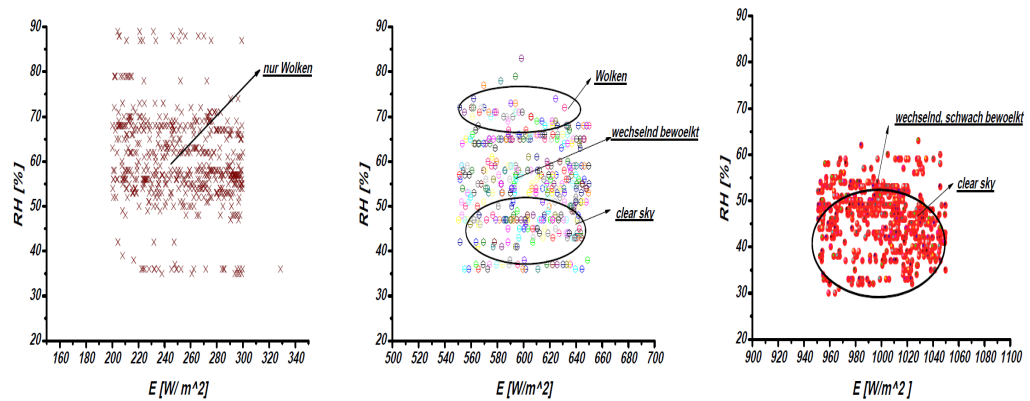


Abbildung 3.33: Korrelation zwischen RH[%] und der Einstrahlungsstärke, Links: Für den Einstrahlungsbereich von 200 bis 300 $[W/m^2]$. In der Mitte: Für den Einstrahlungsbereich von 550 bis 650 $[W/m^2]$. Rechts: Für den Einstrahlungsbereich von 950 bis 1050 $[W/m^2]$. Es sind die Gebiete der verschiedenen Tagestypen festgelegt worden.

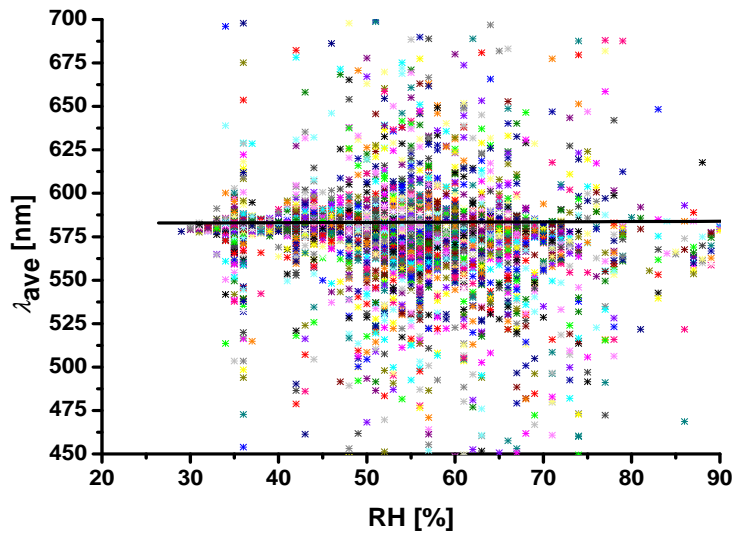


Abbildung 3.34: Die Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der RH [%] an allen ausgetesteten Tagen. Die Linie ist die lineare Regression.

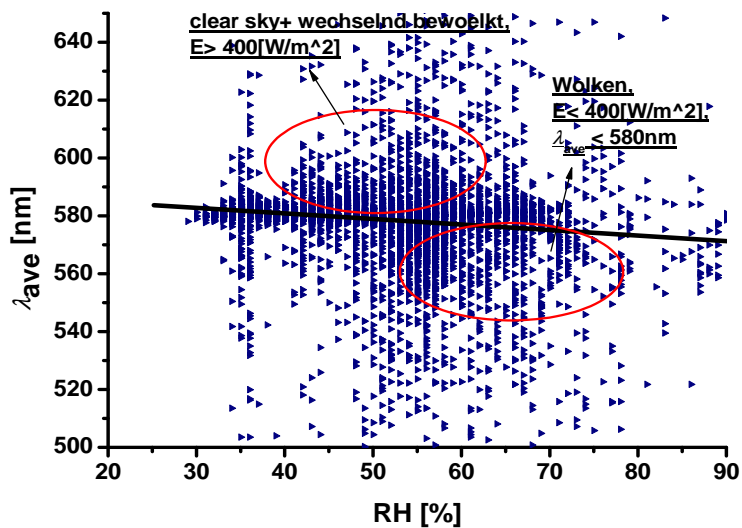


Abbildung 3.35: Korrelation zwischen λ_{ave} und der RH [%]. Allerdings nur für den λ_{ave} - Bereich von 500 bis 650 [nm].

Die Linie ist die lineare Regression. Es sind die Gebiete der verschiedenen Tagestypen und verschiedenen Einstrahlungsintervallen laut bisherigen Auswertungen festgelegt worden.

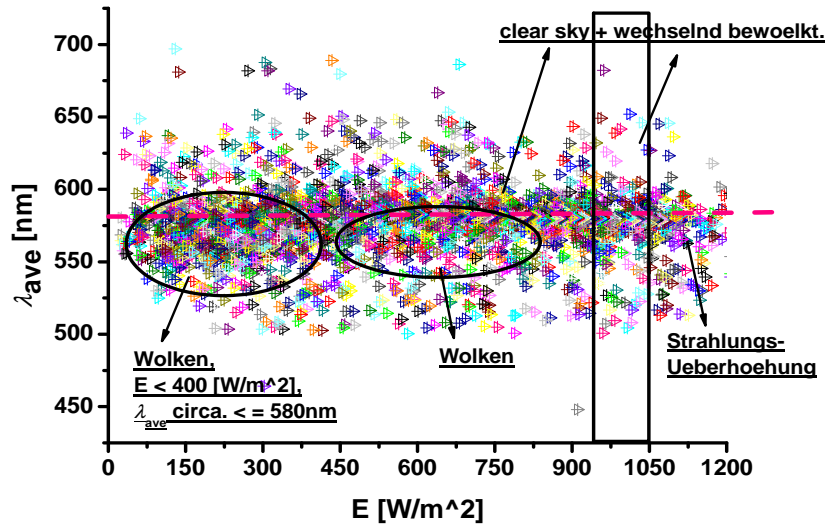


Abbildung 3.36: Korrelation zwischen λ_{ave} und der E, für den λ_{ave} -Bereich von 500 bis 700 [nm].

Die Linie bezeichnet die $\lambda_{ave} = 580nm$. Es sind die Gebiete der verschiedenen Tagestypen laut bisherigen Auswertungen festgelegt worden.

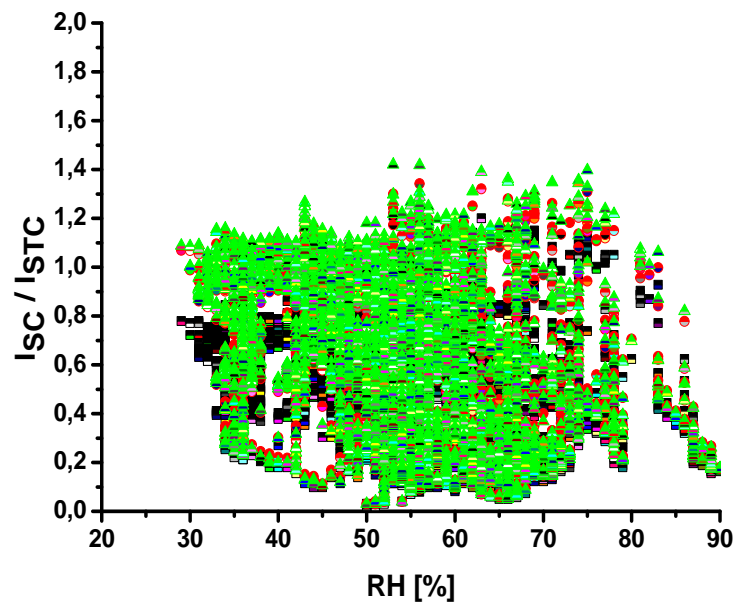


Abbildung 3.37: Auftragung von I_{SC}/I_{STC} und RH [%].

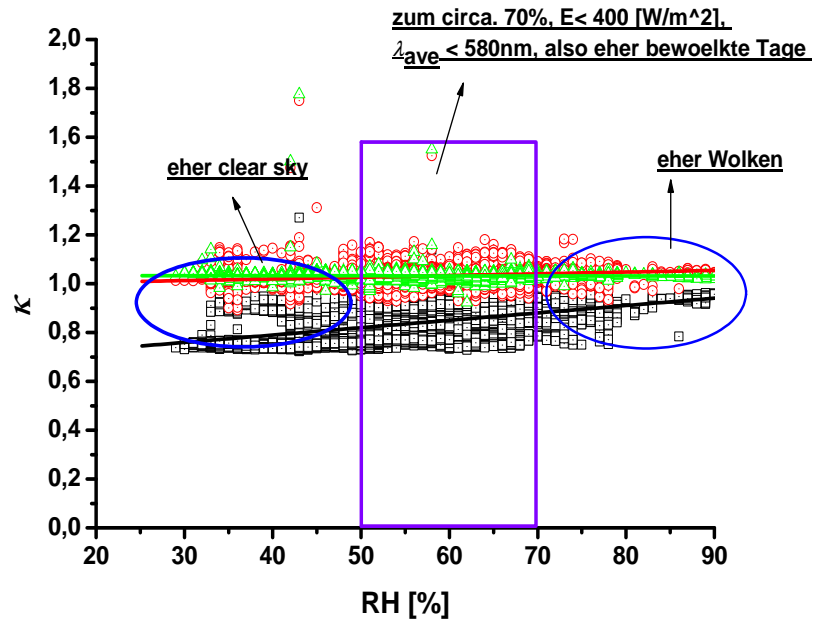


Abbildung 3.38: Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind die lineare Regressionen. Es sind die Gebiete der verschiedenen Tagestypen festgelegt worden.

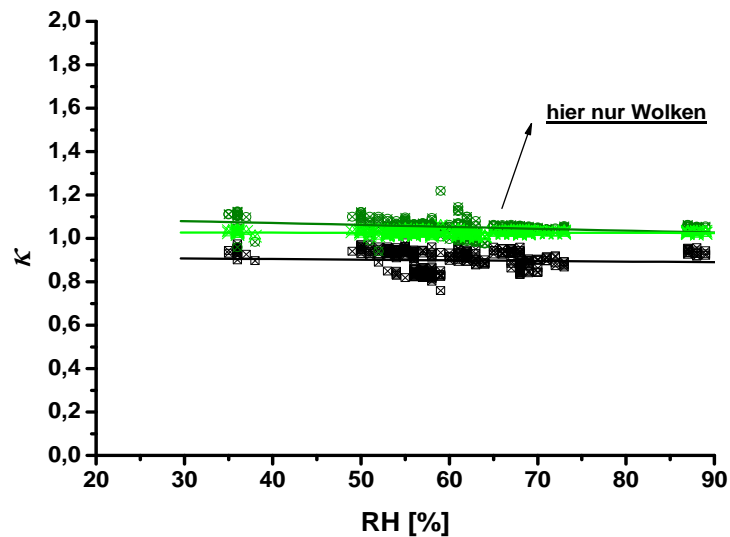


Abbildung 3.39: Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien für den Einstrahlungsbereich von 200 bis 300 $\text{[W/m}^2\text{]}$: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind die lineare Regressionen.

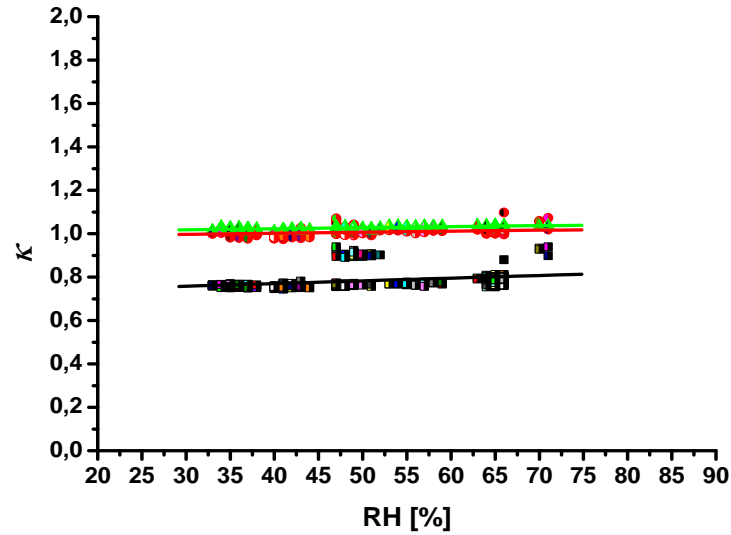


Abbildung 3.40: Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien für den Einstrahlungsbereich von 500 bis 650 $[W/m^2]$: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind die lineare Regressionen.

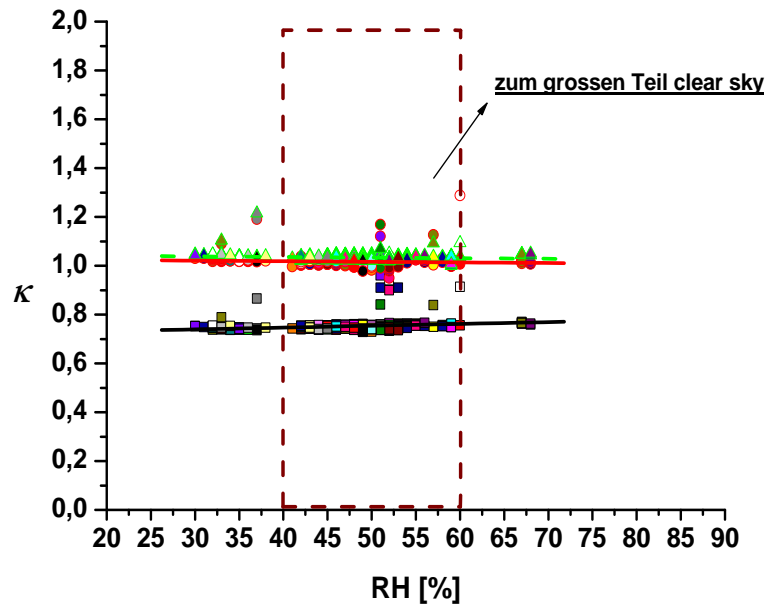


Abbildung 3.41: Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien für den Einstrahlungsbereich von 950 bis 1050 $[W/m^2]$: (■) CdTe, (●) a-Si, (▲) Mono. Die Linien sind die lineare Regressionen.

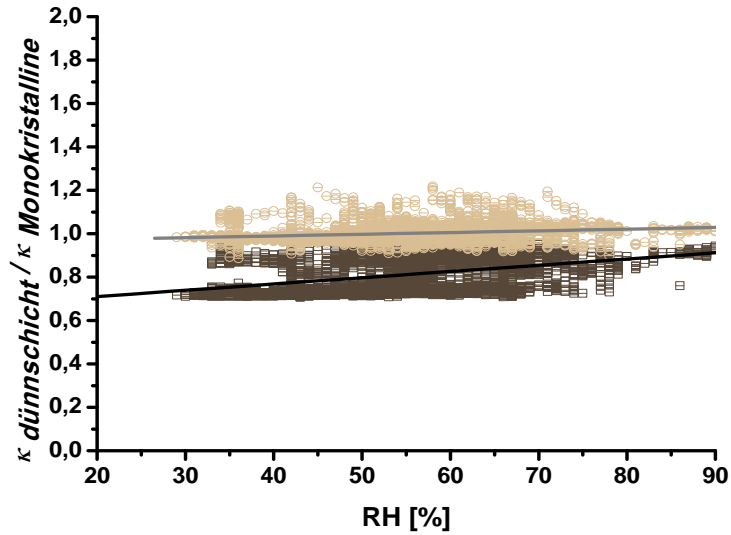


Abbildung 3.42: Korrelation zwischen $\kappa_{Dünnschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der RH [%], für beide Dünnschicht-Technologien: (■) $\kappa_{CdTe}/\kappa_{Monok}$, und (●) $\kappa_{a-Si}/\kappa_{Monok}$. Die Linien sind jeweils lineare Regressionen.

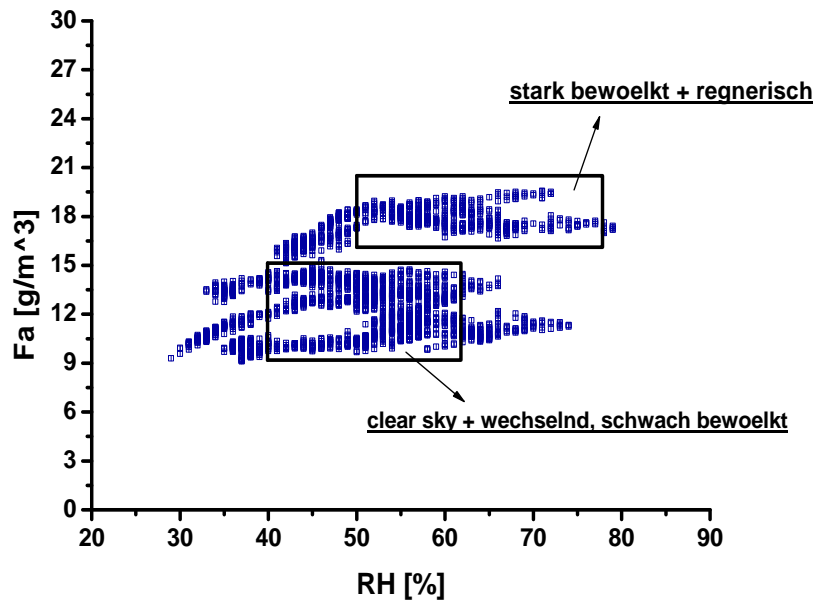


Abbildung 3.43: Korrelation zwischen absoluter Luftfeuchtigkeit und der RH [%] auf der Bodenhöhe für alle ausgesuchten Tage, aus den Daten der Wetterstation. Es sind die Gebiete der verschiedenen Tagestypen festgelegt worden.

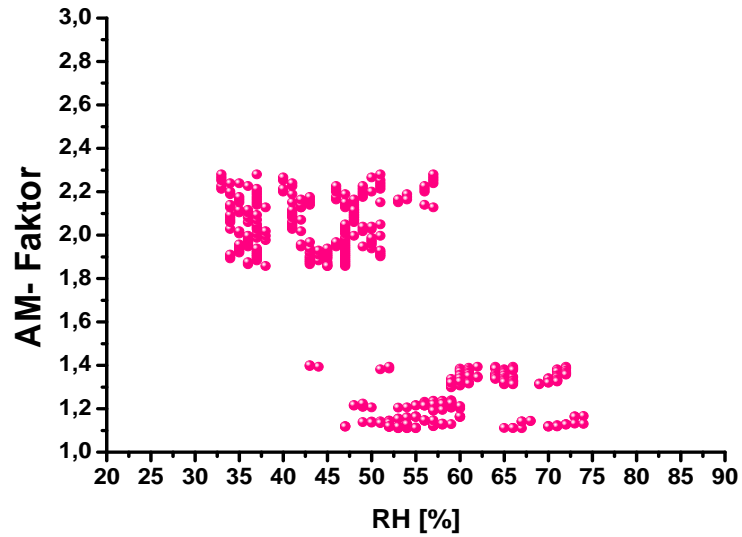


Abbildung 3.44: Korrelation zwischen dem AM-Faktor und relativer Luftfeuchtigkeit, für den Einstrahlungsbereich von 500 bis 650 $[W/m^2]$.

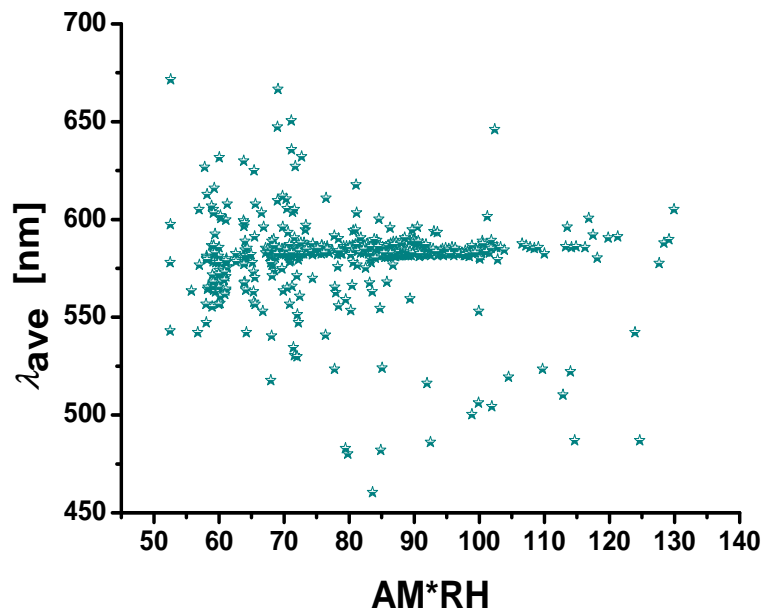


Abbildung 3.45: Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und dem Parameter $AM*RH$, für den Einstrahlungsbereich von 500 bis 650 $[W/m^2]$.

3.4 Simulationen

Es wurden 2 Modellierungs –Programme verwendet, um die theoretischen Werte der Feuchteabhängigkeit mit einem Teil der gemessenen und ausgewerteten Werten zu vergleichen. Es ist allerdings kein exakter Vergleich möglich, da manche herrschende Bedingungen und Faktoren bei den Messungen anders gewesen sind als bei den Berechnungen in den Modellierungs- Programmen. Die folgende Diskussion nutzt also zu einem relativen Vergleich mit den bereits vorhandenen Ergebnissen.

Anhand des ersten Simulationsprogramms des Namen “Solar Spectrum”, innerhalb der Austrian institute of technology [a] entwickelt, wurden die λ_{ave} und ihre Standardabweichung bei verschiedenen RH –Werten berechnet. Es wurde für einen beliebigen Tag des Monats Juli 2012, für jeweils Vormittag und Nachmittag für 2 bestimmte Uhrzeiten 9h und 13h (jeweils Ortszeit Wien), und für die geographische Angaben der Stadt Wien, und für die Umgebungsbedingungen bei 25°C, dem Druck vom 1013hPa, und der globalen horizontalen Einstrahlung von 800 [W/m²], für die horizontale Ausrichtung der Module durchgeführt. Das Programm ist entworfen worden, um den Anteil der diffusen, sowie direkten und auch globalen Einstrahlung bei der Angabe eben genannter Parameter im Vergleich zum AM 1,5 Spektrum zu berechnen und darzustellen. Aus den Einstrahlungswerten und dazugehörige Wellenlängen, wurden dann die λ_{ave} –Werte berechnet.

Es wurden also die λ_{ave} und ihre Standardabweichung (δ) um jeweils 9h und 13h, bei RH von 30, 50, 70 und 90 [%] berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Uhrzeit	9h	9h	13h	13h
RH [%]	λ_{ave} [nm]	δ [nm]	λ_{ave} [nm]	δ [nm]
30	603	8	596	6
50	600	6	595	6
70	599	6	595	6
90	599	6	594	6

Tabelle 3.1: Die berechnete λ_{ave} Werte und ihre Standardabweichungen für die angegebene Uhrzeiten und Werte der relativen Luftfeuchtigkeit durch den Simulator.

Es folgt aus den Ergebnissen der Modellierung, daß die λ_{ave} mit steigender RH sinkt und daß die Variation der λ_{ave} am Vormittag größer ist als am Nachmittag. Nach den Ergebnissen der ausgesuchten Juli –Tage aller Tagestypen, war keine starke Korrelation zwischen RH und λ_{ave} zu erkennen.

Die Variation der λ_{ave} war aber auch aus den ausgewerteten Ergebnissen am Vormittag größer, da die Korrelation mit RH am Vormittag viel stärker war. Da variiert die λ_{ave} stärker, wenn die RH steigt.

Es wurde noch ein zweites Simulationsprogramm des Namen “libRadtran”, zur Modellierung einiger Ergebnisse verwendet. libRadtran ist die Bibliothek für Strahlungstransport, und ist eine Sammlung von C –und Fortran –Funktionen und Programme zur Berechnung von Sonnen-und Wärmestrahlung in der Erdatmosphäre. [32]

Es wurden die direkte, diffuse und globale Anteile der Einstrahlungsstärke $[W/m^2]$ und der λ_{ave} [nm] bei 2 verschiedenen angegebenen Wassergehalten (die ganze absolute Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre) berechnet. Es wurden die theoretische Werte ein Mal für ein niedriges Gehalt von 2 kg (in einer Luftsäule mit $1m^2$ Fläche) und ein Mal für ein hohes Gehalt von 30 kg (in einer Luftsäule mit $1m^2$ Fläche) berechnet.

Wasser gehalt [Kg]	λ_{ave} (direkt) [nm]	λ_{ave} (diffuse) [nm]	λ_{ave} (global) [nm]	E (direkt) [W/m^2]	E (diffuse) [W/m^2]	E (glo- bal) [W/m^2]
2	670	548	602	82	112	194
30	664	547	594	78	123	201

Tabelle 3.2: Die berechnete λ_{ave} und Einstrahlung’s - Werte für die angegebene Wassergehalten in der Luft durch den Strahlungstransport.

Hier ist nur ein Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Zeitraum von März 2011 bis Juni 2011 möglich. In Abbildung 3.15 Rechts sinkt die λ_{ave} (globaler Anteil) mit steigender Fa. Nach der Modellierung sinkt auch der direkte, diffuse, aber auch globale Anteil der λ_{ave} mit steigender absoluten Luftfeuchtigkeit entlang der ganzen Atmosphäre. Nach der letzten Simulation, hat die λ_{ave} auch immer mit steigender RH gesunken, also ein ähnliches Ergebnis geliefert. Nach dem Strahlungstransport –Programm, steigt der diffuse Anteil der Sonnenstrahlung und sinkt der direkte Anteil mit steigender Fa. Das ist nicht überraschend, da die Absorption der Einstrahlung durch die Wassertröpfchen und die Mie –Streuung an den Wassertröpfchen mit steigender Luftfeuchtigkeit steigt.

Der globale Anteil der Sonnenstrahlung steigt aber auch mit steigender F_a , nach den theoretischen Ergebnissen. In Abbildung 3.15 Links sinkt allerdings die globale Einstrahlung mit steigender F_a entlang der Atmosphäre, aber sehr schwach und der Korrelationskoeffizient ist sehr niedrig. Eine Schlussfolgerung wäre also daß die F_a entlang der Atmosphäre [g/m^3] b.z.w das Wassergehalt [kg] und E [W/m^2] miteinander nicht korrelieren.

Kapitel 4

Resümee

4.1 Zusammenfassung der Diskussion der Analyse der Korrelationen mit der Luftfeuchtigkeit

Eine der Fragen die sich am Anfang dieser Arbeit gestellt hat war, wie stark die relative Luftfeuchtigkeit nahe Bodenhöhe mit anderen Umgebungsparameter und mit den Modulparametern von Photovoltaik- Modulen korreliert. Eine wichtige Frage war aber auch, ob die relative Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre, jene auf der Bodenhöhe beeinflusst und wie stark dieser Einfluss ist. Außerdem ob die relative Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre die anderen Parameter auch direkt beeinflusst und wie stark dieser Einfluss ist. Es hat sich aber noch die Frage gestellt ob die absolute Luftfeuchtigkeit ein besserer Parameter oder ein genauso geeigneter Parameter wäre, um Korrelationen mit anderen Parameter zu definieren. Außerdem ob die absolute Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre (b.z.w der Wassergehalt in einer Luftsäule mit $1m^2$ Fläche) einen direkten Einfluss auf mehrere weitere Parameter hat. Und ob die mit der relativen Luftfeuchtigkeit entlang der Atmosphäre oder mit der relativen Luftfeuchtigkeit auf der Bodenhöhe korreliert.

Anhand aller Ergebnisse der Auswertungen der Daten des Zeitraums März bis Juni 2011 korrelieren die relative Luftfeuchte (entlang der Atmosphäre) und die nahe Bodenhöhe und die absolute Luftfeuchte (entlang der Atmosphäre) alle stark und positive miteinander (beeinflussen also einander). Weiters korreliert die relative Luftfeuchte auf der Bodenhöhe mit anderen Parameter stark, dennoch zeigt die relative Luftfeuchte (entlang der Atmosphäre) mit vielen anderen Parameter starke Korrelationen und mit

einigen anderen nicht. Die absolute Luftfeuchte (entlang der Atmosphäre) zeigt eher selten starke Korrelationen mit anderen Parameter. Das bedeutet daß die relative Luftfeuchte oder absolute Luftfeuchte entlang der Atmosphäre doch Einflüsse auf die relative Luftfeuchte auf der Bodenhöhe haben oder zum Teil auf die anderen Umgebungs –oder Modulparameter. Dennoch ist die RH auf der Bodenhöhe selbst ein besserer Maß, um Einflüsse auf die Sonneneinstrahlung, auf das Sonnenspektrum, und auf weitere für PV- Technologie entscheidende Parameter, zu berechnen und zu analysieren.

Aus den Ergebnissen der Auswertungen der Daten des Monats Juli 2012 folgt daß, sich unter den bewölkten und regnerischen Wetterbedingungen kaum Korrelationen der Umgebungs –und Modulparameter mit der relativen Luftfeuchte erkennen läßt. Unter den “clear sky –Wetterbedingungen”läßt sich aber eher nur Korrelationen erkennen wenn nur Vormittag beobachtet wird (da die Änderungen der relativen Feuchtigkeit , wie bereits gesehen, am Nachmittag sehr schwach sind). Oder wenn die Intervalle welcher wirkenden Parameter beschränkt werden (die der Parameter, mit denen die Korrelation gerade untersucht wird, oder die der anderen Parameter, die den einen Parameter weiter beeinflussen). Unter den Wetterbedingungen aller Tagestypen läßt sich auch keine starke Korrelationen mit der relativen Luftfeuchte erkennen (anhand des Korrelationskoeffizientes, es ist allerdings bei der linearen Regression immer eine Steigung oder Absinkung vorhanden, aus der zumindest ein Trend folgt) wenn der tägliche Verlauf (der ganze Vormittag und Nachmittag) beobachtet wird. Es ergibt sich allerdings starke Korrelationen mit I_{SC}/I_{STC} , an den nur “clear sky”Tagen und auch an den Tagen aus allen Wetterbedingungen. Die absolute Luftfeuchte auf der Bodenhöhe korreliert auch nicht mit der relativen Luftfeuchte auf der Bodenhöhe, wenn alle Tagestypen und der ganze tägliche Verlauf betrachtet werden.

Die Ergebnisse des Zeitraums März bis Juni 2011 und die des Monats Juli 2012 können nicht direkt miteinander verglichen werden. Das weil die Auswertungen des Zeitraums März bis Juni 2011 mit den relative Luftfeuchtigkeit´s –Werten auf 200m Meereshöhe durchgeführt wurden und die des Monats Juli 2012 mit den relative Luftfeuchtigkeit´s –Werten auf der Orshöhe (170m über der Meereshöhe) und dieser Höhenunterschied aus einigen meteorologischen Gründen zu Abweichungen der Ergebnisse führt. Außerdem wäre ein Vergleich der Korrelationen zwischen Umgebungs und Modulparameter und die relative Luftfeuchte nur möglich wenn die Messungen bei dem gleichen (oder relative gleichem) AM –Faktor durchgeführt wären, b.z.w wenn der Winkel θ in der Gleichung 1.7 kleiner wäre als 5° . Das weil der AM –Faktor (auch wenn der mit relativer Luftfeuchte selbst nicht direkt korreliert) einen großen Einfluss auf die Einflüsse auf die Sonnenstrahlung und deren Spektrum entlang der Atmosphäre hat, wie das auch in [6] beschrie-

ben wird. Da aber die Auswertungen der Messungen des Monats Juli 2012 für den ganzen täglichen Verlauf (unter starker Tagsüber AM –Faktor –Änderung von circa. 1,1 bis 2,3 also mit einer hohen Variation von 1,2) und die des Zeitraums März bis Juni 2011 für den Zeitraum von einigen Monaten für die Uhrzeit 13h (Ortszeit Wien) (unter jahres-zeitlicher AM- Faktor-Änderung von circa. 1,1 bis 1,6 also mit einer niedrigen Variation von 0,5) durchgeführt wurden, wäre ein Vergleich der Ergebnisse nicht sinnvoll. An den Ergebnissen ist ebenso erkennbar daß die relative Luftfeuchte (fast auf der Bodenhöhe) aus dem Zeitraum März bis Juni 2011 mit anderen Parameter stark korreliert, wobei bei den Ergebnissen aus dem Monat Juli 2012 keine starke Korrelation sichtbar ist.

Aus dem Vergleich aller Ergebnisse der Parameter aus den Daten des Monats Juli 2012 und der genaueren Beobachtung einiger Einstrahlungsintervalle, ergeben sich die 6 Hauptgebiete in Tabelle 4.1:

Ein Gebiet mit ΔRH relative klein, mit niedrigen Einstrahlungswerten, mit großer $\Delta\lambda_{ave}$, kann also zu großer κ –Variation und damit zu stärkerer κ - RH- Korrelation führen.(siehe als Beispiel das erste Gebiet)

Ein Gebiet mit ΔRH groß, mit mittelhohen Einstrahlungswerten, mit großer $\Delta\lambda_{ave}$, mit sehr großem ΔAM von 1,2, kann zu sehr kleiner κ –Variation und damit zu schwacher κ - RH- Korrelation führen (siehe als Beispiel das zweite Gebiet). Wenn also alle andere wesentliche Variationen in einem Bereich stark sind, wie bei mittelhohen Einstrahlungen von 500- 650 [W/m^2] variiert κ sehr schwach.

Andernfalls kann eine kleine ΔRH , mit kleiner $\Delta\lambda_{ave}$, (also wenn die anderen Parameter schwach variieren) zu mittelgroßer κ –Variation führen (siehe dazu als Beispiel das dritte Gebiet) oder zu großer κ –Variation führen wie beim vierten Gebiet.

Bei sehr hohen Einstrahlungen kann allerdings die kleine ΔRH , mit kleiner $\Delta\lambda_{ave}$, zu einer kleinen κ –Variation führen wie im fünften Gebiet. Bei niedrigen Einstrahlungen kann das auch wie im sechsten Gebiet zu einer kleinen κ –Variation führen wie im sechsten Gebiet.

Aus dem Vergleich der letzten 4 Gebiete ist zu erkennen, daß anhand der Variationen anderer Parameter nicht eindeutig festgelegt werden kann, wie stark die Stromumwandlungseffizienz der PV- Module variiert und die damit mit der relativen Luftfeuchte korreliert.

Was aber festgestellt werden kann, ist daß eine große ΔRH , $\Delta\lambda_{ave}$, und ΔAM wie im zweiten Gebiet zu einer kleinen $\Delta\kappa$ führt.

Hauptgebiete	RH-Werte [%]	E- Bereich [W/m^2]	Tagestyp	λ_{ave} -Bereich [nm]	AM-Faktor
1)	50 - 70	$E < 400$	bewölkt und regnerisch	520- 620	
2)	40 - 70	500- 650	bewölkt und clear sky	540- 620	1,1 - 2,3
3)	30 - 50	600- 900	clear sky vom Nachmittag	575- 605	
4)	50 - 65	650- 900	wechselnd bewölkt und clear sky vom Vormittag	575- 605	
5)	35 - 55	900- 1100	wechselnd bewölkt und clear sky Nachmittag	570- 610	
6)	70- 90	$E < 600$	bewölkt und regnerisch	560- 585	

Tabelle 4.1: Übersicht der Hauptgebiete der Parameter aus den Daten des Monats Juli 2012.

Das Zusammenspiel aller Auswertungen führt zu der Schlussfolgerung daß es zu einer bestimmten Uhrzeit am Tag Korrelationen mit relativer Luftfeuchtigkeit gibt, also wenn durch Festhaltung der Uhrzeit der Einfluss des AM- Faktors und die $\Delta\lambda_{ave}$ kleiner gehalten werden. Andern Falls gäbe es nur unter Berücksichtigung und Einbeziehung weiterer beeinflussender Parameter und Beschränkung der betrachteten Intervalle der Parameter Korrelationen mit der relativen Luftfeuchtigkeit.

4.2 Zusammenfassung der Diskussion des Einflusses der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Stromumwandlungseffizienz der PV –Module

Die Ergebnisse des Zeitraums März bis Juni 2011 zeigen daß, die Stromumwandlungseffizienz der PV –Module mit relativer Luftfeuchte auf der Bodenhöhe stark korrelieren und mit steigender relativer Luftfeuchte steigen. Diese Korrelation ist für die CdTe –Technologie am größten, danach für die a –Si –Technologie und für die Monokristalline –Technologie am kleinsten. Die relative Luftfeuchtigkeit beeinflusst die Stromumwandlungseffizienz der PV –Module stark. Die beeinflusst aber besonders stark die der Dünnschichttechnologien. Die relative Luftfeuchte hat also einen starken und positiven Einfluss auf die Stromumwandlungseffizienz der Module wenn der Einfluss des AM –Faktors und die $\Delta\lambda_{ave}$ kleiner gehalten werden. Aus den Ergebnissen des Monats Juli 2012 korrelieren die relative Luftfeuchte und Stromumwandlungseffizienz der Module nur unter den “clear sky” Wetterbedingungen und nur für ein kleines beschränktes Intervall der Sonnenstrahlung stark miteinander. Also die Stromumwandlungseffizienz würde nur vermutlich unter Berücksichtigung weiterer Parameter und bestimmter Intervalle der jeweiligen Parameter mit relativer Luftfeuchtigkeit stark korrelieren, wenn der ganze tägliche Verlauf beobachtet wird. Die relative Luftfeuchtigkeit hätte hier keinen direkten weiter unabhängigen Einfluss auf die Stromumwandlungseffizienz der PV –Module.

Die starke oder auch die schwache Korrelationen zwischen der Stromumwandlungseffizienz und relativer Luftfeuchtigkeit sind aus allen Ergebnissen und für alle 3 untersuchten Technologien positiv. Die Korrelation für die Monokristalline –Technologie ist allerdings an clear sky Tagen nur am Vormittag, oder an nur bewölkten Tagen sehr schwach negativ. Das bedeutet daß die relative Luftfeuchte die Stromumwandlungseffizienz der Module positive beeinflusst, die der Monokristalline aber auch manchmal schwach negative beeinflussen kann.

Anhang A

Anhänge

A.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit hat sich mit den unterschiedlichen Einflüssen des Wetters, insbesondere der relativen Luftfeuchtigkeit auf das auf der Erdoberfläche ankommende Sonnenspektrum, sowie mit den Auswirkungen der unterschiedlichen Sonnenspektren auf den Kurzschlussstrom der 3 derzeit gängigsten unterschiedlichen Modultechnologien beschäftigt.

Die Arbeit wurde im Rahmen des nationalen Projektes PV-SPEC durchgeführt, wobei die verschiedene Modultypen (Mono, CdTe und a-Si) hinsichtlich ihres Verhaltens bezüglich spektraler Änderungen des einfallenden Sonnenlichtes und klimatischer bzw. meteorologischer Parameter untersucht wurden. Schlussfolgerungen über die Umwandlungseffizienz der Module konnten getroffen werden.

Es wurden die Einflüsse der relativen Feuchtigkeit auf Bodenniveau mit jenen der relativen Feuchtigkeit des atmosphärischen Höhenprofils und mit jenen der absoluten Feuchtigkeit des atmosphärischen Höhenprofils verglichen. Es wurden außerdem die Einflüsse der relativen Feuchtigkeit an unterschiedlichen Tagestypen aus einer Tagesklassifikation untersucht und miteinander verglichen. Durch Simulationen wurden die theoretischen Werte der Feuchteabhängigkeit mit den gemessenen Werten verglichen.

Das Zusammenspiel aller Auswertungen führt zu der Schlussfolgerung daß es zu einer bestimmten Uhrzeit am Tag Korrelationen mit relativer Luftfeuchtigkeit gibt, also wenn durch Festhaltung der Uhrzeit der Einfluss des AM- Faktors und die $\Delta\lambda_{ave}$ kleiner gehalten werden. Andern Falls gäbe es nur unter Berücksichtigung und Einbeziehung weiterer beeinflussender Parameter und Beschränkung der betrachteten Intervalle der Parameter Korrelationen mit der relativen Luftfeuchtigkeit.

Die relative Luftfeuchte hat einen starken und positiven Einfluss auf die Stromumwandlungseffizienz der Module wenn der Einfluss des AM –Faktors und die $\Delta\lambda_{ave}$ kleiner gehalten werden (durch zum Beispiel Festhaltung der Uhrzeit). Die Stromumwandlungseffizienz würde nur vermutlich unter Berücksichtigung weiterer Parameter und bestimmter Intervalle der jeweiligen Parameter mit relativer Luftfeuchtigkeit stark korrelieren, wenn der ganze tägliche Verlauf beobachtet wird. Die relative Luftfeuchtigkeit hätte hier keinen direkten weiter unabhängigen Einfluss auf die Stromumwandlungseffizienz der PV –Module. Außerdem beeinflusst die relative Luftfeuchte die Stromumwandlungseffizienz der Module positive, die der Monokristalline aber auch manchmal schwach negative.

Anwendung können die Ergebnisse dieser Arbeit in Planungsbüros für Photovoltaikanlagen finden, da sich gewisse Modultypen für einzelne Wetterbedingungen und bei einem bestimmten Maß der relativen Luftfeuchtigkeit besser eignen als andere.

A.2 Referenzen

[1] G. Tschernigg u.a., Ausbildungsskriptum zum zertifizierten Photovoltaik-techniker und –Planer; 1.Auflage, Wien, Österreichisches Forschungs-und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H, 2006.

[2] P. Becher, Hoher Kohlebedarf fördert nachhaltigen Preisanstieg (29.04.2008), Online unter URL: http://www.handelsblatt.com/_nanzn/rohsto_e/hoher-kohlebedarffoerdert-nachhaltigen-preisanstieg;1421947.

[3] M. Rennhofer, Photovoltaik: Klima und Ertrag, Physik in Österreich, Nr. 4/2010.

[4] H. Häberlin, Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, 2007, Kapitel 3, S 75 –81.

[5] B. Zinsser, Jahresenergieerträge unterschiedlicher Photovoltaik –Technologien bei verschiedenen klimatischen Bedingungen, Dissertation, Stuttgart, 2010.

[6] A. Bamberger, Experimentelle Untersuchung der unterschiedlichen PV–Modultechnologien in Abhängigkeit des Spektrums der Einstrahlung, Diplomarbeit, Arsenal research, Wien, 2009.

[7] W. Weißgerber , Elektrotechnik für Ingenieure 1 / Gleichstromtechnik und elektromagnetisches Feld, 7. Auflage, Wiesbaden, 2007.

[8] T. Markvart, L. Castaner , Practical Handbook of Photovoltaics, Fundamentals and Applications, 1. Auflage, Southampton/Barcelona, 2003.

[9] C. Panhuber, Photovoltaik–Elektrizität aus der Sonne / Skriptum zur Vorlesung ESY 4 (Teil Photovoltaik) im Studienlehrgang OET (FH Oberösterreich), 2007.

[10] S. R. Wenham, M. A. Green und M. E. Watt, “Spectral Response”in Applied Photovoltaics, Australien: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, S. 39–41.

[11] V. Quaschnig, “Funktionsprinzip einer Solarzelle”in Regenerative Energiesysteme, 3. Aufl., München/Wien: Hanser Verlag, 2003, S. 120.

- [12] J. Wagner, S. Hasel, P. Weihs, M. Rennhofer, K. Berger, R. Leidl, W. Laube, D.J. Baumgartner, Investigation of spectral variability under outdoor conditions on the energy yield of a-Si, c-Si and CdTe Modules, Hamburg, 2011.
- [13] M. Holper, Aufbau eines gepulsten Sonnensimulators, Dipl.-Arb., Wien, Technikum Wien, 2006.
- [14] A. Götzberger, V. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Freiburg, 2005.
- [15] H. K. Breitzkreuz, Solare Strahlungsprognosen für energiewirtschaftliche Anwendungen/ Der Einfluss von Aerosolen auf das sichtbare Strahlungsangebot, Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2008.
- [16] G. Cerbe, Grundlagen der Gastechnik / Gasbeschaffung-Gasverteilung-Gasverwendung, München, 2008.
- [17] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Madrid/Delaware, 2003.
- [18] H. Stöcker, Taschenbuch der Physik (Formeln, Tabellen, Übersichten), 2. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, Frankfurt am Main, 1994.
- [19] C. F. Bohren, D. R. Huffman, Absorption and scattering of light by small particles, New York, NY : Wiley. 1983.
- [20] T. Minemoto, S. Nagae, and H. Takakura, Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photovoltaic modules. Solar Energy Materials & Solar Cells 91, 2007, S 919–923.
- [21] J. Wagner, W. Laube, M. Rennhofer, K. A. Berger, R. Leidl, D. Baumgartner and P. Weihs, Ist der spektrale Einfluss in Ertragsprognosen zu berücksichtigen? Unter dem Projekt: “Einfluss von Sonnenspektrum und Klima auf die Performance von photovoltaischen Anlagen: Regionale Abschätzung des Sonnenenergiepotentials Österreichs”, Wien, 2012.

- [22] Ocean Optics, Inc.; HR2000+ High-speed Fiber Optic Spectrometer /Installation and Operation Manual,
Online unter URL:<http://www.oceanoptics.com/technical/hr2000+.pdf>.
- [23] Meteorologisches Profil des PVGIS, Online unter
URL:<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php?lang=de&map=europe>.
- [24] IEC 60904–Series: Measurement and calibration procedures for the pv–modules.
- [25] IEC 61853–Series: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating.
- [26] Radiosondendaten der Welt, University of Wyoming, College of engineering, Department of atmospheric science,
online unter: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [27] H. Häberlin, Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, 2007.
- [28] E. Förster, B. Rönz, Methoden der Korrelations- und Regressionsanalyse, Die Wirtschaft, Berlin, 1979.
- [29] H. D. Mohring, Betriebsergebnisse von Dünnschichtphotovoltaikanlagen, 5th user forum thin film Photovoltaics, Würzburg, 26–27.1. 2009, S 77–86.
- [30] M.Rennhofer, K.A.Berger, J.Wagner, R.Leidl, W.Laube, D.Baumgartner, und P.Weihls, Spektraler und topographischer Einfluss auf die Effizienz von Dünnschichtphotovoltaikmodulen, Projekt.Nr: 822053. Staffelstein, 2012.
- [31] M.Rennhofer, K.A.Berger, J.Wagner, R.Leidl, W.Laube, D.Baumgartner, and P.Weihls, Correlation of weather and spectral changes for evaluation of thin film PV-Module performance, 3rd–TF–PV–Munich, 2011.
- [32] B. Mayer, C. Emde, R. Buras, and A. Kylling, libRadtran, 2005,
Online verfügbar unter: <http://www.libradtran.org/doku.php?id=start>.

- [33] P. Weihs , J.E. Wagner , W. Laube , M. Rennhofer , S. Zamini ,D. Baumgartner, Inclusion of accurate solar spectral irradiance modelling in a PV performance prediction tool, 2010.
- [34] M. Rennhofer , K. Berger , J. Wagner , R. Leidl , S. Zamini , W. Laube , D. Baumgartner , P. Weihs, Impact of climatic induced spectral changes on thin film PV- Module Performance, PV-SEC, 2010.
- [35] J.E. Wagner , S. Hasel , W. Laube , P. Weihs , M. Rennhofer , R.Leidl , K.Berger, D.J. Baumgartner, How large is the impact of spectral variability on the energy yield of a-Si, c-Si and CdTe Modules? , pv_spec, Staffelstein, Deutschland, 2011.
- [36] M. Rennhofer, Topographischer Einfluss auf Dünnschicht-Photovoltaik, AIT Austrian Institute of Technology in Wien. ep Photovoltaik -11/12-2010, S60-62.
- [37] P. Weihs , J. Wagner , M. Rennhofer , S. Zamini , E. Feitzinger , W. Laube ,D.J. Baumgartner, Muss die spektrale Variabilität des solaren Spektrums in PV Ertragsmodellen berücksichtigt werden?, pv_spec, Staffelstein, Deutschland, 2011.
- [38] M. Rennhofer, S. Zamini, K. Berger, T. Krametz, R. Leidl, A. Bamberger, Einfluss des variablen Sonnenspektrums auf die Modul- Performance, pv_spec, Staffelstein, Deutschland, 2010.
- [39] M. Rennhofer, S. Zamini, K. Berger, T. Krametz, R. Leidl, A. Bamberger, Thin film PV-module performance under varying weather conditions, Würzburg, Deutschland, 2010.
- [40] M. Zehner, T. Weigl, J. Weizenbeck, B. Mayer, G. Wirth, H. Prochaska, B. Giesler, R. Gottschalg, G. Becker, O. Mayer, Systematische Untersuchung und Auswertung meteorologischer Einstrahlungsereignisse, pv_spec, Staffelstein, Deutschland, 2010.
- [41] T. Behrendt, A. Hammer, E. Lorenz, D. Heinemann, Spektrale Solarstrahlung aus Satellitendaten zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Dünnschichtsolarzellen, pv_spec, Staffelstein, Deutschland, 2009.

[42] C. Bendel , M. Ries , A. Wagner, Der Einfluss der spektral bewerteten Bestrahlungsstärkemessung auf die Energieertragsprognose –garantierte Energieerträge, pv_spec, Staffelstein, Deutschland, 2003.

[43] T.R. Betts, D.G. Infield, R. Gottschalg, Spectral irradiance correction for PV system yield calculations, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 2004.

[44] J. Merten, Photovoltaics with Amorphous Silicon: Aspects of Technology, Physics and Application, Dissertation, University of Barcelona, Barcelona, 1996.

[45] N. Katsumata , Y. Nakada , T. Minemoto , H. Takakura, Estimation of irradiance and outdoor performance of photovoltaic modules by meteorological data, Solar Energy Materials & Solar Cells 95(2011), S 199–202.

[46] Simulationsprogramme, PHOTON Profil April 2010, S 10–35.

[47] J. Merten, Performance measurements procedures of PV modules , J. Merten –INES –Lab for solar systems (L2S), IEA PVPS Task XIII meeting at INES, Octobre 2010.

A.3 Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle allen Personen Dank aussprechen, die mit ihrer Unterstützung maßgeblich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders danke ich dem Herrn Dr. Marcus Rennhofer, der mich in allen Phasen der Arbeit begleitet und unterstützt hat, und mir für jegliche fachliche Diskussionen, inhaltliche Hilfestellungen und organisatorische Fragen zur Verfügung stand.

Weiters danke ich dem Herrn DI. Karl Berger für jegliche fachliche Diskussionen, und der Photovoltaik- Gruppe der Austrian Institute of Technology, für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit.

Weiters möchte ich meinem Betreuer, dem Ass.-Prof. Dr. Viktor Schloser für seine Unterstützung in den letzten Jahren meines Studiums und die Begleitung und Unterstützung meiner Arbeit herzlich danken.

Großen Dank möchte ich auch meiner Schwester Parisa Nikbakhti aussprechen, deren grenzenlose Unterstützung die ganze Zeit in vielfältiger Art und Weise, mir mein Studium ermöglicht hat. Ich bin sehr dankbar dafür, dass ich immer mit ihrer Unterstützung rechnen konnte.

Auch allen meinen Professoren, die mir während meiner Studienzeit Fachwissen aber auch Freude an der Physik und Wissenschaft vermittelt haben, möchte ich herzlich danken.

Speziell danken möchte ich dabei dem Professor George.Paul. Reischl, und der Professorin Regina Hitzenberger.

Vielen Herzlichen Dank all den oben erwähnten Personen für ihre Begleitung und Unterstützung während meiner Studienzeit und meiner Diplomarbeit.

Besonders bedanken möchte ich mich auch noch bei der Fakultät der Physik der Universität Wien, für die sehr schätzbare und wertvolle Zeit. Diese Arbeit ist dieser Fakultät, meiner Uni gewidmet.

A.4 Lebenslauf

Name: Maryam Nikbakhti

Geburtsdatum: 30. Mai 1982

Geburtsort: Teheran, Iran

1988 bis 1996 : Hauptschule in Teheran

1996 bis 2000 : Realgymnasium in Mathematik und Physik in Teheran

Juni 2000 : Matura in Mathematik und Physik mit ausgezeichnetem Erfolg

2004 bis 2005 : Vorstudiumlehrgang der Wiener Universitäten in Wien

2005 bis Ende 2006 : Studium der Astronomie , Universität Wien

Seit März 2007 : Studium der Physik (Diplomstudium), Universität Wien

Oktober 2008, Erster Abschnitt abgeschlossen

Oktober 2012, Zweiter Abschnitt abgeschlossen

März 2012 bis Dezember 2012 **Diplomarbeit in Physik** (in erneubaren Energien)

Titel: Korrelation zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Stromumwandlungseffizienz von Dünnschichtphotovoltaik

Am: AIT, AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Energy department, Gruppe der Photovoltaik. Wien

Betreuer: Ass.-Prof. Dr. Viktor Schlosser.

2011 : Mitarbeit in der Projektgruppe der Lichtverschmutzung von Universität Wien gemeinsam mit dem Verein Kuffner- Sternwarte

Wien, zu dem Thema: Energieaufwand und Quellen der Lichtverschmutzung, Erstellung eines exemplarischen Lichtkatasters, unter der Leitung von Dr. Günther Wuchterl von dem Institut der Astronomie der Universität Wien.

Berufliche Laufbahn:

Seit 2007-

Privater Unterricht der Mathematik und Physik der Schule

2010 : Mathematik- Lehrkraft bei dem Institut Schülerhilfe

2011 : Mitarbeit bei dem Unternehmen Manpower Wien.

Seit März 2012-

Mitarbeiterin in der Photovoltaik- Gruppe der Austrian Institute of Technology, Energy department.

Publikationen:

●18. September- 21. September 2012: **Poster- Präsentation.** Titel:
KORRELATION RELATIVER FEUCHTE UND STROM-
UMWANDLUNGSKOEFFIZIENT DER DÜNNSCHICHT-PHOTOVOLTAIK
M. Nikbakhti, M. Rennhofer, K. Berger, J. Wagner, R. Leidl, W. Laube,
D. Baumgartner, Ph. Weihs , V. Schlosser.
Bei 62. Jahrestagung der österreichischen physikalischen Gesellschaft
(ÖPG), Karls-Franzes Universität Graz.

●18. Oktober- 19. Oktober 2012: **Poster- Session.** Titel:
KORRELATION RELATIVER FEUCHTE UND STROM-
UMWANDLUNGSKOEFFIZIENT DER DÜNNSCHICHT-PHOTOVOLTAIK
Bei 10. Österreichischen Photovoltaik Tagung 2012 in Laxenburg.
Österreich

Abbildungsverzeichnis

1.1 Einfaches Bändermodell des Halbleiters.	14
1.2 Innerer photoeffekt: Photonen mit $h\nu > E_G$ heben ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband und werden dabei absorbiert. [4]	16
1.3 Absorptionskoeffizienten der verschiedenen Halbleiter. [8]	18
1.4 Strom- Spannungs -Kennlinie einer PV- Zelle. [6].....	21
1.5 Ein typisches PV-System	21
1.6 Die spektrale Empfindlichkeit für die drei unterschiedlichen Modultypen (amorphes Silizium –a-Si, monokristallines Silizium –c-Si und Cadmium-Tellur –CdTe) ist dargestellt (linke Ordinate).	25
1.7 Sonnenspektrum bei AM 1,5. [14]	28
1.8 Absorptionseinschnitte verursacht von Gasen in der Erdatmosphäre. [8]	29
1.9 Veränderung der Spektralverteilung durch die Erdatmosphäre. [1]	30
1.10 Berechnung der Gleichgewichtswellenlänge λ_{ave} . [20]	34
2.1 Der Messaufbau: Der Modulständer am Dach des Gebäudes mit dem Namen “Techbase Vienna”. [a]	40
2.2 Die Schaltung bestehend aus dem Modul, R_S =Shuntwiderstand, R_L = Lastwiderstand, und der Spannungsmessung.	41
2.3 Die Diodenpyranometer am Dach des Gebäudes “Techbase Vienna”. [a] zur Messung der einfallenden Einstrahlung.	42
2.4 HR 2000+ Spektrometer von innen mit den Komponenten [22].	43
2.5 Der Tagesablauf der Strahlungsstärke Richtung Süden, Osten, Westen, und Horizontal für den Monat Juli 2011 mit den Daten aus den 4 Pyranometer.	47
2.6 Die monatliche Änderung der Abweichung der Einstrahlungswerte aus den Pyranometer und aus dem PVGIS für die Richtung Süden.	50
2.7 alte und neue Kalibrierfaktoren des Pyranometers für Richtung Süden. ...	50
2.8 Elektrolumineszenz mit einem CdTe- Modul nach Westen gerichtet.	52

3.1 Korrelation zwischen RH[%] auf 200m Höhe (aus den Daten des meteorologischen Tageshöhenprofils) und der Einstrahlungsstärke.	64
3.2 Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der RH auf 200m Höhe.	64
3.3 Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der Einstrahlungsstärke.	65
3.4 Korrelation zwischen I_{SC} (Schott)[A] und RH auf 200m Höhe und λ_{ave} in einer Übersicht zum direkten Vergleich.	65
3.5 Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien.	66
3.6 Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien.	66
3.7 Korrelation zwischen $\kappa_{Duennschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der relativen Luftfeuchtigkeit für beide Dünnschicht-Technologien.	67
3.8 Korrelation zwischen AM-Faktor und Tagnummer im Jahr (1 bis 365) für die Stadt Wien.	67
3.9 Korrelation zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und AM-Faktor.	68
3.10 Korrelation zwischen RH[%] dem Mittelwert (aus den Daten des meteorologischen Tageshöhenprofils) und der Einstrahlungsstärke.	71
3.11 Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der RH [%] dem Mittelwert.	71
3.12 Korrelation zwischen der RH [%] dem Mittelwert und der RH [%] auf 200m Höhe.	72
3.13 Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert für alle Technologien.	72
3.14 Korrelation zwischen $\kappa_{Duennschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der relativen Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert, für beide Dünnschicht-Technologien.	73
3.15 Korrelation zwischen Links: $Fa[g/m^3]$ (entlang der Atmosphäre), dem Mittelwert (aus den Daten des meteorologischen Tageshöhenprofils) und der Einstrahlungsstärke. Rechts: λ_{ave} [nm] und der $Fa[g/m^3]$, dem Mittelwert.	78
3.16 Korrelation zwischen Links: der $Fa[g/m^3]$, dem Mittelwert und der RH [%] auf 200m Höhe. Rechts: der $Fa[g/m^3]$, dem Mittelwert und der RH [%], dem Mittelwert.	78
3.17 Korrelation zwischen κ und der absoluten Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert für alle Technologien.	79

3.18	Korrelation zwischen $\kappa_{Duennschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der absoluten Luftfeuchtigkeit, dem Mittelwert, für beide Dünnschicht-Technologien.	79
3.19	Korrelation zwischen RH[%] und der Einstrahlungsstärke.	81
3.20	Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der RH [%] , Links: aus den Daten des Vormittags (von 9h bis 12h). Rechts: aus den Daten des Nachmittags (von 12h bis 17h).	83
3.21	Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der Einstrahlungsstärke.	83
3.22	Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien, nur aus den Daten des Vormittags (von 9h bis 12h).	84
3.23	Korrelation zwischen I_{SC}/I_{STC} und der relativen Luftfeuchtigkeit für alle Technologien, nur aus den Daten des Nachmittags (von 12h bis 17h).....	84
3.24	Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien.	86
3.25	Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien. Links: aus den Daten des Vormittags (von 9h bis 12h). Rechts: aus den Daten des Nachmittags (von 12h bis 17h).	86
3.26	Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien aus den Daten entsprechend den Einstrahlungswerten im Intervall von 550 bis 650 [W/m^2].	88
3.27	Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien aus den Daten entsprechend den Einstrahlungswerten im Intervall von 850 bis 950 [W/m^2].	88
3.28	Korrelation zwischen κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien aus den Daten entsprechend den Einstrahlungswerten im Intervall von 950 bis 1050 [W/m^2].	89
3.29	Die Korrelation zwischen λ_{ave} und Einstrahlung an einem clear-sky Tag: 23.07.2012.	89
3.30	Korrelation zwischen Links: RH[%] (aus den Daten der Wetterstation) und der Einstrahlungsstärke, Rechts: λ_{ave} [nm] und der RH [%], an den bewölkten und regnerischen Tagen.	92
3.31	Korrelation zwischen Links: λ_{ave} [nm] und der RH [%] an den bewölkten und regnerischen Tagen, für den λ_{ave} - Bereich von 500 bis 650[nm], Rechts: κ und der relativen Luftfeuchtigkeit, für alle Technologien.	92
3.32	Korrelation zwischen RH[%] (aus den Daten der Wetterstation) und der Einstrahlungsstärke, an allen ausgesuchten Tagen aus der Tagesklassifikation. ...	98

3.33	Korrelation zwischen RH[%] und der Einstrahlungsstärke, Links: Für den Einstrahlungsbereich von 200 bis 300 [W/m ²]. In der Mitte: Für den Einstrahlungsbereich von 550 bis 650 [W/m ²]. Rechts: Für den Einstrahlungsbereich von 950 bis 1050 [W/m ²].	98
3.34	Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und der RH [%] an allen ausgesuchten Tagen.	99
3.35	Korrelation zwischen λ_{ave} und der RH [%]. Allerdings nur für den λ_{ave} - Bereich von 500 bis 650 [nm].	99
3.36	Korrelation zwischen λ_{ave} und der E, für den λ_{ave} -Bereich von 500 bis 700 [nm].	100
3.37	Auftragung von I_{SC}/I_{STC} und RH [%].	100
3.38	Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien.	101
3.39	Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien für den Einstrahlungsbereich von 200 bis 300 [W/m ²].	101
3.40	Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien für den Einstrahlungsbereich von 500 bis 650 [W/m ²].	102
3.41	Korrelation zwischen κ und der RH [%] für alle 3 Technologien für den Einstrahlungsbereich von 950 bis 1050 [W/m ²].	102
3.42	Korrelation zwischen $\kappa_{Dünnschicht}/\kappa_{Monokristalline}$ und der RH [%], für beide Dünnschicht-Technologien.	103
3.43	Korrelation zwischen absoluter Luftfeuchtigkeit und der RH [%] auf der Bodenhöhe für alle ausgesuchten Tage, aus den Daten der Wetterstation.	103
3.44	Korrelation zwischen dem AM-Faktor und relativer Luftfeuchtigkeit, für den Einstrahlungsbereich von 500 bis 650 [W/m ²].	104
3.45	Korrelation zwischen λ_{ave} [nm] und dem Parameter AM*RH, für den Einstrahlungsbereich von 500 bis 650 [W/m ²].	104

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht der Kalibrierfaktoren der 4 Pyranometer und ihre Verschlechterung von November 2009 bis Mai 2012.	48
2.2	Übersicht der Modulparameter der 3 untersuchten Technologien und ihre Abweichungen vom Jahr 2009 bis Juni 2012.	51
3.1	Die berechnete λ_{ave} Werte und ihre Standardabweichungen für die angegebene Uhrzeiten und Werte der relativen Luftfeuchtigkeit durch den Simulator.	105
3.2	Die berechnete λ_{ave} und Einstrahlung's - Werte für die angegebene Wassergehälter in der Luft durch den Strahlungstransport.	106
4.1	Übersicht der Hauptgebiete der Parameter aus den Daten des Monats Juli 2012.	112