

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

# Bachelorarbeit

Studiengang Umwelttechnik

## Vergleich von Kennlinienmessgeräten für I-U-Kennlinien von PV-Komponenten

von

Steven Schneider

Matrikelnummer:

1901420

Abgabedatum:

07.02.2013

Gutachter:



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

Prof. Dr. Timon Kampschulte

**SOLPEG**  
Solar Power Expert Group

Dipl.-Ing. André Schumann

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlichst bei allen bedanken, die mich während dem Verfassen dieser Abschlussarbeit unterstützt und begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt den beiden Betreuern Prof. Dr. Timon Kampschulte der HAW-Hamburg, für dessen Anregungen und Hilfestellungen und Dipl.-Ing. André Schuhmann der Firma SolPEG, für die zahlreichen Denkanstöße, Formulierungsvorschläge, sowie seinem Engagement, dass ich den roten Faden nicht verliere.

Dem gesamten SolPEG-Team: Dieko Jacobi, Dipl.-Ing. Kai Barke, B.Sc. Slawomir Zacharias, B.Sc. Martin John und B.Sc. Julia Dittberner möchte ich ein großes Dankeschön, für die tolle und familiäre Arbeitsatmosphäre und die vielfältige Unterstützung beim allem was mir auf dem Herzen lag, aussprechen.

Vielen Dank auch an Dipl.-Ing. Jan-Claas Böhmke und das Team des Labors für Umwelttechnik, das ich die Messungen an der PV-Anlage der HAW durchführen konnte und bei auftretenden Problemen immer Unterstützung fand. Des Weiteren Danke ich Herr Schröder der Firma Gossen Metrawatt, der Firma PV-Engineering, der HAW-Hamburg und der Firma SolPEG für die Bereitstellung der Kennlinienmessgeräte. Ein weiteres Dankeschön geht an Dipl.-Ing. Rolf Danker von der Firma SunEnergy für die Beantwortung meiner zahlreichen Fragen zu dem mobilen PV-Testcenter.

Zum Schluss möchte ich noch einen großen Dank meinen Eltern Bianca und Anton Schneider, deren Lebenspartnern, sowie meinen alten und neu dazugekommenen Geschwistern für ihren Rückhalt während meines Studiums und das Vertrauen in mich aussprechen. Dieser Dank gilt auch allen Freunden, die mich auf vielfältige Weise dabei unterstützen das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren.

# Inhaltsverzeichnis

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | Einleitung.....                                  | 4  |
| 2.     | Theorie.....                                     | 5  |
| 2.1.   | Strom-Spannungs-Kennlinie.....                   | 5  |
| 2.2.   | Kennlinienmessung.....                           | 9  |
| 2.3.   | Kennlinienapproximationsverfahren.....           | 12 |
| 3.     | Kennlinienmessgeräte.....                        | 13 |
| 3.1.   | Bisherige Kennlinienmessgerät-Vergleiche.....    | 13 |
| 3.2.   | Kenndaten der Messgeräte.....                    | 14 |
| 3.3.   | Einstrahlungs- und Temperatursensor.....         | 16 |
| 3.4.   | Messdatenspeicherung und Moduldatenbank.....     | 17 |
| 4.     | Vorbereitung zu den Messungen.....               | 18 |
| 4.1.   | PV-Anlage.....                                   | 18 |
| 4.2.   | LED-Sonnensimulator.....                         | 20 |
| 4.3.   | Referenz-MPP-Leistung des Ost-Strangs.....       | 22 |
| 5.     | Durchführung und Auswertung der Messungen.....   | 25 |
| 5.1.   | Durchführung der Messungen.....                  | 25 |
| 5.2.   | Einstrahlungs- und Temperatursensoren.....       | 29 |
| 5.3.   | Kennlinienmessgeräte.....                        | 32 |
| 5.3.1. | Eigene Hochrechnung der Messwerte auf STC.....   | 32 |
| 5.3.2. | STC-Leistungswerte der Kennlinienmessgeräte..... | 36 |
| 5.4.   | Fazit und Ergebnisbewertung.....                 | 48 |
| 6.     | Zusammenfassung.....                             | 53 |
| 7.     | Anhang.....                                      | 55 |
| 7.1.   | Digitaler Anhang.....                            | 55 |
| 7.2.   | Abbildungsverzeichnis.....                       | 59 |
| 7.3.   | Tabellenverzeichnis.....                         | 62 |
| 7.4.   | Formelverzeichnis.....                           | 64 |
| 7.5.   | Quellenverzeichnis.....                          | 66 |

## 1. Einleitung

Die jährlich neu installierte Leistung von Photovoltaik-Anlagen wächst seit dem Jahr 2000 rapide an. Während zu Beginn des Jahrtausend jährlich lediglich 45 MW<sub>p</sub> an PV-Anlagen installiert werden, steigt die PV-Neuinstallation bis zu dem Jahr 2011 auf 7500 MW<sub>p</sub> [BSW12]. Ende des Jahres 2012 beträgt die kumulierte installierte PV-Nennleistung in Deutschland rund 32 GW und setzt sich aus ca. 1,3 Millionen Anlagen zusammen. Daneben sinkt die Einspeisevergütung kontinuierlich und weist im Vergleich zu anderen regenerativen Energien sogar den stärksten Rückgang auf. PV-Großanlagen erreichen schon 2011 den Punkt, ab dem die Vergütung niedriger ist als der Bruttopreis von Haushaltsstrom [ISE13]. Diese Effekte werden durch die rückwirkend zum 01.04.2012 in Kraft tretende Änderung der EEG-Novelle mit einer monatlichen Degression der Vergütung noch verstärkt [EEG12].

Gerade durch die sich ändernden finanziellen Rahmenbedingungen ist es für viele PV-Anlagenbetreiber von großem Interesse sicherzustellen, dass die PV-Anlage keine fehlerhaften Module besitzt und die maximale Leistung liefert. Um dies zu kontrollieren, müssen die Kennlinien einzelner Solarmodule oder ganzer Solargeneratoren (in Reihe oder parallel verschaltete Module) gemessen und anschließend ausgewertet werden. In der Endkontrolle der Modulfertigung wird dies mit Hilfe von Sonnensimulatoren unter definierten Bedingungen bewerkstelligt. Bei schon installierten Anlagen kommen sogenannte Kennlinienmessgeräte zum Einsatz, mit denen das Aufzeichnen der Strom-Spannungs-Kennlinie durchgeführt wird. Diese Kennlinienmessgeräte sind ausgestattet mit kalibrierten Sensoren zur Erfassung der Einstrahlung und der Temperatur zum Zeitpunkt der Messung, um mit ihnen anschließend die Daten der Kennlinie auf Standard Testbedingungen (STC - standard test conditions) umzurechnen. Hierdurch kann die Funktionsfähigkeit, sowie die Qualität von einzelnen Modulen und ganzen Strängen vor Ort untersucht werden. Zusätzlich kommen Kennlinienmessgeräte zum Einsatz, wenn es um die normgerechte Abnahmeprüfung neu errichteter Anlagen geht.

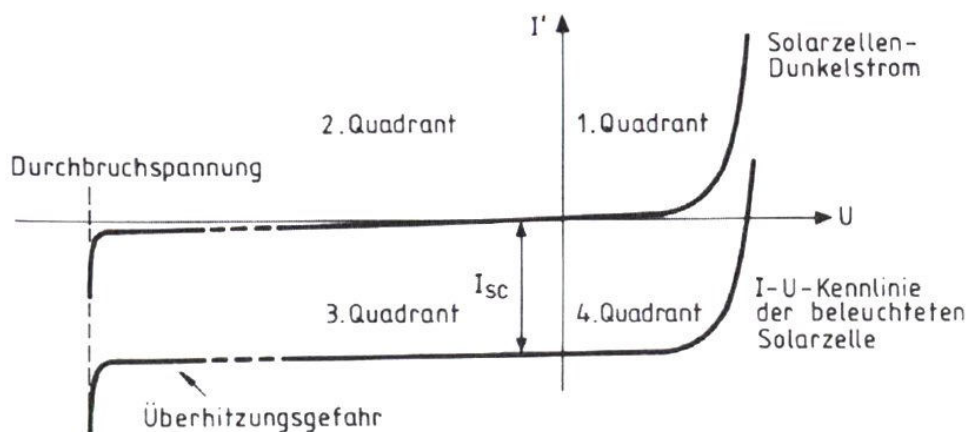
Diese Bachelorarbeit vergleicht vier mobile Kennlinienmessgeräte für den Vor-Ort-Einsatz. Dabei werden Geräte mit zwei unterschiedlichen messtechnischen Ansätzen ausgewählt. Zudem sind zwei der vier Geräte baugleich. Für den Vergleich werden, für einen Zeitraum von neun Tagen, Messungen an dem Ost-Strang der PV-Dachanlage der Fakultät Life Sciences der Hochschule HAW-Hamburg in Bergedorf durchgeführt. Ziel ist es, die Kennliniengeräte hinsichtlich der gemessenen MPP-Leistung bei STC für variierende natürliche Bedingungen zu untersuchen. Hierfür ist es wichtig, das Verhalten der Einstrahlungs- und Temperatursensoren zu analysieren und diese Daten mit einem Referenzsystem abzugleichen. Des Weiteren ist es notwendig, die internen Umrechnungen von den messtechnisch erfassten Werten hin zu den STC-Werten genauer zu beleuchten, sowie einen Blick auf die Reproduzierbarkeit der Messungen mit den jeweiligen Kennliniengeräten zu werfen. Zudem soll gezeigt werden, wie sich das Verhalten der MPP-Leistung bei STC für sinkende Einstrahlungen entwickelt. Die Reproduzierbarkeit und die Leistung in Abhängigkeit von der Einstrahlung sind wichtige Anforderung an die Messgeräte. Das ideale Kennlinienmessgerät weist eine geringe Streuung (hohe Reproduzierbarkeit) der Messungen auf und zeigt eine geringe Änderung der gemessenen STC-Leistung bei variierenden Einstrahlungsniveaus. Um die einzelnen Messungen vergleichen zu können, werden Kategorien bezüglich der Volatilität der Einstrahlung und zur Charakterisierung der Bewölkungslage während des Messzeitpunkts definiert. Zum Schluss werden die Teilauswertungen in Bezug zueinander gestellt und ein Überblick über die Vor- und Nachteile unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien des Vor-Ort-Einsatzes gegeben.

## 2. Theorie

In diesem Kapitel findet die Erläuterung der theoretischen Grundlagen statt. Zuerst wird die Kennlinie einer Solarzelle beschrieben (2.1), danach werden die unterschiedlichen Messverfahren zum Aufzeichnen einer Solarzellenkennlinie erörtert (2.2). Im Anschluss wird ein Approximationsverfahren zum Generieren eines Kennlinienverlaufs aus den Charakteristika einer Kennlinie dargestellt (2.3).

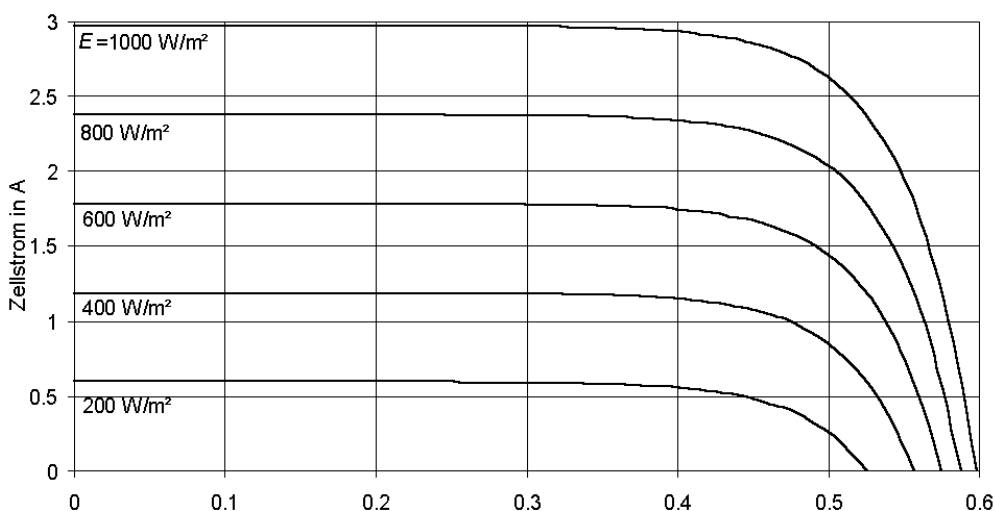
### 2.1. Strom-Spannungs-Kennlinie

Die messtechnische Erfassung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Solargenerators dient der Qualitätsbeurteilung. Durch die Kennlinie lassen sich die wichtigsten Daten zur Charakterisierung des Solargenerators ablesen und Probleme wie Teilabschattung, Verschmutzung oder defekte Bypass-Dioden erkennen. Die I-U-Kennlinie entstammt der Kennlinie der Halbleiterdiode. Für die Kennlinie eines Solargenerators ist nur der Kennlinienbereich des vierten Quadranten von Interesse, da der Solargenerator nur in diesem Bereich Leistung abgibt, während er in dem ersten und dem dritten Quadranten als Verbraucher auftritt. Wird der Solargenerator beleuchtet, verschiebt sich die Kennlinie um den Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  (Bild 1).



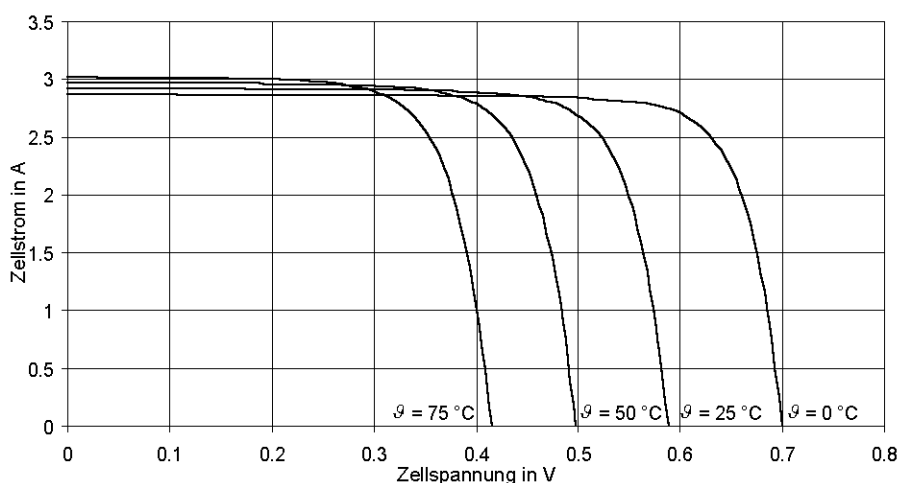
**Bild 1:** Idealisierte Kennlinie einer Solarzelle [HÄB07]

Zum Aufzeichnen der Kennlinie schließt man einen Lastwiderstand an den Solargenerator und lässt diesen Widerstand in Intervallschritten von null Ohm gegen unendlich laufen. Bei null Ohm ist der Solargenerator kurzgeschlossen, in diesem Zustand tritt die maximale Stromstärke – der Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  – auf. Da die Spannung zu diesem Zeitpunkt 0 V entspricht, gibt der Solargenerator keine Leistung ab. Der Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  zeigt bei Einstrahlungsverhältnissen bis etwa  $400 \text{ W/m}^2$  eine proportionale Abhängigkeit zur Bestrahlungsstärke. Sinken die Einstrahlungswerte unter diese Schwelle, nimmt der Kurzschlussstrom stärker ab als die Einstrahlung [GOE94] (Bild 3). Bei einem unendlich großen Widerstand fließt kein Strom und die Spannung des Solargenerators ist maximal. Diese Leerlaufspannung  $U_{OC}$  besitzt eine logarithmische Abhängigkeit zur Bestrahlungsstärke [DGS10] (Bild 2). Dies hat zur Folge, dass die Leerlaufspannung bei einer Veränderung der Einstrahlung relativ konstant bleibt und erst bei geringen Einstrahlungen einbricht.



**Bild 2:** Abhängigkeit des Kurzschlussstroms  $I_{SC}$  und der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  von der Bestrahlungsstärke  $E$  [QUA07]

Neben der Abhängigkeit des Stroms und der Spannung von der Einstrahlung, weisen beide Parameter auch eine Temperaturabhängigkeit auf. Aus einer Erhöhung der Temperatur resultiert eine geringfügige Steigerung des Kurzschlussstroms, bei einer zeitgleichen signifikanten Abnahme der Spannung. Dies hat eine Verringerung der Leistung zur Folge (Bild 3).



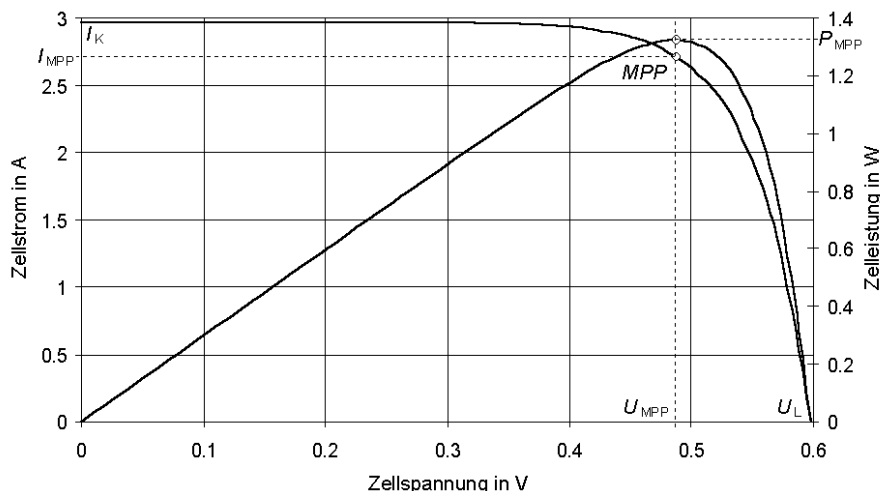
**Bild 3:** Abhängigkeit des Kurzschlussstroms  $I_{SC}$  und der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  von der Temperatur [HÄB07]

Das Verhalten von Strom, Spannung und Leistung werden durch die jeweiligen Temperaturkoeffizienten beschrieben. Typische Werte für die Temperaturkoeffizienten von Siliziumzellen sind [HÄB07]:

- Strom:  $a = (+0,04) - (+0,05) \text{ \%}/\text{K}$
- Spannung:  $\beta = (-0,3) - (-0,4) \text{ \%}/\text{K}$
- Leistung:  $\gamma = (-0,4) - (-0,5) \text{ \%}/\text{K}$

Die Abkürzung MPP steht für Maximum Power Point. In Bild 4 ist neben der I-U-Kennlinie, sowohl die, aus dem Produkt der Strom-Spannungswerte resultierende, Leistungskennlinie (P-U), als auch der Punkt der maximalen Leistung  $P_{MPP}$  mit den dazugehörigen Punkten des maximalen Stroms  $I_{MPP}$  und der maximalen Spannung  $U_{MPP}$  aufgezeichnet. Die MPP-Punkte schwanken mit

der Einstrahlung und der Temperatur. Der Wendepunkt der P-U-Kennlinie bildet die MPP-Leistung  $P_{MPP}$ . Dieser ist definiert als das Produkt aus  $I_{MPP}$  und  $U_{MPP}$ .



**Bild 4:** Kennlinien des Stroms und der Leistung aufgetragen über der Spannung [QUA07]

Mit dem Füllfaktor  $FF$  soll die Qualität von Solarzellen beschrieben werden. Der Füllfaktor ist definiert als Quotient der maximal erreichbaren Leistung und der theoretisch maximalen Leistung. Die maximal erreichbare Leistung entspricht der MPP-Leistung  $P_{MPP}$ , während sich die theoretisch maximale Leistung aus dem Produkt der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  und des Kurzschlussstroms  $I_{SC}$  zusammensetzt.

$$FF = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{U_{OC} * I_{SC}} = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} * I_{SC}}$$

**Formel 1**

- mit:
- $FF$  Füllfaktor
  - $U_{MPP}$  Spannung im Punkt der maximalen Leistung in V
  - $I_{MPP}$  Strom im Punkt der maximalen Leistung in A
  - $P_{MPP}$  Maximale Leistung in W
  - $U_{OC}$  Leerlaufspannung in V
  - $I_{SC}$  Kurzschlussstrom in A

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ergibt sich aus dem Quotienten der produzierten Energie und der zur Verfügung stehenden Energie. Die produzierte Energie ist gleichwertig der MPP-Leistung. Die zur Verfügung stehende Energie ist abhängig von der Einstrahlung und der Fläche der Solarzelle. Durch die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom unterliegt auch der Wirkungsgrad Schwankungen, hervorgerufen durch Änderungen der Temperatur und der Einstrahlung.

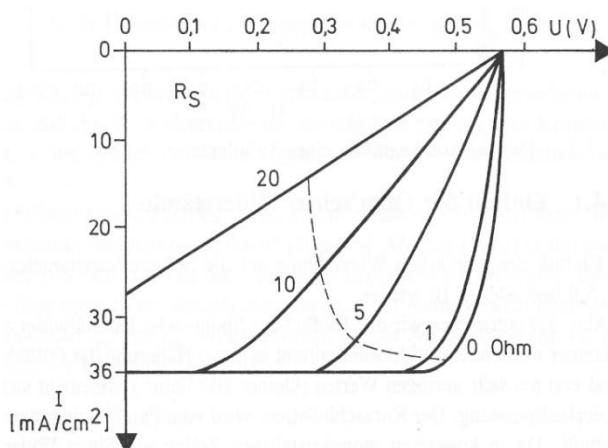
$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Licht}} = \frac{FF * U_{OC} * I_{SC}}{E * A}$$

**Formel 2**

- mit:
- $\eta$  Wirkungsgrad
  - $P_{Licht}$  Auftreffende Lichtleistung in W
  - $E$  Einstrahlung in  $W/m^2$
  - $A$  Fläche der Solarzelle in  $m^2$

Um Solargeneratoren untereinander vergleichen zu können, sind definierte Bedingungen von Nöten. Deshalb wurden die Standard Prüfbedingungen (STC – standard test conditions) eingeführt. Durch sie werden die äußeren Umstände zum Zeitpunkt der Messung definiert: Es muss eine senkrechte Einstrahlung  $E$  von  $1000 \text{ W/m}^2$  herrschen, mit einer Zelltemperatur  $T$  von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , bei einem Lichtspektrum mit einer Air Mass (Luftmasse) von  $AM 1,5$  [DIN61]. Der AM Wert beschreibt die relative Weglänge des Lichtes durch die Atmosphäre. Während das Sonnenlicht im Weltall noch keinen Einflüssen der Atmosphäre ausgesetzt ist und mit dem Spektrum  $AM 0$  bezeichnet wird, erfolgt beim Durchlaufen der Erdatmosphäre eine Veränderung der spektralen Leistungsdichte des Sonnenlichtes. Diese Veränderung wird hervorgerufen durch Reflexion an der Atmosphäre, Absorption durch Moleküle und Streuung durch Aerosole, die in ihr enthalten sind. Bei der Streuung wird zwischen Rayleigh-Streuung (Wellenlänge des Lichts ist im Verhältnis zur Teilchengröße der einzelnen Moleküle groß) und Mie-Streuung (Wellenlänge des Lichts ist im Verhältnis zur Teilchengröße der einzelnen Moleküle klein) unterschieden [WAE07].

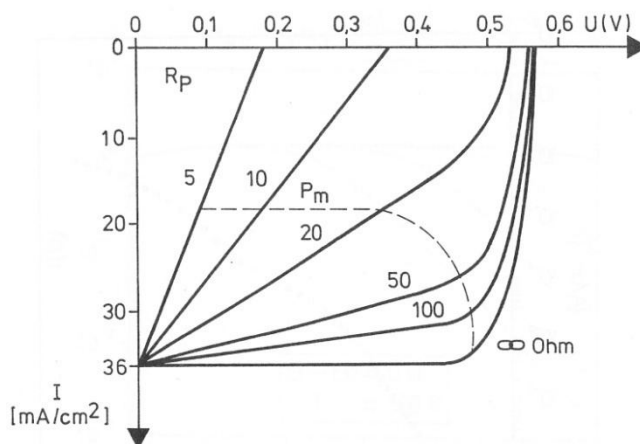
Bei dem Betrieb von Solarzellen treten Verlustleistungen, hervorgerufen durch interne Widerstände in der Zelle, auf. Diese Widerstände werden, basierend auf ihren elektrotechnischen Einfluss auf die Solarzelle, als Parallelwiderstände und Serienwiderstände zusammengefasst.



**Bild 5:** Einfluss des Serienwiderstandes auf die Solarzellenparameter [GOE94]

Der Serienwiderstand setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: Kontaktwiderstände zwischen Metallen und Halbleitern, ohmsche Widerstände in den Metallkontakten und ohmsche Widerstände im Halbleitermaterial. Für eine ideale Solarzelle wäre der Serienwiderstand Null, da somit ein Spannungsabfall vor der Last verhindert wird. Eine Erhöhung des Serienwiderstandes hat eine Verringerung des Füllfaktors und somit auch der maximalen Leistung zur Folge. Bei steigenden Widerstandswerten nimmt der Kurzschlussstrom ab (Bild 5). Für einen hohen Wirkungsgrad ist ein kleiner Serienwiderstand jedoch unerlässlich.





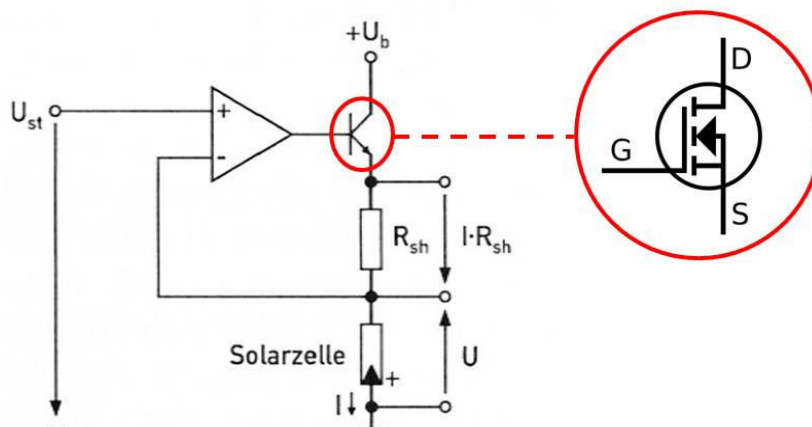
**Bild 6:** Einfluss des Parallelwiderstandes auf die Solarzellenparameter [GOE94]

Der Parallelwiderstand wird durch sogenannte Leckströme bestimmt. Diese Leckströme sind definiert als Kriechströme, die an den Kanten der Solarzellen entstehen. Für eine ideale Solarzelle wäre der Parallelwiderstand unendlich hoch, da somit kein Ersatzpfad für den Stromfluss bereitgestellt wird. Eine Verringerung des Parallelwiderstandes hat eine Verringerung des Füllfaktors und somit auch der maximalen Leistung zur Folge. Bei sehr geringen Widerstandswerten zieht dies ein Abfallen der Leerlaufspannung nach sich. Der Kurzschlussstrom auf der anderen Seite, unterliegt keinem Einfluss (Bild 6) [GOE94].

## 2.2. Kennlinienmessung

Das Aufnehmen einer Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie) erfolgt, indem alle Lastfälle vom Kurzschlussfall bis zum Leerlauf des Solargenerators, bei einer zeitgleichen Erfassung der daraus resultierenden Strom- und Spannungswertepaare, durchlaufen werden. Der messtechnische Aufbau besteht aus einem variablen Widerstand, einem Shunt-Widerstand zum Erfassen der Stromstärke und dem Solargenerator zum Messen der Spannung. Die untersuchten Messgeräte nehmen die I-U-Kennlinie auf zwei unterschiedliche Weisen auf. Während *I-V 400* und *TRI-KA* das Aufnehmen der Kennlinie mit einem Transistor als variablem Widerstand realisieren, kommt bei dem *Profitest-PV* und dem *PVPM 1000CX* eine kapazitive Last als variabler Widerstand zum Einsatz.

Bild 7 zeigt den Messaufbau mit einem Transistor als variablem Widerstand und der Steuerung der Solargeneratorspannung. Der Aufbau besteht aus einem Operationsverstärker, einem Transistor, einem Shunt-Widerstand ( $R_{Sh}$ ), dem Solargenerator (Solarzelle) sowie der Steuerspannung ( $U_{St}$ ) und der Hilfsspannung ( $U_b$ ).



**Bild 7:** Messschaltung eines Kennlinienmessgeräts mit einem Transistor als variablem Widerstand [WAG09] (ergänzt um eigene Darstellung)

Beispielhaft wird die Funktionsweise mit einem Feldeffekttransistor (FET) beschrieben. Auf diese Weise kann eine Ansteuerung über eine sogenannte Steuerspannung ( $U_{st}$ ) erfolgen. Über diese Steuerspannung  $U_{st}$  wird die Spannung zwischen Gate und Source ( $U_{GS}$ ) generiert, durch die der Widerstand zwischen Drain und Source ( $R_{DS}$ ) variiert werden kann, was letzten Endes zu einer Beeinflussung des Stroms  $I_{DS}$  ( $I_{DS} = I$ ) führt.

Der Shunt-Widerstand  $R_{sh}$  ist ein niederohmiger Widerstand, der zudem für hohe Stromstärken ausgelegt ist. Durch seinen niedrigen Temperaturkoeffizienten werden, durch Wärmebildung hervorgerufene, Einflüsse minimiert. Des Weiteren besitzt er eine hohe zeitliche Stabilität. An dem Shunt-Widerstand wird der Strom  $I$  indirekt über dessen Spannungsabfall  $U_{sh}$  gemessen.

$$U_{Sh} = R_{Sh} * I$$

**Formel 3**

- mit:  $U_{sh}$  Spannungsabfall am Shunt-Widerstand in V  
 $R_{sh}$  Shunt-Widerstand in  $\Omega$   
 $I$  Strom an der Solarzelle und dem Shunt-Widerstand in A

Über die Steuerspannung  $U_{st}$  wird die Spannung  $U$  des Solargenerators gesteuert. Es gilt folgende Beziehung:

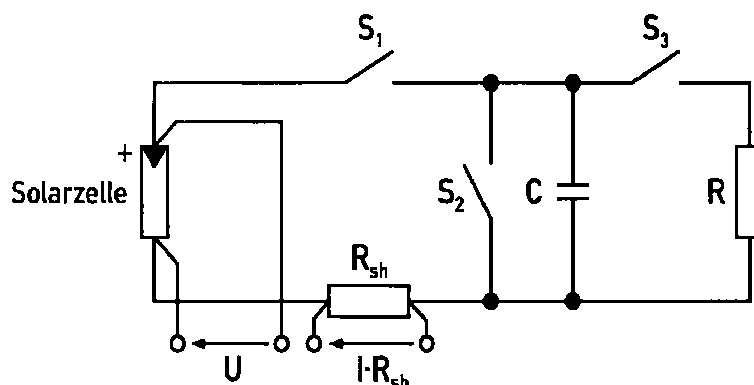
$$U = -U_{St}$$

**Formel 4**

- mit:  $U$  Am Solargenerator anliegende Spannung in V  
 $U_{st}$  Steuerspannung des Transistors in V

Die Hilfsspannung  $U_b$  kompensiert den Spannungsabfall im Messkreis bedingt durch den Kurzschlussfall. Der Operationsverstärker fungiert als Spannungs-Strom-Wandler.

Ein Nachteil bei der Verwendung eines Transistors ist die, durch die Hilfsspannungsquelle und den Solargenerator abgegebene, in Wärme umgewandelte Leistung. Um dies zu umgehen gibt es die Möglichkeit, dass ein Kondensator die Funktion des variablen Widerstands übernimmt (Bild 8). Bei diesem Messaufbau wird die während des Messvorgangs durch den Solargenerator erzeugte Energie im Kondensator gespeichert und somit nicht direkt in Wärme umgewandelt.



**Bild 8:** Messschaltung eines Kennlinienmessgeräts mit einem Kondensator als variablem Widerstand [WAG09]

Zu Beginn des Messvorgangs ist der Schalter  $S_1$  geschlossen. Die an dem Kondensator entstehende Spannung  $U_C$  weist den Verlauf einer Sättigungsfunktion auf. Die Stromstärke  $I$  verhält sich genau gegenläufig und entspricht einer Abklingfunktion. Der Widerstand des Kondensators nimmt folglich mit steigender Spannung zu. Wenn der Ladevorgang abgeschlossen ist, fließt kein Strom und der Widerstand geht gegen unendlich. Das Messen der Strom- und Spannungswertepaare erfolgt ebenfalls an dem Shunt-Widerstand bzw. dem Solargenerator. Die optimale Kapazität  $C_{opt}$  des Kondensators hängt von der Ladezeit  $T$  des Kondensators, sowie dem Kurzschlussstrom  $I_{SC}$  und der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  des Solargenerators ab. Sie wird durch Formel 5 beschrieben.

$$C_{opt}(T) = \frac{T}{2} * \frac{I_{SC}}{U_{OC}}$$

**Formel 5**

mit:  $C_{opt}$  Optimale Kapazität in F  
 $T$  Messzeit der Kennlinie in s

Tabelle 1 zeigt das Ablaufschema nach dem die Messung durchgeführt wird.

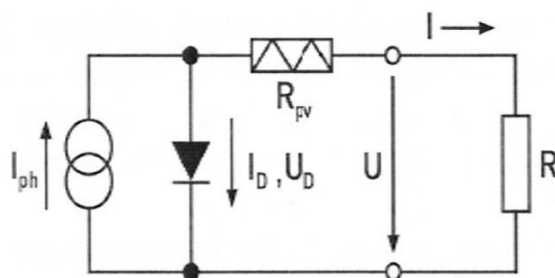
**Tabelle 1:** Messzyklen der Kennlinienmessung mit Kondensator als variablem Widerstand [WAG09]

| $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | Messablauf   |
|-------|-------|-------|--|
| 0     | 0     | 0     | Ruhezustand: Alle Schalter sind geöffnet                                   |
| 0     | 1     | 0     | $S_2$ schließen: Restentladung des Kondensators                            |
| 1     | 1     | 0     | $S_1$ schließen: Kurzschluss des PV-Generators (kein gefährlicher Zustand) |
| 1     | 0     | 0     | $S_2$ öffnen: Start des Messvorgangs                                       |
| 0     | 0     | 0     | $S_1$ öffnen: Ende des Messvorgangs  |
| 0     | 0     | 1     | $S_3$ schließen: Entladung des Kondensators                                |
| 0     | 0     | 0     | $S_3$ öffnen: Ruhezustand  |

Ein weiterer Vorteil der kapazitiven Last als variabler Widerstand gegenüber dem Transistor ist die kürzere Messzeit. Dadurch ist es möglich den Einfluss schwankender Einstrahlungsbedingungen zu verringern.

### 2.3. Kennlinienapproximationsverfahren

Da zu der Generierung einer Strangkennlinie die Kennlinien der einzelnen Module benötigt werden, von den zu untersuchenden Modulen aber nur die Kennliniencharakteristika  $I_{SC}$ ,  $U_{OC}$ ,  $I_{MPP}$  und  $U_{MPP}$  verfügbar sind, erfolgt eine Nachbildung der Kennlinien durch ein nach Wagner beschriebenes Approximationsverfahren [WAG09]. Die aus den einzelnen Modulkennlinien des Ost-Strangs resultierende Strangkennlinie bildet später die Grundlage zum Erstellen eines Toleranzbereichs für die Ergebnisse der MPP-Leistungsmessungen durch die Kennlinienmessgeräte.



**Bild 9:** Ersatzschaltbild für die effektive Solarzellen-Kennlinie [WAG09]

Die Approximation der Modulkennlinien basiert auf dem Ersatzschaltbild der effektiven Solarzellen-Kennlinie (Bild 9). Welches die sehr gute Approximationsqualität des Zwei-Dioden-Modells durch das Verwenden eines fiktiven photoelektrischen Bauelements erreicht. Für die Berechnung der Kennlinie wird der Strom  $I_A$  (in Bild 9  $I$ ) in 1 mA Schritten bis zum Erreichen des Kurzschlussstroms  $I_{SC}$  vorgegeben. Über die Formel 6 wird für jeden Stromwert  $I_A$  der Spannungswert  $U_A$  (in Bild 9  $U$ ) ermittelt:

$$U_A = U_T * \ln \left( \frac{I_{SC} - I_A + I_0}{I_0} \right) - I_A * R_{PV}$$

**Formel 6**

- mit:
- $U_A$  Spannung (für den Strom  $I_A$ ) in V
  - $I_A$  Vorgegebener Stromwert in A
  - $I_{SC}$  Kurzschlussstrom in A
  - $R_{PV}$  Photovoltaik-Widerstand in  $\Omega$
  - $I_0$  Sperrstrom in A
  - $U_T$  Temperaturspannung in V

Die Formel 7 beschreibt die Steigung  $M$  im Leerlaufpunkt, wenn der Strom  $I_A$  Null entspricht.  $M$  wird für die Berechnung von  $R_{PV}$ ,  $U_T$  und  $I_0$  benötigt (Formeln 8, 9 und 10). Die vier Konstanten entstammen der Lösung der Gleichung mit den Methoden der numerischen Mathematik und sind materialunabhängig.

$$M = \frac{U_{OC}}{I_{SC}} * (-5,411 \frac{I_{MPP} U_{MPP}}{I_{SC} U_{OC}} + 6,450 \frac{U_{MPP}}{U_{OC}} + 3,417 \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} - 4,422)$$

**Formel 7**

- mit:
- $M$  Steigung der Kennlinie
  - $U_{OC}$  Leerlaufspannung in V
  - $I_{MPP}$  Strom im Punkt der maximalen Leistung in A
  - $U_{MPP}$  Spannung im Punkt der maximalen Leistung in V

Der Photovoltaik-Widerstand  $R_{PV}$  ist ein fiktives photoelektrisches Bauelement, welches positive und negative Widerstandswerte annehmen kann.

$$R_{PV} = -M * \frac{I_{SC}}{I_{MPP}} + \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}} \left(1 - \frac{I_{SC}}{I_{MPP}}\right)$$

Formel 8

Die Temperaturspannung  $U_T$  entstammt der von Shockley hergeleiteten Beziehung für die ideale Diode und ist Teil der Formel zum Beschreiben der Strom-Spannungs-Kennlinie einer unbeleuchteten idealen Solarzelle.

$$U_T = -(M + R_{PV}) * I_{SC}$$

Formel 9

Der Sperrstrom  $I_0$  entstammt ebenfalls der Shockley-Gleichung und beschreibt den Sättigungssperrstrom einer idealen Diode.

$$I_0 = I_{SC} * e^{\frac{-U_{OC}}{U_T}}$$

Formel 10

Die Spannung  $U_A$  wird für jeden vorgegebenen Stromwert  $I_A$  berechnet. Beide bilden die Grundlage der Strom-Spannungskennlinie der einzelnen Module.

### 3. Kennlinienmessgeräte

In dieser Arbeit werden vier Kennlinienmessgeräte verglichen: Das *I-V 400* der Firma HT Instruments GmbH, das *Profitest-PV* von Gossen Metrawatt GmbH, das aus dem Hause PV-Engineering GmbH stammende *PVPM 1000CX* und das von der Firma TRITEC hergestellte *TRI-KA*. Die Messgeräte *PVPM 1000CX* und *Profitest-PV* sind baugleich, besitzen lediglich visuelle Unterschiede. Die Firma Gossen Metrawatt fungiert als Vertriebspartner der Firma PV-Engineering innerhalb Deutschlands. Folglich werden beide Messgeräte in der Beschreibung zusammengefasst. Dieses Kapitel soll die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der verwendeten Kennlinienmessgeräte aufzeigen. Bei der Beschreibung der Messgeräte wird auf die einzelnen Bedienungsanleitungen Bezug genommen.

#### 3.1. Bisherige Kennlinienmessgerät-Vergleiche

Die PHOTON-Profi untersucht in der Ausgabe vom Juli 2012 zehn Kennlinienmessgeräte. Darunter auch das *I-V 400*, das *PVPM 1000CX* und das *TRI-KA*. Das PHOTON-Labor führt die Tests der Messgeräte zuerst an einer realen Anlage, deren aktuelle Flash-Protokolle der Einzelmodule zur Verfügung stehen, durch und betrachtet die erfassten STC-Leistungswerte. In einem zweiten Schritt wird die Genauigkeit des eigentlichen Messvorgangs in einem Simulatortest ermittelt. Hierfür werden mehrere Referenzmessungen der Kennlinie mit einem hochgenauen Leistungsanalysator durchgeführt und mit aufgenommenen Messungen der Kennliniengeräte verglichen. In dem Sonnensimulator schneidet das *I-V 400* mit einer Abweichung zu der Referenzmessung von -0,51 % am besten ab. Danach folgen das *PVPM 1000CX* mit 1,41 % und das *TRI-KA* mit 2,76 %. Bei den Messungen unter natürlichen Bedingungen liegt das *TRI-KA* mit einer Abweichung von 0,35 % bezogen auf, die anhand der Flash-Protokolle ermittelte,

Strangleistung vorne. Gefolgt von dem *I-V 400* mit 3,44 % und dem *PVPM 1000CX* mit - 5.61 %. Alle drei Kennlinienmessgeräte (*I-V 400*, *PVPM 1000CX*<sup>1</sup> und *TRI-KA*) bekommen die Gesamtnote gut. Anzumerken ist, dass die Messungen im April durchgeführt werden und Einstrahlungsverhältnisse zwischen 700 und über 1000 W/m<sup>2</sup> herrschen [PHO12a].

### 3.2. Kenndaten der Messgeräte

Die beiden Messgeräte *PVPM 1000CX* und *Profitest-PV* bestehen aus zwei Kunststoffkoffern. Ein Kunststoffkoffer für das Kennlinienmessgerät und ein zweiter für das dazugehörige Messequipment. Das Messgerät der Firma TRITEC ist in einem Schalenkoffer untergebracht. Es besteht aus dem *TRI-KA* zum Aufnehmen der Kennlinie und dem *TRI-SEN* zum Erfassen der Einstrahlung und der Temperatur. Das *I-V 400* ist zusammen mit dem Messequipment in einer stabilen Stofftasche verstaut (Bild 10).



Bild 10: Messgerätunterbringung (*I-V 400*, *Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA*)

Der Anschluss der Messgeräte an den PV-Generator erfolgt mit Ausnahme von dem *TRI-KA* durch Vierleiter-Messkabel. Indem über ein erstes stromführendes Wirkleitungspaar und einem zweiten stromlosen Potentialleitungspaar Verluste, hervorgerufen durch Leitungswiderstände, messtechnische Berücksichtigung finden [GER85]. Bei dem *TRI-KA* lässt sich der durch den Leitungswiderstand verursachte Spannungsabfall durch manuelle Eingabe der Leitungslänge, des Leitungsquerschnitts und des spezifischen Widerstands korrigieren. Das *PVPM 1000CX* und das *Profitest-PV* besitzen darüber hinaus einen externen Sicherheitstrennschalter um die Messgeräte von dem PV-Generator zu entkoppeln.

Die Messunsicherheit hinsichtlich der MPP-Leistungsmessung bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) wird für das *I-V 400* mit  $\pm 1$  % und bei dem *Profitest-PV*, sowie dem *PVPM 1000CX*, als auch dem *TRI-KA* mit  $\pm 5$  % angegeben. In Tabelle 2 findet sich eine Übersicht der messtechnisch erfassten und der berechneten Werte der einzelnen Kennlinienmessgeräte.

<sup>1</sup> Das Testsiegel wurde fälschlicher Weise als befriedigend deklariert, während es in der Tabelle "Testergebnisse im Überblick" mit gut bewertet wird. Dies wird in der PHOTON-Profi Ausgabe 09-2012 auf S.109 richtiggestellt.

Tabelle 2: Übersicht der messtechnisch erfassten und der berechneten Werte der einzelnen Kennlinienmessgeräte

| Parameter        |   | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|------------------|---|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Gemessene Werte  | Spannung  | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | Strom   | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | Modultemperatur                                       | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | Einstrahlung  | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | Temperatur Einstrahlungssensor                        | x              | x                   | x                  |               |
|                  | Neigungswinkel  |                |                     |                    | x             |
| Berechnete Werte | $I_{SC}$ , $U_{OC}$ , $I_{MPP}$ , $U_{MPP}$ (bei STC) | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | $P_{MPP}$ (bei STC)                                   | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | Füllfaktor  | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | Serienwiderstand                                      |                | x                   | x                  |               |
|                  | Parallelwiderstand                                    |                | x                   | x                  |               |
|                  | Abweichung Mess- zu Nennleistung                      | x              |                     |                    |               |
|                  | Kennlinie   | x              | x                   | x                  | x             |
|                  | Idealkennlinie  |                |                     |                    | x             |

Für die spätere Auswertung wird immer auf die MPP-Leistung des gesamten Ost-Strangs Bezug genommen. Alle untersuchten Messgeräte erfassen folgende charakteristischen Kennlinienwerte bei Betriebsbedingungen (OPC = Operating Conditions):  $P_{MPP}$ ,  $U_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ . Während bei dem *Profitest-PV*, dem *PVPM 1000CX* und dem *TRI-KA* die charakteristischen Kennlinienwerte bei OPC direkt auf STC hochgerechnet werden, werden bei dem *I-V 400* aus den Strangleistungen bei OPC Durchschnittswerte für ein Modul gebildet, die im Anschluss daran auf STC-Werte hochgerechnet werden. Daraus resultiert die Notwendigkeit bei den Einzelmessungen des *I-V 400* aus den STC-Werten für ein Modul die MPP-Strangleistung manuell zu berechnen.



Bild 11: Messgeräte (*I-V 400*, *Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA*)

Während das *Profitest-PV*, das *PVPM 1000CX* und das *TRI-KA* mit einem Touch-LCD-Farbdisplay ausgestattet sind, hat das *I-V 400* ein hintergrundbeleuchtetes LCD-Display mit einer Auflösung von 128 auf 128 Punkten. Das Display des *Profitest-PV* und des *PVPM 1000CX* besitzen ein Auflösung von 480 mal 272 Punkten. Das Display des *TRI-KA* hat eine Auflösung von 240 mal 320 Punkten (Bild 11).

Die Energieversorgung des Messgeräts wird bei dem *I-V 400* durch sechs 1,5V AA-Batterien sichergestellt. Dies ermöglicht ein Austauschen zu jeder Zeit. Für die übrigen Messgeräte kommen Akkumulatoren zum Einsatz. Das *TRI-KA* sowie das *TRI-SEN* sind mit einem Lithium-Polymer-Akkumulator ausgestattet. Bei dem *Profitest-PV* und dem *PVPM 1000CX* handelt es sich um einen Blei-Säure-Akkumulator.

In Tabelle 3 sind die Messbereiche zu den Kategorien: Spannung, Strom, Einstrahlung und Temperatur der einzelnen Kennlinienmessgeräte gegenübergestellt.

Tabelle 3: Übersicht der einzelnen Messbereiche der Kennlinienmessgeräte

| Messbereich                      | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|----------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Spannung [V]                     | 5 – 1000       | 0 – 1000            | 0 – 1000           | 1 – 1000      |
| Strom [A]                        | 0 – 10         | 0 – 20              | 0 – 20             | 0 – 15        |
| Einstrahlung [W/m <sup>2</sup> ] | 0 – 1200       | 0 – 1300            | 0 – 1300           | 100 – 1200    |
| Temperatur [°C]                  | -20 – 100      | -40 – 100           | -40 – 100          | 0 – 100       |

### 3.3. Einstrahlungs- und Temperatursensor

Jedes Messgerät ist mit Sensoren zur Erfassung der Temperatur und der Einstrahlung ausgestattet. Während bei dem *I-V 400*, dem *Profitest-PV* und dem *PVPM 1000CX* diese Sensoren mittels Kabel mit den Messgeräten verbunden werden, erfolgt die Datenübertragung bei dem *TRI-KA* via Funkverbindung. Sollte es während des Messvorgangs nicht möglich sein eine stabile Funkverbindung zwischen den beiden Geräten *TRI-KA* und *TRI-SEN* zu implementieren, werden die erfassten Messdaten auf dem jeweiligen Gerät zwischengespeichert, um die Synchronisierung zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführen.

Die Messung der Einstrahlung erfolgt bei allen Messgeräten durch Referenzsolarzellen (Bild 12). Bis auf das *I-V 400* sind alle Einstrahlungssensoren mit einer Halterung zur Befestigung in der Modulebene ausgestattet. Die Fixierung des Sensors des *I-V 400* erfolgt durch eine Klemmzange. Der verwendete Sensor trägt die Bezeichnung *HT304* und besteht aus einer monokristallinen und einer multikristallinen Referenzzelle. In Abhängigkeit des Zelltyps des PV-Generators, muss das Ausgangssignal des *HT304* an das *I-V 400* angepasst werden. Hierzu werden die jeweiligen Parameter für die Empfindlichkeit und den Temperaturkoeffizienten des Kurzschlussstroms in das *I-V 400* eingegeben. Da es sich bei den installierten PV-Modulen der Dachanlage der HAW um polykristalline Module handelt, werden für die Empfindlichkeit (Sensitivity MULTI) der Wert von 28,28 mV/kW/m<sup>2</sup> und für den Temperaturkoeffizienten des Kurzschlussstroms (Alpha MULTI) 0,06 %/°C in das *I-V 400* eingegeben. Das *TRI-KA* besitzt ebenfalls eine monokristalline und eine polykristalline Einstrahlungsreferenzzelle, hier muss aber keine separate Parametereinstellung vorgenommen werden. Das *Profitest-PV* und das *PVPM 1000CX* besitzen den gleichen Einstrahlungsreferenzsensor namens *Phox* (Photovoltaik Lux) mit einem integrierten Pt-Temperaturfühler.





**Bild 12:** Einstrahlungssensoren (links das *I-V 400* mit dem *HT304*, Mitte das *Profitest-PV* und das *PVPM 1000CX* mit dem *Phox*, rechts das *TRI-KA* mit dem *TRI-SEN*)

Bei der messtechnischen Erfassung der Temperatur verwenden die Kennlinienmessgerätehersteller des *I-V 400*, des *Profitest-PV* und *PVPM 1000CX* Pt-Tempersensoren für eine kontinuierliche Messwerterfassung. Lediglich bei dem *TRI-KA* wird die Messung der Zelltemperatur berührungslos über einen Infrarotsensor an der Frontseite des *TRI-SEN* realisiert. Die Messwerte werden zwischengespeichert und das *TRI-SEN* bildet aus den einzelnen Temperaturwerten einen Mittelwert.

### 3.4. Messdatenspeicherung und Moduldatenbank

Die Speicherung der gemessenen Daten erfolgt bei dem *TRI-KA* auf eine SD-Speicherkarte, zum Auslesen der Messdaten installiert man die auf der SD-Speicherkarte enthaltene Software *TRI-KA PC-Software* und kann dann die Daten auf einen PC exportieren. In Abhängigkeit von der Größe der Speicherkarte können bei 1 GB mehr als 1000 Messkurven gespeichert werden. Mit den 256 kB des messgerätinternen Speichers des *I-V 400* können mehr als 200 Messkurven aufgenommen werden. Zum Übertragen der Messdaten wird das *I-V 400* über eine optische Schnittstelle mit einem PC verbunden. Die Auswertung findet mit der Software *Topview* statt. Bei dem *Profitest-PV* und dem *PVPM 1000CX* können per Flash-Speicher mehrere 1000 Messungen auf dem Messgerät gespeichert werden. Für den Datentransfer der Messungen auf einen PC durch die mitgelieferte Software *PV-Analysator* bzw. *PVPMdisp* (dabei handelt es sich um dieselbe Softwarevariante) hat das Messgerät eine USB-Schnittstelle.



**Bild 13:** Messequipment (links *I-V 400*, Mitte *Profitest-PV* und *PVPM 1000CX*, rechts *TRI-KA*)

Für die korrekte Durchführung der Messung ist es von Nöten, die Kenndaten des jeweiligen Moduls, wenn noch nicht in der Moduldatenbank vorhanden, nachzutragen. Nur bei dem *I-V 400* lässt sich dies direkt über das Messgerät bewerkstelligen. Das Erstellen von neuen

Moduldatenbankeinträgen muss bei den restlichen Messgeräten über die jeweilige Software realisiert werden.

In Bild 13 ist das Messequipment der einzelnen Kennliniengeräte zu sehen. Das *I-V 400* und das *TRI-KA* sind Handmessgeräte, die Messeinheit des *Profitest-PV* und das *PVPM 1000CX* sind in einem Koffergehäuse untergebracht.

## 4. Vorbereitung zu den Messungen

Diese Kapitel beschreibt die Lage und die Komponenten der PV-Anlage, an welcher die Messungen mit den Kennliniengeräten durchgeführt werden (4.1). Zusätzlich wird der LED-Sonnensimulator charakterisiert und dessen Messergebnisse für die einzelnen Module vorgestellt (4.2). In Kapitel 4.3 wird aus den charakteristischen Werten der I-U-Kennlinie für jedes Module eine Kennlinie approximiert, um diese Kennlinien in einem nächsten Schritt zu einer Strangkennlinie zusammenzufassen. Aus dieser Kennlinie wird die Referenz-MPP-Leistung des Ost-Strangs gebildet, die als Grundlage zur Definition eines Toleranzbereichs dient.

### 4.1. PV-Anlage

Die Kennlinienmessungen der einzelnen Messgeräte werden an der Photovoltaik-Anlage des Campus Bergedorf der HAW-Hamburg durchgeführt. Insgesamt sind auf dem Vordach 28 Module mit einer Nennleistung von  $220 \text{ W}_p$  installiert (Bild 14). Diese Module sind unterteilt in eine netzgekoppelte Anlage und eine Inselanlage. Für die netzgekoppelte Anlage sind an zwei Strang-Wechselrichtern, mit einer maximalen AC-Leistung von  $2,8 \text{ kW}_p$  pro Wechselrichter, jeweils 12 Module in Reihe zu einem Strang verschaltet. Daraus ergibt sich eine AC-Leistung des PV-Generators von  $5,28 \text{ kW}_p$ . Die beiden Stränge lassen sich als Ost- und West-Strang unterscheiden. Die Inselanlage besteht aus vier Modulen, die mit dem erzeugten Strom eine Batteriebank speisen. Die Kennlinienmessungen der einzelnen Messgeräte werden an den 12 Modulen des Ost-Strangs der netzgekoppelten Anlage durchgeführt.



**Bild 14:** Netzgekoppelte Anlage und Inselanlage (mit dem Ost-Strang als markiertem Bereich)(Quelle: Eigene Bilder)

Die Module des Ost-Strangs besitzen eine mittlere Neigung von  $24,9^\circ$  und einen Azimutwinkel, der ausgehend von der Südausrichtung um  $24^\circ$  nach Osten abweicht. Die Neigung wird mit dem Leica DistoD5 (Genauigkeit  $\pm 0,3 \%$ ) für jedes Modul jeweils an beiden Seiten ermittelt.

Zur Erfassung der Einstrahlung sind insgesamt drei Pyranometer des Typs CMP11 der Firma Kipp und Zonen an dem östlichsten Modul des Ost-Strangs der Anlage installiert (Bild 15). Dieser Pyranometertyp entspricht dem Sekundärstandard (höchste Qualitätsklasse) und besitzt eine Genauigkeit bzgl. der Einstrahlungsmessung von  $\pm 2 \%$ . Zur theoretischen Funktionsweise von Pyranometern siehe [RÖS05]. Zwei dieser Pyranometer besitzen den Neigungswinkel der Module und messen somit die Globalstrahlung in Modulebene. Sie befinden sich jeweils an der Ober- (P2) und der Unterkante (P1) der Module. Das dritte Pyranometer ist waagrecht ausgerichtet (P3) und erfasst die Globalstrahlung in der horizontalen Ebene. Die sekundlich gemessenen Einstrahlungswerte werden aufsummiert und als Minutenmittelwert abgespeichert.

Somit besitzen die als Referenz dienenden Einstrahlungswerte der Pyranometer eine minütliche Auflösung.

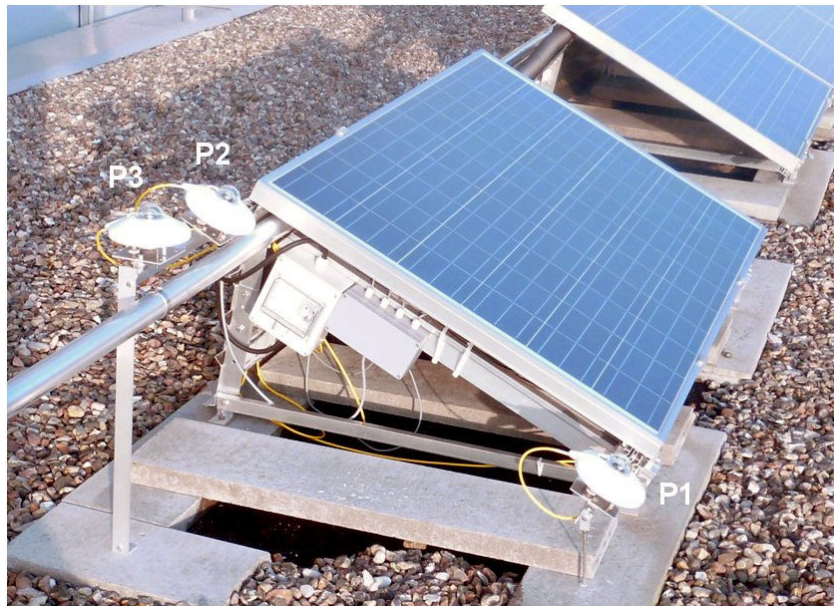


Bild 15: Anordnung der Pyranometer [ZAC10]

### Module

Die installierten Module stammen von der Firma *Conergy Deutschland GmbH*. Der Modultyp hat die Bezeichnung PowerPlus 220P. Die Nennleistung der Module beträgt  $220 \text{ W}_p$ . Ein Modul besteht aus 60 in Reihe verschalteten polykristallinen Zellen der Größe  $156 \times 156 \text{ mm}^2$ . Insgesamt sind drei Bypassdioden pro Modul verbaut und können jeweils 20 Zellen des Moduls überbrücken. In der Tabelle 4 sind die Kenndaten des PowerPlus 220P aufgelistet.

Tabelle 4: Modulkennwerte [CON09]

| Modultyp                           | Conergy PowerPlus 220P              |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Nennleistung ( $P_{MPP}$ )         | $220 \text{ W}_p$                   |
| Leistungstoleranz                  | $\pm 3 \%$                          |
| Nenn-Kurzschlussstrom ( $I_{SC}$ ) | 8,00 A                              |
| Nenn-Leerlaufspannung ( $U_{OC}$ ) | 36,6 V                              |
| Nennstrom ( $I_{MPP}$ )            | 7,47 A                              |
| Nennspannung ( $U_{MPP}$ )         | 29,5 V                              |
| Nennwirkungsgrad                   | 13,51 %                             |
| Temperaturkoeffizient $I_{SC}$     | +0,026 %/°C                         |
| Temperaturkoeffizient $U_{OC}$     | -0,35 %/°C                          |
| Temperaturkoeffizient $P_{MPP}$    | -0,45 %/°C                          |
| Anzahl Zellen                      | 60                                  |
| Technologie                        | Polykristalline Silizium Solarzelle |
| Abmessungen                        | 1651 mm x 986 mm x 46 mm            |

## Wechselrichter

Die beiden Wechselrichter stammen ebenfalls von der Firma Conergy. Hierbei handelt es sich um Strang-Wechselrichter. Der Wechselrichtertyp hat die Bezeichnung IPG 3000 und besitzt eine AC-Nennleistung von 2,6 kWp. Der DC-Spannungsbereich liegt zwischen 275 und 800 V. Die maximale MPP-Spannung liegt bei 700 V. In der Tabelle 5 sind die Daten des IPG 3000 aufgelistet.

**Tabelle 5: Wechselrichterwerte [CON07]**

|                           |                                 |
|---------------------------|---------------------------------|
| Wechselrichtertyp         | Conergy IPG 3000                |
| Technologie               | 1-phasiger Strangwechselrichter |
| DC-Nennleistung           | 2.800 W                         |
| Max. Eingangsstrom        | 10,2 A                          |
| DC-Spannungsbereich       | 275 - 800 V                     |
| Max. MPP-Spannung         | 700 V                           |
| Max. AC-Nennleistung      | 2.800 W                         |
| Nom. AC-Nennleistung      | 2.600 W                         |
| Max. Wirkungsgrad         | 96,1 %                          |
| Europäischer Wirkungsgrad | 94,5 %                          |

Der von dem PV-Generator erzeugte Gleichstrom, wird von den Wechselrichtern in Wechselstrom umgewandelt und anschließend in das Niederspannungsnetz der HAW-Bergedorf eingespeist.

## 4.2. LED-Sonnensimulator

Die Installation der Module auf dem Dach der HAW-Bergedorf findet im Jahr 2008 statt. Von den 24 netzgekoppelten Modulen gibt es 23 von *Conergy Deutschland GmbH* erstellte Flash-Protokolle. In dem untersuchten Ost-Strang der PV-Anlage befindet sich das Modul mit dem fehlenden Flash-Protokoll. Um dem Vergleich der Kennlinienmessgeräte eine aktuelle und vollständige Datengrundlage hinsichtlich der Modulkenndaten gegenüberzustellen, werden die Module des Ost-Strangs abmontiert und in einem mobilen PV-Testcenter durch die Firma *SunEnergy Europe GmbH* vermessen (24. Oktober 2012).

### Mobiles PV-Testcenter

Das mobile PV Testcenter entstammt der Firma *MBJ Services GmbH*. Die *MBJ Services GmbH* ist auf das mobile Testen von PV-Modulen spezialisiert und ist eine Ausgründung der *MBJ Solutions GmbH*. Die Firma *SunEnergy Europe GmbH* fungiert als ein Partnerunternehmen, das eine Vor-Ort-Prüfung mit dem mobilen PV-Testcenter (in Deutschland als Dienstleistung) anbietet. Mit dem mobile PV-Testcenter ist eine Qualitätskontrolle vor Ort möglich. Hierzu wird die Kennlinie durch eine Leistungsmessung mit einem LED-Sonnensimulator aufgenommen, eine Elektrolumineszenz Inspektion zum Erkennen von Mikrorissen und inaktiven Bereichen des PV-Moduls durchgeführt, sowie eine Thermografie-Aufnahme mit dem integrierten FLIR-Sensor gemacht.

Für das Erstellen der Modulkenndatengrundlage und der Referenz-Strangkennlinie werden die I-U-Kennlinien der einzelnen Module des Ost-Strangs aufgenommen. Folgende Parameter werden dabei messtechnisch erfasst:

- I-U-Kennlinie ( $P_{MPP}$  in W,  $I_{MPP}$  in A,  $U_{MPP}$  in V,  $I_{SC}$  in A,  $U_{OC}$  in V)
- Füllfaktor  $FF$
- Einstrahlung in Watt pro Quadratmeter ( $Irr$  in  $W/m^2$ )
- gemittelte Modultemperatur in Grad Celsius ( $T_{mod}$  in  $^{\circ}C$ )
- gemittelte Temperatur des Referenzsensors ( $T_{ref}$  in  $^{\circ}C$ )
- gemessene Temperatur des Innenraums der Messanlage ( $T_{dev}$  in  $^{\circ}C$ )
- gemessene Außentemperatur im Schatten ( $T_{out}$  in  $^{\circ}C$ )

Die Parameter  $P_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $I_{SC}$ ,  $U_{OC}$  und  $FF$  entsprechen den Messwerte bei den tatsächlichen Testbedingungen. Die Temperaturen  $T_{mod}$  und  $T_{ref}$  werden während der Messung der Leistungskurve erfasst. Die Temperaturen  $T_{dev}$  und  $T_{out}$  werden zum Zeitpunkt der I-U-Kennlinie erfasst.

Aus diesen gemessenen Parametern werden folgende STC-Werte nach der IEC 60891 (Prozedur 2) berechnet:

- $P_{MPP,STC}$
- $I_{MPP,STC}$
- $U_{MPP,STC}$
- $I_{SC,STC}$
- $U_{OC,STC}$
- $FF_{STC}$

Da für die spätere Betrachtung die Messung der I-U-Kennlinie durch den LED-Sonnensimulator von Bedeutung ist, wird an dieser Stelle näher auf dessen technische Details eingegangen. Der LED-Sonnensimulator besitzt in einem Spektrum von 400 bis 800 nm eine Bestrahlungsleistung von mehr als  $1200 W/m^2$ . Dies entspricht bei polykristallinen Zellen einer effektiven Bestrahlungsstärke von ca.  $900 W/m^2$ . Bei einer Blitzdauer von bis zu 180 ms können mehr als 8000 Messpunkte aufgenommen werden. Der eingebaute Polykristalline-Referenzsensor zur Einstrahlungsermittlung weist eine STC-Genauigkeit von  $\pm 4\%$  auf. Für die Ermittlung der MPP-Leistung unter STC wird eine Genauigkeit von  $\pm 5\%$  angegeben [LED12]. In der PHOTON-Profi Ausgabe vom September 2012 wird die Messgenauigkeit sogar mit  $\pm 3,5\%$  angegeben [PHO12c].

Die Klassifizierung eines Sonnenlichtsimulators nach der IEC 60904-9 erfolgt durch drei Kriterien: Die spektrale Übereinstimmung, sie definiert die zulässige Abweichung von dem AM 1,5 Spektrum in Abhängigkeit von unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. Die örtliche Inhomogenität, sie bezeichnet die räumliche Diskrepanz der auf dem Prüfling ankommenden Bestrahlungsstärke und die Beleuchtungsstabilität, sie lässt sich in die Kurzzeit- und Langzeitstabilität aufteilen und charakterisiert die zeitliche Änderung der messtechnisch erfassten Größen. Für die beiden letzten Kriterien besitzt der LED-Sonnensimulator mit der Klasse A die höchste Klassifizierung (örtliche Inhomogenität und Beleuchtungsstabilität sind kleiner  $\pm 2\%$ ). Eine Klassifizierung der spektralen Übereinstimmung ist nicht möglich. Dies liegt laut Dienstleister an den verwendeten weißen LEDs (Lichtspektrum von 400 bis 800 nm). Diese emittieren Licht in einem warmweißen Spektrum, was zur Folge hat, dass für den Infrarot-Bereich keine Klassifizierung in dem definierten Wellenlängenintervall (900 bis 1100 nm)

durchgeführt werden kann. Das emittierte Lichtspektrum einer weißen LED zeigt in Richtung des ultravioletten und des infraroten Bereichs signifikante Unterschiede bzgl. des Tageslichtspektrums und weicht somit von dem  $AM\ 1,5$  Spektrum ab. Eine bessere spektrale Übereinstimmung setzt die Kombination von farblich unterschiedlichen LEDs voraus, die auch Licht im ultravioletten und infraroten Bereich emittieren [BLI08].

Zur besseren Übersicht werden die PV-Module des Ost-Strangs durchnummeriert. Dies erfolgt von Ost nach West. Es folgt eine Übersicht der Module des Ost-Strangs (Tabelle 6).

**Tabelle 6: Ergebnisübersicht Flash-Messung**

| Modulnummer | Seriennummer | Ermittelte MPP-Leistung in W | Blitzdauer in ms |
|-------------|--------------|------------------------------|------------------|
| 1           | 0000257979   | 226,4                        | 92,0             |
| 2           | 0000255932   | 224,3                        | 92,0             |
| 3           | 0000255981   | 221,8                        | 92,0             |
| 4           | 0000257299   | 224,1                        | 92,5             |
| 5           | 0000257609   | 224,4                        | 92,0             |
| 6           | 0000258404   | 226,1                        | 92,5             |
| 7           | 0000320619   | 222,3                        | 93,0             |
| 8           | 0000256610   | 222,9                        | 91,8             |
| 9           | 0000256674   | 226,5                        | 92,5             |
| 10          | 0000256758   | 226,1                        | 92,0             |
| 11          | 0000256744   | 227,1                        | 93,0             |
| 12          | 0000256933   | 225,7                        | 92,0             |

### 4.3. Referenz-MPP-Leistung des Ost-Strangs

Da für den Vergleich der Messgeräte die Kennlinie des gesamten Ost-Strangs aufgenommen wird, ist es notwendig aus den Kennlinien der einzelnen Module eine Strangkennlinie zu bilden. Hierfür werden aus den einzelnen Flash-Protokollen der 12 Module des Ost-Strangs, die für die I-U-Kennlinie charakteristischen Werte  $I_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$ ,  $I_{SC}$  und  $U_{OC}$  herangezogen. Aus diesen Werten wird die Kennlinie jedes einzelnen Moduls nach den in Kapitel 2.3 beschriebenen Formeln nachgebildet. Mit diesen Modulkennlinien wird eine Strangkennlinie generiert, aus der sich die MPP-Strangleistung ablesen lässt. Diese MPP-Strangleistung dient als Grundlage zur Definition eines Toleranzbereichs, in dem die Referenz-MPP-Leistung des Ost-Strangs liegt.

In Tabelle 7 ist die Datengrundlage für die Erstellung der Modulkennlinien aufgelistet. Sie besteht zum einen aus den für die Kennlinie charakteristischen Strom und Spannungswerten der einzelnen Flash-Protokolle und zum anderen aus den für das Bilden der Kennlinie berechneten Parametern (siehe Kapitel 2.3). Zum Generieren der Strangkennlinie erfolgt eine Sortierung der Module nach dem Kurzschlussstrom in absteigender Reihenfolge.

Tabelle 7: Übersicht der STC-Werte der Flash-Protokolle und der berechneten Werte zum Erstellen der Modulkennlinie

| Module | Flash-Protokolle |           |          |           |           | berechnete Parameter |              |       |        |
|--------|------------------|-----------|----------|-----------|-----------|----------------------|--------------|-------|--------|
|        | $I_{SC}$         | $I_{MPP}$ | $U_{OC}$ | $U_{MPP}$ | $P_{MPP}$ | $M$                  | $R_{PV}$     | $U_T$ | $I_0$  |
|        | [A]              | [A]       | [V]      | [V]       | [W]       | [-]                  | [ $\Omega$ ] | [V]   | [nA]   |
| 11     | 8,338            | 7,813     | 36,646   | 29,068    | 227,11    | -0,55                | 0,34         | 1,77  | 8,99   |
| 7      | 8,338            | 7,726     | 36,504   | 28,778    | 222,33    | -0,54                | 0,29         | 2,10  | 240,81 |
| 12     | 8,333            | 7,794     | 36,459   | 28,958    | 225,69    | -0,54                | 0,32         | 1,83  | 18,86  |
| 1      | 8,317            | 7,785     | 36,658   | 29,083    | 226,42    | -0,55                | 0,33         | 1,81  | 13,45  |
| 6      | 8,312            | 7,790     | 36,632   | 29,022    | 226,09    | -0,56                | 0,35         | 1,76  | 7,85   |
| 9      | 8,308            | 7,792     | 36,652   | 29,065    | 226,46    | -0,56                | 0,35         | 1,74  | 6,23   |
| 10     | 8,304            | 7,791     | 36,652   | 29,021    | 226,11    | -0,57                | 0,36         | 1,73  | 4,98   |
| 3      | 8,303            | 7,730     | 36,221   | 28,694    | 221,80    | -0,53                | 0,30         | 1,96  | 76,31  |
| 4      | 8,299            | 7,763     | 36,551   | 28,868    | 224,10    | -0,57                | 0,35         | 1,81  | 13,34  |
| 5      | 8,297            | 7,772     | 36,463   | 28,879    | 224,44    | -0,56                | 0,35         | 1,77  | 9,31   |
| 8      | 8,296            | 7,759     | 36,353   | 28,733    | 222,93    | -0,56                | 0,34         | 1,80  | 14,68  |
| 2      | 8,294            | 7,750     | 36,490   | 28,946    | 224,32    | -0,54                | 0,32         | 1,86  | 24,62  |

Die Spannung der einzelnen Module wird beginnend bei dem höchsten Kurzschlussstrom aufsummiert. Dies geschieht nach folgendem Schema: Die Kennlinie des zweiten Moduls setzt bei der Spannung an, an welcher der Stromwert des ersten Moduls den Kurzschlussstrom des zweiten Moduls erreicht. Zusätzlich verschiebt sich der neue Kurvenbeginn um die resultierende Spannungsdifferenz zwischen der Leerlaufspannung und dem Spannungswert des ersten Moduls, zum Zeitpunkt des Kurzschlussstroms des zweiten Moduls. Aus der finalen Strom-Spannungskennlinie werden die Leistungswerte gebildet, um aus diesen Werten die Referenz-MPP-Strangleistung zu bestimmen.

Abschließend erfolgt ein Vergleich der MPP-Leistungswerte aus den Flash-Protokollen und den nachgebildeten Kennlinien. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Abweichungen der MPP-Leistungswerte liegen alle unterhalb von einem Promille. Somit kann die aus den approximierten Kennlinien erstellte Strangkennlinie und der damit verbundenen MPP-Strangleistungswert als Grundlage für die spätere Auswertung verwendet werden.

Tabelle 8: Vergleich der MPP-Leistungswerte der Flash-Protokolle und der Kennlinienapproximation

| Modul-Nr. | $P_{MPP}$ - Flash-Protokolle | $P_{MPP}$ - Approximation | Abweichung |
|-----------|------------------------------|---------------------------|------------|
|           | [W <sub>p</sub> ]            | [W <sub>p</sub> ]         | [%]        |
| 1         | 226,42                       | 226,51                    | 0,04       |
| 2         | 224,32                       | 224,41                    | 0,04       |
| 3         | 221,80                       | 221,85                    | 0,02       |
| 4         | 224,10                       | 224,20                    | 0,05       |
| 5         | 224,44                       | 224,56                    | 0,05       |
| 6         | 226,09                       | 226,20                    | 0,05       |
| 7         | 222,33                       | 222,35                    | 0,01       |
| 8         | 222,93                       | 223,04                    | 0,05       |
| 9         | 226,46                       | 226,61                    | 0,06       |
| 10        | 226,11                       | 226,24                    | 0,06       |
| 11        | 227,11                       | 227,23                    | 0,05       |
| 12        | 225,69                       | 225,79                    | 0,04       |

Das Bild 16 zeigt die Visualisierung der aufsummierten I-U-Kennlinie der einzelnen Module und die daraus resultierende I-U-Strangkennlinie. Der MPP-Strangleistungswert liegt bei 2698,77 W. Dieser befindet sich bei einem Strom von 7,7720 A und einer Spannung von 347,2424 V.

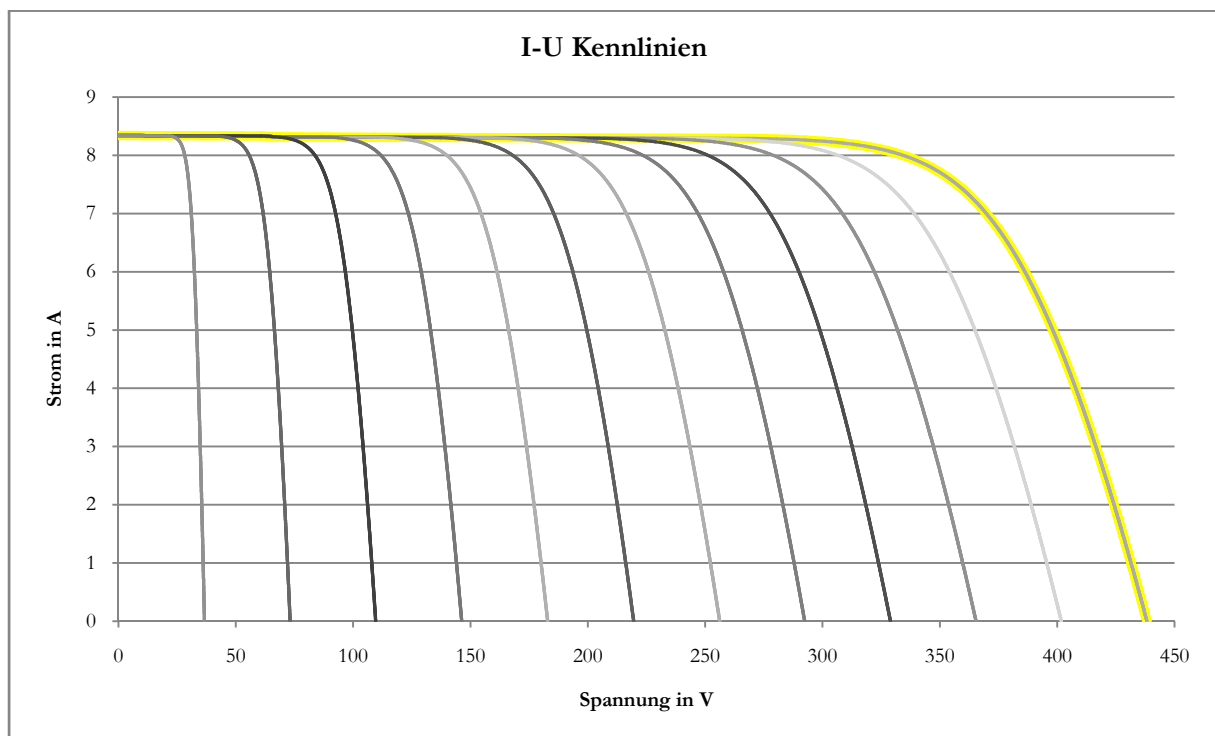


Bild 16: Die aufsummierten I-U-Kennlinien der einzelnen Module (grau) mit der daraus resultierenden I-U-Strangkennlinie (gelb)



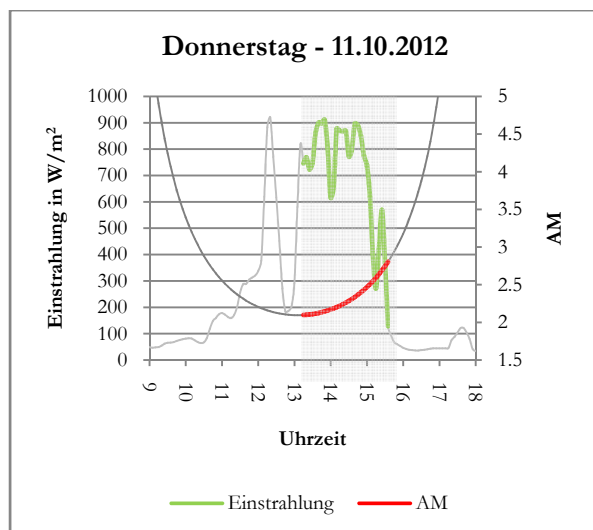
## 5. Durchführung und Auswertung der Messungen

Dieses Kapitel behandelt die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung der Kennlinienmessungen des Ost-Strangs mit den Kennlinienmessgeräten. In einem ersten Schritt wird beschrieben, welche Vorbereitungen getroffen werden um die einzelnen Messungen zu dokumentieren und welche Einstrahlungsverhältnisse an den jeweiligen Messtagen herrschen. Zudem erfolgt eine kurze Erläuterung hinsichtlich des Anbringens der Sensoren der Messgeräte, sowie an welchem Punkt des Ost-Strangs die Sensoren befestigt werden und somit der Aufbau der Kennlinienmessgeräte stattfindet (5.1). Danach werden die Einstrahlungs- und Temperatursensoren dahingehend untersucht, ob sich signifikante Abweichungen zwischen den Messwerten der einzelnen Kennliniengeräte zeigen, die sich in den resultierenden MPP-Leistungsmessungen bei STC widerspiegeln (5.2). In dem Kapitel 5.3 werden die mit den Messgeräten aufgenommenen Kennlinien ausgewertet. Hierzu wird ein Verfahren vorgestellt, um die messtechnisch erfassten Werte der Messgeräte einheitlich auf STC-Werte hochzurechnen. Damit soll gezeigt werden, welchen Einfluss die messgerätinterne Umrechnung auf die berechnete MPP-Leistung bei STC besitzt (5.3.1). Im Anschluss daran erfolgt die Darstellung der MPP-Leistungswerte bei STC. Basierend auf einer statistischen Auswertung, wird die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse grafisch dargestellt. Zum Schluss werden ausgewählte, zeitlich kurz nacheinander aufgenommene Messungen gegenübergestellt (5.3.2). In dem Kapitel 5.4 erfolgt die Ergebnisbewertung. Hier werden die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln zusammengefasst.

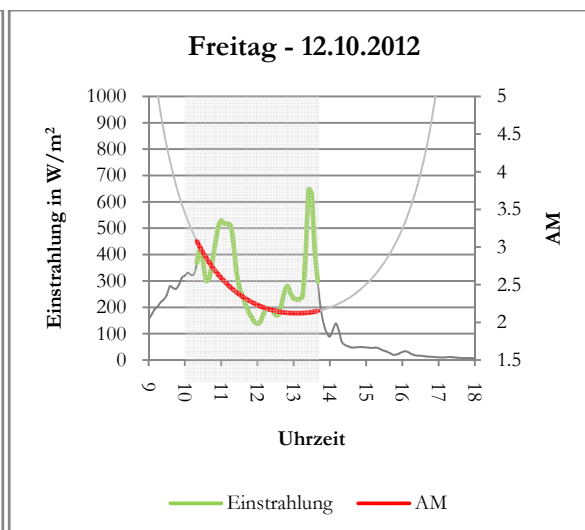
### 5.1. Durchführung der Messungen

Zum Dokumentieren der Messungen kommen zwei Messprotokolle zum Einsatz. Das *Messprotokoll 1* dient der Erfassung der Uhrzeit, sowie der getätigten Aktion (z.B. Strang entkoppelt, Temperatursensoren angebracht, Kennlinienmessgerät angeschlossen, etc.) und besitzt eine fortlaufende Nummerierung. Das *Messprotokoll 2* erfüllt den Zweck, die Wettersituation, die Einstrahlungswerte, die Temperaturwerte der Einstrahlungssensoren und die Modultemperaturwerte aller Kennlinienmessgeräte während jeder Messung zu erfassen. Nach dem Ende der Messungen werden die beiden Messprotokolle am Computer zu einem Protokoll zusammengefasst.

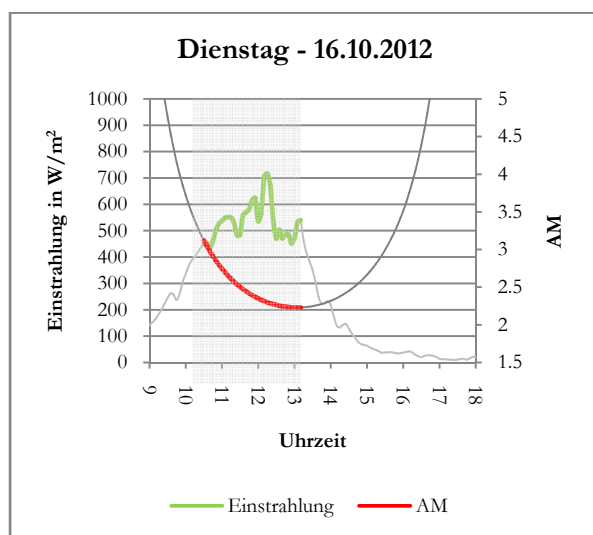
Die folgenden Bilder (Bild 17-23) beschreiben den Tagesverlauf der an den Messtagen vorherrschenden Einstrahlungsverhältnisse. Zusätzlich wird das AM-Spektrum des Messtages abgebildet. Die Berechnungen bzgl. des AM-Spektrums erfolgen nach Wagner [WAG09]. Der farbig hinterlegte Bereich markiert den Messzeitraum. Die Datengrundlage für die Darstellung des Einstrahlungsverlaufs bildet der Einstrahlungsmittelwert aus den in Modulebene ausgerichteten Pyranometern  $E_{P1}$  und  $E_{P2}$  in einem Intervall von fünf Minuten.



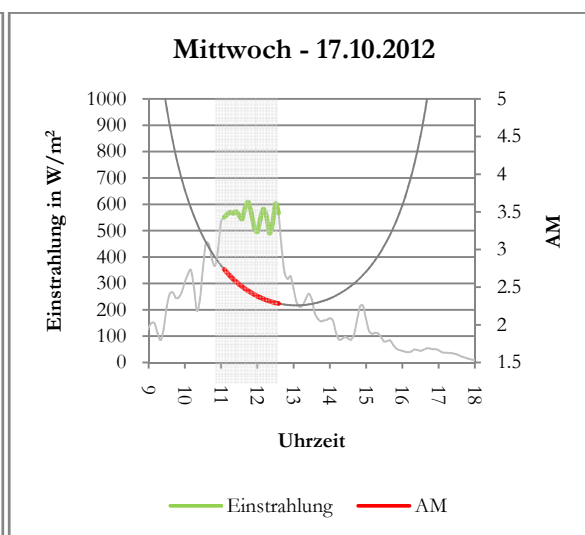
**Bild 17:** Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 11.10.2012



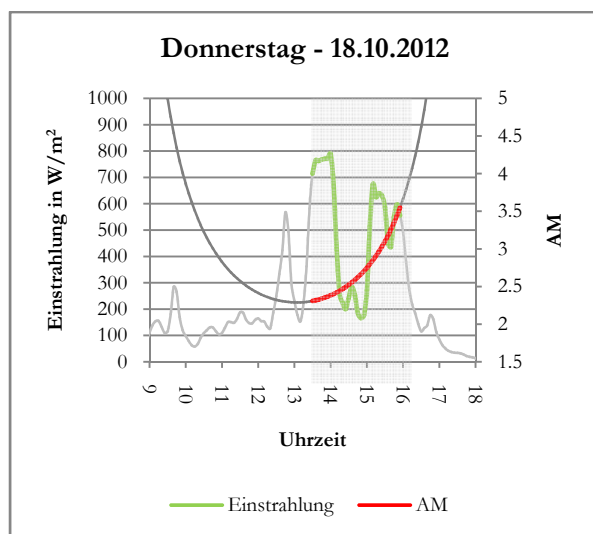
**Bild 18:** Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 12.10.2012



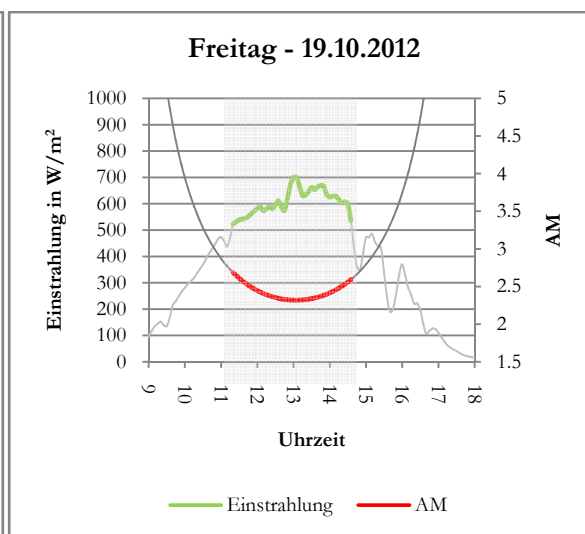
**Bild 19:** Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 16.10.2012



**Bild 20:** Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 17.10.2012



**Bild 21:** Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 18.10.2012



**Bild 22:** Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 19.10.2012

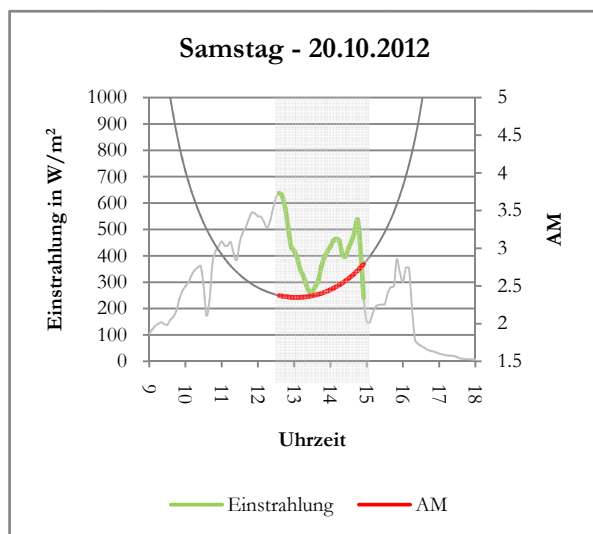


Tabelle 9: Einstrahlungsminimum und -maximum

| Datum      | Einstrahlung in $W/m^2$ |         |
|------------|-------------------------|---------|
|            | Minimum                 | Maximum |
| 11.10.2012 | 142,50                  | 939,04  |
| 12.10.2012 | 138,52                  | 645,24  |
| 16.10.2012 | 434,95                  | 716,67  |
| 17.10.2012 | 490,75                  | 607,74  |
| 18.10.2012 | 166,00                  | 789,23  |
| 19.10.2012 | 522,72                  | 699,43  |
| 20.10.2012 | 240,38                  | 637,78  |

Bild 23: Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 18.10.2012

Die Tabelle 9 zeigt die auftretenden Minima und Maxima der Einstrahlung für die einzelnen Messtage.

Als Vorbereitung auf die Messungen erfolgt eine Reinigung der 12 Module des Ost-Strangs. Des Weiteren wird sichergestellt, dass an jedem Messtag ein Abgleich zwischen der Uhrzeit des Messdatenerfassungssystem und der Uhr zum Festhalten des Messzeitpunkts stattfindet. Mindestens 15 Minuten vor dem Durchführen der Messungen werden die Temperatur- und Einstrahlungssensoren der Kennlinienmessgeräte an, dem von Osten aus gesehen, siebten Modul befestigt (vergleiche Bild 14). Dies ermöglicht eine zeitliche Anpassung der Sensoren an die Umgebungsbedingungen. Die Fixierung der Pt-Temperatursensoren an der Modulrückseite erfolgt durch das Verwenden von Klebeband. Für eine gleichmäßige Wärmeübertragung sorgt eine Schicht Wärmeleitpaste zwischen den Sensoren und der Modulrückseite. Die Einstrahlungssensoren werden mit den dazugehörigen Befestigungssystemen angebracht, lediglich für das *I-V 400* wird eine Klemm-Zange verwendet (Bild 24). Danach erfolgt das ordnungsgemäße Trennen des Ost-Strangs von dem Wechselrichter.



Bild 24: Messaufbau (*PVPM 1000CX*, *Profitest-PV*, *TRI-KA* und *I-V 400*), Einstrahlungssensoren (*TRI-KA*, *I-V 400*, *Profitest-PV* und *PVPM 1000CX*) und Temperatursensoren (*Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *I-V 400*)(von links nach rechts)

Nach dem Aufbauen der Messgeräte und dem Anschließen der Sensoren finden die Trennung der Strangkabel und das Anschließen der selbigen an den Sicherheitstrennschalter statt. Die Messungen mit den einzelnen Kennliniengeräten erfolgen nach dem gleichen Schema. Wenn die Vierleitermesskabel des DC-Trennschalters angeschlossen sind, wird die Position des Trennschalters von „0“ auf „1“ gestellt, sodass eine Messung der Kennlinie möglich ist. Nach dem Starten der Messung werden neben der Uhrzeit und der aktuellen Wetterlage noch folgende Werte dokumentiert: Die auf dem Display der vier Kennlinienmessgeräte angezeigten Einstrahlungswerte, sowie die Temperaturwerte der Einstrahlungssensoren und die Temperaturwerte der Module.

Tabelle 10 verdeutlicht die Dokumentation der Parameter nach jeder Messung mit einem Kennliniengerät.

**Tabelle 10: Parameter der Dokumentation**

| Messgerät                               | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|---|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Einstrahlungswert                       | X              | X                   | X                  | X             |
| Temperaturwert des Einstrahlungssensors |                | X                   | X                  |               |
| Modultemperatur (Rückseite)             | X              | X                   | X                  |               |
| Modultemperatur (Vorderseite)           |                |                     |                    | X             |

Diese Dokumentation dient als Datengrundlage für den Vergleich der Einstrahlungs- und Temperatursensoren der Kennlinienmessgeräte untereinander.

Es wird versucht die Messungen in Messzyklen durchzuführen. Ein Messzyklus beinhaltet eine Messung mit jedem der vier verwendeten Kennlinienmessgeräte. Die Reihenfolge, in der die Messungen aufgenommen werden, lautet wie folgt: *PVPM 1000CX*, *Profitest-PV*, *I-V 400* und *TRI-KA*. Ein Messzyklus dauert im Mittel ca. fünf Minuten.

Bei den Messgeräten *Profitest-PV* und *PVPM 1000CX* wird bei einer Einstrahlung die kleiner als  $500 \text{ W/m}^2$  ist keine Umrechnung der Messwerte auf STC durchgeführt. Für das *Profitest-PV* sind dies 12 Messungen. Das *PVPM 1000CX* weist sieben dieser Messungen auf. Zusätzlich gibt es zwei Messungen mit dem *PVPM 1000CX* bei denen der DC-Trennschalter auf der Sperrposition stand und somit keine Kennlinie aufgenommen werden konnte, da kein Stromfluss vorhanden war. Für das *I-V 400* und das *TRI-KA* reduzieren sich die Anzahl der Messungen um vier bzw. um eine. Grund hierfür ist, dass bei dem *I-V 400* die Messungen, wenn sie eine zu große prozentuale Abweichung von der nominalen Leistung aufweisen, in die Kategorien "OK" und "nicht OK" eingeteilt werden und die Messung mit der Kategorie "Nicht OK" keine Berücksichtigung in der Auswertung finden. Während bei dem *TRI-KA* eine Messung nicht auf der SD-Karte abgespeichert wurde. Diese Messungen werden bei der nachfolgenden Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 11 zeigt eine Auflistung der aufgenommenen Messungen mit den jeweiligen Kennliniengeräten an den einzelnen Tagen.

Tabelle 11: Auflistung der Anzahl der Messungen an den jeweiligen Messtagen

| Messdatum                   | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|-----------------------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| 11.10.2012                  | 7              | 8                   | 7                  | 5             |
| 12.10.2012                  | 5              | 6                   | 8                  | 5             |
| 16.10.2012                  | 9              | 9                   | 11                 | 9             |
| 17.10.2012                  | 5              | 7                   | 6                  | 5             |
| 18.10.2012                  | 8              | 11                  | 9                  | 7             |
| 19.10.2012                  | 12             | 12                  | 12                 | 12            |
| 20.10.2012                  | 6              | 6                   | 6                  | 6             |
| <b>Summe Messungen</b>      | <b>52</b>      | <b>59</b>           | <b>59</b>          | <b>49</b>     |
| <b>Auswertung Messungen</b> | <b>48</b>      | <b>47</b>           | <b>50</b>          | <b>48</b>     |

## 5.2. Einstrahlungs- und Temperatursensoren

Während der Durchführung der Messungen werden bei jeder einzelnen Messung die Einstrahlungs- und Temperaturwerte der Sensoren der vier Kennlinienmessgeräte erfasst. Dies geschieht mit dem *Messprotokoll 2* und dient als Vergleichsgrundlage der Einstrahlungs- und Temperatursensoren untereinander. Dieses manuelle Sensorwerte-Erfassungssystem unterliegt durch den zeitlichen Versatz der Dokumentation Schwankungen. Für das Abbilden einer Tendenz im Verhalten der Sensoren ist es aber hinreichend genau.

Zum Vergleich der über die Einstrahlungssensoren erfassten Messdaten, wird der Mittelwert aus allen vier Einstrahlungssensoren der Größe nach in absteigender Reihenfolge geordnet. Anschließend wird die Abweichung bezogen auf eine Einstrahlung von  $1000 \text{ W/m}^2$  berechnet (Bild 25).

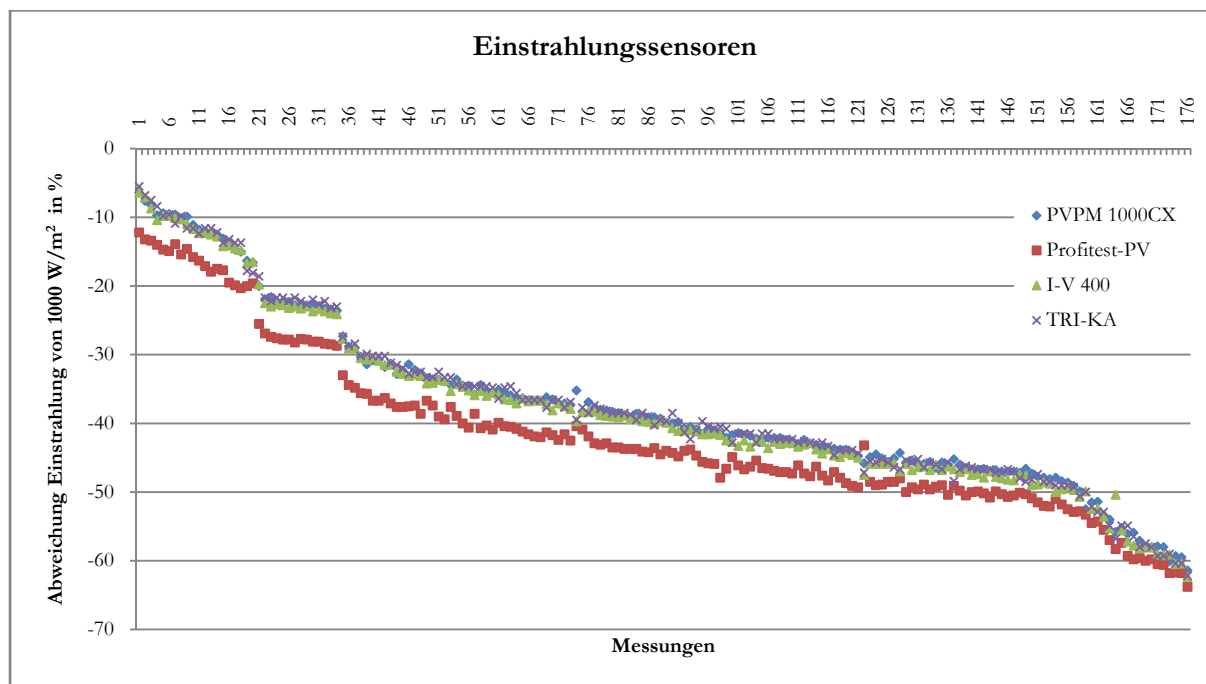


Bild 25: Prozentuale Abweichung bezogen auf eine Einstrahlung von  $1000 \text{ W/m}^2$  der dokumentierten Werte der Einstrahlungssensoren aller Messungen

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Einstrahlungswerte des *I-V 400*, des *PVPM 1000CX* und des *TRI-KA* sehr nahe beieinander liegen, während die Einstrahlungswerte des *Profitest-PV*

signifikant niedriger ausfallen. Dies fällt auch auf, wenn man die Spannweite (der Unterschied zwischen der maximalen und der minimalen Abweichung bzgl. einer Einstrahlung von  $1000 \text{ W/m}^2$ ) für sechs Einstrahlungsintervalle bildet. Der Intervallanfangswert liegt bei  $1000 \text{ W/m}^2$  und einer Intervallbreite von  $100 \text{ W/m}^2$ . Es wird zwischen der Spannweite für alle vier Messgeräte und für die drei Messgeräte *I-V 400*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* unterschieden. Im Anschluss erfolgt die Bildung eines Mittelwerts der Spannweiten für jedes Einstrahlungsintervall (Tabelle 12).

Tabelle 12: Mittelwert der Spannweite der prozentualen Abweichung in Abhängigkeit von Einstrahlungsintervallen

| Einstrahlungsintervalle in $\text{W/m}^2$ | Mittelwert Spannweite 1 in %<br>( <i>I-V 400</i> , <i>Profitest-PV</i> ,<br><i>PVPM 1000CX</i> , <i>TRI-KA</i> ) | Mittelwert Spannweite 2 in %<br>( <i>I-V 400</i> , <i>PVPM 1000CX</i> ,<br><i>TRI-KA</i> ) |
|---|--|--|
| 1000 – 900                                | 6,3  | 1,1  |
| 900 – 800                                 | 5,2  | 1,0  |
| 800 – 700                                 | 5,8  | 1,0  |
| 700 – 600                                 | 5,4  | 1,0  |
| 600 – 500                                 | 4,3  | 1,1  |
| 500 – 400                                 | 3,2  | 1,5  |
| 400 – 300                                 | 2,4  | 1,0  |

In Bild 26 sind die einzelnen Spannweiten und ein gleitender Mittelwert mit einem Intervallschritt von zehn Werten dargestellt. Der gleitende Mittelwert dient zu einer besseren visuellen Darstellung des Verhaltens der Abweichung in Abhängigkeit der Einstrahlung.

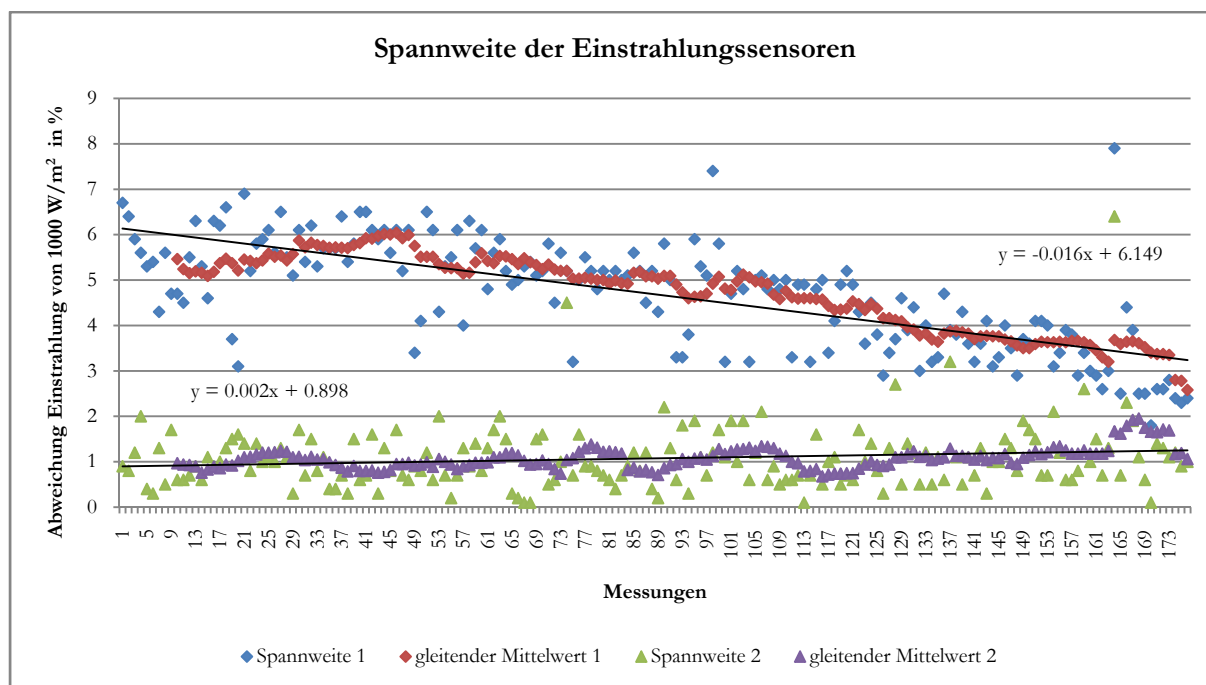
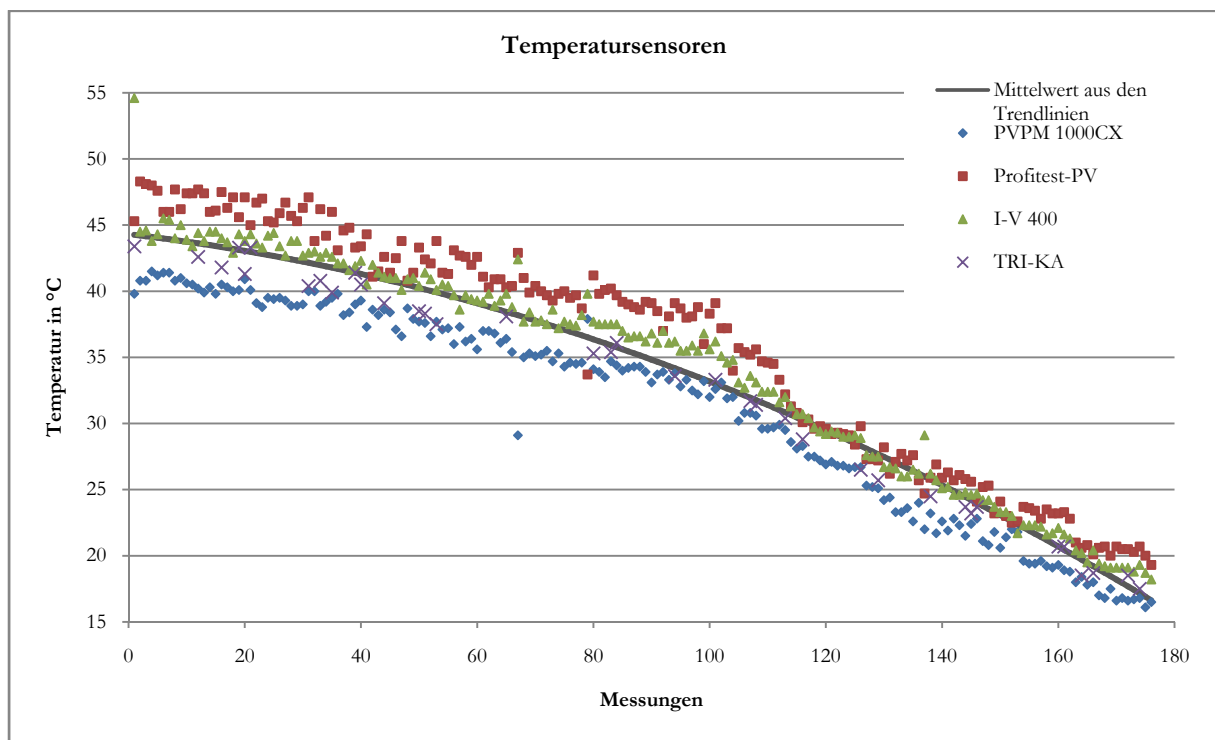


Bild 26: Spannweite der prozentuale Abweichung (Oben für: *PVPM 1000CX*, *Profitest-PV*, *I-V 400* und *TRI-KA*. Unten für: *PVPM 1000CX*, *I-V 400* und *TRI-KA*)

Die Datenreihe *Spannweite 1* beinhaltet alle Kennlinienmessgeräte. Bei der Datenreihe *Spannweite 2* findet das *Profitest-PV* keine Berücksichtigung. Während die *Spannweite 2* einen nahezu konstante Verlauf aufweist (die Mittelwerte der Abweichungen für die Einstrahlungsintervalle bewegen sich

zwischen 1,0 und 1,5 %), zeigt die *Spannweite 1* eine Abnahme von ca. vier Prozent mit sinkender Einstrahlung (die Mittelwerte der Abweichungen für die Einstrahlungsintervalle sinken von 6,3 auf 2,4 %). Das *Profitest-PV* misst niedrigere Einstrahlungswerte als die drei übrigen Messgeräte und errechnet somit bei gleichen Umgebungsbedingungen höhere MPP-Leistungen. Die Differenz der gemessenen Einstrahlungswerte des *Profitest-PV* hinsichtlich der restlichen Messgeräte nimmt mit steigender Einstrahlung zu. Die Ursache dieses Effekts kann in einer fehlerhaften Kalibrierung des Einstrahlungssensors liegen.

Zum Darstellen des Verhaltens der Temperatursensoren wird ebenfalls der Mittelwert aus allen Sensorwerten gebildet und in absteigender Reihenfolge sortiert. Da die Temperatur des *TRI-KA* anders als bei den restlichen drei Messgeräten auf der Moduloberseite gemessen wird und nicht kontinuierlich stattfindet, ergeben sich für das *TRI-KA* weniger Temperaturwerte. Da die dokumentierten Messwerte weit gefächert sind, wird aus den Polynomen-Trendlinien eine mittlere Trendlinie gebildet, die als Näherung der wahren Temperatur angesehen wird (Bild 27).



**Bild 27:** Die dokumentierten Werte der Temperatursensoren aller Messungen

Bei den Temperatursensoren zeigen sich ausgeprägte Unterschiede hinsichtlich der Spannweite. Zwischen dem *PVPM 1000CX* und dem *Profitest-PV* zeigen sich bei Temperaturen zwischen 30 °C und 50 °C Unterschiede in den erfassten Werten von um die 6 °C. Die Temperaturwerte des *I-V 400* und des *TRI-KA* bewegen sich dazwischen mit einer leichten Tendenz hin zum *Profitest-PV* (*I-V 400*) bzw. zum *PVPM 1000CX* (*TRI-KA*). Bei Temperaturen kleiner 30 °C ist eine Abnahme dieser Unterschiede und eine Annäherung der Werte des *Profitest-PV* an die Werte des *I-V 400* zu beobachten. Die Werte der Temperatursensoren unterliegen aber auch einer signifikanteren Schwankung, da eine Änderung der Modultemperatur neben der Abhängigkeit von dem durch das Modul fließenden Strom, auch von äußeren Faktoren wie den aktuellen Windverhältnissen abhängig ist. Außerdem ist die oben beschriebene Methode der Werteaufzeichnung nur zum Aufzeigen von Tendenzen geeignet.

### 5.3. Kennlinienmessgeräte

Die Messungen der Kennliniengeräte werden in einem ersten Schritt in drei Einstrahlungsklassen ( $E 1$ ,  $E 2$  und  $E 3$ ) unterteilt. Für die Einteilung werden die Einstrahlungswerte der in Modulebene ausgerichteten Pyranometer  $E_{P1}$  und  $E_{P2}$  jeweils eine Minute vor, eine Minute nach und zum Zeitpunkt der Messung zu einem Mittelwert zusammengefasst. Aus den drei Einstrahlungswerten der zwei Pyranometer wird die prozentuale Abweichung zu dem jeweiligen Mittelwert berechnet. Basierend auf diesen sechs prozentualen Abweichungen werden die Einstrahlungsklassen ermittelt. Sind alle sechs Abweichungen einer Messung kleiner als zwei Prozent, wird die Einstrahlung zum Zeitpunkt der Messung als hinreichend konstant angesehen und gehört zur Einstrahlungsklasse  $E 1$ . Bei Abweichungen kleiner zehn Prozent, handelt es sich um schwach schwankende Einstrahlung, welche der Einstrahlungsklasse  $E 2$  angehören. Wenn die Abweichungen größer zehn Prozent sind, schwankt die Einstrahlung stark. Dies entspricht der Einstrahlungsklasse  $E 3$  (Tabelle 13).

Tabelle 13: Einteilung in Einstrahlungsklassen nach Schwankung der Einstrahlung zum Zeitpunkt der Messung  $\pm 1$  Minute

| Einstrahlungsklasse | Einstrahlung         | Abweichungen |
|---------------------|----------------------|--------------|
| $E 1$               | Hinreichend konstant | $< 2\%$      |
| $E 2$               | Schwach schwankend   | $< 10\%$     |
| $E 3$               | Stark schwankend     | $> 10\%$     |

Die 193 ausgewerteten Messungen unterliegen nach dem oben beschriebenen Verfahren der in Tabelle 14 dargestellten Einteilung.

Tabelle 14: Übersicht der resultierenden Anzahl an Messungen für die jeweiligen Einstrahlungsklassen

| Einstrahlungsklasse | Gesamt | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 100CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|---------------------|--------|----------------|---------------------|-------------------|---------------|
| $E 1$               | 104    | 26             | 23                  | 31                | 24            |
| $E 2$               | 68     | 18             | 19                  | 12                | 19            |
| $E 3$               | 21     | 4              | 5                   | 7                 | 5             |

#### 5.3.1. Eigene Hochrechnung der Messwerte auf STC

Um mögliche Unterschiede hinsichtlich der Umrechnung der Messwerte auf STC-Werte der einzelnen Kennlinienmessgeräte herauszufinden, werden die messtechnisch erfassten Daten mit einem eigenen Verfahren auf STC-Werte umgerechnet. Die erfolgt unter der Berücksichtigung des relativen Wirkungsgradverlaufs in Abhängigkeit der Einstrahlung für das installierte Conergy PowerPlus 220P Modul.

Tabelle 15: Relativer Wirkungsgradverlauf des Conergy PowerPlus 220P Moduls in Abhängigkeit von verschiedenen Einstrahlungen

| Einstrahlung in $W/m^2$ | Relativer Wirkungsgrad |
|-------------------------|------------------------|
| 100                     | 0,9194                 |
| 200                     | 0,9632                 |
| 400                     | 1,0012                 |
| 700                     | 1.0138                 |
| 1000                    | 1,0000                 |



Die Nennleistung von 220 W bei einer Einstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup> entstammt dem Datenblatt des Conergy PowerPlus 220P. Die relativen Wirkungsgrade bei den Einstrahlungen von 100, 200, 400 und 700 W/m<sup>2</sup> basieren auf dem relativen Verhalten aus dem PHOTON-Profi Magazin vom Februar 2012 [PHO12b] (Tabelle 15).

Aus der gemessenen Einstrahlung  $E_{Eff}$  der Kennlinienmessgeräte wird die resultierende normierte Nennleistung  $\eta_{Rel}$  linear interpoliert. Mit diesem relativen Wirkungsgrad wird die Leistung im MPP-Punkt  $P_{MPP,STC*}$  mit Formel 11 berechnet:

$$P_{MPP,STC*} = \frac{1000 \text{ W/m}^2}{E_{Eff} * \eta_{Rel}} * P_{MPP} * ((T_{Mod} - 25 \text{ °C}) * (-\gamma_{MPP}) + 1)$$

Formel 11

|      |                |   |
|------|----------------|---|
| mit: | $P_{MPP,STC*}$ | Errechnete MPP-Leistung bei STC in W <sub>p</sub>                       |
|      | $E_{Eff}$      | Gemessene Einstrahlung in W/m <sup>2</sup>                              |
|      | $\eta_{Rel}$   | Relativer Wirkungsgrad für die gegebene Einstrahlung                    |
|      | $P_{MPP}$      | Gemessene MPP-Leistung in W <sub>p</sub>                                |
|      | $T_{Mod}$      | Gemessene Modultemperatur in °C   |
|      | $\gamma_{MPP}$ | Temperaturkoeffizient der Leistung des Conergy 220P Moduls (Datenblatt) |

Aus den resultierenden Leistungswerten bei STC ( $P_{MPP,STC*}$ ) und den STC-Leistungswerten ( $P_{MPP,STC}$ ) der Kennliniengeräte werden die Abweichungen ermittelt und unter Berücksichtigung der Einstrahlungsklassen vergleichend gegenübergestellt (Formel 12).

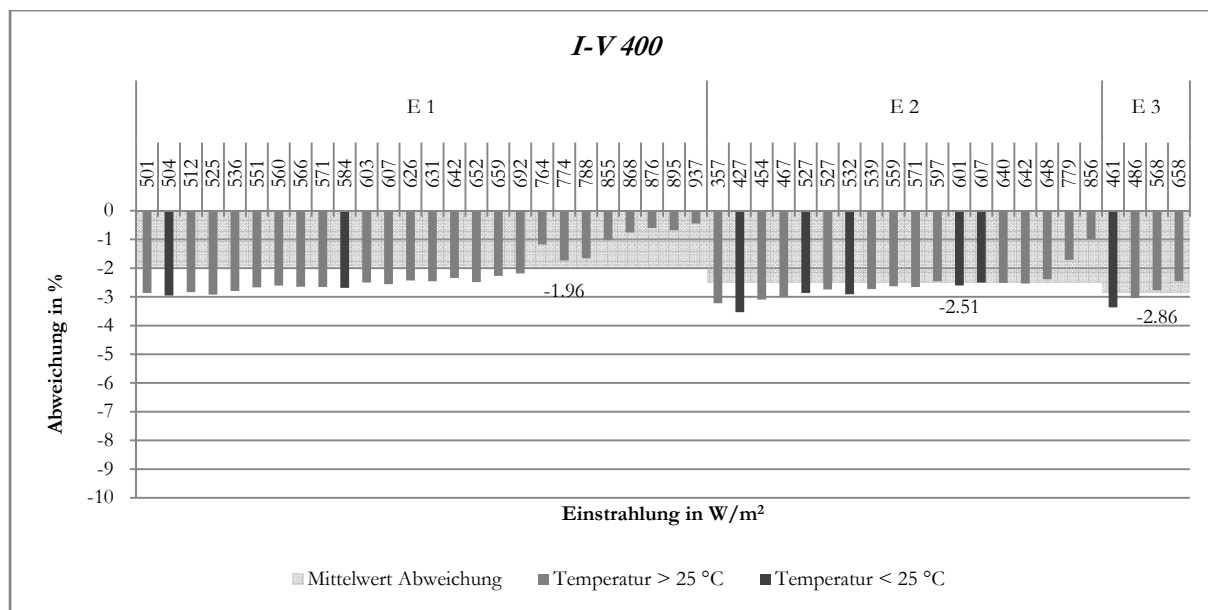
$$\Delta = \left( \frac{P_{MPP,STC*}}{P_{MPP,STC}} - 1 \right) * 100 \%$$

Formel 12

|      |               |  |
|------|---------------|--|
| mit: | $\Delta$      | Abweichung der Leistungswerte                    |
|      | $P_{MPP,STC}$ | gemessene MPP-Leistung bei STC in W <sub>p</sub> |

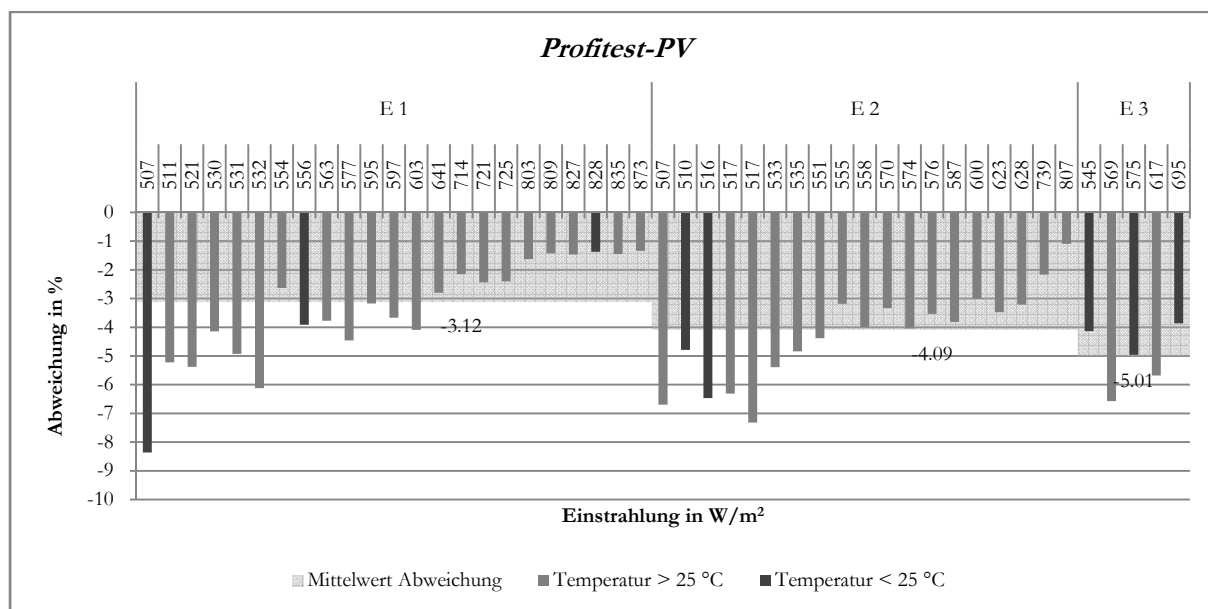
Zusätzlich wird durch die Multiplikation der Abweichung mit den durch die Sensoren der Kennliniengeräte erfassten Einstrahlungswerten ein nach der Einstrahlung gewichteter Mittelwert für jede Einstrahlungsklasse gebildet. Durch dieses einheitliche Umrechnungsverfahren zeigen sich etwaige Unterschiede, die alleine durch die Hochrechnung der Messwerte auf STC-Werte der einzelnen Kennliniengeräte generiert werden.

Die Ergebnisse sind in den Bildern 28, 29, 30 und 31 zu sehen. Auf der y-Achse findet sich die prozentuale Abweichung der nach Formel 12 berechneten MPP-Leistungswerte bezogen auf die MPP-Leistungswerte der Kennlinienmessgeräte. Auf der x-Achse sind die drei Einstrahlungsklassen zusammen mit gemessenen Einstrahlungswerten der Kennliniengeräte abgebildet. Die Sortierung innerhalb der Einstrahlungsklassen erfolgt anhand der Einstrahlungswerte des Messdatenerfassungssystems ( $E_{p2}$ ). Je nach gemessener Modultemperatur sind die Säulen im Diagramm farblich gekennzeichnet.



**Bild 28:** Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts *I-V 400* in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

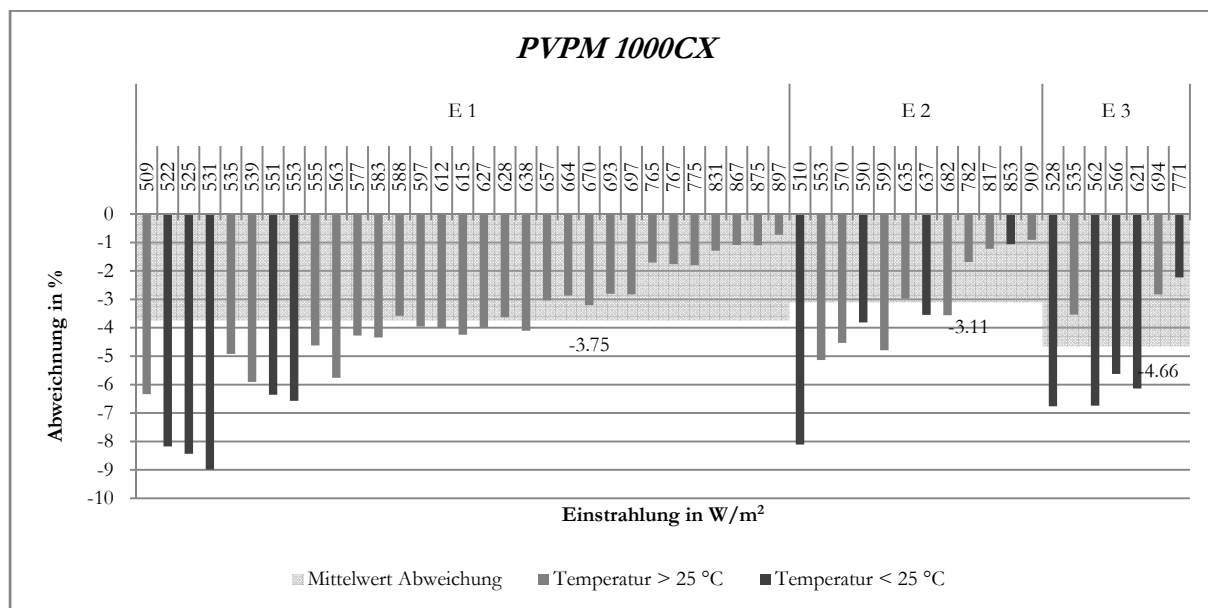
Das *I-V 400* zeigt einen geordneten und flachen Verlauf hinsichtlich der Abnahme der Abweichung in Abhängigkeit der Zunahme der Einstrahlung. Die minimale und maximale Abweichung liegt bei -0,5 % bzw. bei -3,5 %. Bei einer zunehmende Volatilität der Einstrahlung nimmt auch der Betrag des gewichteten Mittelwerts leicht zu. Von dem Mittelwert der Einstrahlungsklassen *E 1* zu *E 2* ist eine Steigerung von 28 % und von *E 1* zu *E 3* von 46 % zu beobachten.



**Bild 29:** Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts *Profitest-PV* in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

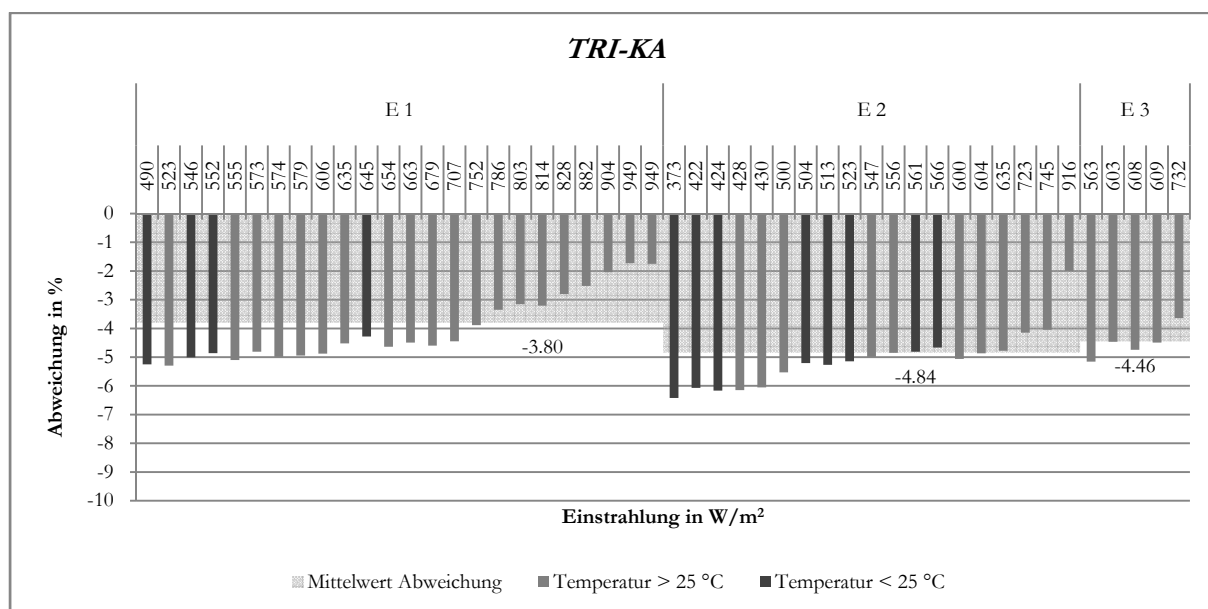
Der Verlauf des *Profitest-PV* zeichnet ein sprunghafteres Bild. Die minimale und maximale Abweichung liegt bei -1,1 % und -8,4 %. Auffällig ist die Spannweite der Abweichungen von über sieben Prozent (beim *I-V 400* sind es drei Prozent). Beim *Profitest-PV* zeigt sich wie bei dem

*I-V 400* eine Zunahme der gewichteten Abweichung bei steigender Schwankung der Einstrahlung (*E 1* zu *E 2*: 31 %; *E 1* zu *E 3*: 61 %).



**Bild 30:** Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts *PVPM 1000CX* in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

Beim *PVPM 1000CX* zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei dem *Profitest-PV*. Die minimale und maximale Abweichung liegt jeweils bei -0,7 % und -9,0 % und zeigt somit wie das *Profitest-PV* eine hohe Spannweite der Abweichung (8,3 Prozent). Hier zeigt sich keine durchgehende Zunahme des gewichteten Mittelwerts, wenn die Einstrahlung nicht hinreichend konstant ist (*E 1* zu *E 2*: -17 %; *E 1* zu *E 3*: 24 %).



**Bild 31:** Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts *TRI-KA* in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

Das *TRI-KA* zeigt analog wie das *I-V 400* eine geordnete Abnahme der Abweichung bei einer Zunahme der Einstrahlung, jedoch keine durchgehende Zunahme des Abweichungsmittelwerts bei den Einstrahlungsklassen *E 2* und *E 3* (*E 1* zu *E 2*: 27 %; *E 1* zu *E 3*: 17 %). Die minimale und maximale Abweichung liegt bei -1,7 % und -6,4 %. Die Spannweite der Messungen bewegt sich mit 4,7 Prozent zwischen denen des *I-V 400* (3 %) und des *Profitest-PV* (7,3 %), sowie des *PVPM 1000CX* (8,3 %).

In Tabelle 16 sind die gewichteten Mittelwerte der prozentualen Abweichung des STC-Vergleichs der einzelnen Kennlinienmessgeräte unter Berücksichtigung der Einstrahlungsklassen gegenübergestellt. Zusätzlich sind für die Messgeräte *Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* die absoluten Verhältnisse aus dem Quotienten bezogen auf das *I-V 400* zu sehen.

**Tabelle 16: Übersicht der gewichteten Mittelwerte des STC-Vergleichs der verschiedenen Einstrahlungsklassen aller Messgeräte und des absoluten Verhältnisses zum *I-V 400***

| Einstrahlungsklasse | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> |     | <i>PVPM 1000CX</i> |     | <i>TRI-KA</i> |     |
|---------------------|----------------|---------------------|-----|--------------------|-----|---------------|-----|
|                     | %              | %                   | -   | %                  | -   | %             | -   |
| <i>E 1</i>          | -1,96          | -3,12               | 1,6 | -3,75              | 1,9 | -3,80         | 1,9 |
| <i>E 2</i>          | -2,51          | -4,09               | 1,6 | -3,11              | 1,2 | -4,84         | 1,9 |
| <i>E 3</i>          | -2,86          | -5,01               | 1,8 | -4,66              | 1,6 | -4,46         | 1,6 |

Es zeigt sich bei allen Kennlinienmessgeräten eine Abnahme der prozentualen Abweichung der STC-Leistungswerte basierend auf der eigenen Umrechnung, bezogen auf die STC-Leistungswerte der Messgerät internen Umrechnung. Betrachtet man die Abweichung der einzelnen Messgeräte zeigt sich, dass alleine durch die interne Hochrechnung auf STC-Werte das *I-V 400* Messergebnis liefert, die unter denen der anderen drei Messgeräte liegen (bei allen Kategorien unterscheidet sich die Abweichung ca. um den Faktor 1,5).

### 5.3.2. STC-Leistungswerte der Kennlinienmessgeräte

Für den Vergleich der STC-Leistungswerte im MPP ( $P_{MPP,STC}$ ) der Kennlinienmessgeräte wird ein weiteres Kriterium eingeführt. Aus der im Messprotokoll beschriebenen Wetterlage wird ein dreistufiger Wolkenindex gebildet (Tabelle 17).

**Tabelle 17: Definition des Wolkenindex**

| Wolkenindex  | Beschreibung                      |
|--------------|-----------------------------------|
| <i>W 0</i>   | Keine Wolken vor der Sonne        |
| <i>W 0,5</i> | Leicht bewölkt                    |
| <i>W 1</i>   | Bewölkt bzw. Wolken vor der Sonne |

Daraus resultieren insgesamt neun Kategorien mit einer unterschiedlichen Anzahl an Messungen für jedes Kennliniengerät (Tabelle 18).

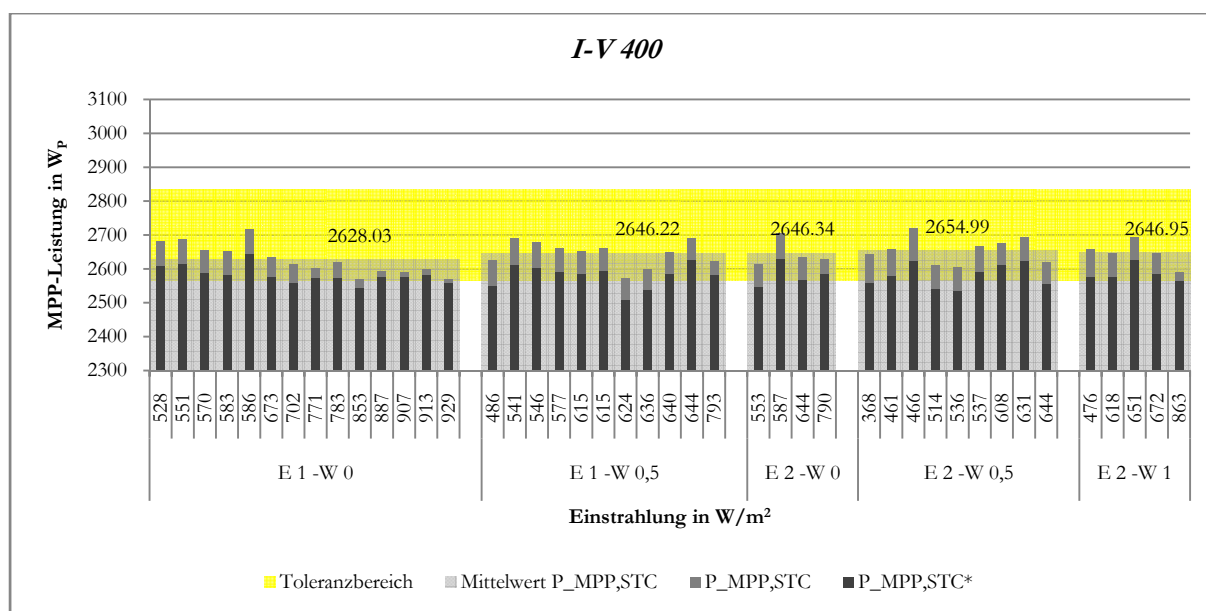
Tabelle 18: Übersicht der Anzahl der Messungen in den jeweiligen Kategorien aus der Kombination der Einstrahlungsklassen mit dem Wolkenindex

| Einstrahlungs-<br>klasse | Wolken-<br>index | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|--------------------------|------------------|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| <i>E 1</i>               | <i>W 0</i>       | 14             | 17                  | 17                 | 16            |
|                          | <i>W 0,5</i>     | 11             | 9                   | 17                 | 6             |
|                          | <i>W 1</i>       | 1              | 2                   | 0                  | 2             |
| <i>E 2</i>               | <i>W 0</i>       | 4              | 2                   | 3                  | 2             |
|                          | <i>W 0,5</i>     | 9              | 17                  | 8                  | 14            |
|                          | <i>W 1</i>       | 5              | 4                   | 4                  | 3             |
| <i>E 3</i>               | <i>W 0</i>       | 0              | 0                   | 0                  | 0             |
|                          | <i>W 0,5</i>     | 2              | 1                   | 1                  | 3             |
|                          | <i>W 1</i>       | 2              | 7                   | 7                  | 2             |

Für die weitere Auswertung werden zuerst die Kennlinienmessgeräte einzeln betrachtet. Bei dieser Ausführung finden nur die Kategorien *E 1-W 0*, *E 1-W 0,5*, *E 2-W 0*, *E 2-W 0,5* und *E 2-W 1* Berücksichtigung, da hier eine ausreichende Anzahl an Messungen vorhanden ist (Bild 32, 33, 34 und 35). Hier soll das Verhalten der Messgeräte bei unterschiedlichen Wetterbedingungen visualisiert werden. Im Anschluss daran werden die Kennlinienmessgeräte vergleichend für die Kategorien *E 1-W 0* und *E 1-W 0,5* gegenübergestellt (Bild 36 und 37). In einem letzten Schritt werden aus der Kategorie *E 1-W 0* einzelne Messzyklen ausgewählt und grafisch dargestellt (Bild 38).

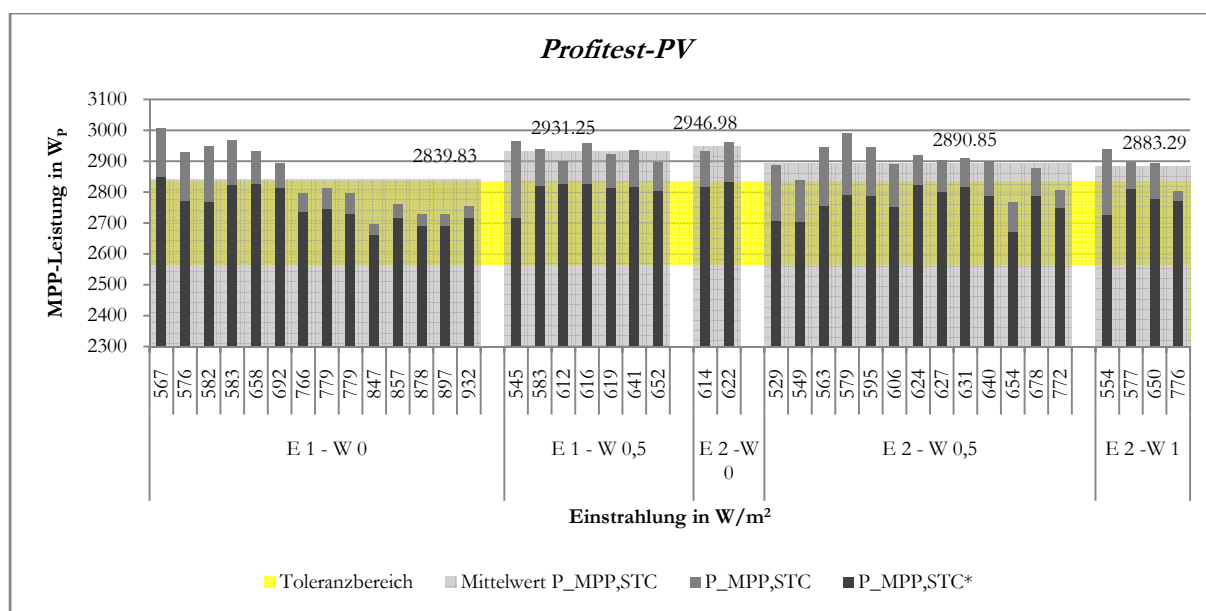
Des Weiteren wird die Anhand der Flash-Protokolle ermittelte MPP-Strangleistung von 2698,77  $W_p$  zuzüglich einer Abweichung von  $\pm 5\%$  als Referenzleistung definiert. Dadurch entsteht ein Leistungsbereich von 2563,83  $W_p$  bis 2833,71  $W_p$ . Wenn sich die STC-Leistungswerte ( $P_{MPP,STC}$ ) in diesem Toleranzbereich bewegen, gilt die Messung mit dem Kennlinienmessgerät als erfolgreich.

Auf der x-Achse sind die Einstrahlungswerte  $E_{P2}$  des oberen, in Modulebene ausgerichteten, Pyranometers des Messdatenerfassungssystems aufgetragen. Dies ist ebenfalls das Sortierungskriterium innerhalb der einzelnen Einstrahlungsklassen. Die y-Achse zeigt sowohl die von den Kennlinienmessgeräten ermittelten Strangleistungen ( $P_{MPP,STC}$ ), als auch die auf der eigenen STC-Umrechnung basierenden Strangleistungen ( $P_{MMP,STC^*}$ ). Das gelbe Band stellt den definierten Toleranzbereich dar. Außerdem wird für jede Kategorie ein Mittelwert der gemessenen STC-Leistung gebildet. Zuerst werden die messgerätereigenen MPP-Leistungen ( $P_{MMP,STC}$ ) analysiert, danach erfolgt die Betrachtung der MPP-Leistung bei STC basierend auf der eigenen Hochrechnung ( $P_{MMP,STC^*}$ ).



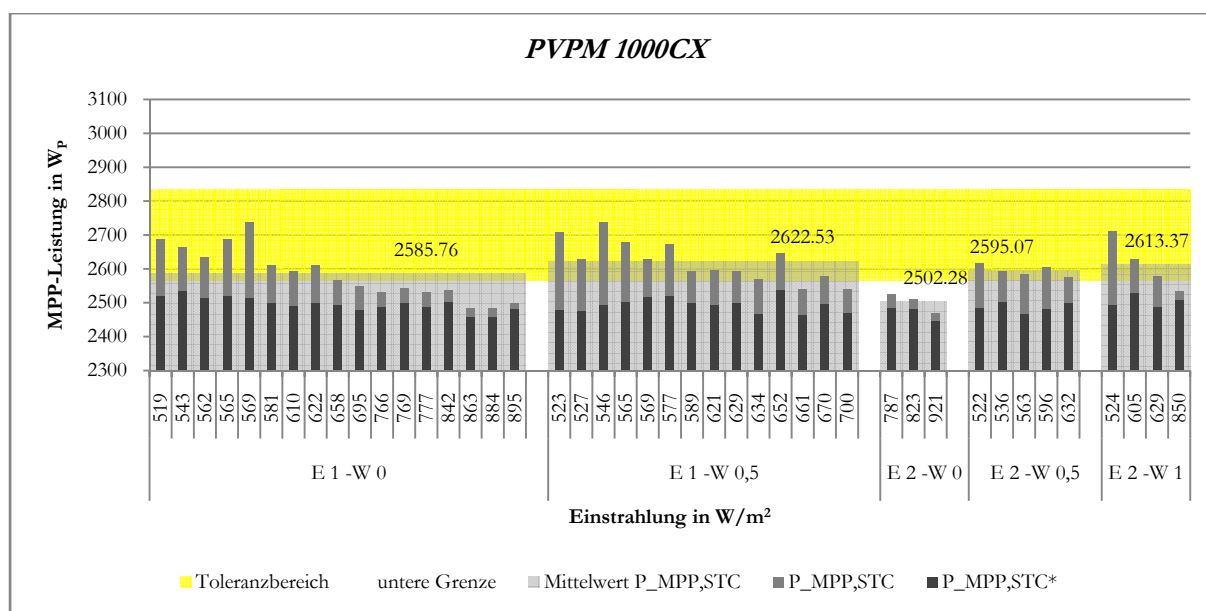
**Bild 32:** Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) des *I-V 400* für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

Die 43 erfassten MPP-Strangleistungen ( $P_{MPP,STC}$ ) des *I-V 400* liegen alle im Toleranzbereich. Es zeigt sich für jede abgebildete Kategorie eine geringe Schwankung der einzelnen Messungen. Dies spiegelt sich auch in den Mittelwerten der einzelnen Kategorien wieder, deren maximaler Unterschied (Spannweite) 26,96  $W_p$  beträgt. Während die Kategorie *E 1-W 0* eine klare Tendenz zur Abnahme der gemessenen MPP-Leistungswerte aufzeigt, lässt sich bei anderen Kategorien, mit einer ausreichenden Anzahl an Einzelmessungen (*E 1-W 0,5* und *E 2-W 0,5*), ein solches Verhalten nicht erkennen. Jedoch fehlen in den Kategorien *E 1-W 0,5* und *E 2-W 0,5* auch Messungen bei Einstrahlungswerten größer 800 bzw. 700  $W/m^2$ . Bei den MPP-Leistungswerten der eigenen STC-Umrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) liegen 31 aller Messungen im Toleranzbereich. Es zeigt sich vor allem bei Einstrahlungen über 800  $W/m^2$  eine geringe Abweichung von  $P_{MPP,STC^*}$  zu  $P_{MPP,STC}$ . Die Differenz der Mittelwerte zwischen den beiden Umrechnungsvarianten für die einzelnen Kategorien beträgt von links nach rechts: 46,23  $W_p$ , 48,99  $W_p$ , 66,99  $W_p$ , 75,80  $W_p$  und 61,76  $W_p$ .



**Bild 33:** Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC}^*$ ) des *Profitest-PV* für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

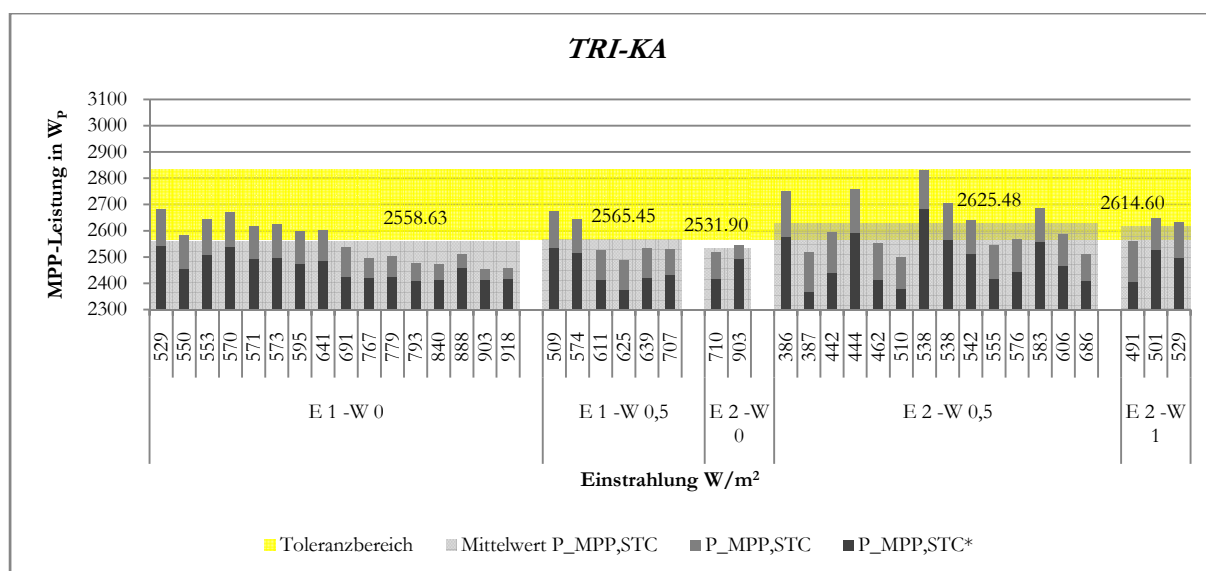
Von insgesamt 40 Messungen befinden sich beim *Profitest-PV* 11 MPP-Strangleistungswerte ( $P_{MPP,STC}$ ) in dem definierten Toleranzbereich. Der Großteil dieser im Toleranzbereich liegenden Messungen ist bei konstanten Einstrahlungsverhältnissen und hohen Einstrahlungswerten zu finden (siehe *E 1-W 0*). Auffällig ist, dass zwischen Messungen bei geringen und hohen Einstrahlungen Ergebnisunterschiede in der MPP-Leistungsmessung von bis zu 300  $W_p$  zu beobachten sind. Die Mittelwertspannweite der gemessenen MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ) in den einzelnen Kategorien beträgt 107,15  $W_p$ . Hier zeigt sich ebenfalls eine Abnahme der Abweichung zwischen den Umrechnungsvarianten bei höheren Einstrahlungen um die 800  $W/m^2$ . Betrachtet man die MPP-Leistungswerte der eigenen Hochrechnung auf STC ( $P_{MPP,STC}^*$ ) befinden sich 39 von den 40 Messungen im vorgegebenen Toleranzbereich. Für die einzelnen Kategorien beträgt die Differenz der Mittelwerte zwischen den beiden MPP-Leistungswerten bei STC: 87,53  $W_p$ , 128,60  $W_p$ , 123,44  $W_p$ , 127,67  $W_p$  und 112,39  $W_p$  (von links nach rechts).



**Bild 34:** Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) des PVPM 1000CX für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

Beim PVPM 1000CX gibt es insgesamt 43 Messungen ( $P_{MPP,STC}$ ) von denen 29 im Toleranzbereich liegen. Hier ergibt sich für jede Kategorie eine Abnahmetendenz der MPP-Leistung, bei einer Zunahme der Einstrahlung. Der Mittelwert der Kategorie E 2-W 0 fällt wesentlich geringer aus als bei den restlichen Kategorien, besitzt jedoch nur drei Einzelmessungen und keine Messungen in Einstrahlungsbereichen kleiner  $700 \text{ W/m}^2$ . Es ergibt sich eine Spannweite der Kategoriemittelwerte von  $120,25 \text{ W}_p$ . Unter nicht Berücksichtigung der Kategorie E 2-W 0 verkürzt sich die Spannweite auf  $36,77 \text{ W}_p$ . Von den 43 Messungen befinden sich bei der eigenen STC-Umrechnung der gemessenen Werte ( $P_{MPP,STC^*}$ ) 0% im Toleranzbereich. Das Phänomen der abnehmenden Abweichung bei höheren Einstrahlungen zeigt sich auch bei dem PVPM 1000CX. Für die einzelnen Kategorien beträgt die Differenz der Mittelwerte zwischen den beiden MPP-Leistungswerten bei STC:  $89,79 \text{ W}_p$ ,  $129,12 \text{ W}_p$ ,  $31,9 \text{ W}_p$ ,  $109,07 \text{ W}_p$  und  $109,63 \text{ W}_p$  (von links nach rechts).





**Bild 35:** Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) des TRI-KA für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2

Das TRI-KA weist 21 Messungen von insgesamt 41 auf ( $P_{MPP,STC}$ ), die in dem Toleranzbereich liegen. Aus dem Minimum und Maximum der Mittelwerte resultiert eine Spannweite von 93,58  $W_p$ . Bei schwankenden Einstrahlungsverhältnissen zeigt sich, vorausgesetzt es sind ausreichend Messung vorhanden, eine markante Zunahme der Streuung der Messergebnisse (siehe E 2-W 0,5). Bei der eigenen STC-Hochrechnung liegen von den vorhandenen Messungen vier im Toleranzbereich. Wieder zeigt sich die Abnahme der Abweichung zwischen der messgerätinternen und der eigenen STC-Umrechnung ab einer Einstrahlung von ungefähr 800  $W/m^2$ . Für die einzelnen Kategorien beträgt die Differenz der Mittelwerte zwischen den beiden MPP-Leistungswerten bei STC: 98,94  $W_p$ , 118,22  $W_p$ , 114,63  $W_p$ , 139,14  $W_p$  und 140,09  $W_p$  (von links nach rechts).

**Tabelle 19:** Übersicht der Anzahl der Messungen bzgl. des definierten Toleranzbereichs für die gemessene MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ) und die eigene Hochrechnung der MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC^*}$ )

|                        | <i>I-V 400</i> |                 | <i>Profitest-PV</i> |                 | <i>PVPM 1000CX</i> |                 | <i>TRI-KA</i> |                 |
|------------------------|----------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------|-----------------|
|                        | $P_{MPP,STC}$  | $P_{MPP,STC^*}$ | $P_{MPP,STC}$       | $P_{MPP,STC^*}$ | $P_{MPP,STC}$      | $P_{MPP,STC^*}$ | $P_{MPP,STC}$ | $P_{MPP,STC^*}$ |
| Messanzahl             | 43             |                 | 40                  |                 | 43                 |                 | 41            |                 |
| Innerhalb der Toleranz | 43             | 31              | 11                  | 39              | 29                 | 0               | 21            | 4               |
|                        | 100 %          | 72 %            | 28 %                | 98 %            | 67 %               | 0 %             | 51 %          | 10 %            |
| Außerhalb der Toleranz | 0              | 12              | 29                  | 1               | 14                 | 43              | 20            | 37              |
|                        | 0 %            | 28 %            | 72 %                | 2 %             | 33 %               | 100 %           | 49 %          | 90 %            |

In Tabelle 19 sind die Messungen der messgerätinternen Umrechnung auf STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung auf STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) aller Kennliniengeräte zusammengefasst. Für beide Umrechnungsvarianten zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Anzahl der im Toleranzbereich liegenden Messungen. Bei der messgerätinternen Umrechnung ( $P_{MPP,STC}$ ) befinden sich 100 % aller mit dem I-V 400 durchgeführten Messungen in dem definierten Toleranzbereich, danach kommt mit 67 % das PVPM 1000CX, gefolgt von dem TRI-KA mit 51 % und dem Profitest-PV mit 28 %. Betrachtet man als nächstes die Ergebnisse der eigenen

Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) zeichnet sich ein gänzlich anderes Bild. Hier liegen 98 % aller *Profitest-PV* Messung innerhalb des Toleranzbereichs gefolgt von dem *I-V 400* mit 72 %, dem *TRI-KA* mit 10 % und dem *PVPM 1000CX* mit 0 %.

In den weiteren Bildern sind die Messungen jedes einzelnen Kennlinienmessgeräts für die Kategorien *E 1-W 0* und *E 1-W 0,5* dargestellt. Wieder zeigt die y-Achse die gemessene MPP-Strangleistung sowohl der messgerätinternen Umrechnung ( $P_{MPP,STC}$ ), als auch der eigenen Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) und die x-Achse die Einstrahlung des oberen, in Modulebene ausgerichteten, Pyranometers ( $E_{p2}$ ) in einer aufsteigenden Reihenfolge.

Zu jeder Kategorie wird für die MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) eine statistische Auswertung der zugehörigen Messwerte durchgeführt. Neben der Anzahl der durchgeführten Messungen, werden sowohl der daraus resultierende Mittelwert, als auch die Standardabweichung und die Varianz errechnet. Zusätzlich wird die Standardabweichung des Mittelwerts ermittelt. Daneben werden die untere und die obere Toleranzgrenze zusammen mit dem Minimum und dem Maximum der gemessenen MPP-Leistung aufgelistet. Aus deren Differenz wird die Spannweite gebildet. Das Vertrauensintervall ist ein zum Mittelwert symmetrisches Intervall, in dem der Erwartungswert der Messgröße mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, dem Vertrauensniveau liegt. Für die Berechnung des Vertrauensintervalls wird ein Vertrauensniveau von 95 % gewählt. Aus dem Vertrauensniveau und der Anzahl an Messungen resultiert der Wert der Studentischen t-Verteilung. Das Vertrauensintervall wird nach Formel 13 berechnet:

$$\Delta x = 2t * \frac{s}{\sqrt{i}}$$

Formel 13

- mit:  $\Delta x$  Vertrauensintervall in  $W_p$   
 $t$  Wert der t-Verteilung  
 $s$  Standardabweichung in  $W_p$   
 $i$  Anzahl der Messwerte

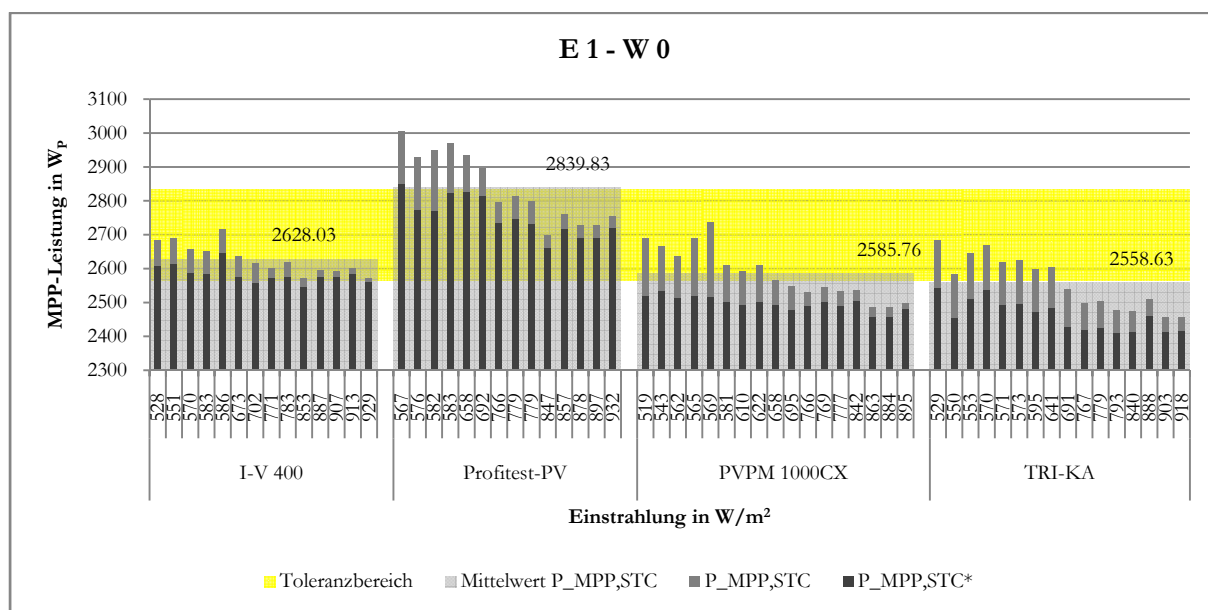


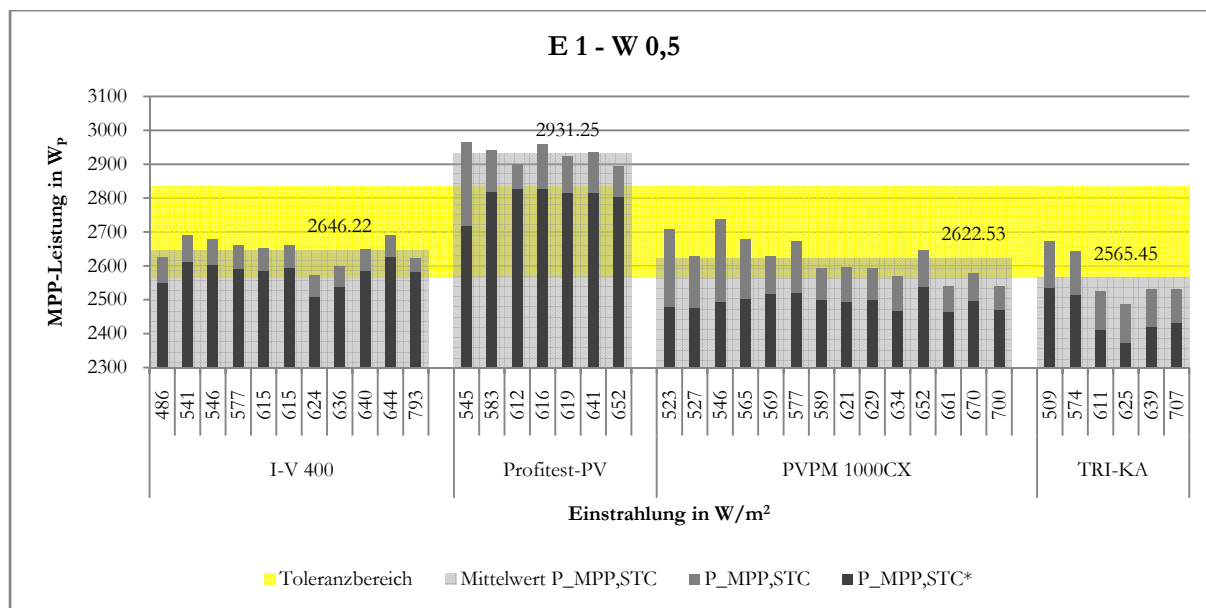
Bild 36: MPP-Leistungswerte der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometer P2 für die Einstrahlungsklasse *E 1* und den Wolkenindex *W 0*

Bild 36 zeigt die gemessene Strangleistung bei einer hinreichend konstanten Einstrahlung und einem wolkenfreien Himmel für die vier Kennliniengeräte. Die Messungen decken einen Einstrahlungsbereich von  $500 \text{ W/m}^2$  bis über  $900 \text{ W/m}^2$  ab. Des Weiteren lässt sich eine Abnahme der messtechnisch erfassten STC-Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ), sowie die Verringerung der Abweichung hinsichtlich der Leistungswerte der eigenen STC-Umrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) bei höheren Einstrahlungswerten beobachten. Zudem zeigt sich ein klarer Unterschied zwischen den Ergebnissen der Messgeräte *I-V 400*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* und denen des *Profitest-PV*.

Tabelle 20: Fehlerrechnung der MPP-Leistungen der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) für die Kategorie *E 1-W 0*

| <i>E 1-W 0</i>            |            |                 |                |               |               |
|---------------------------|------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Statistische Größen       |            | Messwerte @ STC |                |               |               |
|                           |            | <i>I-V 400</i>  | <i>P-PV</i>    | <i>PVPM</i>   | <i>TRI-KA</i> |
| Anzahl Messwerte          | i          | 14              | 14             | 17            | 16            |
| <b>Mittelwert</b>         | $\bar{x}$  | <b>2628,0</b>   | <b>2839,8</b>  | <b>2585,8</b> | <b>2558,6</b> |
| Standardabweichung        | s          | 45,7            | 103,3          | 76,8          | 78,3          |
| <b>Varianz (Streuung)</b> | $s^2$      | <b>2085,4</b>   | <b>10672,4</b> | <b>5898,7</b> | <b>6124,5</b> |
| Untere Toleranzgrenze     |            | 2563,8          |                |               |               |
| Minimum                   | $x_{\min}$ | 2570,0          | 2697,9         | 2484,4        | 2455,7        |
| Obere Toleranzgrenze      |            | 2833,7          |                |               |               |
| Maximum                   | $x_{\max}$ | 2717,1          | 3006,0         | 2737,9        | 2683,6        |
| Spannweite (Range)        | R          | 147,1           | 308,1          | 253,5         | 227,9         |
| Vertrauensintervall       | $\Delta x$ | 52,2            | 118,2          | 79,7          | 83,7          |
| <b>Messergebnis</b>       | <b>x</b>   | <b>2628,0</b>   | <b>2839,8</b>  | <b>2585,8</b> | <b>2558,6</b> |
|                           | <b>±</b>   | <b>26,1</b>     | <b>59,1</b>    | <b>39,9</b>   | <b>41,9</b>   |

Bei der Betrachtung der Mittelwerte liegen (wenn auch nur gering) das *Profitest-PV* und das *TRI-KA* oberhalb bzw. unterhalb des Toleranzbereichs, während das *I-V 400* und das *PVPM 1000CX* sich innerhalb des Toleranzbereichs befinden. Bezüglich der Streuung der Messwerte liegen das *PVPM 1000CX* und das *TRI-KA* nahe beieinander, die Werte sind aber ca. um den Faktor drei größer als die des *I-V 400*. Signifikanter zeigt sich eine Streuung nur beim *Profitest-PV*, hier ergibt sich ein Faktor von fünf (bezogen auf die Streuung des *I-V 400*). Dies spiegelt sich auch in abgeschwächter Form in der Spannweite der Kennliniengeräte wieder. Das Intervall, aufgespannt durch die Differenz der maximal und der minimal gemessenen MPP-Strangleistung, des *I-V 400* ist mit  $147,1 \text{ W}_p$  am geringsten, gefolgt von dem *TRI-KA* mit  $227,9 \text{ W}_p$ , dem *PVPM 1000CX* mit  $253,5 \text{ W}_p$  und dem *Profitest-PV* mit  $308,1 \text{ W}_p$  (Tabelle 20).



**Bild 37:** MPP-Leistungswerte der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometer P2 für die Einstrahlungskategorie *E 1* und den Wolkenindex *W 0,5*

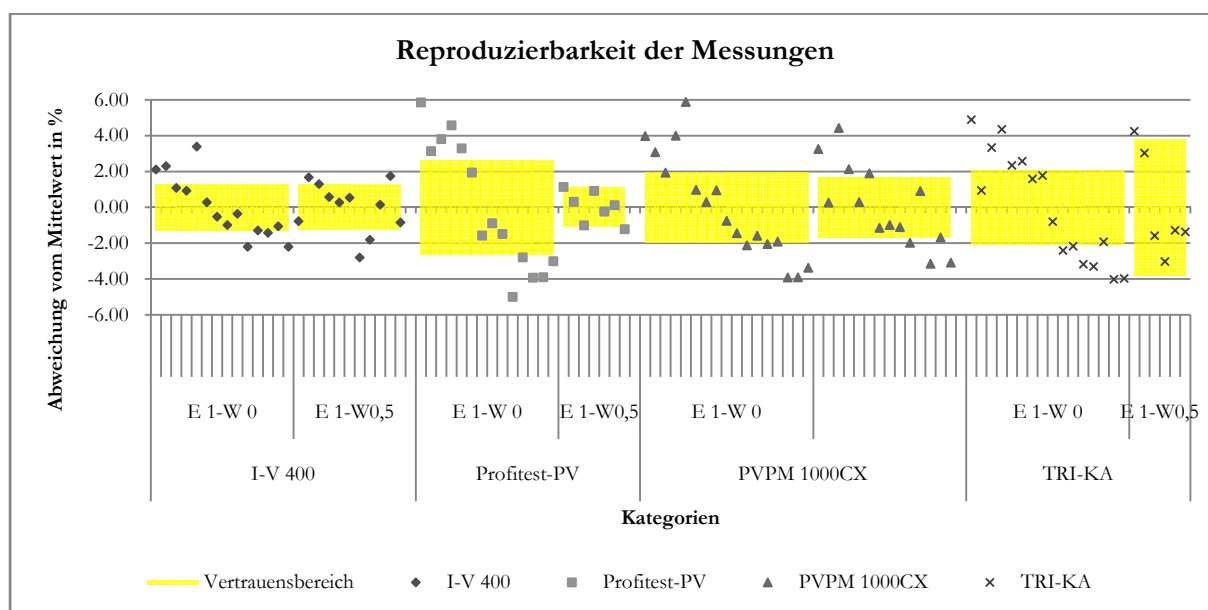
Bild 37 zeigt die Messungen der Strangleistung bei einer hinreichend konstanten Einstrahlung, sowie einem leicht bewölkten Himmel für die vier Kennliniengeräte. In dieser Kategorie liegt lediglich der Mittelwert des *Profitest-PV* nicht im Toleranzbereich. Der abgedeckte Einstrahlungsbereich übersteigt nur bei drei Messungen eine Einstrahlung von 700 W/m². Im Gegensatz zu Bild 38 zeigt sich auch keine ausgeprägte Verringerung der gemessenen STC-Leistungswerte ( $P_{MPP,STC}$ ) bei einem Anstieg der Einstrahlung. Die Abnahme der Unterschiede zwischen  $P_{MPP,STC}$  und  $P_{MPP,STC^*}$  ist ebenfalls nicht so ausgeprägt zu erkennen. Die auftretenden Effekte können aber auch mit den fehlenden Einstrahlungswerten zwischen 800 und 1000 W/m² zusammenhängen. Wie bei der Kategorie *E 1-W 0,5* zeigt sich ein klarer Unterschied zwischen den Ergebnissen der Messgeräte *I-V 400*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* und denen des *Profitest-PV*.

**Tabelle 21:** Fehlerrechnung der MPP-Leistungen der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) Kategorie *E 1-W 0,5*

|                           |            | <i>E 1-W 0,5</i> |               |               |               |
|---------------------------|------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| Statistische Größen       |            | Messwerte @ STC  |               |               |               |
|                           |            | <i>I-V 400</i>   | <i>P-PV</i>   | <i>PVPM</i>   | <i>TRI-KA</i> |
| Anzahl Messwerte          | i          | 11               | 7             | 14            | 6             |
| <b>Mittelwert</b>         | $\bar{x}$  | <b>2646,2</b>    | <b>2931,2</b> | <b>2622,5</b> | <b>2565,5</b> |
| Standardabweichung        | s          | 38,1             | 26,2          | 60,5          | 74,7          |
| <b>Varianz (Streuung)</b> | $s^2$      | <b>1449,3</b>    | <b>687,6</b>  | <b>3654,4</b> | <b>5583,6</b> |
| Untere Toleranzgrenze     |            | 2563,8           |               |               |               |
| Minimum                   | $x_{min}$  | 2572,0           | 2895,5        | 2539,9        | 2487,8        |
| Obere Toleranzgrenze      |            | 2833,7           |               |               |               |
| Maximum                   | $x_{max}$  | 2692,4           | 2964,6        | 2738,6        | 2674,4        |
| Spannweite (Range)        | R          | 120,5            | 69,1          | 198,8         | 186,6         |
| Vertrauensintervall       | $\Delta x$ | 51,9             | 48,6          | 69,1          | 156,8         |
| <b>Messergebnis</b>       | <b>x</b>   | <b>2646,2</b>    | <b>2931,2</b> | <b>2622,5</b> | <b>2565,5</b> |
|                           | <b>±</b>   | <b>25,9</b>      | <b>24,3</b>   | <b>34,6</b>   | <b>78,4</b>   |

Für die Streuung der Messwerte zeigt sich ein ganz anderes Bild als bei der Kategorie  $E\ 1-W\ 0$ . Für diese Kategorie ( $E\ 1-W\ 0,5$ ) besitzt das *Profitest-PV* die geringste Streuung, gefolgt von dem *I-V 400*, dem *PVPM 1000CX* und dem *TRI-KA*. Zusätzlich fällt die Varianz für alle vier Kennliniengeräte in der Kategorie  $E\ 1-W\ 0,5$  bezogen auf die Kategorie  $E\ 1-W\ 0$  geringer aus. Die Spannweite der Messgeräte fällt ebenfalls geringer aus. Wie schon oben erwähnt könnte der Grund hierfür in den fehlenden Einstrahlungswerten über  $800\ \text{W}/\text{m}^2$  liegen. Denn in den Darstellungen der einzelnen Messgeräte (Bild 32 bis 35) zeigt sich, dass die gemessenen MPP-Leistungen bei Einstrahlungswerten größer als  $700\ \text{W}/\text{m}^2$  abnehmen (Tabelle 21).

Nimmt man das aus der Fehlerrechnung resultierende Messergebnis und berechnet die prozentuale Abweichung der Einzelmessung basierend auf dem dazugehörigen Mittelwert, lässt sich die Reproduzierbarkeit der Messungen wie in Bild 40 darstellen. Die Messungen auf der x-Achse sind wie bei den Kategorien  $E\ 1-W\ 0$  und  $E\ 1-W\ 0,5$  nach den Einstrahlungsmesswerten  $E_{p2}$  sortiert. Durch das gewählte Vertrauensniveau liegen die Messungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % innerhalb des Vertrauensbereichs.

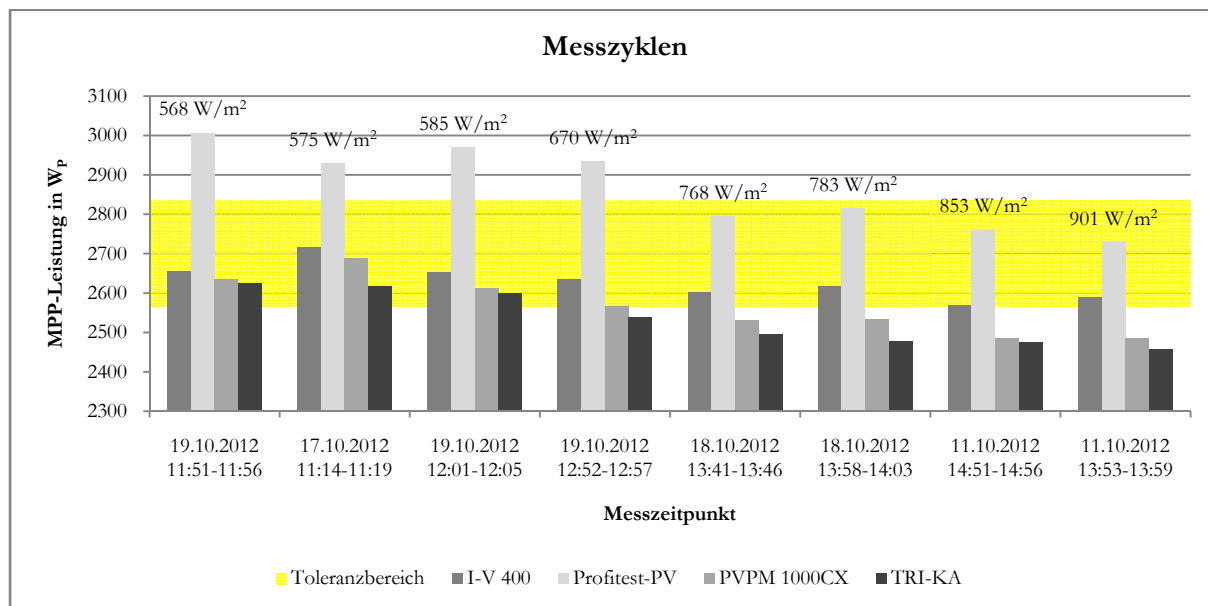


**Bild 38:** Abweichung der Einzelmessungen vom Mittelwert für die Kategorien  $E\ 1-W\ 0$  und  $E\ 1-W\ 0,5$  mit dem dazugehörigen Vertrauensbereich

Es zeigt sich nochmals deutlich, dass die Messungen des *I-V 400* die geringste Streuung der Einzelmessung bezüglich des zur jeweiligen Kategorie gehörenden Mittelwerts besitzt.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, wird versucht die Messungen mit den Kennliniengeräten in Messzyklen durchzuführen. Diese Messzyklen bestehen aus einer Kennlinienmessung mit jedem Messgerät. Die Reihenfolge der Geräte im Messprotokoll lautet wie folgt: *PVPM 1000CX*, *Profitest-PV*, *I-V 400* und *TRI-KA*. Für die Darstellung der Ergebnisse sind die Messgeräte jedoch alphabetisch geordnet. Die Einzelmessungen eines Messzyklus sind in einem Zeitintervall von höchstens fünf Minuten aufgenommen. Für diese Betrachtung werden nur Messungen mit hinreichend konstanten Einstrahlungsverhältnissen und einem wolkenfreien Himmel ausgewertet (Kategorie  $E\ 1-W\ 0$ ). Ziel ist es, die Ergebnisse der Kennlinienmessgeräte in einem möglichst kurzen Zeitraum, bei Umgebungsbedingungen, die so konstant wie möglich sind, gegenüberzustellen. Bild 39 zeigt die Messzyklen in aufsteigender Reihenfolge nach der

Einstrahlung geordnet. Hierfür wird der Mittelwert der Pyranometer-Einstrahlungswerte ( $E_{P2}$ ) zum Zeitpunkt der vier Messungen in einem Messzyklus gebildet. Dieser ist als Beschriftung über den einzelnen Messzyklen zusehen. Auf der y-Achse ist die gemessene MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ) abgebildet. Auf der x-Achse findet sich der Messzeitpunkt mit der Angabe des Tages und des Zeitraums der vier Messungen.



**Bild 39:** Einzelmessungen mit allen vier Messgeräten durchgeführt in einem Zeitintervall kleiner fünf Minuten

In der IEC 60904-1 (Photovoltaische Einrichtungen - Teil 1: Messen der photovoltaischen Strom-/Spannungskennlinien) wird für Messungen im natürlichen Sonnenlicht eine Mindesteinstrahlung von  $800 \text{ W/m}^2$  definiert, wenn sich die Messungen auf Standardprüfbedingungen (STC) beziehen sollen. Auffällig ist, dass schon ab einer Einstrahlung von  $700 \text{ W/m}^2$  die gemessenen MPP-Leistungen ( $P_{MPP,STC}$ ) des *PVPM 1000CX* und des *TRI-KA* unterhalb des Toleranzbereichs liegen. Das *Profitest-PV* und das *I-V 400* befinden sich an der oberen bzw. der unteren Grenze des Toleranzbereichs. Während bei Einstrahlungen zwischen  $500$  und  $600 \text{ W/m}^2$  alle Messgeräte bis auf das *Profitest-PV*, dessen Messwerte sich markant über der oberen Grenze befinden, innerhalb des Toleranzbereichs liegen. Das Absinken der MPP-Leistung bei steigender Einstrahlung tritt beim *Profitest-PV* am deutlichsten hervor. *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* zeigen diesbezüglich ein ähnliches Verhalten. Das *TRI-KA* weist die geringste Leistungsabnahme bei höheren Einstrahlungen auf (es wurde die Steigung der linearen Trendlinien betrachtet). Bei allen dargestellten Messzyklen zeigt sich hinsichtlich der gemessenen MPP-Strangleistung folgendes Bild: Das *TRI-KA* liefert die Geringsten Messergebnisse gefolgt von dem *PVPM 1000CX*, dem *I-V 400* und dem *Profitest-PV*.

In der Tabelle 22 finden sich die zu dem Bild 39 zugehörigen Parameter: die gemessene Strangleistung  $P_{MPP,STC}$ , die Einstrahlung  $E_{Eff}$  und die Temperatur  $T_{Mod}$  der Messgerätsensoren, sowie die Einstrahlungswerte  $E_{P2}$  des oberen in Modulebene ausgerichteten Pyranometers.

Tabelle 22: Parameterübersicht zu den einzelnen Messzyklen

| Parameter                         | <i>I-V 400</i>                  | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|---------------|
|                                   | <b>19.10.2012 / 11:51-11:56</b> |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2656,39                         | 3005,95             | 2635,79            | 2624,60       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 559,50                          | 511,09              | 555,50             | 579,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 36,04                           | 38,43               | 32,81              | 33,60         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 570,47                          | 566,97              | 561,74             | 572,84        |
| <b>17.10.2012 / 11:14-11:19</b>   |                                 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2717,11                         | 2928,84             | 2689,17            | 2618,50       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 550,60                          | 521,22              | 550,98             | 573,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 27,61                           | 26,38               | 24,16              | 25,70         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 586,25                          | 576,27              | 565,35             | 570,79        |
| <b>19.10.2012 / 12:01-12:05</b>   |                                 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2652,23                         | 2969,71             | 2611,09            | 2599,10       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 571,40                          | 530,92              | 576,74             | 606,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 37,90                           | 40,38               | 34,39              | 35,30         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 582,99                          | 583,13              | 580,58             | 595,17        |
| <b>19.10.2012 / 12:52-12:57</b>   |                                 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2635,42                         | 2933,28             | 2566,21            | 2538,10       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 658,50                          | 597,01              | 663,93             | 707,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 42,21                           | 44,83               | 37,41              | 39,90         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 672,88                          | 658,17              | 658,12             | 690,60        |
| <b>18.10.2012 / 13:41-13:46</b>   |                                 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2602,03                         | 2794,93             | 2530,91            | 2496,90       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 763,50                          | 714,32              | 764,77             | 803,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 41,04                           | 41,51               | 36,87              | 39,10         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 770,86                          | 766,19              | 766,25             | 767,07        |
| <b>18.10.2012 / 13:58-14:03</b>   |                                 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2618,49                         | 2814,47             | 2532,77            | 2477,40       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 773,70                          | 721,47              | 775,14             | 828,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 41,91                           | 44,08               | 40,02              | 38,30         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 782,82                          | 778,51              | 777,38             | 793,08        |
| <b>11.10.2012 / 14:51-14:56</b>   |                                 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2569,98                         | 2760,48             | 2484,39            | 2474,10       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 855,00                          | 802,81              | 867,41             | 882,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 43,77                           | 45,58               | 39,62              | 43,40         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 853,19                          | 856,72              | 863,00             | 839,77        |
| <b>11.10.2012 / 13:38-13:45</b>   |                                 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ]   | 2594,06                         | 2728,32             | 2498,51            | 2509,40       |
| $E_{E_{eff}}$ [W/m <sup>2</sup> ] | 868,10                          | 826,89              | 897,07             | 904,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                    | 41,02                           | 41,72               | 34,98              | 40,50         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]      | 886,72                          | 877,92              | 894,63             | 888,03        |

| Parameter                       | <i>I-V 400</i>           | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|---------------|
|                                 | 11.10.2012 / 13:53-13:59 |                     |                    |               |
| $P_{MPP,STC}$ [W <sub>p</sub> ] | 2590,62                  | 2729,07             | 2484,73            | 2457,00       |
| $E_{Eff}$ [W/m <sup>2</sup> ]   | 875,80                   | 834,73              | 874,77             | 949,00        |
| $T_{Mod}$ [°C]                  | 44,49                    | 46,34               | 41,30              | 43,30         |
| $E_{P2}$ [W/m <sup>2</sup> ]    | 906,74                   | 897,27              | 883,54             | 918,02        |

### 5.4. Fazit und Ergebnisbewertung

In dem Fazit werden die Grenzen der gewählten Rahmenbedingungen betrachtet, sowie die Erkenntnisse aus den einzelnen Auswertung der Kennlinienmessungen zusammengeführt, um sie hinsichtlich der Ursachen und Folgen zu analysieren. Damit im Anschluss ein ausführliches Resümee der Ergebnisse dargelegt werden kann.

#### Umgebungsbedingungen

Nach der Norm IEC 60904-1 (Photovoltaische Einrichtungen - Teil 1: Messen der photovoltaischen Strom-/Spannungskennlinien) wird eine Mindesteinstrahlungen von 800 W/m<sup>2</sup> definiert, wenn sich die Messungen auf Standardprüfbedingungen (STC) beziehen sollen. In dem Messzeitraum vom 11.10.12 bis zum 20.12.2012 herrschen jedoch selten Verhältnisse mit Einstrahlungswerten über 800 W/m<sup>2</sup>. Die Majorität der ausgewerteten Messungen wird bei Einstrahlungsverhältnissen zwischen 500 und 700 W/m<sup>2</sup> (400-500 W/m<sup>2</sup>: 37 %, 500-600 W/m<sup>2</sup>: 30 %) durchgeführt. Über der Grenze von 700 W/m<sup>2</sup> liegen 23 % der Messungen (700-800 W/m<sup>2</sup>: 11 %, 800-900 W/m<sup>2</sup>: 8 %, 900-1000 W/m<sup>2</sup>: 4 %) (Bild 40). Wobei die Einstrahlungsintervalle der x-Achse basierend auf den Einstrahlungswerten des Pyranometers P2 gebildet werden, sodass die Einstrahlungen der einzelnen Messungen davon abweichen können. Dieser hohe Anteil an Messungen bei geringen Einstrahlungen kann auf der einen Seite zu einer Beeinträchtigung der Messergebnisse führen. Auf der anderen Seite kann nicht gewährleistet werden, dass bei Vor-Ort-Prüfungen immer ausreichend hohe Einstrahlungsverhältnisse herrschen. Das Verhalten der Kennlinienmessgeräte bei geringen Einstrahlungsbedingungen ist deshalb durchaus von Interesse.

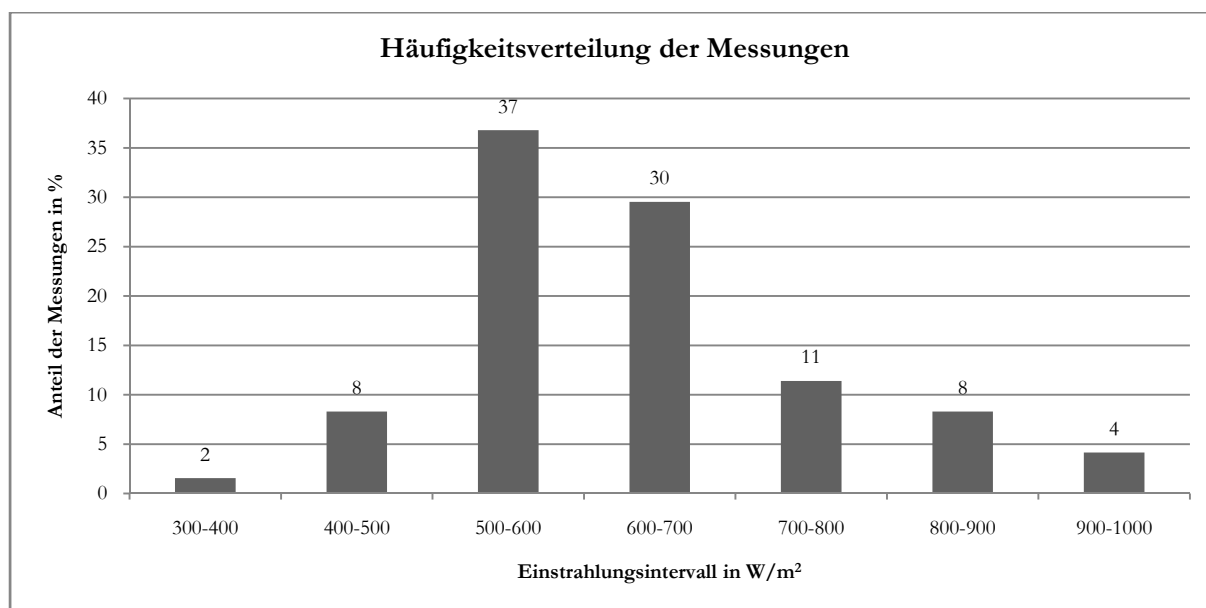


Bild 40: Prozentualer Anteil der Messungen für bestimmte Einstrahlungsintervalle



Die Umgebungstemperaturen bewegen sich im Zeitraum der Messungen im Wesentlichen zwischen 10 und 25°C. Aufgrund dieses Temperaturniveaus kann es zu einer Leistungssteigerung in Bezug auf vergleichbare Einstrahlungen in den Sommermonaten kommen.

Die Einteilung der Messungen in einen Wolkenindex basiert auf eigenen Beobachtungen und unterliegt daher einer gewissen Subjektivität. Eine Einteilung in Abhängigkeit von der Bewölkungssituation ist aber notwendig, um vergleichbare Rahmenbedingungen zu schaffen. Jedoch wird durch den Wolkenindex keine Aussage über das Verhältnis der Global- zur Diffusstrahlung gemacht, somit wird der Einflussfaktor der Bewölkungsstärke auf das Spektrum des einfallenden Lichtes nicht berücksichtigt [PRE11].

### **AM-Spektrum**

Bei der Betrachtung der Flash-Protokolle zeigt sich, dass die gemessenen MPP-Leistungen aller Module über der Nennleistung des Datenblatts liegen. Beruhend auf den Flash-Messungen ergibt sich eine mittlere Nennleistung, die um zwei Prozent über der Datenblatt-nennleistung liegt. Die Auswirkung der fehlenden Klassifizierung bzgl. der spektralen Übereinstimmung des LED-Sonnensimulators auf die Messergebnisse lässt sich schwer abschätzen. Basierend auf den Genauigkeitsangaben der ermittelten maximalen Leistung bei STC des Dienstleisters von  $\pm 5\%$ , wird ein Toleranzbereich für die ermittelte Referenz-MPP-Leistung aufgespannt.

Die Hersteller der Kennlinienmessgeräte geben bzgl. des AM-Spektrums an, dass Messungen bei einem Spektrum nahe AM 1,5 durchgeführt werden sollen. Für den Standort der HAW ist dies aber nur für den Zeitraum von Anfang April bis Anfang September der Fall. Wie sich in den Bildern 19 bis 25 in Kapitel 5.1 zeigt, bewegt sich das AM-Spektrum in dem Messzeitraum zwischen AM 2,1 bis AM 3,4. Dies bedeutet eine Erhöhung der Weglänge des Lichts und somit eine Rotverschiebung des Lichtspektrums. Da in der Praxis Kennlinienmessungen unabhängig von der Jahreszeit durchgeführt werden müssen, wird keine Auswertung des Messgerätverhaltens hinsichtlich einer Verschiebung des AM-Spektrums durchgeführt.

### **Einstrahlung**

Die Einstrahlungswerte der Pyranometer werden bei den Auswertungen als Referenzsystem für die Einstrahlungssensoren herangezogen und für das Einteilen der Einstrahlungskategorien verwendet. Das Pyranometer des Typs CMP11 der Firma Kipp und Zonen ist durch den Sekundärstandard für den Einsatz in Laboren und Instituten geeignet und wird mit einer erwarteten täglichen Ungenauigkeit von  $\pm 2\%$  als hinreichend genau betrachtet.

Betrachtet man die dokumentierten Werte der Einstrahlungssensoren (Bild 25) in Kapitel 7.2, stellt sich ein deutlicher Unterschied der erfassten Einstrahlungswerte des *Profitest-PV* bezogen auf die Werte des *I-V 400*, des *PVPM 1000CX* und des *TRI-KA* dar. Dieser Unterschied lässt sich nicht auf die Messgenauigkeit des Einstrahlungssensors zurückführen. In dem Vergleich der Spannweiten 1 und 2 (Bild 26) wird dieses Verhalten näher untersucht. Das *Profitest-PV* liefert durchgehend geringere Einstrahlungswerte, deren prozentualer Unterschied zu den restlichen Messgeräten mit sinkender Einstrahlung abnimmt. Als möglicher Grund für die Abweichung der Einstrahlungsmessung wird in Kapitel 7.2 eine fehlerhafte Kalibrierung des Sensors angeführt. Durch diese Unterbewertung der Einstrahlung kommt es zu einer Überbewertung der MPP-Leistung bei STC, mit der Folge, dass die gemessenen Strangleistungen nach der messgeräterechneten STC-Umrechnung zu 72 % außerhalb des Toleranzbereichs liegen. Unter der

Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen dem Einstrahlungsquotienten und der MPP-Leistung bei STC (Formel 11), ergibt sich bei einer mittleren Überbewertung des *Profitest-PV* Einstrahlungssensors von ca. 4 %, eine Überbewertung der Leistungswerte von ebenfalls 4 %. Zieht man diese vier Prozent von den ermittelten MPP-Leistungswerten bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) ab (Bild 33), liegen anstatt 11 Messungen nun 34 Messungen in dem Toleranzbereich.

### Temperatur

Die Temperaturwerte des Messdatenerfassungssystems der HAW können aufgrund des örtlichen Anbringungsunterschieds zu den Temperaturfühlern der Kennliniengeräte nicht als Referenzwerte verwendet werden. Um die Sensoren dennoch vergleichen zu können, wird aus den Polynomen-Trendlinien eine mittlere Trendlinie gebildet, die als Näherung der wahren Temperatur angesehen wird. Zusätzlich liegt die PV-Anlage der HAW auf einem Vordach in Mitten zweier Gebäude, dadurch kann das Vordach je nach Wetterlage als Windfang fungieren und somit Schwankungen in der Temperaturerfassung verursachen.

Im Vergleich mit den Verhalten der Einstrahlungssensoren lässt sich bei den Temperatursensoren keine klare Abweichung eines Sensors erkennen, vielmehr zeigt sich eine größere Spannweite und eine Fächerung aller Temperaturfühler (Bild 29). Dies erschwert es, eine klare Aussage hinsichtlich einer möglichen Über- oder Unterbewertung zu treffen, sodass auf den Mittelwert der Trendlinien zurückgegriffen wird. Bei den dokumentierten Werten der Temperatursensoren erfasst der Temperaturfühler des *Profitest-PV* die höchsten Temperaturen, gefolgt von dem *I-V 400* und dem *TRI-KA*. Die niedrigsten Werte werden von dem *PVPM 1000CX* gemessen. Zwischen den Messgeräten *PVPM 1000CX* und *Profitest-PV* ergibt sich eine Spannweite bzgl. der Temperatur zwischen 6,5 °C bei den maximal und 3,5 °C bei den minimal erfassten Daten. Die Werte der Temperaturfühler des *I-V 400* bewegen sich näher an dem *Profitest-PV*, während die des *TRI-KA* näher an dem *PVPM 1000CX* liegen. Bei der eigenen STC-Hochrechnung wird der Einfluss der Temperaturwerte durch den Temperaturkoeffizienten (Kapitel 2.1) abgeschwächt. Eine Überbewertung der Temperaturen, hat bei der STC-Umrechnung eine Erhöhung der Leistung zur Folge. Eine Unterbewertung zieht eine Verringerung der Leistung nach sich. Bildet man den Mittelwert der einzelnen Abweichung zur Trendlinie, so ergibt sich folgendes Verhalten: Das *Profitest-PV* ermittelt im Durchschnitt eine Temperatur die um 6,8 % über dem Mittelwert der Trendlinie liegt. Bei dem *I-V 400* beträgt die Überbewertung 2,5 %. Das *PVPM 1000CX* zeigt eine mittlere Abweichung von -6,9 % und das *TRI-KA* liegt im Mittel -2,3 % unter der Trendlinie. Bezieht man diese Abweichungen auf die Formel 11, lässt sich ausgehend von einer Temperatur von 25 °C feststellen, dass sich die Abweichung näherungsweise mit dem Faktor ein Zehntel an die errechnete Leistung weitergeben wird.

### STC-Werte

Die Vergleiche der gemessenen MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ) mit den MPP-Leistung der eigenen STC-Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) können lediglich zum Aufzeigen von Unterschieden bei der messgerätinternen STC-Umrechnung der Kennliniengeräte herangezogen werden, denn es erfolgt eine direkte Hochrechnung der Leistungsmesswerte und keine wie in der Norm DIN EN 60891 definierte separate Umrechnung der Strom und Spannungswerte auf STC. Bei dieser Variante (Formel 11) wird die logarithmische Spannungsabhängigkeit des Quotienten der beiden Einstrahlungswerte nicht berücksichtigt. Des Weiteren wird durch die direkte Hochrechnung der Leistungswerte auch der Einfluss des Serieninnenwiderstands auf den Spannungswert

vernachlässigt, der auch eine Temperaturabhängigkeit aufweist. Als Tendenz lässt sich aus den Bildern 28 bis 31 folgern, dass die Messgeräte *Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* bezogen auf das *I-V 400* höhere MPP-Leistungswerte liefern die alleine auf den messgerätinternen STC-Umrechnungen basieren. Nimmt man die Werte der Tabelle 16 so liegt ein Faktor von 1,2 bis 1,9 zwischen den Werten des *I-V 400* und den restlichen Kennlinienmessgeräten. Mit anderen Worten: es ergeben sich für die Einstrahlungsklassen (*E 1*, *E 2* und *E 3*) prozentuale Abweichungen des *Profitest-PV*, des *PVPM CX1000* und des *TRI-KA*, die um 20 bis 90 % über denen des *I-V 400* liegen.

**Tabelle 23: Prozentuale und absolute Unterschiede der Mittelwerte der gemessenen MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ) und der MPP-Leistung bei STC der eigenen Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ )**

| Parameter  |       | <i>I-V 400</i> |                  | <i>Profitest-PV</i> |                  | <i>PVPM 1000CX</i> |                  | <i>TRI-KA</i>  |                  |
|--|-------|----------------|------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|----------------|------------------|
|  |       | <i>E 1-W 0</i> | <i>E 1-W 0,5</i> | <i>E 1-W 0</i>      | <i>E 1-W 0,5</i> | <i>E 1-W 0</i>     | <i>E 1-W 0,5</i> | <i>E 1-W 0</i> | <i>E 1-W 0,5</i> |
| Mw $P_{MPP,STC}$   | $W_p$ | 2628,03        | 2646,22          | 2839,83             | 2931,25          | 2585,76            | 2622,53          | 2558,63        | 2565,45          |
| Mw $P_{MPP,STC^*}$   | $W_p$ | 2581,80        | 2579,23          | 2752,30             | 2802,65          | 2495,97            | 2493,41          | 2459,69        | 2447,23          |
| $\Delta P_{MPP}$   | $W_p$ | 46,23          | 66,99            | 87,53               | 128,60           | 89,79              | 129,12           | 98,93          | 118,22           |
| $\Delta$ Abw   | %     | 1,8            | 2,5              | 3,1                 | 4,4              | 3,5                | 4,9              | 3,9            | 4,6              |
| Mw $P_{MPP,STC}$ : Mittelwert der gemessenen MPP-Leistung bei STC                                |       |                |                  |                     |                  |                    |                  |                |                  |
| Mw $P_{MPP,STC^*}$ : Mittelwert der errechneten MPP-Leistung bei STC (eigene Hochrechnung)       |       |                |                  |                     |                  |                    |                  |                |                  |
| $\Delta P_{MPP}$ : Differenz der beiden Mittelwerte $P_{MPP,STC}$ und $P_{MPP,STC^*}$            |       |                |                  |                     |                  |                    |                  |                |                  |
| $\Delta$ Abw: die prozentuale Abweichung der Mittelwertdifferenz zu dem Mittelwert $P_{MPP,STC}$ |       |                |                  |                     |                  |                    |                  |                |                  |

Bei der Betrachtung der Mittelwerte der messgerätinternen und der eigenen STC-Umrechnung ergeben sich für die Kategorien *E 1-W 0* und *E 1-W 0,5* absolute Abweichungen der Messgeräte *Profitest-PV*, *PVPM CX1000* und *TRI-KA* bezogen auf das *I-V 400* (z.B.  $\Delta P_{MPP}(Profitest-PV) - \Delta P_{MPP}(I-V 400) \approx 41 W_p$ ), die sich zwischen 41 und 53  $W_p$  (*E 1-W 0*) sowie 69 und 80  $W_p$  (*E 1-W 0,5*) bewegen. Bei der durchschnittlichen MPP-Strangleistung bei STC durch die interne Umrechnung der einzelnen Messgeräte (Mw  $P_{MPP,STC}$ ) entspricht dies im Mittel (*E 1-W 0* und *E 1-W 0,5*) gegenüber dem *I-V 400* einem Plus an Leistung von 1,3 % (*Profitest-PV*) und 2,1 % (*PVPM CX1000* und *TRI-KA*) (Tabelle 23).

### Reproduzierbarkeit

Die auf den statistischen Auswertungen (Tabelle 20 und 21) beruhende Reproduzierbarkeit der Messungen der einzelnen Kennliniengeräte (Bild 38), zeigt für jede Kategorie einen Vertrauensbereich, in dem der Erwartungswert mit einer 95 prozentigen Wahrscheinlichkeit vermutet wird. Bei der Kategorie *E 1-W 0* lassen sich, aufgrund der annähernd gleichen Anzahl an Einzelmessung, die Unterschiede der jeweiligen Kennlinienmessgeräte aufzeigen (Tabelle 24).

**Tabelle 24: Reproduzierbarkeit für die Kategorie *E 1-W 0***

|                          |         | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|--------------------------|---------|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Anzahl der Messungen     | -       | 14             | 14                  | 17                 | 16            |
| Varianz (Streuung)       | $W_p^2$ | 2085,38        | 10672,39            | 5898,74            | 6124,50       |
| Vertrauensintervall      | $W_p$   | 52,24          | 118,17              | 79,73              | 83,74         |
| Innerhalb des Intervalls | %       | 36             | 29                  | 29                 | 19            |
| Außerhalb des Intervalls | %       | 64             | 71                  | 71                 | 81            |

Bei dem *I-V 400* liegen 36 % der Messungen innerhalb des Vertrauensintervalls und weisen die geringste Streuung auf. Für das *Profitest-PV* und das *PVPM 1000CX* sind es 29 % aller Messungen, die im Vertrauensintervall liegen. Das *Profitest-PV* besitzt jedoch eine fast doppelt so große Streuung der Messwerte. Bei dem *TRI-KA* sind 19 % der Messungen innerhalb des Vertrauensintervalls.

### **Fazit aus den elektrischen Messungen**

Es konnte gezeigt werden, dass das *Profitest-PV* durch einen fehlerhaft kalibrierten Einstrahlungssensor zu geringe Einstrahlungswerte misst und dadurch überbewertete MPP-Strangleistungen liefert. Diese Überbewertung bewegt sich in einem Bereich von ca. vier Prozent. Die erfassten Temperaturwerte liegen im Mittel um 6,8 % über dem wahrscheinlichen Temperaturwert. Dies schlägt sich jedoch nur um ca. 0,7 % in einer erhöhten MPP-Leistung nieder. Durch das interne STC-Umrechnungsverfahren wird im Durchschnitt eine um 1,3 % höher MPP-Leistung bezogen auf das *I-V 400* generiert.

Das *PVPM 1000CX* zeigt bei der Einstrahlungsmessung keine signifikante Abweichung. Bei den Werten des Temperaturfühlers ergibt sich eine mittlere Unterbewertung von 6,9 % bezogen auf die Werte der Trendlinie. Dies führt zu einer MPP-Leistung, die um 0,7 % geringer ausfällt. Hier wird durch das interne STC-Umrechnungsverfahren im Durchschnitt eine um 2,1 % höhere MPP-Leistung bezogen auf das *I-V 400* erzeugt.

Das *TRI-KA* weist ebenfalls keine relevante Abweichung der gemessenen Einstrahlungen auf. Die erfassten Temperaturen sind im Durchschnitt um 2,3 % geringer als die gemittelte Trendlinie. Dies resultiert in einer um 0,2 % geringeren MPP-Leistung. Hinsichtlich des STC-Umrechnungsverfahrens ergibt sich bei dem *TRI-KA* im Durchschnitt ebenfalls eine um 2,1 % höhere MPP-Leistung bezogen auf das *I-V 400*.

Das *I-V 400* besitzt bei den Einstrahlungswerten keine kennzeichnenden Abweichungen. Für die Temperaturwerte ergibt sich eine Überbewertung von 2,5 % bezogen auf die mittlere Trendlinie, die sich in einer um 0,3 % höheren MPP-Leistung widerspiegelt.

Gerade die signifikant zu geringen Einstrahlungswerte des *Profitest-PV* macht einen Vergleich mit den anderen Kennliniengeräten schwierig. Doch zeigt sich bei dem direkten Vergleich mit dem baugleichen *PVPM 1000CX*, wie wichtig eine genaue Kalibrierung der Sensoren für ein genaues Messergebnis ist. Es können jedoch keine Aussagen über die messtechnische Genauigkeit der Kennliniengeräte, wie z.B. in der PHOTON-Profi Ausgabe vom Juli 2012, gemacht werden.

### **Handhabung**

Die Tabelle 25 soll einzelne Eigenschaften der Kennlinienmessgeräte hinsichtlich des Vor-Ort-Einsatzes bewerten. Diese Bewertung erfolgt anhand der mit den Kennliniengeräten gesammelten Eindrücke während des Messzeitraums und den bei der Firma SolPEG gesammelten Erfahrungen bzgl. der Ansprüche eines Kennlinienmessgeräts bei einem Vor-Ort-Einsatz. Da man bei großen PV-Freiflächenanlagen weite Wege zurücklegen muss um sämtliche Stränge zu messen, ist es von Vorteil, wenn die Kennlinienmessgeräte handlich und von geringem Gewicht sind. Bei solchen Anlagen nimmt eine Überprüfung sämtlicher Stränge viel Zeit in Anspruch. Dies kann nur durch eine lange Akkulaufzeit oder dessen Austausch vor Ort gewährleistet werden. Durch das ständige Auf- und Abbauen der Messgeräte ergibt sich die Notwendigkeit, dass die eingegebenen Parameter beim Aus- und Einschalten des Geräts zwischengespeichert werden, um eine ständige Neueingabe zu unterbinden und somit Zeit zu sparen. Eine erste Bewertung der Kennlinienmessung erfolgt direkt vor Ort, sodass die auf dem

Display abgebildeten Ergebnisse immer ablesbar sein müssen. Die Bewertung der einzelnen Kriterien erfolgt durch die Vergabe von maximal drei und minimal einem Stern.

Tabelle 25: Übersicht der Kriterien bzgl. eines Vor-Ort-Einsatzes der Kennlinienmessgeräte

| Kriterium | <i>I-V 400</i> | <i>Profitest-PV</i> | <i>PVPM 1000CX</i> | <i>TRI-KA</i> |
|-----------|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Mobilität | ***            | **                  | **                 | ***           |
| Akku      | ***            | **                  | **                 | **            |
| Aufbau    | ***            | **                  | **                 | *             |
| Display   | ***            | *                   | *                  | *             |

Das *PVPM 1000CX* und das *Profitest-PV* sind mit den zwei Schalenkoffern die schwersten Messgeräte. Es ist zwar nicht unmöglich die beiden Messgeräte zu tragen, doch bei langen Strecken macht sich das Gewicht der beiden Koffer bemerkbar. Nur das *I-V 400* bietet die Möglichkeit die AA-Batterien direkt auszutauschen, bei dem *TRI-KA*, dem *PVPM 1000CX* und dem *Profitest-PV* lässt sich der Akku nur über einen Anschluss an die Steckdose aufladen. Dies ist bei längeren Einsätzen der Messgeräte von Nachteil (Akkulaufzeit *PVPM 1000CX* und *Profitest-PV*: zwischen 3-6 Std., *TRI-KA*: über 6 Std.). Zwar befindet sich in den meisten Transformatorstationen eine Steckdose, jedoch besitzt nicht jede PV-Anlage eine Transformatorstation. Außerdem kostet das Aufladen des Messgeräts wertvolle Zeit, die man nicht zum Messen von Strangkennlinien zur Verfügung hat. Das ständige Auf- und Abbauen der Kennliniengeräte erfordert, gerade mit Blick auf eine lange Akkulaufzeit, das Mehrfache Aus- und Anschalten des Messgeräts. Hierbei werden bei den Geräten *Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* die zuvor eingegebenen Werte (Kunde, Anlage, Modultyp, Anzahl Module pro Strang, Stränge parallel) aus dem Speicher gelöscht und müssen neu eingegeben werden. Nur das *I-V 400* behält den Status quo vor dem Ausschalten bei. Für das *TRI-KA* muss man außerdem darauf achten, dass die Bezeichnung des Modultyps nicht zu lang gewählt wird, da sie sonst nicht mehr vollständig auf dem Display angezeigt wird. Bei direktem Lichteinfall hat man bei den Kennliniengeräten mit einem Touch-LCD-Farbdisplay (*Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA*) Probleme alle Einzelheiten zu erkennen. Hier zeigt das *I-V 400* durch das hintergrundbeleuchtete LCD-Display wieder die geringsten Auffälligkeiten.

## 6. Zusammenfassung

Die Kennlinienmessung mit mobilen Messgeräten ist eine sinnvolle und empfehlenswerte Methode die Funktionsfähigkeit und Qualität von PV-Modulen vor Ort sicherzustellen. Sie ist heutzutage ein Standardverfahren. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger, neben den begrenzten Herstellerangaben auch weitergehende Studien zum Verhalten der Kennlinienmessgeräte anzufertigen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit verfolgt das Ziel, die gemessene MPP-Leistungen bei STC für variierende Einstrahlungsverhältnisse zu untersuchen. Hierbei werden vor allem auch Messungen unterhalb der durch die Norm IEC 60904-1 definierten Einstrahlungsgrenze von  $800 \text{ W/m}^2$  aufgenommen. Es werden Messungen bei Einstrahlungen zwischen  $350$  und  $950 \text{ W/m}^2$  durchgeführt, wobei die Majorität der Messungen in dem Einstrahlungsbereich von  $500$  bis  $700 \text{ W/m}^2$  zu finden ist. Daneben soll aber auch die Eignung der Kennlinienmessgeräte für den Vor-Ort-Einsatz diskutiert werden.

Durch die per Hand angefertigten Messprotokolle werden Tendenzen für das Verhalten der Einstrahlungs- und Temperatursensoren abgeleitet. Aus 219 mit allen Kennlinienmessgeräten

durchgeführten Messungen, werden in einem ersten Schritt drei Einstrahlungsklassen in Abhängigkeit der Volatilität der Pyranometerwerte gebildet, um die messgerätinternen STC-Umrechnungsvarianten der einzelnen Geräten mit einem einheitlichen STC-Verfahren zu vergleichen. In einem zweiten Schritt erfolgt eine weitere Unterteilung der Messungen aufgrund der herrschenden Himmelsbewölkung zum Zeitpunkt der Messung. Mit Hilfe der Daten des LED-Sonnensimulator wird eine Referenz-MPP-Leistung für den Ost-Strang der PV-Anlage generiert und zu einem Toleranzbereich für die Messungen ausgeweitet. Zuerst wird das Verhalten der Kennliniengeräte separat betrachtet, um in einem nächsten Schritt die Messgeräte für vergleichbare Einstrahlungsverhältnisse gegenüberzustellen und eine statistische Auswertung durchzuführen. Basierend auf der statistischen Auswertung wird die Reproduzierbarkeit der Kennlinienmessungen betrachtet. Für ausgewählte Messungen die bei konstanten Einstrahlungen, wolkenfreiem Himmel und minimalem zeitlichen Versatz aufgenommen werden, erfolgt eine grafische Darstellung, die das Verhalten der einzelnen Kennlinienmessgeräte im direkten Vergleich zeigt. Eine abschließende kurze Bewertung der Messgeräte hinsichtlich ausgewählter Kriterien für den Vor-Ort-Einsatz soll das Bild abrunden.

Die Einstrahlungswerte der Kennliniengeräte *I-V 400*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Das *Profitest-PV* misst zu geringe Einstrahlungswerte, die in einer Überbewertung der gemessenen MPP-Leistung resultieren. Das *I-V 400* und das *TRI-KA* erfassen die Temperaturen, mit der geringsten Abweichung zur gemittelten Trendlinie. Die Geräte *Profitest-PV* und *PVPM 1000CX* bilden die obere und untere Grenze der Temperaturwerte. Durch die interne STC-Hochrechnung ermitteln die Kennlinienmessgeräte *Profitest-PV*, *PVPM 1000CX* und *TRI-KA* höhere STC-Werte als das *I-V 400*. Bei der Reproduzierbarkeit der Messungen zeigt das *I-V 400* die geringste Streuung, gefolgt von dem *PVPM 1000CX* und dem *TRI-KA*. Die höchste Streuung weist das *Profitest-PV* auf. Gerade bei hohen Einstrahlungsverhältnissen fällt auf, dass die gemessenen MPP-Leistungen der Kennlinienmessgeräten, mit Ausnahme des *Profitest-PV*, an der unteren Grenze des Toleranzbereichs oder darunter liegen. Hinsichtlich der Handhabung schneidet das *I-V 400* am besten ab, gefolgt von dem *Profitest-PV*, dem *PVPM 1000CX* und dem *TRI-KA*. Zusammenfassend erfüllt das *I-V 400* die Ansprüche an ein mobiles Kennlinienmessgerät am umfassendsten. Es weist den größten Anteil an Messungen ( $P_{MPP,STC}$ ) innerhalb des Toleranzbereichs auf, zeigt die geringste Streuung und schneidet am besten bei der Handhabung ab. Das *PVPM 1000CX* misst gerade bei hohen Einstrahlungsverhältnissen MPP-Leistungen ( $P_{MPP,STC}$ ), die unterhalb des Toleranzbereichs liegen und besitzt Schwächen bei der Handhabung, z.B. ist die Akkulaufzeit in Kombination mit der fehlenden Möglichkeit diesen auszutauschen von Nachteil bei großen PV-Anlagen und es handelt sich um das Kennlinienmessgerät mit dem größten Gewicht. Das *TRI-KA* benötigt zum Aufnehmen einer I-U-Kennlinie zu viel Zeit, was gerade bei Einstrahlungsschwankungen zu einer markanten Zunahme der Streuung der Messergebnisse führt. Obwohl es sich beim *Profitest-PV* und dem *PVPM 1000CX* um baugleiche Geräte handelt, fällt die Bewertung der Messergebnisse sehr unterschiedlich aus. Dies verdeutlicht, dass für ein möglichst genaues Messergebnis geräteunabhängig eine genaue Kalibrierung der Sensoren unumgänglich ist.

## 7. Anhang

### 7.1. Digitaler Anhang

Der digitale Anhang befindet sich als CD anbei dieser Arbeit. Der folgende Dateibaum zeigt die Ordnerstruktur des Anhangs. Außerdem werden die im Anhang enthaltenen Dokumente mit einer kurzen Beschreibung aufgelistet.

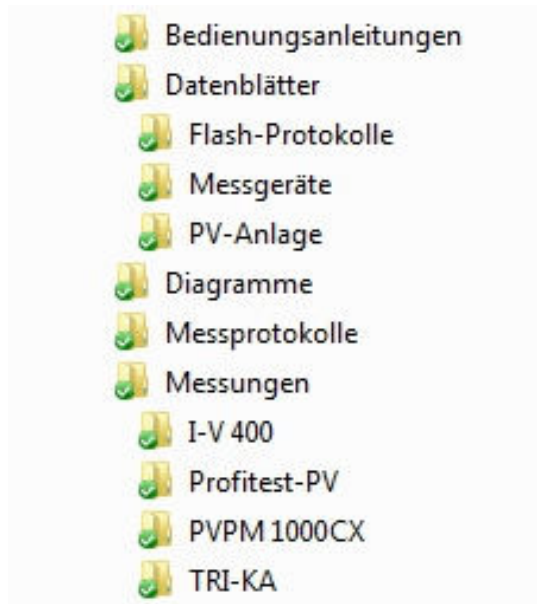


Bild 41: Dateibaum für den digitalen Anhang

#### Zusätzliche Informationen

- **Bedienungsanleitungen**

Bedienungsanleitungen der einzelnen Kennlinienmessgeräte

- *Manual I-V400.pdf*
- *Manual Profitest-PV.pdf*
- *Manual PVPM 1000CX.pdf*
- *Manual TRI-KA.pdf*

- **Datenblätter**

Datenblätter der verwendeten Geräte.

- **Flash-Protokolle**

PDF-Dokumente der Messungen des LED-Sonnensimulators der einzelnen Module.

- *1-Solpeg Schneider HAW 1  
\_21000025797911080921942100000192\_Report.pdf*
- *2-Solpeg Schneider HAW 1  
\_21000025593211080921942100000192\_Report.pdf*

- *3-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025598111080921942100000192\_Report.pdf*
- *4-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025729911080921942100000192\_Report.pdf*
- *5-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025760911080921942100000192\_Report.pdf*
- *6-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025840411080921942100000192\_Report.pdf*
- *7-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000032061911081127942100000313\_Report.pdf*
- *8-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025661011080921942100000192\_Report.pdf*
- *9-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025667411080921942100000192\_Report.pdf*
- *10-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025675811080921942100000192\_Report.pdf*
- *11-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025674411080921942100000192\_Report.pdf*
- *12-Solpeg Schneider HAW 1*  
*\_21000025693311080921942100000192\_Report.pdf*

Die Quelle [LED12] mit den Spezifikationen des LED-Sonnensimulators. Erhalten am 30.10.2012 via E-Mail von Dipl.-Ing. Rolf Danker von der Firma SunEnergy Europe GmbH

- *Spezifikation LED-Simulator.docx*

○ **Messgeräte**

Die Datenblätter der untersuchten Messgeräte

- *I-V 400.pdf*
- *Profitest-PV.pdf*
- *PVPM-1000CX.pdf*
- *TRI-KA.pdf*
- *Übersicht Kennlinienmessgerät.pdf*

Eine Zusammenstellung der Eigenschaften der Kennlinienmessgeräte.

○ **PV-Anlage**

Die Datenblätter der beschriebenen Komponenten der Photovoltaik-Dachanlage der HAW

- *PV-Modul - Conergy Power Plus 220P.pdf*
- *Pyranometer - Kipp Zonen CMP 11.pdf*
- *Wechselrichter - Conergy IPG 3000.pdf*



- **Diagramme**

- *AM-Spektrum.xlsx*

Die Datengrundlage zur Berechnung des AM-Spektrums und die Pyranometerwerte des Messdatenerfassungssystems der HAW zur Darstellung der Einstrahlungsverhältnisse für die einzelnen Messtage.

- *E 1+W 0,5.xls*

Auswertung der Daten für eine hinreichend konstante Einstrahlung und einen leicht bewölkten Himmel.

- *E 1+W 0.xlsx*

Auswertung der Daten für eine hinreichend konstante Einstrahlung und einem wolkenfreien Himmel.

- *Einstrahlungssensoren.xlsx*

Vergleich der Einstrahlungssensoren basierend auf den Daten der Messprotokoll.xlsx.

- *Grundlagen.xlsx*

Tabelle mit allen Messwerten. Auf ihr bauen alle weiteren Tabellen auf (Ausnahme: AM-Spektrum)

- *Messzyklen.xlsx*

Die Darstellung ausgewählter Messungen die innerhalb eines Messzyklus aufgenommen wurden.

- *Reproduzierbarkeit.xlsx*

Die Reproduzierbarkeit der Messungen der einzelnen Kennlinienmessgerät basierend auf der statistischen Auswertung der Kategorien E 1 + W 0 und E 1 + W 0,5.

- *STC-Hochrechnung.xlsx*

Hochrechnung der messtechnisch erfassten MPP-Leistungswerte auf STC.

- *Strangrechner.xlsx*

Das Approximationsverfahren und die Zusammenführung der daraus resultierenden Modulkennlinien zu einer Strangkennlinie.

- *Temperatursensoren.xlsx*

Vergleich der Temperatursensoren basierend auf den Daten der Messprotokoll.xlsx.

- *Übersicht Messgeräte.xlsx*

Auswertung der Daten für eine hinreichend konstante und eine schwach schwankende Einstrahlung zu jedem Kennlinienmessgerät.

- *Zusammenfassung Diagramme.pdf*

Die Zusammenstellung der Datentabellen für die einzelnen Diagramme in einem PDF-Dokument.

- **Messprotokolle**

Die protokollierten Werte der Einstrahlungs- und der Temperatursensoren der einzelnen Messungen mit den Kennlinienmessgeräten zusammen mit der Beschreibung der Wettersituation, sowie die für die eigentliche Messung mit dem jeweiligen Messgerät erfassten Einstrahlungs- und Temperaturwerte. Zusätzlich die Temperatur- und Einstrahlungswerte des Messdatenerfassungssystems der HAW. Die Einstrahlungswerte der Pyranometer dienen der Berechnung der prozentualen Abweichung und somit der Bestimmung der Einstrahlungskategorien.

- *121011-Messprotokoll\_Einzelheiten.xlsx*
- *121012-Messprotokoll\_Einzelheiten.xlsx*
- *121016-Messprotokoll\_Einzelheiten.xlsx*
- *121017-Messprotokoll\_Einzelheiten.xlsx*
- *121018-Messprotokoll\_Einzelheiten.xlsx*
- *121019-Messprotokoll\_Einzelheiten.xlsx*
- *121020-Messprotokoll\_Einzelheiten.xlsx*

Die protokollierten Werte der Einstrahlungs- und der Temperatursensoren der einzelnen Messungen mit den Kennlinienmessgeräten für alle Messtage.

- *Messprotokoll.xlsx*

- **Messungen**

Die einzelnen durchgeführten Messungen mit dem jeweiligen Kennlinienmessgerät. Die erste Nummer bei jedem EXCEL-Dokument steht für die fortlaufende Nummerierung in dem Messprotokoll. Danach folgt das Datum und die Uhrzeit.

- *I-V 400*
- *Profitest-PV*
- *PVPM 1000CX*
- *TRI-KA*

## 7.2. Abbildungsverzeichnis

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Bild 1:  | Idealisierte Kennlinie einer Solarzelle [HÄB07].....   | 5  |
| Bild 2:  | Abhängigkeit des Kurzschlussstroms $I_{SC}$ und der Leerlaufspannung $U_{OC}$ von der Bestrahlungsstärke $E$ [QUA07].....  | 6  |
| Bild 3:  | Abhängigkeit des Kurzschlussstroms $I_{SC}$ und der Leerlaufspannung $U_{OC}$ von der Temperatur [HÄB07].....  | 6  |
| Bild 4:  | Kennlinien des Stroms und der Leistung aufgetragen über der Spannung [QUA07]..   | 7  |
| Bild 5:  | Einfluss des Serienwiderstandes auf die Solarzellenparameter [GOE94].....  | 8  |
| Bild 6:  | Einfluss des Parallelwiderstandes auf die Solarzellenparameter [GOE94].....  | 9  |
| Bild 7:  | Messschaltung eines Kennlinienmessgeräts mit einem Transistor als variablem Widerstand [WAG09] (ergänzt um eigene Darstellung).....  | 10 |
| Bild 8:  | Messschaltung eines Kennlinienmessgeräts mit einem Kondensator als variablem Widerstand [WAG09].....   | 11 |
| Bild 9:  | Ersatzschaltbild für die effektive Solarzellen-Kennlinie [WAG09].....  | 12 |
| Bild 10: | Messgerätunterbringung ( <i>I-V 400</i> , <i>Profitest-PV</i> , <i>PVPM 1000CX</i> und <i>TRI-KA</i> ).....  | 14 |
| Bild 11: | Messgeräte ( <i>I-V 400</i> , <i>Profitest-PV</i> , <i>PVPM 1000CX</i> und <i>TRI-KA</i> ).....  | 15 |
| Bild 12: | Einstrahlungssensoren (links das <i>I-V 400</i> mit dem <i>HT304</i> , Mitte das <i>Profitest-PV</i> und das <i>PVPM 1000CX</i> mit dem <i>Pbox</i> , rechts das <i>TRI-KA</i> mit dem <i>TRI-SEN</i> )..... | 17 |
| Bild 13: | Messequipment (links <i>I-V 400</i> , Mitte <i>Profitest-PV</i> und <i>PVPM 1000CX</i> , rechts <i>TRI-KA</i> ).....   | 17 |
| Bild 14: | Netzgekoppelte Anlage und Inselanlage (mit dem Ost-Strang als markiertem Bereich)(Quelle: Eigene Bilder).....  | 18 |
| Bild 15: | Anordnung der Pyranometer [ZAC10].....   | 19 |
| Bild 16: | Die aufsummierten I-U-Kennlinien der einzelnen Module (grau) mit der daraus resultierenden I-U-Strangkennlinie (gelb).....   | 24 |
| Bild 17: | Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 11.10.2012.....   | 26 |
| Bild 18: | Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 12.10.2012.....   | 26 |
| Bild 19: | Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 16.10.2012.....   | 26 |
| Bild 20: | Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 17.10.2012.....   | 26 |
| Bild 21: | Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 18.10.2012.....   | 26 |
| Bild 22: | Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 19.10.2012.....   | 26 |
| Bild 23: | Einstrahlungsverlauf und AM-Spektrum für den 18.10.2012.....   | 27 |
| Bild 24: | Messaufbau ( <i>PVPM 1000CX</i> , <i>Profitest-PV</i> , <i>TRI-KA</i> und <i>I-V 400</i> ),<br>Einstrahlungssensoren ( <i>TRI-KA</i> , <i>I-V 400</i> , <i>Profitest-PV</i> und <i>PVPM 1000CX</i> ) und     |    |

|          |  |    |
|----------|--|----|
|          | Temperatursensoren ( <i>Profitest-PV</i> , <i>PVPM 1000CX</i> und <i>I-V 400</i> )(von links nach rechts) .....  | 27 |
| Bild 25: | Prozentuale Abweichung bezogen auf eine Einstrahlung von 1000 W/m <sup>2</sup> der dokumentierten Werte der Einstrahlungssensoren aller Messungen .....  | 29 |
| Bild 26: | Spannweite der prozentuale Abweichung (Oben für: <i>PVPM 1000CX</i> , <i>Profitest-PV</i> , <i>I-V 400</i> und <i>TRI-KA</i> . Unten für: <i>PVPM 1000CX</i> , <i>I-V 400</i> und <i>TRI-KA</i> ).....                                     | 30 |
| Bild 27: | Die dokumentierten Werte der Temperatursensoren aller Messungen.....   | 31 |
| Bild 28: | Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts <i>I-V 400</i> in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2 .....                | 34 |
| Bild 29: | Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts <i>Profitest-PV</i> in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2.....            | 34 |
| Bild 30: | Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts <i>PVPM 1000CX</i> in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2.....             | 35 |
| Bild 31: | Verlauf der prozentualen Abweichung der MPP-Leistungswerte bei STC der eigenen Hochrechnung bezogen auf die MPP-Leistungen bei STC des Messgeräts <i>TRI-KA</i> in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2.....                  | 35 |
| Bild 32: | Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) des <i>I-V 400</i> für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2.....      | 38 |
| Bild 33: | Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) des <i>Profitest-PV</i> für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2..... | 39 |
| Bild 34: | Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) des <i>PVPM 1000CX</i> für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2.....  | 40 |
| Bild 35: | Verlauf der MPP-Leistungswerte bei STC ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung bei STC ( $P_{MPP,STC^*}$ ) des <i>TRI-KA</i> für die verschiedenen Wetterkategorien in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometers P2.....       | 41 |
| Bild 36: | MPP-Leistungswerte der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometer P2 für die Einstrahlungsklasse <i>E 1</i> und den Wolkenindex <i>W 0</i> .....       | 42 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Bild 37: | MPP-Leistungswerte der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) und der eigenen Hochrechnung ( $P_{MPP,STC^*}$ ) in Abhängigkeit der Einstrahlung des Pyranometer P2 für die Einstrahlungsklasse $E 1$ und den Wolkenindex $W 0,5$ ..... | 44 |
| Bild 38: | Abweichung der Einzelmessungen vom Mittelwert für die Kategorien $E 1-W 0$ und $E 1-W 0,5$ mit dem dazugehörigen Vertrauensbereich .....   | 45 |
| Bild 39: | Einzelmessungen mit allen vier Messgeräten durchgeführt in einem Zeitintervall kleiner fünf Minuten.....   | 46 |
| Bild 40: | Prozentualer Anteil der Messungen für bestimmte Einstrahlungsintervalle .....  | 48 |
| Bild 41: | Dateibaum für den digitalen Anhang .....   | 55 |

### 7.3. Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Messzyklen der Kennlinienmessung mit Kondensator als variablem Widerstand [WAG09].....  | 11 |
| Tabelle 2: Übersicht der messtechnisch erfassten und der berechneten Werte der einzelnen Kennlinienmessgeräte .....  | 15 |
| Tabelle 3: Übersicht der einzelnen Messbereiche der Kennlinienmessgeräte.....  | 16 |
| Tabelle 4: Modulkennwerte [CON09] .....  | 19 |
| Tabelle 5: Wechselrichterkennwerte [CON07].....  | 20 |
| Tabelle 6: Ergebnisübersicht Flash-Messung.....  | 22 |
| Tabelle 7: Übersicht der STC-Werte der Flash-Protokolle und der berechneten Werte zum Erstellen der Modulkennlinie .....   | 23 |
| Tabelle 8: Vergleich der MPP-Leistungswerte der Flash-Protokolle und der Kennlinienapproximation.....  | 24 |
| Tabelle 9: Einstrahlungsminimum und –maximum.....  | 27 |
| Tabelle 10: Parameter der Dokumentation .....  | 28 |
| Tabelle 11: Auflistung der Anzahl der Messungen an den jeweiligen Messtagen.....   | 29 |
| Tabelle 12: Mittelwert der Spannweite der prozentualen Abweichung in Abhängigkeit von Einstrahlungsintervallen.....  | 30 |
| Tabelle 13: Einteilung in Einstrahlungsklassen nach Schwankung der Einstrahlung zum Zeitpunkt der Messung $\pm 1$ Minute.....  | 32 |
| Tabelle 14: Übersicht der resultierenden Anzahl an Messungen für die jeweiligen Einstrahlungsklassen .....   | 32 |
| Tabelle 15: Relativer Wirkungsgradverlauf des Conergy PowerPlus 220P Moduls in Abhängigkeit von verschiedenen Einstrahlungen .....   | 32 |
| Tabelle 16: Übersicht der gewichteten Mittelwerte des STC-Vergleichs der verschiedenen Einstrahlungsklassen aller Messgeräte und des absoluten Verhältnisses zum $I-V 400$ .....                             | 36 |
| Tabelle 17: Definition des Wolkenindex .....   | 36 |
| Tabelle 18: Übersicht der Anzahl der Messungen in den jeweiligen Kategorien aus der Kombination der Einstrahlungsklassen mit dem Wolkenindex .....   | 37 |
| Tabelle 19: Übersicht der Anzahl der Messungen bzgl. des definierten Toleranzbereichs für die gemessene MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ) und die eigene Hochrechnung der MPP-Leistung ( $P_{MPP,STC^*}$ )..... | 41 |
| Tabelle 20: Fehlerrechnung der MPP-Leistungen der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) für die Kategorie $E 1-W 0$ .....   | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 21: Fehlerrechnung der MPP-Leistungen der Messgeräte ( $P_{MPP,STC}$ ) Kategorie <i>E 1-W 0,5</i><br>.....   | 44 |
| Tabelle 22: Parameterübersicht zu den einzelnen Messzyklen .....   | 47 |
| Tabelle 23: Prozentuale und absolute Unterschiede der Mittelwerte der gemessenen MPP-<br>Leistung ( $P_{MPP,STC}$ ) und der MPP-Leistung bei STC der eigenen Hochrechnung<br>( $P_{MPP,STC^*}$ ) ..... | 51 |
| Tabelle 24: Reproduzierbarkeit für die Kategorie <i>E 1-W 0</i> .....  | 51 |
| Tabelle 25: Übersicht der Kriterien bzgl. eines Vor-Ort-Einsatzes der Kennlinienmessgeräte .....   | 53 |

## 7.4. Formelverzeichnis

|                |   |
|----------------|---|
| $A$            | Fläche der Solarzelle in $m^2$                        |
| $C_{Opt}$      | Optimale Kapazität in F                               |
| $E$            | Einstrahlung in $W/m^2$                               |
| $E_{Eff}$      | Gemessene Einstrahlung in $W/m^2$                     |
| $E_{P1}$       | Einstrahlung des Pyranometers P1 der HAW in $W/m^2$   |
| $E_{P2}$       | Einstrahlung des Pyranometers P2 der HAW in $W/m^2$   |
| $FF$           | Füllfaktor  |
| $i$            | Anzahl der Messwerte                                  |
| $I_A$          | vorgegebener Stromwert in A                           |
| $I$            | Strom an der Solarzelle und dem Shunt-Widerstand in A |
| $I_{MPP}$      | Strom im Punkt der maximalen Leistung in $W_p$        |
| $I_0$          | Sperrstrom in A                                       |
| $I_{SC}$       | Kurzschlussstrom in A                                 |
| $M$            | Steigung der Kennlinie                                |
| $P_{Licht}$    | Auftreffende Lichtleistung in W                       |
| $P_{MPP}$      | Leistung im Maximum Power Point in $W_p$              |
| $P_{MPP,STC}$  | gemessene MPP-Leistung bei STC in $W_p$               |
| $P_{MPP,STC*}$ | errechnete MPP-Leistung bei STC in $W_p$              |
| $R$            | Spannweite in $W_p$                                   |
| $R_{pV}$       | Photovoltaik-Widerstand in $\Omega$                   |
| $R_{sb}$       | Shunt-Widerstand in $\Omega$                          |
| $s$            | Standardabweichung in $W_p$                           |
| $s^2$          | Varianz in $W_p^2$                                    |
| $s_x$          | Standardabweichung des Mittelwerts in $W_p$           |
| $t$            | Wert der t-Verteilung                                 |
| $T$            | Messzeit der Kennlinie in s                           |
| $T_{Mod}$      | gemessene Modultemperatur in $^{\circ}C$              |



|                |   |
|----------------|---|
| $U_A$          | Spannung (für den Strom $I_A$ ) in V                              |
| $U$            | am Solargenerator anliegende Spannung in V                        |
| $U_b$          | Kompensationsspannung des Messkreises in V                        |
| $U_{MPP}$      | Strom im Punkt der maximalen Leistung in $W_p$                    |
| $U_{OC}$       | Leerlaufspannung in V   |
| $U_{Sb}$       | Spannungsabfall am Shunt-Widerstand in V                          |
| $U_{St}$       | Steuerspannung des Transistors in V                               |
| $U_T$          | Temperaturspannung in V   |
| $x$            | Messergebnis in $W_p$   |
| $\Delta x$     | Vertrauensintervall in $W_p$                                      |
| $\bar{x}$      | Mittelwert in $W_p$   |
| $x_{Min}$      | Minimum der betrachteten Messwerte in $W_p$                       |
| $x_{Max}$      | Maximum der betrachteten Messwerte in $W_p$                       |
| $a$            | Temperaturkoeffizient des Stroms in %/K                           |
| $\beta$        | Temperaturkoeffizient der Spannung in %/K                         |
| $\gamma$       | Temperaturkoeffizient der Leistung in %/K                         |
| $\gamma_{MPP}$ | Temperaturkoeffizient der Leistung des Conergy 220P Moduls in %/K |
| $\eta$         | Wirkungsgrad  |
| $\eta_{rel}$   | relativer Wirkungsgrad für die gegebene Einstrahlung              |
| $\Delta$       | Abweichung der Leistungswerte                                     |

## 7.5. Quellenverzeichnis

- [BLI08] Bliss, M./ Betts, T.R./ Gottschalg, R.: *Advantages in using LEDs as the main light source in solar simulators for measuring PV device characteristics*, SPIE Conference - Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems (704807; doi:10.1117/12.795428), San Diego 2008
- [BSW12] Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: *Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik)*. [http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/bsw\\_solar\\_fakten\\_pv.pdf](http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/bsw_solar_fakten_pv.pdf), Stand: September 2012
- [CON09] Datenblatt Conergy: *PowerPlus 200P-230P*, Stand 2009
- [CON07] Datenblatt Conergy: *IPG 2000-5000*, Stand 2007
- [DGS10] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie - Landesverband Berlin Brandenburg e.V.: *Photovoltaische Anlagen*, Berlin 2010
- [DIN61] Norm DIN EN 61853 Dezember 2011: *Prüfung des Leistungsverhaltens von photovoltaischen (PV-) Modulen und Energiebemessung - Teil 1: Leistungsmessung in Bezug auf Bestrahlungsstärke und Temperatur sowie Leistungsbemessung*
- [EEG12] BMU - Erneuerbare Energien: *Die wichtigsten Änderungen der EEG-Novelle zur Photovoltaik 2012*. <http://www.erneuerbare-energien.de/unser-service/mediathek/downloads/detailansicht/artikel/novellierung-des-eeg-2012-durch-die-pv-novelle/>, Stand: 28.06.2012
- [GER85] Germer, Horst/ Wefers, Norbert: *Messelektronik Band 1. Grundlagen, Maßverkörperungen, Sensoren, Analoge Signalverarbeitung*, Heidelberg 1985
- [GOE94] Goetzberg, Adolf/ Voß, Bernhard/ Knobloch, Joachim: *Sonnenenergie: Photovoltaik. Physik und Technologie der Solarzelle*, Stuttgart 1994
- [HÄB07] Häberlin, Heinrich: *Photovoltaik. Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen*, Aarau 2007
- [ISE13] Fraunhofer ISW: *Aktuelle Zahlen zur Photovoltaik in Deutschland*. <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>, Stand: 08.01.2013
- [LED12] Daten zum LED-Sonnensimulator: *Mobiles PV-Testcenter*, Stand 2012 (via E-Mail)
- [PHO12a] Podewils, Christoph: *Handlich, genau und kabellos. Präzision und eine einfachere Bedienung müssen sich bei Anlagenmessgeräten nicht ausschließen, wie unser Test von zwölf Modellen zeigt*, PHOTON-Profi 07/2012, S. 10-47
- [PHO12b] Rosenberger, Andreas/ Welter, Philippe/ Podewils, Christoph: *Scharfe Kurven. Ergebnisse der Ertragsmessung 2011 im Detail*, PHOTON-Profi 02/2012, S. 22
- [PHO12c] Beneking, Andreas: *Modultests an der Haustür*, PHOTON-Profi 09/2012, S. 74

- [PRE11] Preiss, Alexander et. al: *Performance Vergleich von a-Si, a-Si/ $\mu$ c-Si, c-Si als eine Funktion der Himmelstrübung und der Sonnenhöhe als auch der spektralen Toleranz von STC-Messungen am Sonnensimulator*, Tagungsband 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie S. 262-267, Regensburg 2007
- [QUA07] Quaschnig, Volker: *Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Simulation*, München 2007
- [RÖS05] Reinhold Rösemann: *Strahlungsmesstechnik: Vom Sensor bis zur Anwendung in Meteorologie und Umweltmesstechnik*, Reichenbach 2005
- [WAE07] Wagemann, Hans-Gunther/ Eschrich, Heinz: *Photovoltaik. Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarkonzepte und Aufgaben*, Wiesbaden 2007
- [WAG09] Wagner, Andreas: *Photovoltaik Engineering. Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*, Heidelberg 2009
- [ZAC10] Zacharias, Slawomir: *Untersuchung der Auswirkung realer Schatten auf die Produktion von Photovoltaikanlagen mit kristallinen Silizium-Modulen und Simulation mit PVSystem*, Fachbibliothek Life Sciences (Signatur: LS UT BA 3) HAW-Hamburg 2010