

# **IEA Photovoltaik (PVPS) Task 13: Ertragssicherheit und Zuverlässigkeit photovoltaischer Systeme**

K. Berger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**59/2019**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe  
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

## **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:  
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

# IEA Photovoltaik (PVPS) Task 13: Ertragssicherheit und Zuverlässigkeit photovoltaischer Systeme

Karl A. Berger, Bernhard Kubicek  
AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy

Gernot Oreski  
PCCL Polymer Competence Center Leoben

Wien, Jänner 2019

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage [www.nachhaltigwirtschaften.at](http://www.nachhaltigwirtschaften.at) gewährleistet wird.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

---

|      |                                                                                         |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.   | Kurzfassung / Abstract.....                                                             | 4  |
| 2.   | Einleitung.....                                                                         | 6  |
| 2.1. | Allgemeine Einführung in die Thematik .....                                             | 6  |
| 2.2. | Ausgangssituation und Motivation .....                                                  | 7  |
| 2.3. | Stand der Technik und Marktentwicklung .....                                            | 8  |
| 2.4. | Vorarbeiten zu Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen und Komponenten    | 11 |
| 2.5. | Aufbau des Ergebnisberichts zum IEA PVPS Task 13.....                                   | 14 |
| 3.   | Hintergrundinformation zum Projektinhalt .....                                          | 15 |
| 3.1. | Kooperationsprojekt IEA PVPS Task 13 - Beteiligung und Gliederung .....                 | 15 |
|      | Teilnehmende Partnerländer und Organisationen im IEA PVPS Task 13 .....                 | 15 |
|      | Subtask-Struktur des IEA PVPS Task 13 .....                                             | 16 |
| 3.2. | Ziele, Schwerpunkte der österreichischen Beteiligung und Kooperation .....              | 17 |
| 3.3. | Methodik, Daten und Vorgangsweise .....                                                 | 18 |
| 4.   | Ergebnisse des Projektes .....                                                          | 19 |
| 4.1. | Subtask 1: Wirtschaftliche Aspekte des Betriebs von PV Anlagen .....                    | 19 |
| 4.2. | Subtask 2: Anlagenperformance und Analyse.....                                          | 22 |
| 4.3. | Subtask 3: Modulcharakterisierung und -lebensdauer .....                                | 24 |
| 4.4. | Subtask 4: Dissemination .....                                                          | 30 |
| 5.   | Vernetzung und Ergebnistransfer .....                                                   | 31 |
| 5.1. | Österreichische Zielgruppe, für die Task 13 Ergebnisse relevant sind .....              | 31 |
| 5.2. | Einbindung relevanter Stakeholder im Task 13, Relevanz und Nutzen der Ergebnisse .....  | 32 |
| 5.3. | Kompetenzaufbau, konkrete Umsetzungen.....                                              | 33 |
| 5.4. | Nutzen für (Technologie)Bereich in Öst.; Mehrwert und Nutzen der Task 13 Beteiligung .. | 33 |
| 6.   | Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....                                      | 34 |
| 7.   | Verzeichnisse .....                                                                     | 36 |
|      | IEA-PVPS Task 13 Reports.....                                                           | 36 |
|      | Vorträge, Konferenzen, Zeitschriftenpublikationen im Zusammenhang mit Task 13 .....     | 37 |
|      | Literatur zur Thematik.....                                                             | 38 |
|      | Abbildungsverzeichnis.....                                                              | 41 |
|      | Tabellenverzeichnis .....                                                               | 42 |
|      | Abkürzungsverzeichnis .....                                                             | 42 |
| 8.   | Anhang.....                                                                             | 42 |

# 1. Kurzfassung / Abstract

- **Ausgangssituation/Motivation**

Derzeit trägt Photovoltaik etwa 3% zur globalen Energieerzeugung bei. Der weltweite Einsatz von Photovoltaik wächst rasch: zwischen 2010 und 2016 war das mittlere jährliche Wachstum 24%, und seit mehreren Jahren übersteigen die Neuinvestitionen in Kraftwerke mit erneuerbaren Energien die Investitionen in konventionelle Kraftwerke, wobei der größte Anteil dabei auf Photovoltaikanlagen entfällt. Der ökologische (CO<sub>2</sub>-) Fußabdruck und der wirtschaftliche (Return of Investment) beim Betrieb von PV-Anlagen hängen wesentlich von validen Informationen zur Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Photovoltaik Systemen und deren Komponenten ab, weshalb bei Investoren, Errichtern und Betreibern ein anhaltend hohes Interesse am IEA PVPS Task13 vorhanden ist, der diese Inhalte mit einem internationalen Team seit vielen Jahren bearbeitet.

- **Inhalte und Zielsetzungen**

Es sind die wirtschaftlichen Aspekte der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Photovoltaiksystemen zu adressieren und zu analysieren, und darzustellen wie gegebene Unsicherheiten adäquat berücksichtigt werden können. Mittels Fragebögen erhobene Vorgangsweisen bei Vorstudien zu PV-Anlagen, sowie zu Fehlern und Leistungseinbußen von PV-Anlagen wurden statistisch ausgewertet. Charakterisierungsmethoden von PV-Modulen und Fehlern im Feld wurden evaluiert und statistische Methoden der Analyse von Felddaten von PV Systemen angewendet.

Die Erkenntnisse dieser Analysen werden den Zielgruppen in Industrie und Wirtschaft, den Akteuren des Finanzsektors und der Öffentlichkeit zu übermitteln.

- **Methodische Vorgehensweise**

Die Arbeit im Task 13 ist in drei thematische Subtasks gegliedert, die den obigen Zielsetzungen entsprechen. Durch das gegebene, internationale Projektkonsortium beinhaltet die Kooperation auch die Märkte des asiatisch-pazifischen Raums, Europa und die USA. Ein vierter Subtask bündelt die Maßnahmen zur Verbreitung der erarbeiteten Informationen. Die detaillierten Reports, die die unterschiedlichen Aspekte von Performance und Zuverlässigkeit behandeln, sind zum freien Download auf der internationalen IEA PVPS Webseite <http://iea-pvps.org/> verfügbar, weiters wird an nationalen und internationalen Workshops und Konferenzen teilgenommen und in Journalen publiziert.

- **Ergebnisse**

Die in der 1. Verlängerung des Task 13 von 2014-2017 erarbeiteten Reports analysieren die Finanzielle Modellierung von PV-Anlagenerträgen, werten statistisch Langzeiterträge und Zuverlässigkeit von PV Systemen sowie dessen Monitoring aus, und evaluieren die damit verbundenen Unsicherheiten in Betriebsdaten und Modellierung, und bieten eine Übersicht zu Materialien und Materialdegradation von PV-Modulen, sowie zu den Methoden Fehler im Feld zu detektieren. Wie im Workplan vorgesehen wurden zu diesen Themen sieben umfangreiche Berichte erstellt und auf der IEA-PVPS Homepage veröffentlicht. Ergebnisse wurden, auch von den österreichischen Projektpartnern auf einer Vielzahl von Veranstaltungen präsentiert und fanden auch Eingang in die internationale Normung.

## Abstract

- **Actual situation / Motivation**

At present, Photovoltaic contributes about 3% to the global energy production. The global installation of PV is rising sharply, with an average annual growth between 2010 and 2016 of 24%, investments in new renewable technologies outperforms the classical energy technology investments since several years, with PV as the major energy technology implemented. The ecological (CO<sub>2</sub>) footprint as well as the economic benefit (Return of Investment) of PV systems is dependent on valid information about the performance and reliability of Photovoltaic systems, and therefore, a persistent interest in IEA PVPS Task 13's results, achieved from an international team collaborating since many years, from investors, installers, and operators of PV systems exists.

- **Content and goals**

The economic aspects of performance and reliability of PV systems are addressed and analyzed, including considering uncertainties. PV-system data, from yield assessment studies to failures and flaws during operation were investigated by means of surveys, and statistical evaluation. Methods to characterize PV modules and -systems in the field were evaluated, and statistical methods to analyze performance from field data for system failure detection are investigated.

The results of these analyses will be disseminated to the stakeholders in PV industry and economy, as well as to the financial sector and the public.

- **Methodic approach**

The work in the Task 13 is organized in subtasks, three thematic ones, for the above-mentioned tasks, and one for the dissemination actions. The international task consortium contains partners from the Asia-Pacific, the Americas, and Europe as well, and therefore represents the major global PV market actors. Within the Subtask 4 dissemination actions are set, including sharing of the comprehensive review reports prepared in the consortium via the international IEA PVPS website <http://iea-pvps.org/>, and participation in international and national conferences and side-events, and journal publications.

- **Results**

The Reports, issued in the 1<sup>st</sup> extension of the Task 13 collaboration analyze the financial modelling of PV yields and its uncertainties, evaluate long term performance of PV systems and its monitoring measures, include reports on module degradation modes and system failures and its field detection methods. As specified in the workplan, seven comprehensive review reports were issued, that can be downloaded from the IEA PVPS homepage. The results were presented – also from the Austrian project partners in the Task 13 - at numerous workshops, conferences, and journal publications and led, in collaboration with the international electrical standardization body IEC TC82 Photovoltaic, also to the issuing of new PV standards.

## 2. Einleitung

### 2.1. Allgemeine Einführung in die Thematik

Nach wie vor basiert die globale Energieversorgung Großteils auf nicht erneuerbaren, nicht nachhaltigen fossilen Energieträgern. Erneuerbare Energieträger machen nur ein Fünftel des globalen Energieeinsatzes aus, siehe Abb. 1, und elektrische Energiebereitstellung hat global auch etwa 20% Anteil an der gesamten Energieaufbringung, wovon wenig mehr als ¼ aus erneuerbaren Ressourcen stammt.

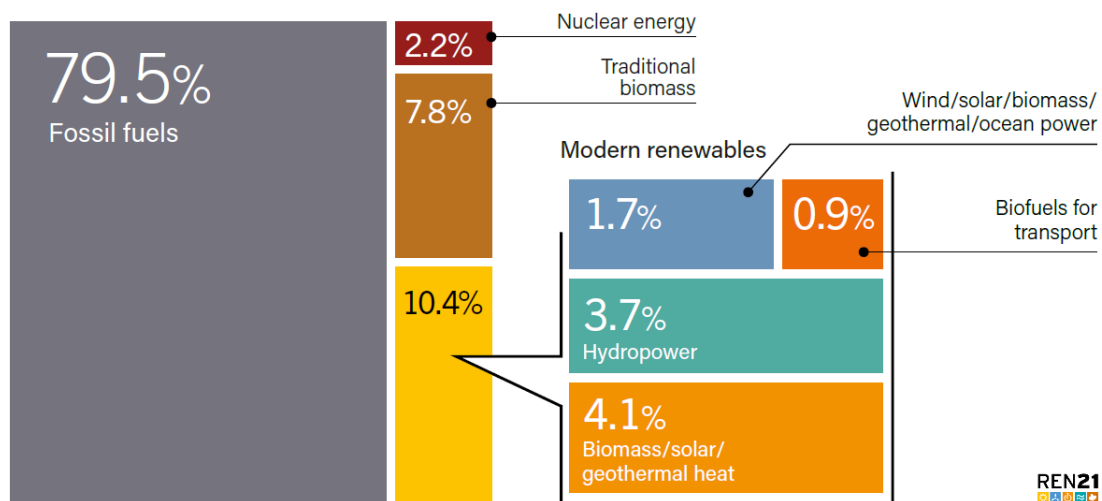


Abb. 1: Globaler Endenergieeinsatz und Anteile erneuerbarer Energieträger 2016 [36].

Dass langfristig die Energiebereitstellung durch solare Technologien das Rückgrat der zukünftigen Energieversorgung darstellen muss und kann ist evident. Das Jahr 2015 markierte - in doppelter Hinsicht - eine Trendwende: (i) 2015 wurde erstmals mehr Kraftwerkskapazität durch Anlagen erneuerbarer Energie zugebaut, als durch alle anderen Anlagen zusammen und (ii) es wurde in entwickelnden Ländern und Schwellenländern mehr in Energietechnologien investiert als in den Industrieländern. Inzwischen sind die jährlichen Neuinvestitionen in erneuerbare Energietechnologien etwa drei Mal so groß wie in fossile Kraftwerke. 2017 wurde allein durch Photovoltaik eine größere Erzeugungskapazität zugebaut als durch fossile und nukleare Kraftwerke zusammen [36].

Ende 2017 war weltweit ca. 402 GW Photovoltaik in Betrieb, wovon 98 GW (+33%) 2017 neu installiert wurde. Da 2018 etwas mehr als 100 GW (+25%) zugebaut wurden sind nun mehr als 500 GW an Photovoltaikkraftwerken in Betrieb, was bedeutet, dass etwa 2.5% der globalen elektrischen Energie durch Photovoltaik bereitgestellt wird [54]. Die größten Märkte sind derzeit in Asien und China ist größter Produzent von Photovoltaikmodulen. Im Vergleich zu anderen Energietechnologien überrascht Photovoltaik mit drastisch sinkenden Anlagen- und Stromgestehungskosten, weshalb Prognosen welche Anteile die Photovoltaik an der zukünftigen Energieaufbringung haben wird immer wieder nach oben korrigiert wurden<sup>2</sup>. Die Abb. 2 gibt eine Übersicht welche Anteile Photovoltaik 2017 im Strom-Mix der Länder im Jahresmittel hatte.

<sup>2</sup> China hatte im 5-Jahresplan für 2020 ein Photovoltaik-Ziel von 105 GW formuliert, das bereits Mitte 2017 überschritten wurde. 2018 wurde ein erhöhtes Ausbauziel von 210 bis 270 GW diskutiert, s. <https://www.pv-magazine.com/2018/11/05/china-may-raise-2020-solar-target-to-over-200-gw/>

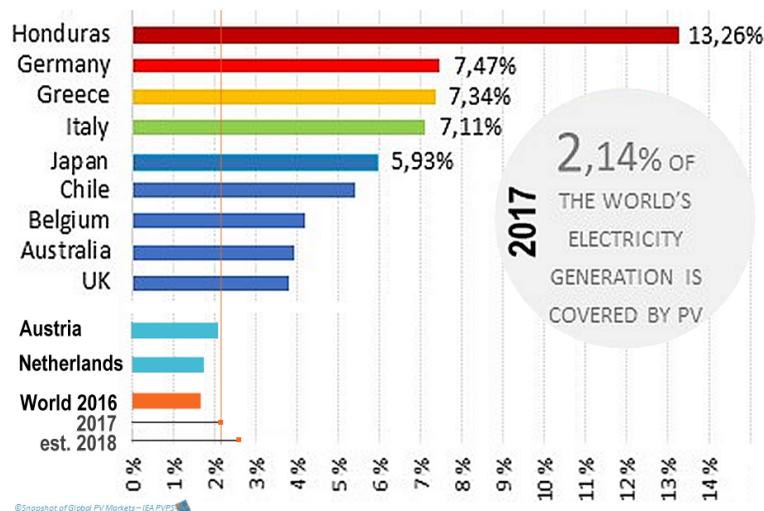


Abb. 2: Anteil der Photovoltaik im elektrischen Energiemix der Länder 2017. IEA-PVPS Task 1, [54], ergänzt um 2017 Daten aus Österreich und den Niederlanden [4].

Nach dem REN21 Statusreport 2018 hatten 57 Länder [36] das Ziel die Stromaufbringung zu 100% durch erneuerbare Energie zu decken, und 17 Länder deckten bereits mehr als 90% aus Erneuerbaren. Im Herbst 2018 wurde für Österreich das Ziel von 100% erneuerbarem Strom für 2030 formuliert [55], bei dem – je nach Szenario etwa 11 bis 13 TWh jährlicher Erzeugung aus Photovoltaik, bzw. bis zu 15 GWp an Photovoltaik in Österreich erforderlich sind, um bilanziell 100% erneuerbaren Strom bereitzustellen [43], [56], [57], [58]. Zwölf TWh Produktion 2030 durch Photovoltaik entsprechen dann etwa einem 15% Anteil an der Stromaufbringung, das heißt dass bis 2030 etwa acht Mal so viel Photovoltaik installiert werden muss, wie derzeit in Österreich besteht.

Um diese ambitionierten Ziele erreichen zu können, sind einerseits geeignete Rahmenbedingungen zu schaffen, um diese Ausbauziele erreichen zu können, andererseits muss dieser wesentliche Anteil an der Stromaufbringung auch langfristig mit hoher Zuverlässigkeit und geringen Wartungskosten funktionieren. Auch aus Sicht der CO<sub>2</sub>-Bilanz in der Stromaufbringung ist es wesentlich, dass Photovoltaikanlagen effizient gefertigt werden und zuverlässig über einen möglichst langen Zeitraum bei niedrigen Degradationsraten in Betrieb bleiben können.

## 2.2. Ausgangssituation und Motivation

Die Internationale Energieagentur (IEA<sup>3</sup>), wurde von 16 Industrienationen als Kooperationsplattform zu Energietechnologien im Zuge der Ölkrise gegründet, und ist seit 1974 eine autonome Einheit der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD. Seit 1993 gibt es das IEA Photovoltaic Power Systems Programme Implementing Agreement (IA) - heute IEA Technology Cooperation Programme<sup>4</sup> - als eines der gemeinschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsprojekte der Internationalen Energieagentur. Ziel des IEA PVPS Programms ist die Beschleunigung der Entwicklung und Anwendung der Photovoltaik (PV) als maßgebliche und nachhaltige erneuerbare Energiequelle [29], [5].

<sup>3</sup> Siehe auch: [www.iea.org](http://www.iea.org)

<sup>4</sup> 2015 wurden die Aktivitäten der IEA neu ausgerichtet und strukturiert. Die „Implementing Agreements“ werden seitdem als „Technology Cooperation Programmes, TCPs“ bezeichnet, siehe [www.iea.org/tcp](http://www.iea.org/tcp).

Die Arbeit im IEA PVPS Technologie-Kooperationsprogramm ist in sogenannte Tasks gegliedert, siehe dazu die internationale Webseite <http://iea-pvps.org/index.php?id=4> und **Tabelle 1**, an denen zurzeit 29 Mitgliedsstaaten mitarbeiten. Unterschiedliche österreichische Akteure sind in den Tasks 1 und 12 bis 17 aktiv.

**Tabelle 1: Im Photovoltaic Power Systems Technologie-Kooperationsprogramm der Internationalen Energieagentur (IEA-PVPS TCP) aktive Tasks (Stand 2018).**

|                |                                                                                               |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Task 1         | Strategische Photovoltaik-Analyse & Übersicht                                                 |
| Task 8         | Sehr große Photovoltaikanlagen in abgelegenen Gebieten                                        |
| Task 9         | Einsatz von Photovoltaik in der Regionalentwicklung                                           |
| Task 12        | Umweltaspekte der Photovoltaik                                                                |
| <b>Task 13</b> | <b>Leistungsfähigkeit, (Betrieb<sup>5</sup>) und Zuverlässigkeit von Photovoltaiksystemen</b> |
| Task 14        | Hohe Dichte von Photovoltaiksystemen in elektrischen Netzwerken                               |
| Task 15        | Rahmenbedingungen für Förderung und Entwicklung gebäudeintegrierter Photovoltaik              |
| Task 16        | Solare Ressource für Anwendungen mit hoher Durchdringung und großem Umfang                    |
| Task 17        | Photovoltaik für Transport                                                                    |

Der **internationale Task 13**, der die Inhalte des abgeschlossenen Tasks 2 weiterführt, startete nach einer zweijährigen Vorbereitungszeit im Mai 2010 mit einer Laufzeit von vier Jahren. Aufgrund des außerordentlichen Erfolges - sehr große positive Resonanz auf die bei Konferenzen, öffentlichen Side-Events der Task Meetings präsentierten Inhalte, und die auf der Webseite <http://iea-pvps.org/> gratis verfügbaren, im Task erarbeiteten Review-Reports - wurde der Task 13 um weitere 3 Jahre – bis Ende September 2017 verlängert. Derzeit arbeiten 41 Partnerinstitutionen aus 21 Ländern im Task 13 mit. Zu den schon zu Anfang bearbeiteten Inhalten kamen noch die wirtschaftlichen Aspekte der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Photovoltaik-Anlagen hinzu. Dieser Ergebnisbericht fasst die Ergebnisse dieser Zusammenarbeit zusammen. Bereits in dieser Laufzeit wurde begonnen einen Arbeitsplan für die erneute Verlängerung um weitere drei Jahre, von 2018 – 2021 zu erarbeiten. Ein Ausblick informiert auch darüber, welche Inhalte in der nächsten Arbeitsperiode bearbeitet werden sollen.

### 2.3. Stand der Technik und Marktentwicklung

Der photovoltaische Effekt, die direkte Konversion von Licht in elektrische Energie wurde bereits 1839 von E.A. Bequerel entdeckt. Die erste praktikable Photovoltaikzelle, die auf dem Halbleitermaterial Silizium basierte, wurde 1954 in den Bell Laboratories entwickelt und hatte einen Wirkungsgrad von ca. 6% [38]. Die Abb. 3 gibt einen Überblick wie sich die Technologie und die Wirkungsgrade der Zellen und Module weiterentwickelten. Einkristalline Zellen auf Siliziumbasis erreichen nun bis zu 26% Wirkungsgrad, eine Tandemzelle mit Perowskit auf kristallinem Silizium erreichte Ende 2018 einen Wirkungsgrad von 28%<sup>6</sup>. Die besten Mehrschichtzellen unter hochkonzentriertem Sonnenlicht haben 46% Wirkungsgrad, deren praktische Anwendung ist aber auf Gebiete mit sehr hohem Anteil direkter

<sup>5</sup> Im aktuellen Arbeitsprogramm 2018 – 2021 ist im (neuen) Titel des Task 13 auch der Betrieb explizit genannt.

<sup>6</sup> Oxford PV, 2018-12: <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pv-perovskite-solar-cell-achieves-28-efficiency>

Solarstrahlung beschränkt und hat den Nachteil, dass eine mechanische Nachführung erforderlich ist, um bei wechselndem Sonnenstand das Licht stets auf die Zelle(n) zu konzentrieren.

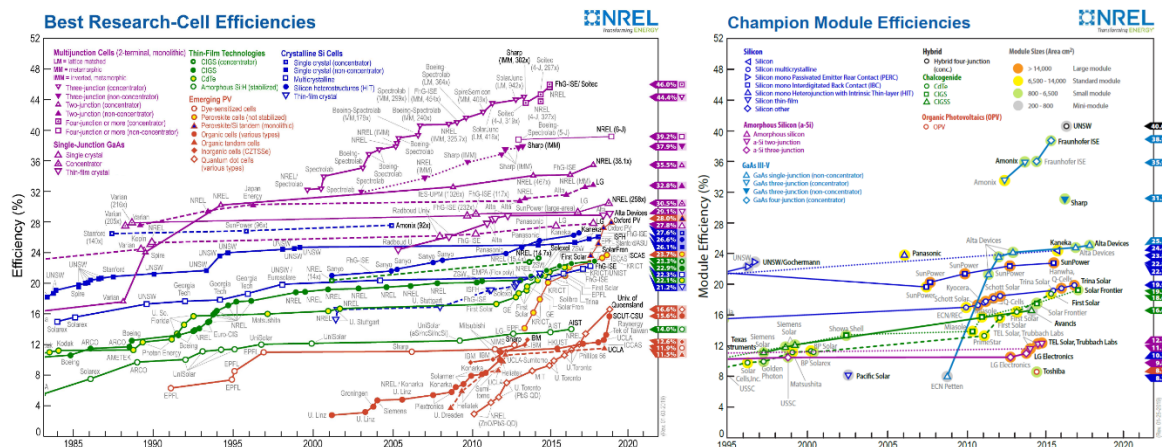


Abb. 3: Entwicklung der Wirkungsgrade von Photovoltaik Zellen (links) und PV-Modulen (rechts) aus [39].

Da die elektrische Spannung einer einzelnen Photovoltaikzelle unter 1 Volt liegt, die Stromstärke aber mehrere Ampere beträgt, werden die Zellen in Reihe verschaltet. Diese Stränge werden zwischen Front- und Rückseitenmaterialien (Glas und/oder Kunststoffe) in elastische, transparente Materialien eingebettet um mechanischen und Witterungsschutz zu bieten, und besser handhabbare größere Einheiten zu erzielen. Kommerzielle (flache) Photovoltaikmodule auf Siliziumbasis haben heute Wirkungsgrade um 20% (die besten 24%), Exoten z.B. mit Mehrschichtzellen auf GaAs-Basis 31%.

Die Anwendung der Photovoltaik erfolgte - aufgrund anfangs sehr hoher Kosten - zuerst in Nischen, wo andere Energietechnologien schwer eingesetzt werden konnten und keine Anbindung an die Elektrizitätsversorgung gegeben war, wie z.B. in der Weltraumtechnologie, für Seezeichen (Funk- und Leuchtfeuer), für die Telekommunikation und Schutzhütten im alpinen Bereich, s. z.B. [59]. Einander bedingende Technologie- und Marktentwicklung führte zu einer beispiellosen, stetigen Kostendegression.

Die Transformation des PV-Marktes von anfänglichen Nischenmärkten zu einem globalen Markt erfordert verfügbare und belastbare Daten in Hinblick auf die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen, Auslegungsrichtlinien, Planungsmethoden und Finanzierung. Nur dadurch kann auch langfristig sichergestellt werden, dass Photovoltaik weiterhin eine stark zunehmende Rolle in der Energieversorgung durch hohe und stabile Wachstumsraten erzielen kann, siehe Abb. 4.

Ziel der Aktivitäten von IEA Task 13 „Performance and Reliability of PV Systems“ ist die Stärkung der internationalen Zusammenarbeit zur Verbesserung des Betriebs und der Zuverlässigkeit von PV-Anlagen, um in Folge den elektrischen wie wirtschaftlichen Ertrag von Anlagen zu erhöhen. Dazu wurde eine Plattform zum Austausch von Erfahrungen zur Qualität von PV-Anlagen und ihren Komponenten aufgebaut, die einerseits ein Forum für unabhängige, internationale Analysen und Empfehlungen durch Experten zur Qualität und Performance von PV-Anlagen und –Komponenten dient und gleichermaßen zur Verbreitung des Wissens unter den MarktteilnehmerInnen beiträgt. Die Arbeit ist in drei inhaltliche Subtasks und einen weiteren zur Dissemination der Ergebnisse gegliedert, [5], [47]. Wie wichtig die breite, länderübergreifende Zusammenarbeit im IEA PVPS TCP und speziell im Task 13 ist, zeigt auch die regionale Entwicklung des Photovoltaik Markts, Abb. 4 und [29].

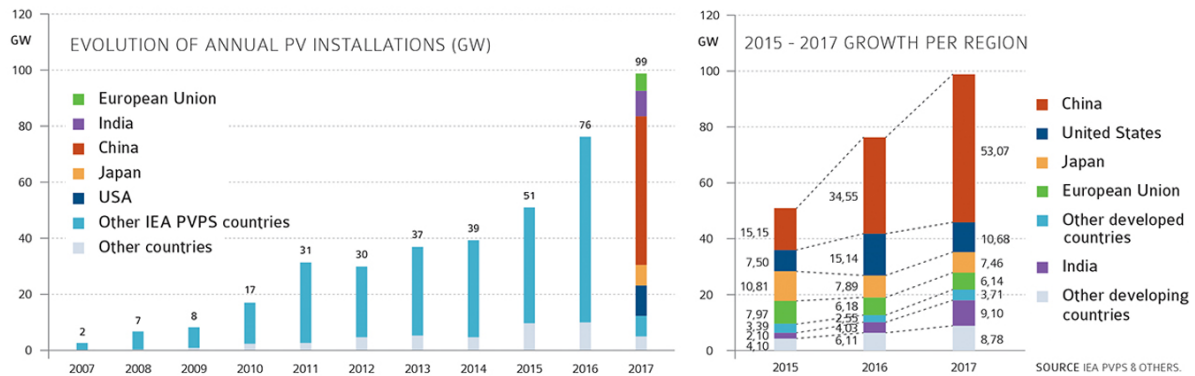


Abb. 4: Jährliche PV-installationen und regionale Verteilung 2015-2017. [29].

Während längere Zeit der Europäische Markt dominierte, hat sowohl die installierte Erzeugungskapazität als auch die Produktion in Asien stark an Marktanteilen gewonnen. Dennoch sind nach wie vor Europäische und im speziellen auch österreichische Unternehmen im globalisierten Markt als Produzenten und Zulieferer von Materialien und Komponenten sowie als Betreiber von und als Investoren in Photovoltaikanlagen tätig. Selbst wenn Teile der Produktion aus Europa verlegt wurden, wird Forschung und Entwicklung nach wie vor auch in Europa fortgeführt,[44]. Auch im europäischen Kontext ist die Photovoltaik für den Umbau zum nachhaltigen Energiesystem unverzichtbar [29], [42]. Indem sich die Photovoltaik als eine wertvolle Ressource erneuerbarer Energie erweist, können durch global anhaltend hohe Wachstumsraten [36], [29] und [40] deutliche Kostendegressionseffekte erzielt werden.

Im Mittel bedeutete eine Verdoppelung des Marktvolumens eine Kostendegression von 20%, das heißt, dass bei den gegebenen Wachstumsraten die Kosten in drei bis vier Jahren halbiert werden. In Abb. 5 ist der weltweite Trend der Modulpreise sowie die Aufteilung der Anlagen-Preise dargestellt.

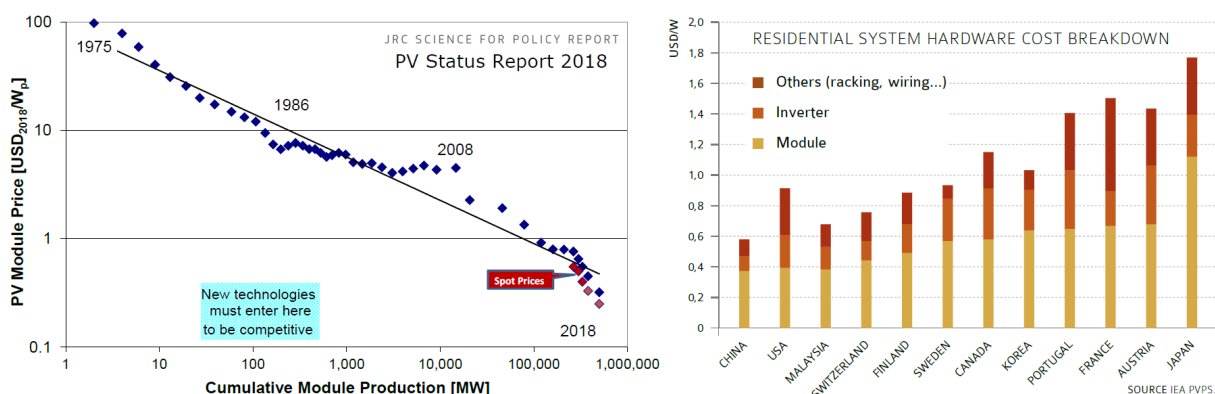


Abb. 5: Links: Preisentwicklung (Lernkurve) für den Weltmarktpreis von PV-Modulen [37]. Rechts: Kosten für Haus-PV-anlagen einiger Länder [29].

Die massiven Kostensenkungen kommen einerseits durch rationellere und effizientere Massenproduktion zustande, sind aber auch ein Mittel um Mitbewerber vom Markt zu verdrängen. Die effizientere Produktion bedeutet auch einen sinkenden Energieeinsatz in der Produktion, womit die energetischen Amortisationsraten von PV-Anlagen ebenfalls drastisch gesunken sind und auch nur mehr wenige Jahre betragen, während die Anlagen tatsächlich eine Betriebsdauer von Jahrzehnten erreichen.

Natürlich ist die wirtschaftliche und energetische Amortisationszeit umso kürzer, wenn die Produktion möglichst ressourcenschonend erfolgt, die Degradationsraten der Anlagen möglichst niedrig und die Lebensdauer möglichst lang ist. Massive Kostensenkungen bedeuten aber auch einen erheblichen Kostendruck auf alle Marktteilnehmer und dass bestehende Produktionsanlagen rasch veraltet sind. In diesem Umfeld ist es notwendig, aber auch schwierig, qualitativ hochwertige Produkte am Markt durchzusetzen - das billigere Produkt ist oft der Feind des besseren. Daher sind qualitätssichernde Maßnahmen in der gesamten Wertschöpfungskette von den Materialien von PV-Komponenten bis hin zu Planung, Errichtung, Wartung und Betrieb kompletter Anlagen wichtig und gewinnen weiterhin an Bedeutung.

## 2.4. Vorarbeiten zur Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen und Komponenten

Im Vergleich zu anderen Energietechnologien hängt die Photovoltaik von der zwar praktisch unerschöpflichen, aber fluktuierenden Energiequelle der solaren Einstrahlung ab. Große Teile der PV-Anlagen sind ständig den wechselnden Klima- und Wetterbedingungen ausgesetzt. Es ist daher nicht trivial, Komponenten geeignet auszuwählen und Systeme so zu konfigurieren, dass

- (a) möglichst effizient, ressourcenschonend und langfristig gute Erträge erwirtschaftet werden können, und
- (b) unter wechselnden Betriebsbedingungen festgestellt werden kann, ob eine PV-Anlage bestmöglich arbeitet oder Fehler vorliegen.

Die Abb. 6 gibt zwei Beispiele von PV-Anlagen, mit sehr unterschiedlichen Dimensionen und Anforderungen. Dennoch ist in beiden Fällen hohe Qualität und Zuverlässigkeit unverzichtbar um die angestrebten ökologischen und ökonomischen Ziele zu erreichen.



Z.B. Gebäudeintegrierte Anlage (BiPV): Kunden- und projektspezifisch gefertigte Fassadenelemente (Sol4-Gebäude, Mödling, © AIT).



Z.B. Großkraftwerk mit 20 MWp<sup>7</sup> (© AIT) in Südosteuropa. Freifeld-Anlage, 40 Zentralwechselrichter, die paarweise über einen Blocktransformator ins Mittelspannungsnetz einspeisen.

*Abb. 6: Anwendungen von Photovoltaik - Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit: Sowohl bei gebäudeintegrierter Photovoltaik (links) als auch bei Großanlagen (rechts) werden hohe Anforderungen an Ertrag, Leistungsfähigkeit und Sicherheit gestellt.*

<sup>7</sup> MWp (Megawatt Peak) bezeichnet die Nennleistung der PV-Module bei Standardtestbedingungen: Modultemperatur 25°C, 1000 W/m<sup>2</sup> senkrechte Einstrahlung auf die Moduloberfläche mit solarer spektraler Intensitätsverteilung AM1.5 (Air Mass 1.5). 1 MW = 1 000 kW = 1 000 000 W.

Bei einer gebäudeintegrierten Photovoltaik (linkes Bild) ist es essentiell, dass die Anlage ihren - vor der Errichtung - prognostizierten Ertrag bringt, um die erwarteten Effekte im Gesamtenergiekonzept des Gebäudes tatsächlich zu realisieren. Zusätzliche baurechtliche Anforderungen sind über die Lebensdauer (+40 Jahre) zu erfüllen. Die Alterung der PV-Elemente hat auch so zu erfolgen, dass das optische Erscheinungsbild nicht beeinträchtigt wird, und langfristig Standsicherheit, Brandschutz, etc. gewährleistet sind. Eine typische Herstellergarantie für Photovoltaikmodule umfasst 25 Jahre, allerdings wird nach drei Jahren nur finanzielle Abgeltung von Ertragsausfällen und kein Produktersatz gewährt. Wenn ein Modul getauscht werden müsste ist es schwierig später Module zu beschaffen, die exakt das gleiche Erscheinungsbild haben, da sich die Zelltechnologie weiterentwickelt. Reservehaltung von Modulen ist teuer, mitunter sind bei einem Gebäude mehrere unterschiedliche Modultypen mit unterschiedlichen Abmessungen eingesetzt.

Bei Großanlagen (Utility Scale PV, rechtes Bild) basiert die Kalkulation des zu erwartenden finanziellen Ertrags auf Annahmen, welche Erträge an diesem Standort erwirtschaftet werden können (Ertragsgutachten, Einspeisebedingungen und Vergütung), welcher Alterung die Gesamtanlage unterliegt, welche Betriebs- und Wartungskosten anfallen werden, etc. Fehler die sich auf Sicherheit und/oder Ertrag auswirken, müssen rasch erkannt und behoben werden um, finanzielle Verluste im Schadensfall zu minimieren. Wären bei einer 20MWp-Anlage etwa 1.25 Promille der Module fehlerhaft - gilt es die 100 schlechten aus 80 000 installierten Modulen, die 5 Millionen PV-Zellen einer Fläche von ca. 12 Hektar enthalten zu finden. Risiken können durch geeignete Versicherungen abgedeckt werden (Risk Mitigation), aber das erfordert auch eine möglichst realistische Einschätzung der tatsächlichen Risiken und ein gutes Qualitätsmanagement über die gesamte Wertschöpfungskette von der Produktion der Komponenten, über Transport, Errichtung und Inbetriebsetzung, bis hin zu Betrieb und Wartung der Anlage [45].

Die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen und ihrer Komponenten war von Anfang an ein wesentliches Thema, das die gesamte Photovoltaikentwicklung begleitet, denn schon die ersten Nischenanwendungen waren überhaupt nur bei hoher Zuverlässigkeit und ausreichenden Erträgen sinnvoll zu realisieren. Auch im IEA PVPS Programm war diese Thematik von Anfang an als Task 2 „Performance, Reliability and Analysis of Photovoltaic Systems“ vertreten. Diese Untersuchungen werden im Task 13 fortgeführt und vertieft. Dazu wurden in der ersten Arbeitsperiode des Task 13 vier Reports, [IEA-PVPS T13-01](#) bis [IEA-PVPS T13-03](#) und [IEA-PVPS T13-05](#) veröffentlicht, siehe dazu die Zusammenstellung auf Seite 36.

Die anhaltend hohe bzw. noch gesteigerte Aktualität der Untersuchungen ergibt sich einerseits durch die Vielzahl an Änderungen im Produktionsprozess, der von einer Labor- und Kleinserienproduktion zu einem Weltmarkt, der eine installierte Leistung mehrerer hundert Gigawatt umfasst (Größenordnung 1000 km<sup>2</sup> Photovoltaik Modulfläche<sup>8</sup>) und jährlich mehrere 10 Milliarden Euro umsetzt, herangewachsen ist. Andererseits erfolgte das Wachstum des Photovoltaik Massenmarkts längere Zeit überwiegend in Ländern mit gemäßigten Klimabedingungen (wie z.B. Zentraleuropa), während sich nun der Schwerpunkt nach Asien verlagerte, wo auch subtropische und tropische Klimabedingungen (heiß und feucht) bedeutsam sind. Aufstrebende Märkte liegen auch in Regionen die durch sehr hohe Solarstrahlung und Wüstenklima (heiß und trocken) gekennzeichnet sind.

Die Ergebnisse früherer Langzeit-Untersuchungen sind zwar unverzichtbar, aber nur bedingt geeignet um in diesem geänderten Umfeld zuverlässige Prognosen zu erstellen, wie sich Erträge und Kosten

---

<sup>8</sup> Bei einem Systemwirkungsgrad von 20% ist eine Modulfläche von 5 m<sup>2</sup> je kW Nennleistung erforderlich. Eine Leistung von 1 GW<sub>p</sub> entspricht daher einer Modulfläche von 5 km<sup>2</sup>. 1 GW = 1 000 MW.

heutiger Anlagen in Zukunft entwickeln werden. Im Task 12, der u.a. den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Photovoltaik thematisiert, wurde ein online-Tool<sup>9</sup> entwickelt, das eine Abschätzung des CO<sub>2</sub> Äquivalents ermöglicht[41], siehe Abb. 7 und Abb. 8.

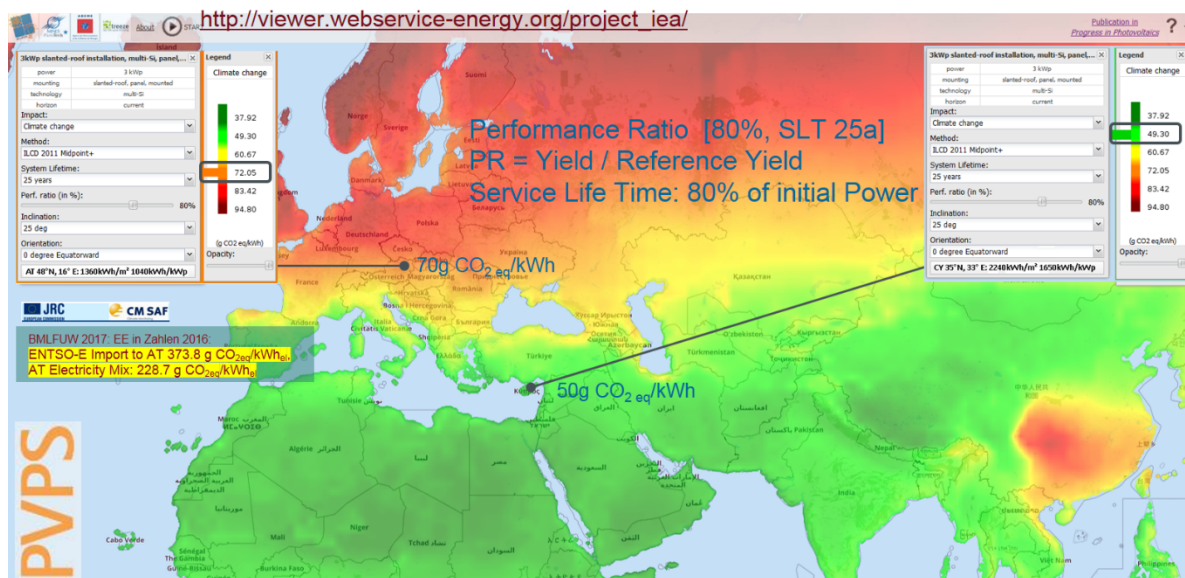


Abb. 7: Anwendung des IEA-PVPS Task 12 online-Tools: Vergleich von kleinen Aufdach-Anlagen in Wien und Nicosia: Annahme aktueller europäischer Strom-Mix in der Produktion, 25 Jahre Nutzungsdauer, PR = 80%. Aus [22].

Das CO<sub>2</sub> Äquivalent wird maßgeblich von der Art der Energiebereitstellung in der Produktion (z.B. erdölbasierte Kunststoffe, stromintensive Zell- und Modulrahmenproduktion) und dem Energieertrag über die Lebensdauer bestimmt. Zum Vergleich: 1 kWh Kohlestrom bedingt ca. 1 000g CO<sub>2</sub> Äquivalent.

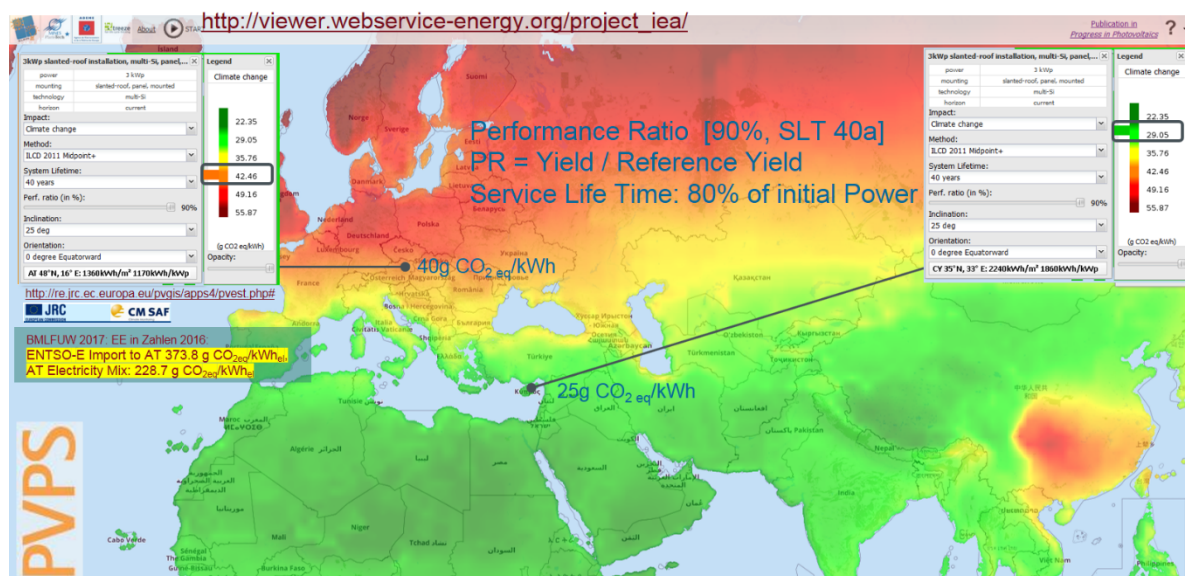


Abb. 8: Anwendung des IEA-PVPS Task 12 online-Tools: Vergleich von kleinen Aufdach-Anlagen in Wien und Nicosia: Annahme aktueller europäischer Strom-Mix in der Produktion, 40 Jahre Nutzungsdauer, PR = 90%. Aus [22].

Wenn z.B. eine kleine Photovoltaik-Aufdachanlage aus europäischer Produktion in Wien oder Nicosia installiert wird, ergibt sich ein CO<sub>2</sub> Äquivalent von 70 g bzw 50 g je von den Anlagen erzeugter

<sup>9</sup> [http://viewer.webservice-energy.org/project\\_iea/](http://viewer.webservice-energy.org/project_iea/)

Kilowattstunde, siehe Abb. 7, wenn von gleicher Performance Ratio  $PR^{10}$  von 80% und Lebensdauer<sup>11</sup> von 25 Jahren ausgegangen wird. Lässt sich dagegen eine  $PR$  von 90% bei einer Lebensdauer von 40 Jahren erreichen, so hätte so eine Anlage in Österreich mit 40 g CO<sub>2</sub> Äq./kWh einen niedrigeren Fußabdruck wie eine durchschnittliche Anlage in Nicosia, obwohl dort die solare Einstrahlung doppelt so hoch ist wie in Wien, siehe Abb. 8. Es ist zudem so, dass Degradationsprozesse oft etwa linear von der Dosis (z.B. der UV-Einstrahlung) und etwa exponentiell von der inversen (Betriebs-)Temperatur<sup>12</sup> abhängen. In diesem Fall könnte die Lebensdauer, und damit auch der Ertrag über die Lebensdauer im gemäßigten Klima auch höher sein, als in Gebieten mit sehr hoher solarer Ressource. Die Betriebstemperatur ist einerseits von den klimatischen Bedingungen des Standorts, aber auch entscheidend von den lokalen Betriebsbedingungen (Mikroklima) beeinflusst, und Materialwahl und Qualität in Fertigung, Transport und bei der Installation haben entscheidenden Einfluss auf die tatsächliche Lebensdauer von Photovoltaikanlagen. Die Zusammenarbeit im Task 13 „Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems“, liefert Informationen und gibt Einsicht in das komplexe Wechselspiel von Zuverlässigkeit, Betrieb und Langzeitstabilität von PV-Systemen.

## 2.5. Aufbau des Ergebnisberichts zum IEA PVPS Task 13

Die Gliederung des Ergebnisberichts liefert Hintergrundinformationen zu den Inhalten des Task 13, in der abgelaufenen Arbeitsperiode, stellt die Ergebnisse entsprechend der Taskstruktur zusammen, liefert Informationen was in Zukunft noch an Informationen erarbeitet werden soll, aber auch wie dieses Wissen zu den österreichischen Marktteilnehmern disseminiert wird und wie Informationen aus Österreich in die internationale Task-Arbeit einfließen:

Nach den Kurzfassungen im 1. Kapitel bietet das 2. Kapitel eine Einleitung mit einer allgemeinen Einführung in die Situation der nicht nachhaltigen Energieaufbringung und der daraus resultierenden Motivation zum verstärkten Einsatz der Photovoltaik und zur IEA PVPS Kollaboration. Aus dem Stand der Technik und aufgrund der Marktentwicklung resultiert die dringende Notwendigkeit, die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Photovoltaikanlagen zu untersuchen und zu verbessern. Der IEA PVPS Task 13 kann dazu wesentlich beitragen, weil die etablierte, intensive Zusammenarbeit von Institutionen und Personen weite Bereiche der Photovoltaik-Wertschöpfungskette (Forschung, Konsulenten und Industriepartner von der Komponentenentwicklung bis zur Betriebsführung von PV Anlagen) beinhaltet, und auch durch seine regionale Vielschichtigkeit die wesentlichen Märkte wie Europa, Asien und Ozeanien und die USA repräsentiert.

---

<sup>10</sup> Die Performance Ratio  $PR$  ist das Verhältnis von spezifischem Ertrag (kWh / kW<sub>p</sub> bei STC) zum Referenzertrag, der sich aus der Einstrahlung in Modulebene im Verhältnis zur Einstrahlung bei STC ergibt (kWh/m<sup>2</sup> / 1kW/m<sup>2</sup>). Der  $PR$ -Wert ist somit das Verhältnis der Erzeugung in Volllaststunden zu den Volllastsonnenstunden über einen bestimmten Zeitraum (z.B. über ein Jahr). Zu den Standardtestbedingungen, STC siehe Fußnote 7.

<sup>11</sup> Meist wird als technische Lebensdauer jener Zeitraum definiert, bei dem die Anlage mindestens 80% ihres Anfangsertrags liefert.

<sup>12</sup> Reaktionskinetik nach Arrhenius, mit der Reaktionsgeschwindigkeit  $k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}$ . Dabei ist  $R$  die universelle Gaskonstante 8.314 J/mol·K (86 meV),  $E_a$  die Aktivierungsenergie, typischerweise im für Polymermaterialien im Bereich von 50 ... 150 J/mol·K (0.5 ... 1.5 eV), und  $T$  die absolute Temperatur in K. Wäre z.B. die Aktivierungsenergie für einen bestimmten Prozess 65 kJ/mol·K und die gewichtete mittlere Temperatur in einem Fall 50°C, im anderen 60°C so läuft die Reaktion bei 60°C doppelt so schnell ab wie bei 50°C, das Verhältnis der Reaktionsgeschwindigkeiten, bzw. der Beschleunigungsfaktor  $a_T = e^{-\frac{E_a}{R}(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})}$  ist dann gleich 2.

Im 3. Kapitel werden Hintergrundinformationen zum Task 13, seiner Struktur, Organisation und Methodik aufbereitet. Dabei wird auch auf die spezifische Rolle der österreichischen Projektpartner im Task und deren Projektziele eingegangen. Das 4. Kapitel zeigt auf, wie weit diese geplanten Ziele in der internationalen und nationalen Zusammenarbeit erreicht wurden, welche Projektergebnisse bereits vorliegen und welche weiteren geplant sind.

Im 5. Kapitel wird dargestellt, welchen Nutzen die Mitarbeit im Task 13 im Rahmen der IEA Beteiligung für die österreichische Zielgruppe hat, und wie Informationen österreichischer Stakeholder den internationalen Task unterstützen, und andererseits diese von der Beteiligung im Task profitieren. Abschließend wird in Kapitel 6 dargestellt, wie das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiterarbeitet und dass eine Fortführung geplant ist. Im Kapitel 8 sind Verzeichnisse zu Inhalt, Abbildungen und Tabellen sowie Links zu den erarbeiteten Ergebnissen auf der internationalen Webseite zusammengestellt

### 3. Hintergrundinformation zum Projekteinhalt

#### 3.1. Kooperationsprojekt IEA PVPS Task 13 - Beteiligung und Gliederung

Der IEA-PVPS Task 13 zur Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Photovoltaik ist in die Aktivitäten des Photovoltaic Power Systems Programme, eines der Implementing Agreements der Internationalen Energieagentur, eingebettet. Im PVPS Programm sind 29 Mitglieder aktiv, die Länder Australien, Österreich, Belgien, Kanada, China, Dänemark, Finnland, Frankreich, Deutschland, Israel, Italien, Japan, Korea, Malaysien, Mexico, die Niederlande, Norwegen, Portugal, Spanien, Schweden, Schweiz, Thailand, Türkei und die Vereinigten Staaten, sowie die fünf Organisationen EPIA/Solar Power Europe, die Europäische Union, die Internationale Copper Association, SEIA (Solar Electric Power Association) und SEPA (Solar Energy Industries Association). Eine Aufstellung der derzeit im PVPS aktiven Tasks ist in **Tabelle 1** (siehe Seite 8) zusammengestellt. Siehe dazu auch die internationale Webseite des Programmes, <http://iea-pvps.org/index.php?id=4>.

#### Teilnehmende Partnerländer und Organisationen im IEA PVPS Task 13

Dabei arbeiten ExpertInnen aus vielen Ländern (21) und Organisationen (42 nationale und 2 internationale Organisationen) zusammen:

- *Australien* (Ekistica, Desert Knowledge Precinct; The University of New South Wales; Murdoch University)
- *Österreich* (AIT; PCCL; OFI<sup>13</sup>)
- *Belgien* (Laborelec; 3E nv/sa; Tractebel – Engie; IMEC)
- *Canada* (Canmet)
- *Chile* (AtaMoS-TeC; Univ. Antofagasta)
- *China* (Chinese Academy of Science)

---

<sup>13</sup> OFI Technologie & Innovation GmbH, Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik (OFI), ist in vielen nationalen und internationalen Projekten Partner der beiden österreichischen Vertreter im Task 13, dem PCCL und AIT, und beabsichtigt sich ebenfalls im nationalen und internationalen Konsortium des Task 13 im laufenden internationalen Arbeitsprogramm 2018 – 2021 einzubringen.

- *Dänemark* (Silicon & PV Consulting)
- *Finnland* (Fortum Corp.; Turku University of Applied Sciences)
- *Frankreich* (Electricité de France R&D)
- *Deutschland* (TÜV Rheinland Energy GmbH (Task-Leitung) und Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (stellvertretende Task-Leitung); Institut für Solarenergieforschung Hameln; LSPV Consulting)
- *Israel* (M.G.Lightning Electrical Engineering)
- *Italien* (EURAC; GSE S.p.A.; IMT Lucca; RSE S.p.A.)
- *Japan* (AIST; NEDO)
- *Marokko* (IRESEN)
- *Die Niederlande* (Utrecht Universität, Copernicus Institute)
- *Südafrika* (CSIR)
- *Spanien* (DNV GL; CENER)
- *Schweden* (Paradisenergi AB; PPAM Solkraft; RISE; Univ. Mälardalen; Emulsionen Ekonomisk Forening)
- *Schweiz* (ISAAC – SUPSI; ZAHW)
- *Thailand* (CSSC)
- *Vereinigte Staaten von Amerika* (SDLE, Case Western Reserve University; Sandia National Laboratories)
- sowie die *länderübergreifenden Organisationen* Solarpower Europe und die Internationale Copper Association.

Siehe dazu auch die Liste unter <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=61>.

### **Subtask-Struktur des IEA PVPS Task 13**

Der Task 13 „Performance and Reliability of Photovoltaic Systems“ bearbeitet in 4 Subtasks die Fragestellungen und Methoden der Qualitätssicherung bei PV-Systemen, und disseminiert diese Ergebnisse.

Es werden in den drei inhaltlichen Subtasks die entsprechenden Methoden vorgestellt und verfeinert, Best Practice Beispiele gegeben (ST 1), und Instrumente entwickelt, um international vergleichbar Daten zu Leistungsfähigkeit und Ertrag von Photovoltaik-Anlagen zu erheben (ST 2). Reale, qualitativ hochwertige Daten zum Betrieb von Photovoltaik in unterschiedlichen Betriebs- und Klimabedingungen und die unvermeidlichen Mess- und Modellierungsunsicherheiten sind ebenfalls wichtige Bausteine zum Gesamtverständnis (ST 3, 3.1).

Die im Task 13 entwickelten Richtlinien zum Einsatz von bildgebenden Verfahren wie Elektrolumineszenz und Infrarotthermografie (ST 3, 3.3), entsprechende Bewertungskriterien und Fehlerkataloge haben auch Eingang in die internationale Normung (IEC TC82 - Photovoltaik, Working Group 2: Module, Working Group 3 - Systeme) gefunden: neue technische Spezifikationen für den Einsatz dieser Verfahren [66] u. [67], basieren in wesentlichen Teilen auf in der Task 13 Kooperation

erarbeiteten Inhalten und Berichten. Ein umfangreicher Review Report (ST 3, 3.4) vertieft die Informationen zu Fehlern von PV Modulen des IEA-PVPS T13-01 Reports<sup>14</sup>. In **Tabelle 2** sind die vier Task 13 Subtasks, ihre Gliederung und die Titel und der Link zu den erarbeiteten Reports der 1. Verlängerung des Task 13 zusammengestellt. Da die erarbeiteten Reports in der Reihenfolge ihrer Freigabe auf der IEA-PVPS Task 13 Homepage nummeriert wurden, folgt deren Nummerierung nicht der Reihung der Subtasks.

**Tabelle 2: Subtask-Struktur des IEA PVPS Task 13 zur Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von PV Systemen [1].**

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Subtask 1 | <u>Economics of PV System Performance and Reliability</u><br>1.1: Overview of Current Practices in the Technical Assumptions in Financial Models &<br>1.2 Review and Assessment of Technical Assumptions in Financial Models<br><u>IEA-PVPS T13-08:2018</u> <i>Technical Assumptions Used in PV Financial Models</i> , 101 p.<br><a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=426">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=426</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Subtask 2 | <u>System Performance and Analysis</u><br>2.1: Field Performance Analysis using two complementary approaches &<br>2.2: Specific Data Evaluations<br><u>IEA-PVPS T13-07:2017</u> <i>Improving Efficiency of PV Systems Using Statistical Performance Monitoring</i> , 57 p.<br><a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=427">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=427</a><br>2.3: Uncertainty Framework for Data Acquisition and Modeling<br><u>IEA-PVPS T13-12:2018</u> <i>Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments</i> , 74 p.<br><a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=477">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=477</a><br>2.4: PV Performance Modelling Collaborative<br><u>IEA-PVPS T13-06:2017</u> <i>PV Performance Modeling Methods and Practices</i> , 98 p.<br><a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=423">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=423</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Subtask 3 | <u>Module Characterisation and Reliability</u><br>3.1: Power Rating, Uncertainties and Propagation into Modelling<br><u>IEA-PVPS T13-12:2018</u> <i>Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments</i> , 74 p.<br><a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=477">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=477</a><br>3.2: Module energy yield data from test fields in different climates<br><u>IEA-PVPS T13-11:2018</u> <i>Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice</i> , 134 p. <a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=493">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=493</a><br>3.3: Characterization of PV Module Condition in the Field - Guidelines on IR and EL in the Field<br><u>IEA-PVPS T13-10:2018</u> <i>Review on IR and EL Imaging for PV Field Applications</i> , 99 p.<br><a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=480">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=480</a><br>3.4: Assessment of PV Module Failures of the Field<br><u>IEA-PVPS T13-09:2018</u> <i>Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field</i> , 120 p.<br><a href="http://www.iea-pvps.org/index.php?id=435">http://www.iea-pvps.org/index.php?id=435</a> |
| Subtask 4 | <u>Dissemination</u><br>4.1: Information Material<br>4.2: Workshops                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

### 3.2. Ziele, Schwerpunkte der österreichischen Beteiligung und Kooperation

Ziel der Aktivitäten von IEA Task 13 ‚Performance and Reliability of PV Systems‘ ist die Stärkung der internationalen Zusammenarbeit zur Verbesserung des Betriebs und der Zuverlässigkeit von PV-

<sup>14</sup> Reports der 1. Phase der Task 13 Zusammenarbeit und Links zum Download siehe Verzeichnis auf Seite 35.

Anlagen, um in Folge den elektrischen wie wirtschaftlichen Ertrag von Anlagen zu erhöhen. Dazu wurde, eine Plattform zum Austausch von Erfahrungen zur Qualität von PV-Anlagen und ihren Komponenten aufgebaut, die einerseits ein Forum für unabhängige, internationale Analysen und Empfehlungen durch Experten zur Qualität und Performance von PV-Anlagen und –Komponenten dient und gleichermaßen zur Verbreitung des Wissens unter den MarktteilnehmerInnen beiträgt.

Im Österreichischen Teil des Task 13 sind das Austrian Institute of Technology AIT und das Polymer Competence Center Leoben PCCL aktiv, wobei das PCCL vorwiegend mit Materialfragen im Subtask 3 und der Dissemination (Subtask 4) befasst ist, das AIT in allen vier Subtasks beiträgt. Weitere Österreichische Partner aus Forschung und Industrie werden über gemeinsame Forschungsprojekte, die Österreichische Technologieplattform Photovoltaik und andere Aktivitäten eingebunden.

Ziel ist es, österreichische Erfahrungen aus der Kooperation zwischen AIT und PCCL, aber auch aus der Zusammenarbeit mit anderen österreichischen Projektpartnern aus Industrie und Forschung in die internationale Kooperation einzubringen, und andererseits Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem internationalen Task 13 für Österreichische und internationale Projekte, sowie in Kooperationen mit Stakeholdern der Österreichischen Photovoltaikindustrie und -forschung nutzbar zu machen.

Die Ergebnisse, die im Berichtszeitraum 01.04. 2016-31.05.2018 umgesetzt werden konnten, sind auch in Kapitel 5 (Vernetzung und Ergebnistransfer) zusammengestellt.

### **3.3. Methodik, Daten und Vorgangsweise**

Für den Subtask 1 - wirtschaftliche Aspekte der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von PV-Systemen - bringen (i) die Projektpartner ihre Expertise aus Gutachten und technischen Analysen zu Photovoltaikanlagen ein, um die gängige Praxis zu analysieren und (ii) daraus Richtlinien für Best Practice abzuleiten.

Im Subtask 2 - wurde (i) mit qualitativ hochwertigen Langzeit-Monitoringdaten von PV-Anlagen eine Datenbank<sup>15</sup> erstellt, die laufend erweitert wurde und deren Daten über die IEA PVPS Task 13 Webseite öffentlich zugänglich sind. (ii) Aus Monitoringdaten und Statusmeldungen von Wechselrichtern und mathematisch-statischen Methoden wird daran gearbeitet Probleme möglichst frühzeitig und automationsunterstützt zu detektieren. Im Zusammenhang mit dem Subtask 1 ist es auch essentiell, (iii) welche Unsicherheiten bei der Messung an PV-Komponenten im Labor und im Feld, sowie bei den darauf basierenden Berechnungen auftreten. Diese wurden durch Fragebögen an die teilnehmenden Partner evaluiert. (iv) In Zusammenarbeit mit der PV Performance Modelling Collaborative<sup>16</sup> des US

---

<sup>15</sup> Diese Datenbank wurde bereits im Task 2 aufgebaut, und im Task 13 ausgeweitet und laufend ergänzt, siehe <http://77.245.18.90/>

<sup>16</sup> Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, siehe <https://energy.sandia.gov/>. Für die PV

Sandia NL wurden drei Workshops in Europa bei Task 13 Projektpartnern (TUV Rheinland, RE; Fh ISE, SUPSI) veranstaltet.

Die Zuverlässigkeit und Charakterisierung von Photovoltaikmodulen wird im Subtask 3 analysiert, wobei (i) im Zusammenhang mit den Messunsicherheiten, siehe Subtask 2 iii, deren Auswirkung auf die Leistungsklassifizierung und daraus abgeleitete Ertragsmodelle untersucht wird und (ii) die Daten von Modul-Testfeldern in unterschiedlichen Klimaregionen nutzbar gemacht werden. Es werden (iii) für PV-Module die Methoden der bildgebenden Charakterisierungsverfahren Infrarot-Thermografie und Elektrolumineszenz evaluiert. Zur Fehleranalyse von PV-Systemen und PV-Modulen wurden (iv) Fragebogen<sup>17</sup> entwickelt, die ermöglichen das Auftreten von Fehlern an PV-Anlagen und -Modulen in weltweit standardisierter Weise zu dokumentieren und damit vergleichbar zu machen. Die Ergebnisse daraus und das Wissen der Projektpartner zu (v) den im Feld beobachteten Modulfehlern werden in detaillierten Reports zusammengestellt.

Der Subtask 4 - Dissemination - erarbeitet (i) Informationsmaterialien<sup>18</sup>, die auf der internationalen IEA-PVPS Webseite zur Verfügung gestellt werden und (ii) organisiert Workshops die entweder an die internationalen Treffen des Task 13 gekoppelt, oder im Verbund mit internationalen Konferenzen abgehalten werden, und vermittelt die Inhalte des Task 13 auch durch weitere Vorträge und Veröffentlichungen durch die Partner im Task.

## 4. Ergebnisse des Projektes

Die Organisation und Bearbeitung der Inhalte des Task 13 zur Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Photovoltaik wurde nach der ersten Projektphase (2010 bis 2015) mit etwas veränderter Gliederung der vier Subtasks (2015-2017) fortgesetzt, s. [1]. Die Darstellung der Ergebnisse folgt hier der *neuen* Struktur der inhaltlichen und organisatorischen Gliederung des Tasks 13, wobei auch die Ergebnisse der ersten Projektphase entsprechend integriert werden. Die noch zu erwartenden Projektergebnisse aus der 2. Verlängerung des Task 13 sind auch in Kapitel 6, im Ausblick dargestellt.

### 4.1. Subtask 1: Wirtschaftliche Aspekte des Betriebs von PV Anlagen

Ansätze bei der Planung von PV-Anlagen welche Errichtungs- und Betriebskosten und welche Erträge über die Betriebszeit zu erwarten sind, wurden mit Beteiligung des AIT evaluiert, um Richtlinien für die finanzielle Modellierung von PV-Projekten zu erstellen. Dabei fließen auch Ertragsergebnisse laufender PV-Anlagen (Subtask 2) und Felddaten der Modulcharakterisierung und Anlagen-Fehlerstatistik (Subtask 3) ein. Im Subtask 4, der Dissemination werden auch Akteure der Finanzwelt adressiert.

---

Performance Modelling Collaborative siehe <https://pvpmc.sandia.gov/>

<sup>17</sup> <http://iea-pvps.org/index.php?id=344>

<sup>18</sup> <http://iea-pvps.org/index.php?id=57>

Ob eine Photovoltaikanlage so wie geplant funktioniert, oder nicht setzt einerseits eine Modellierung der zu erwartenden Erträge voraus, andererseits müssen die tatsächlichen erzielten Erträge gemessen und - unter Berücksichtigung der herrschenden Umgebungsbedingungen - mit den Ergebnissen dieser Modellierung verglichen werden. Viele Modellannahmen werden bereits zum Zeitpunkt einer Ertragsprognose, die Teil der Standortbewertung ist, vor der Errichtung einer Photovoltaikanlage festgelegt. Welche möglichen Unsicherheiten bzw. Risiken damit verknüpft sind, und wie diese sich in der finanziellen Modellierung von PV-Anlagen abbilden wird meist nicht ausreichend thematisiert. Es wurde daher:

- eine Übersicht über die üblichen *technischen Annahmen* beim Erstellen finanzieller Modelle von PV-Anlagen gegeben,
- sowie diese Ansätze bewertet, um daraus *Best Practice Beispiele* abzuleiten.

Diese Ansätze und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen sind bei Großanlagen (Multi Megawatt-Anlagen, Utility Scale PV) ein wesentliches Thema. Da in Österreich eine sehr kleinteilige Struktur mit nur sehr wenigen große Anlagen, aber einer Vielzahl von Anlagen mit nur wenigen kW Leistung existiert, s. Abb. 9, kann hier aus Österreich nur zu einem relativ kleinen Teil beigetragen werden. Zu den Anlagen-Ertragsdaten siehe Subtask 2 in diesem Kapitel. Die komplexe Verflechtung von Anforderungen an Gebäudebestandteile, die zugleich eine elektrische Energieerzeugungsanlage darstellen, sind auch Gegenstand der nationalen und internationalen Normung [5], sowie im IEA-PVPS Task 14 (Hohe Dichte von Photovoltaiksystemen in elektrischen Netzwerken) und Task 15 (Rahmenbedingungen für Förderung und Entwicklung gebäudeintegrierter Photovoltaik).

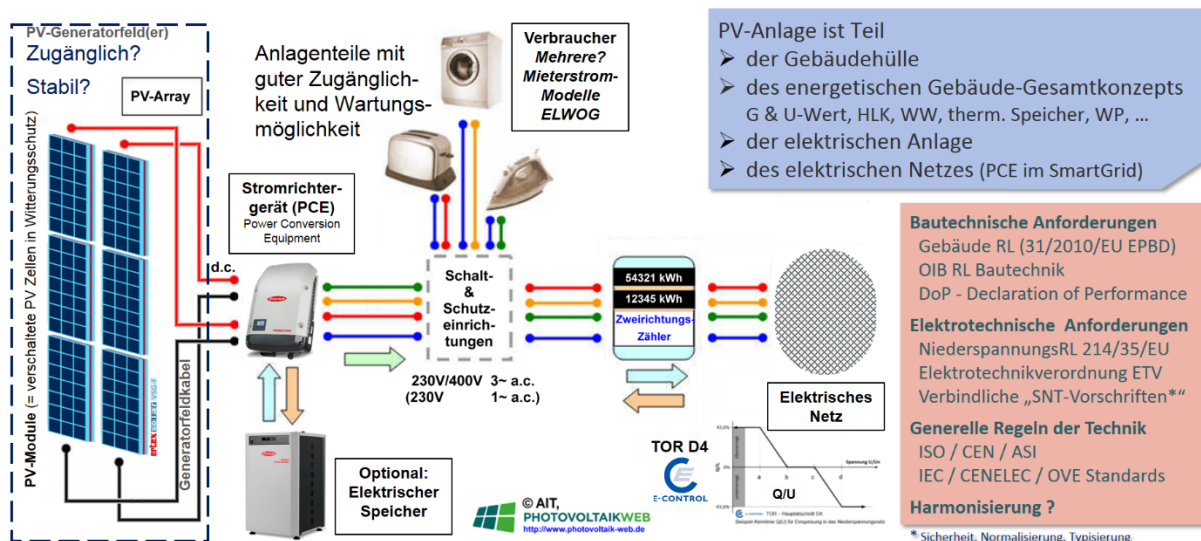


Abb. 9: Beispiel einer PV-Anlage mit Überschusseinspeisung<sup>19</sup>: Ein oder mehrere PV-Stränge sind an einem Wechselrichter angeschlossen, der netzparallel und parallel zu den Verbrauchern im Haus arbeitet. In einer steigenden Anzahl von PV-Anlagen ist zusätzlich ein Batteriespeicher vorhanden, der zeitliche Lastverschiebung ermöglicht. Seit der „kleinen Ökostromnovelle 2017“ ist es in Österreich möglich, dass mehrere Mieter eine gemeinsame PV Anlage auf dem Gebäude betreiben.

AIT Energy hat einige Expertise mit qualitätssichernden Maßnahmen bei der Errichtung und Inbetriebsetzung von PV-Großanlagen, großteils im (süd-)osteuropäischen Raum und bei der

<sup>19</sup> Ein Sensor, der die Einstrahlung in Modulebene erfasst ist üblicherweise nicht ausgeführt. Mit hoher Genauigkeit wird nur die bezogene und gelieferte elektrische Arbeit im Bezugszeitraum (z.B. ein Jahr, mit „Smart Metering“ auch in ¼ Stundenmittelwerten) durch den Zähler erfasst[6].

Schadensabklärung. Die Ergebnisse fließen in die Analysen ein. Die Leitung des Subtask 1 lag bei 3E aus Belgien, einem Betriebsführer von PV-Großanlagen und SiCon, einem Dänischen PV Consultant. Ergebnisse der Kooperation im Subtask 1 wurden 2016 auf der größten Europäischen PV-Konferenz präsentiert [47]).

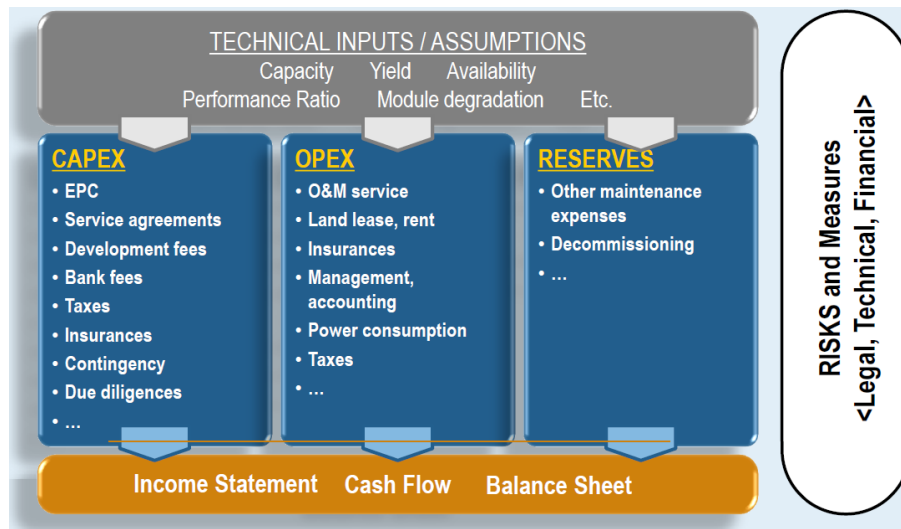


Abb. 10: Schematische Darstellung des Finanzierungsmodells von PV-Kraftwerken. Die technischen Analysen und Annahmen sind maßgebliche Eingangsgrößen für die finanzielle Modellierung. Jan Vedde (SiCon), [61].

Unter der Leitung von Jan Vedde (SiCon, DK) und Mauricio Richter (3E, BE) wurde der Bericht IEA-PVPS T13-08:2018 *“Technical Assumptions in PV Financial Models: Review of Current Practices and Recommendations”* wurde auf der internationalen PVPS-homepage veröffentlicht, bei dem dem das AIT als „Contributing Author“ gelistet ist.

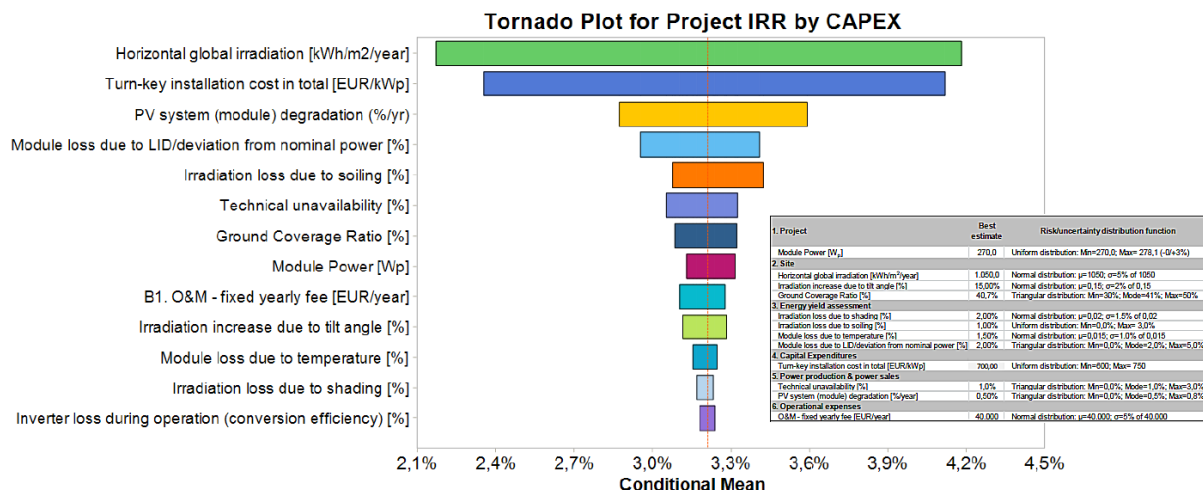


Abb. 11: Tornado-Plot: Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für ein Kraftwerksprojekt. Größten Einfluss auf die Rendite hat die Schwankungsbreite der Einstrahlung, gefolgt von den realen Anlagen-Baukosten und der Moduldegradation. IEA-PVPS T13-08:2018.

Die Abb. 11 stellt für ein Kraftwerksprojekt die Abhängigkeit des Ertrags von der Unsicherheit der Angaben/Annahmen dar, die mehr oder weniger genau in einer Vorstudie zu einem Kraftwerksprojekt enthalten sind. Es ist zu sehen, dass die Qualität des Ertragsgutachtens wesentlich ist, da die korrekte Berechnung der solaren Ressource für den Standort großen Einfluss auf den erzielbaren Ertrag hat, und auch Moduldegradation, und Anfangs-Leistungsverlust (lichtinduzierte Degradation, LID) zu den

wichtigsten Einflussgrößen zählen. Großen Einfluss haben natürlich auch die tatsächlichen Baukosten<sup>20</sup>, denn Baukostenüberschreitungen gefährden die Rendite ebenso wie Qualitätsmängel bei der Errichtung, die Moduldegradation, und (Nicht-)verfügbarkeit der Anlage verursachen können.

## 4.2. Subtask 2: Anlagenperformance und Analyse

In diesem Subtask werden Hinweise gegeben, wie ein Monitoringsystem gestaltet werden soll, und es wird auf der Basis hochwertiger Monitoringdaten gezeigt welche Erträge und Leistungsfähigkeit PV-Anlagen im weltweiten Kontext haben.

Die Task 13 Performance Datenbank zur Erfassung der monatlich aggregierten statistischen Daten aus Anlagen und zu den Betriebsergebnissen beinhaltet Zeitreihen für mindestens 12 Monate, die unter anderem die Einstrahlung in der Modulebene (Referenzertrag), die einstrahlungsgewichtete Modultemperatur und die Anlagenenerträge auf der Gleich- und Wechselspannungsseite wiedergeben. Ebenso werden Ausfallzeiten der Anlage und des Monitorings in der Datenbank erfasst. Es konnten Anlagendaten mehrerer österreichischer Anlagen für die Datenbank<sup>21</sup> übermittelt werden. Obwohl die Daten zu Monatswerten aggregiert werden, setzt dies eine sehr hohe Datenqualität mit guter zeitlicher Auflösung (1/4 Stundenwerte oder besser) voraus.

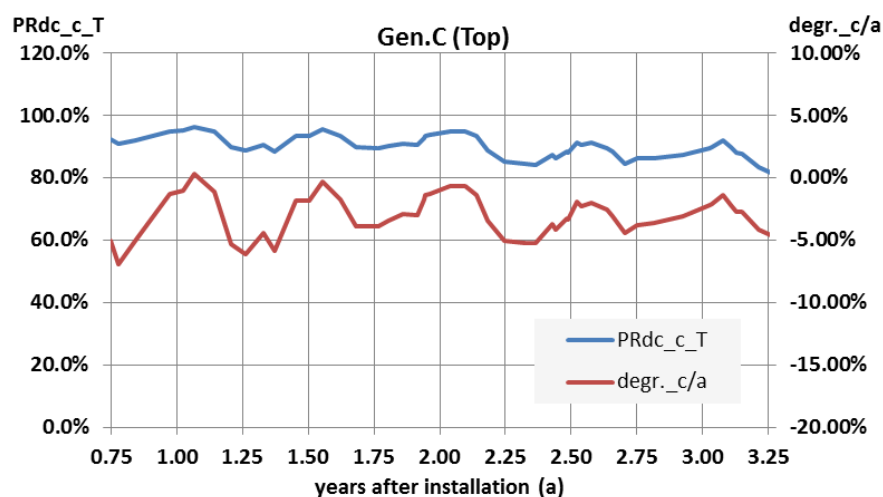


Abb. 12: Beispiel für die Auswertung von Daten einer Österreichischen PV-Anlage mit PV-Modulen basierend auf CIGS-Dünnschichtzellen über eine Betriebsdauer von zweieinhalb Jahren. Performance Ratio (temperaturkorrigierter, normierter PV-Ertrag im Verhältnis zur Einstrahlung) sinkt im Beobachtungszeitraum von 95 bis 97% auf 80%. Mittlere Moduldegradation 3.1% p.a.

Die Abb. 12 gibt ein Beispiel für eine Datenauswertung. Hier wurde die resultierende Moduldegradation zu 3.1% pro Jahr, ermittelt, während sie nach internationalen Erfahrungen meist unter 1% pro Jahr liegt, siehe Subtask 2 in diesem Kapitel und [IEA-PVPS T13-05: 2014](#). Es ist zu sehen,

<sup>20</sup> PV-Kraftwerke sind, trotz der beeindruckenden Lernkurve (siehe Abb. 5) kapitalintensiv, dafür fallen aber dann keine Brennstoffkosten wie bei nicht erneuerbaren Technologien an und Wartungskosten sind im Vergleich zu anderen Energietechnologien niedrig.

<sup>21</sup> Die Datenbank wird/wurde vom Schweizerischen Partner TNC erstellt und gepflegt, Daten werden jeweils aggregiert in ein Input-Tool (von TNC entwickelt) eingegeben und dann an TNC übermittelt. In der Schweiz kam es zu Änderungen im Projektteam, wodurch TNC (derzeit?) keine Finanzierung hat. Es ist momentan nicht klar ob TNC die Datenbank in Zukunft wieder pflegen kann, oder ob der Inhalt der Datenbank in ein anderes Datenbankformat übertragen werden wird, und ein anderer Partner die Aufgabe im Rahmen der 2. Verlängerung des Task 13 von 2018-2021 übernehmen wird.

dass neben der fortschreitenden Degradation auch jahreszeitliche Effekte auftreten, siehe dazu auch [IEA-PVPS T13-02: 2014](#) und Arbeiten zu metastabilen Zuständen von Dünnschicht-Photovoltaik, [7].

Hohe Datenqualität bei den Ertragsdaten und eine Erfassung der Einstrahlung ist in der Regel nur beim Monitoring kommerzieller größerer Anlagen verfügbar, aber gerade dort ist der Zugang zu den Daten meist aus rechtlichen Gründen erschwert, weil die Eigentümer der Anlage und die Betreiber in der Regel nicht ident sind. Daher wurde in der internationalen Verlängerung des Task 13 eine zusätzliche Aktivität gestartet, Jahres-Ertragsdaten zu ermitteln, und - wenn keine Einstrahlungsmessung vor Ort vorhanden ist, satellitenbasierte Jahres-Einstrahlungsdaten für den Standort zu verwenden. Webbasierte Methoden<sup>22</sup> könnten ermöglichen, auch Ertragsdaten einer großen Zahl von Anlagen, niedrigerer Datenqualität, deren Daten aber öffentlich verfügbar sind für die Analyse zu erschließen. Auch für diese Aktivität (Leitung Wilfried van Sark, Univ. Utrecht) sollte es in Zukunft möglich sein, Daten einiger Österreichischer Anlagen zur Verfügung zu stellen.

Ebenfalls in Subtask 2 wurde untersucht, wieweit sich aus den Monitoringdaten Hinweise auf zukünftige Fehler in Anlagen bereits abzeichnen, bevor es noch zu deutlichen Leistungseinbußen kommt, und welche Prognosen sich aus den Betriebsdaten für kurzfristige (wenige Stunden) bzw. mittelfristige (z.B. stündlich für den nächsten Tag) Prognosen zukünftiger Erträge ableiten lassen, s. Abb. 13. Dazu und weiteren Methoden der statistischen Datenanalyse mit Hilfe von maschinellem Lernen wurde der Bericht [IEA-PVPS T13-07:2017](#) „Improving Efficiency of PV Systems Using Statistical Performance Monitoring“ veröffentlicht.

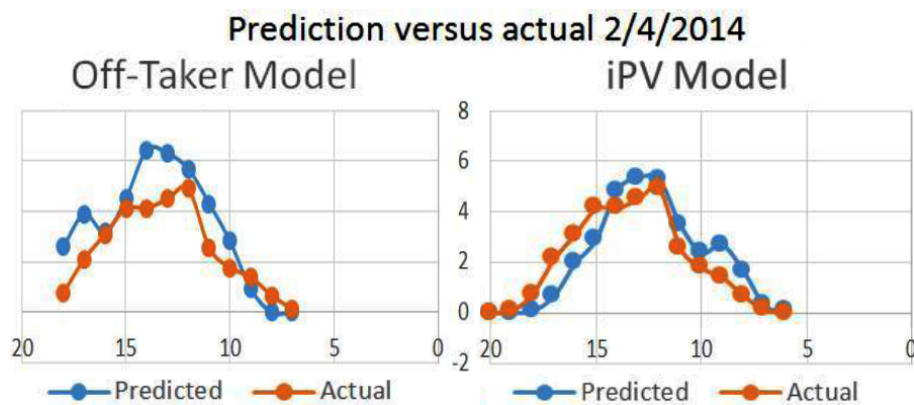


Abb. 13: Vergleich zweier Prognosemodelle (blaue Kurven) für Stundenwerte des morgigen Ertrags einer PV-Großanlage (in MWh). Links: kommerziell verfügbares Modell, Rechts: Im Task 13 erprobtes Modell das auf Machine Learning Algorithmen [46] basiert. [IEA-PVPS T13-07:2017](#)

Wie groß Messunsicherheiten beim Anlagenmonitoring und bei der Labormessung von Komponenten sind, und wie sie sich in die Modellierung übersetzen wurde mittels Fragebogen von den im Task 13 vertretenen Partnern erhoben, siehe Appendix 1, Seite 96-118 im Bericht [IEA-PVPS T13-11:2018](#) „Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice“. Die Abb.

<sup>22</sup> Webbasierte Methoden konnten im Task 13 nicht weiterverfolgt werden, da der maßgebliche Partner (Univ. Utrecht, NL) nicht finanziert war. Inzwischen wurde eine Europäische Initiative, die COST Action PEARL PV gestartet, die auch mit dem Task 13 kooperieren möchte, aber erst im Aufbau begriffen ist [62]. In dieser COST Action unter Leitung von Angele Reinders (Univ. Twente, NL) sind aus dem Task 13 die Univ. Utrecht, und beide österreichischen Partner, PCCL und AIT aktiv. Diese europäische Vernetzungsaktivität bietet jedoch nur Reisekostenfinanzierung, ohne Möglichkeit sonstige Aufwendungen wie Personalaufwand abrechnen zu können, ist also auf andere Finanzierungsmöglichkeiten angewiesen.

14 stellt Messunsicherheiten bei absoluter und relativer Messung der Modul-Performance Ratio (siehe Fußnote 10) MPR gegenüber. Das heißt, dass eine Aussage „Modul(technologie) A, erbringt einen MPR = 88.6% (z.B. mit 1240 kWh/kW<sub>p</sub>a bei 1400 kW/m<sup>2</sup>a Einstrahlung), ist mit größerer Unsicherheit (±4%) verbunden, wie die Aussage, dass an diesem Standort für Modul(technologie) B (z.B. 1360 kWh/kW<sub>p</sub>a gemessen) gegenüber A ein 9.5% höherer Jahresertrag (±1.6%) zu erwarten ist.

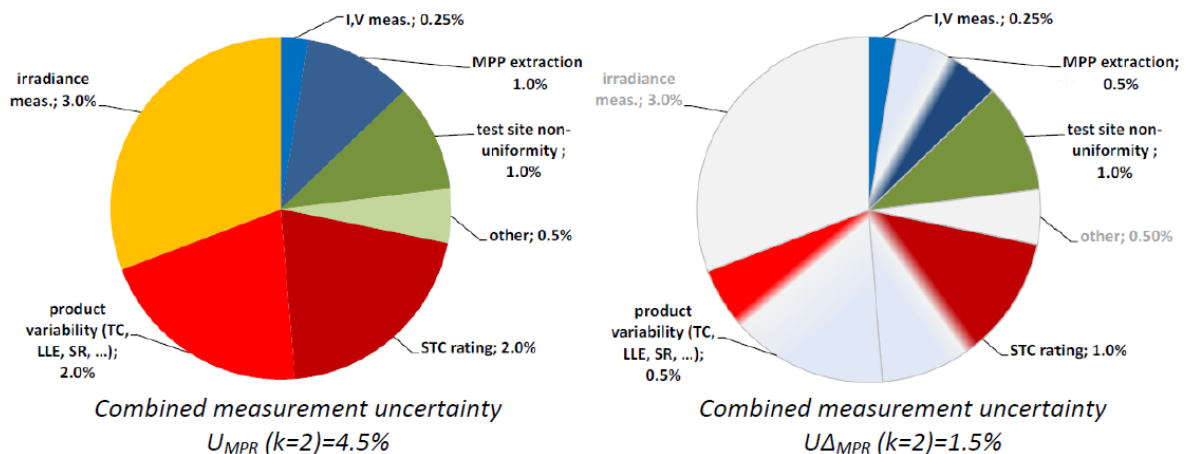


Abb. 14: Beispiel wie sich Messunsicherheiten bei der Messung der Modul-Performance auswirken. Links: In Bezug auf die absoluten Werte; Rechts: bei relativen Vergleich von Modulen, wenn die Messungen durch dasselbe Labor vorgenommen werden. Graue Bereiche: Beiträge zur Messunsicherheit, die bei der vergleichenden Messung wegfallen. [IEA-PVPS T13-11:2018](#)

Qualitativ hochwertige Klimadaten und Daten von Einzel-Modulmessungen in unterschiedlichen Klimazonen wurden gesammelt, deren Veröffentlichung auf der PVPS-Webseite oder im Rahmen der COST Action Pearl PV (siehe Fußnote 22) ist in Diskussion, um Referenzwerte für die Modellierung von Erträgen unterschiedlicher Modultechnologien zur Verfügung zu stellen. Dies steht auch in Zusammenhang mit einem Entwurf zu einer internationalen Norm zur Berechnung und Ertragsbeurteilung (energy rating) von Photovoltaikmodulen: IEC 61853 Teil 3 und 4 [48], [49], die beide 2018 veröffentlicht wurden.

### 4.3. Subtask 3: Modulcharakterisierung und -lebensdauer

Es wurde bereits in der ersten Phase des Task 13 ein umfangreicher Report, [IEA-PVPS T13-01:2014](#) zu den Modulfehlern und den Methoden, um im Labor wie im Feld fehlerhafte PV-Module zu detektieren, veröffentlicht, sowie eine Sichtprüfungsvorlage<sup>23</sup> zu Modulfehlern entwickelt. Im Report wird auch dargestellt welche Prognose der Leistungsdegradation diese Fehler - in Abhängigkeit von den Umwelt- und Einsatzbedingungen haben, und inwieweit und welche Sicherheitsprobleme dabei auftreten können. Einige der häufigsten Fehlerfälle sind in Abb. 15 zusammengestellt. Diese Darstellung der

<sup>23</sup> 150121 Documentation of module condition, xlsx, [http://www.ica-pvps.org/index.php?id=344&eID=dam\\_frontend\\_push&docID=2917](http://www.ica-pvps.org/index.php?id=344&eID=dam_frontend_push&docID=2917)

„umgestürzten Badewannenkurve“ die Abb. 3.1 aus diesem Task 13 Report gehört inzwischen zum Standardrepertoire zahlreicher Präsentationen und Veröffentlichungen zum Thema von Anlagenfehlern in PV-Modulen. Der Report enthält im Anhang auch ein standardisiertes *Erhebungsblatt für die Sichtprüfung von PV-Modulen*, das auch direkt als xlsx-Dokument verfügbar ist<sup>24</sup>.

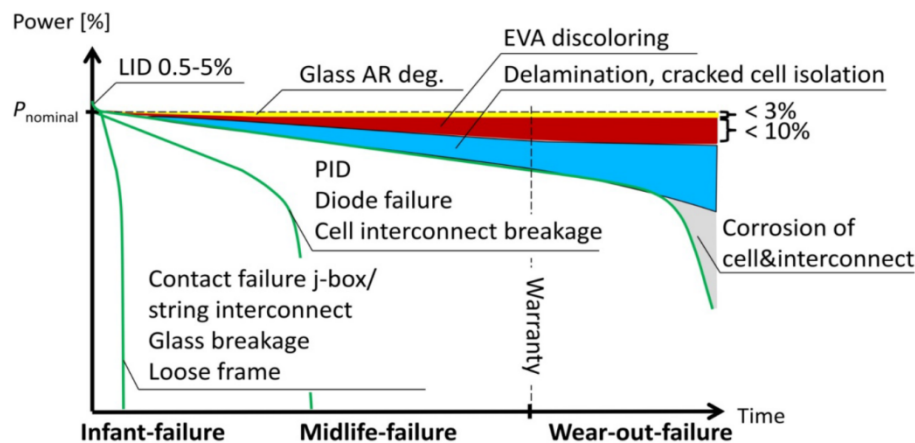


Abb. 15: Fehlerarten und Fehlerentwicklung bei PV Modulen<sup>25</sup>: Früh-, Midlife- und Verschleißausfälle sowie das Schadenspotential unterschiedlicher Fehlerfälle. IEA-PVPS T13-01:2014

In der Task 13 Verlängerung wurden die Inhalte dieses Reports, weiterentwickelt: Der im Subtask 3 erstellte Report [IEA-PVPS T13-09:2018](#) zur Materialdegradation in PV-Modulen und zu PV-Anlagenfehlern wurde hauptverantwortlich von Gernot Oreski (PCCL, AT) und Marc Köntges (ISFH, DE) erstellt, wobei der Schwerpunkt des PCCL auf Materialien und Material(in)kompatibilitäten liegt. Das AIT brachte sich maßgeblich bei der Modul- und Systemcharakterisierung ein.

In diesem Report wird die Analyse von den PV-Modul- auf Anlagenfehler (siehe Abb. 16) ausgeweitet und auch dazu direkt ein File zur Verfügung gestellt<sup>24</sup>, womit in einem standardisierten Verfahren weltweit in unterschiedlichen Klimazonen<sup>26</sup> mit dem gleichen Erhebungsbogen die Art und Häufigkeit von Fehlern erhoben werden kann, was Vergleiche zwischen unterschiedlichen Regionen ermöglicht. AIT und gemeinsame österreichische Projektpartner im Infinity Projektkonsortium, die auch viele PV-Großanlagen im Ausland betreuen haben wesentlich zu den weltweit gesammelten Daten zu Systemfehlern, deren Ursachen, Leistungsverlust und Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen beigesteuert. Ergebnisse zu Modulfehlern wurden bei der europäischen Photovoltaikkonferenz EU PVSEC 2016 präsentiert [8], wo die Präsentation als einer der besonders wertvollen Vorträge der Konferenz in der Abschluss-Session vom Vorsitzenden Nigel Taylor besonders erwähnt wurde.

<sup>24</sup> Der Erhebungsbogen kann direkt von der internationalen Task 13 Seite heruntergeladen werden: [http://iea-pvps.org/index.php?id=344&eID=dam\\_frontend\\_push&docID=3948](http://iea-pvps.org/index.php?id=344&eID=dam_frontend_push&docID=3948) - xlsx-Erhebungsbogen  
[http://iea-pvps.org/index.php?id=344&eID=dam\\_frontend\\_push&docID=3947](http://iea-pvps.org/index.php?id=344&eID=dam_frontend_push&docID=3947) - Erläuterung.

<sup>25</sup> Abkürzungen: LID...Lichtinduzierte Degradation, PID...Potentialinduzierte Degradation, EVA...Ethylen-Vinylacetat, AR...Antireflex-Beschichtung, j-box...Anschlussdose. Aus IEA-PVPS T13-01:2014 (Fig. 3.1).

New form Copy form Delete form IEA-PVPS T13-09:2017 Survey version 14 October 2016

[PV system basics](#) [Goal of this survey](#) [How to start ?](#) [Other questions](#)

|                              |  |                                                     |           |
|------------------------------|--|-----------------------------------------------------|-----------|
| System ID:                   |  | PV module type                                      |           |
| Source of data               |  | Inverter type                                       |           |
| Country                      |  | Mounting system type                                |           |
| <a href="#">Climate zone</a> |  | Grounding of substructure & module frames/conductor |           |
| Special stress               |  | Other system component                              |           |
| Kind of system               |  | Nominal system power                                | [kWp]     |
| Orientation                  |  | Date of system start                                | [MM/YYYY] |
| Inclination                  |  | Date of failure documented here                     | [MM/YYYY] |
| Comment if a field is orange |  |                                                     |           |

**Integral data**

| Following failure specifications are based on investigated percentage of |              |                              |               |              |           |         |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------|---------------|--------------|-----------|---------|
| Total system power loss [%]                                              | Inverter [%] | Cable and interconnector [%] | PV module [%] | Mounting [%] | Other [%] | Comment |
|                                                                          |              |                              |               |              |           |         |

**5 x Failure specification for 0 % of the system**

| Failed system part           | Failure 1 specification [%] | Power loss 1 [%]   | Failure 2 specification [%] | Power loss 2 [%]   | Safety failure 1 | Safety failure 2 |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| Inverter                     | No failure                  | No detectable loss | No failure                  | No detectable loss | No failure       | No failure       |
| Cable and interconnector     | No failure                  | No detectable loss | No failure                  | No detectable loss | No failure       | No failure       |
| PV module                    | No failure                  | No detectable loss | No failure                  | No detectable loss | No failure       | No failure       |
| Mounting                     | No failure                  | No detectable loss | No failure                  | No detectable loss | No failure       | No failure       |
| Other system component       | No failure                  | No detectable loss | No failure                  | No detectable loss | No failure       | No failure       |
| Comment if a field is orange |                             |                    |                             |                    |                  |                  |

Abb. 16: Struktur des xls<sup>m</sup>-Erhebungsbogens zu PV-Anlagenfehlern. IEA-PVPS T13-09:2018, s. auch [8] und Fußnote 24.

Eine weiterführende Publikation die auch die Ergebnisse zu PV-Systemfehlern zusammenstellt wurde in [17] präsentiert und publiziert, mit erweiterter Datenbasis im Infinity Leitprojekt vertieft [27].

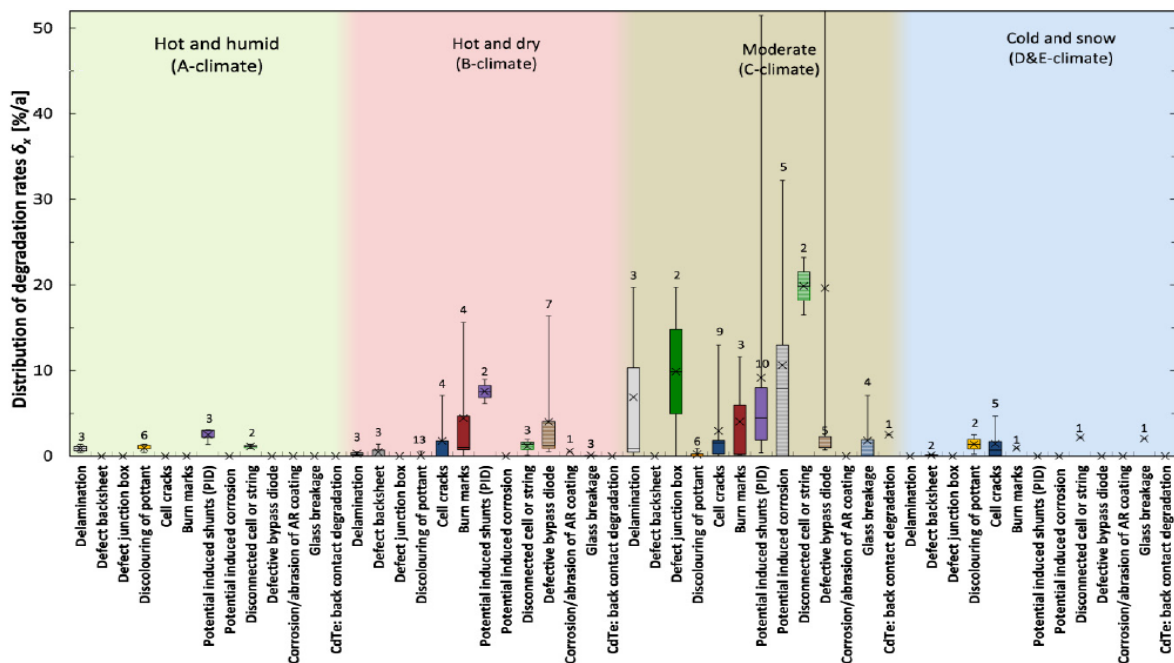


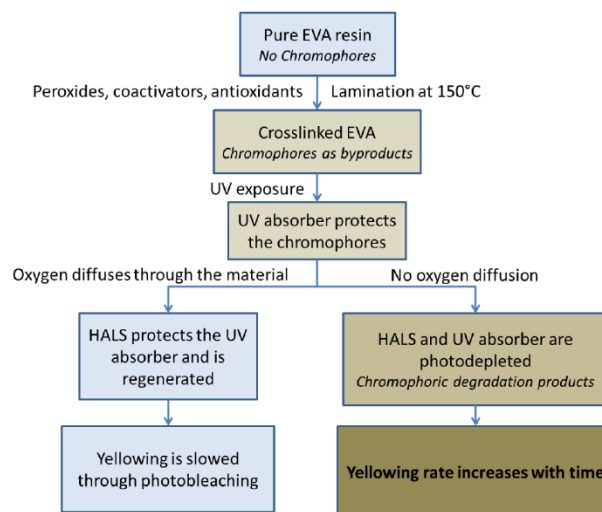
Abb. 17: Modulfehler und verursachte Degradationsraten in den Hauptklimazonen nach Köppen-Geiger<sup>26</sup>. x ... mittlere, Rechteck ... obere und untere Quartile, Whisker ... Minima und Maxima der Degradationsraten. IEA-PVPS T13-09:2018.

<sup>26</sup> Die Köppen-Geiger Klimaklassifikation charakterisiert das Klima nach Haupt-Klimazonen A ... Tropisches Regenklima, B ... Trockenklima (Wüste, Steppe), C ... Warm-Gemäßigt, D ... Boreal (Schneewaldklima), E ... Schneeklimate jenseits der Baumgrenze. Die Buchstaben w ... wintertrocken, s ... sommertrocken, f ... vollfeucht, m ... Monsun spezifizieren die Niederschlagsverhältnisse näher, und die Temperaturverhältnisse sind mit den Buchstaben a ... d für C und D, i ... l für B, näher zu spezifizieren (Jahresmitteltemperaturen, wärmste und kälteste Monate). Die Klassifikation wurde auf Basis von und für Pflanzenwachstum definiert, bilden aber mit den Temperatur-, Temperaturwechsel- und Feuchtebedingungen auch wesentliche Stressbedingungen für technische Anlagen ab.

Die Abb. 17 stellt gemessenen Modul-Degradationsraten aus in den Hauptklimazonen nach Köppen-Geiger zusammen. In einer großen Metastudie [50], zeigte ein Großteil der untersuchten Module und Anlagen relativ geringe Degradation, aber ein Viertel in einem Bereich von 2% bis über 4% Degradation der Anlagenleistung pro Jahr, was inakzeptabel hoch ist. Diese Studie enthält sowohl Anlagen ohne jede Beanstandung, als auch Anlagen mit Fehlern. Die mit dem Erhebungsbogen des Task 13 erhobenen Daten, Abb. 16, sind dagegen praktisch nur von Anlagen die Fehler aufgewiesen haben, weshalb nur das relative Auftreten von Fehlern dargestellt werden kann, da eine Dunkelziffer von Anlagen mit unentdeckten Fehlern, und eine große Zahl von nicht erfassten, problemlos funktionierenden Anlagen existiert. Deutlich ist jedoch in beiden Studien, dass qualitätssichernde Maßnahmen über die gesamte Wertschöpfungskette unabdingbar sind.

Der andere Hauptteil im [IEA-PVPS T13-09:2018](#) Report gibt vertiefende Informationen zu Degradationsprozessen und deren Modellierung. Die Abb. 18 gibt eine Übersicht zu den Degradationsprozessen im am häufigsten in PV-Modulen verwendeten Einbettungsmaterial EVA (Ethylen-Vinylacetat-Copolymer), das zur besseren Verarbeitung im Laminationsprozess zahlreiche Additive enthält. Weitere Additive schützen die Kunststoffe vor Schäden durch UV-A und UV-B Strahlung, die zusammen etwa 5% Anteil an der solaren Einstrahlung haben.

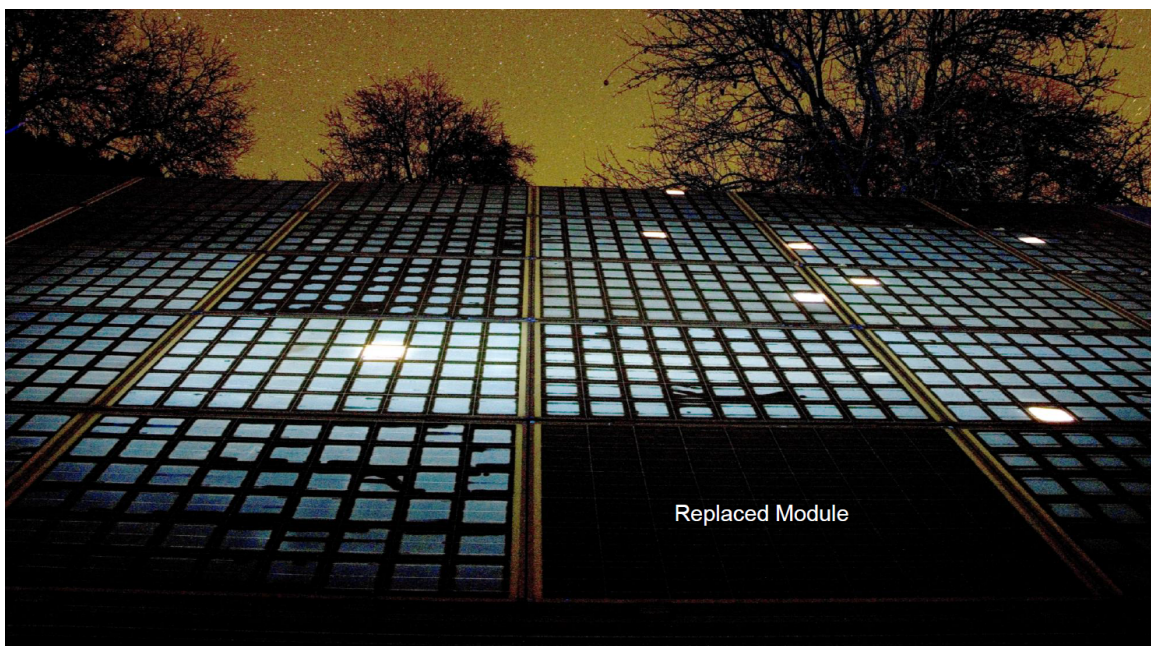
Die Übersicht zu den Degradationsprozessen und deren Modellierung aus dem [IEA-PVPS T13-09:2018](#) Report war auch ein wesentlicher Teil einer Buchpublikation, zu dem Gernot Oreski das entsprechende Kapitel beigetragen hat, [28].



*Abb. 18: Schema der Degradationsprozesse beim Vergilben (und Bleichen) des Einbettungsmaterials EVA (Ethylen-Vinylacetat) in PV-Modulen – Additive die der Schädigung durch den Ultraviolett-Anteil im Sonnenlicht entgegenwirken sind UV-Absorber und gehemmte Amine (HALS). Je nachdem ob bzw. wieviel Sauerstoffdiffusion ein Moduldesign zulässt, können bleichende Prozesse (linker Pfad) oder vergilbende Prozesse (rechter Pfad) dominieren. [IEA-PVPS T13-09:2018](#)*

Inhalte aus dem Report wurden beim Task 13 Side Event auf der größten europäischen Solartechnikmesse, der Intersolar [14], und beim internationalen japanischen Photovoltaik-Zuverlässigkeitssymposium SAYURI [23] präsentiert. In Österreich wurde bei der österreichischen PV-Tagung [13], dem Kunststoffforum Neutal [15], sowie beim 10. Jahresforum des Österreichischen Zellverbinderherstellers Ulbrich [21] vorgetragen.

In der Fertigung und durch Abbauprozesse in den Kunststoffen entstehen Lumophore, die bei Beleuchtung mit UV-Licht im sichtbaren blauen Teil des Spektrums Licht emittieren. Diese Fluoreszenzerscheinungen bieten ebenfalls die Möglichkeit Modulfehler zu detektieren. Diese Methode wurde bereits im Report [IEA-PVPS T13-01:2014](#) vorgestellt. Im Oktober 2018 wurde ein Workshop<sup>27</sup> in Zusammenhang mit dem Kick-Off Meeting zur nächsten Arbeitsperiode des Task 13 am ISFH in gehalten, bei dem auch Bernhard Kubicek vorgetragen hat [26].



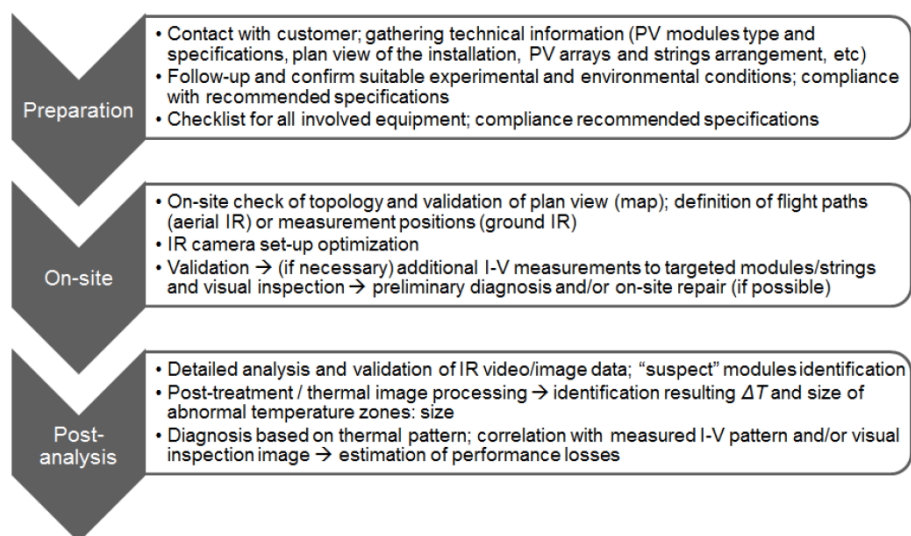
*Abb. 19: Nacht UV-Fluoreszenzaufnahme mittels Spiegelreflexkamera (am Stativ) und Beleuchtung mit AIT 60W UV-LED Handlampe [26].*

Es ist zu sehen, dass (i) die Anlage schon länger in Betrieb ist da deutliche Fluoreszenz beobachtet werden kann, aber (ii) das Modul rechts der Mitte erst kürzlich eingebaut (ersetzt) wurde, da es noch keine Fluoreszenz zeigt, (iii) ein Moduldesign mit einem Rückseitenmaterial vorliegt, das einen Austausch von Wasserdampf und Sauerstoff zulässt, denn durch Diffusion um die Zellränder herum kommt es zur Randauslöschung der Fluoreszenz, (iv) einige Zellen Mikrobrüche aufweisen, da auch dunkle Stellen innerhalb der Zellen zu sehen sind, (v) ohne dass diese Zellen im Betrieb deutlich wärmer

<sup>27</sup> Workshop UV-Fluorescence Measurement for Damage Assessment of PV Modules. Emmerthal bei Hameln, Deutschland, 12. Oktober 2018, <https://isfh.de/publikationen/isfh-workshops-proceedings/uv-fluorescence-workshop/>. (Eine Gegenüberstellung von UV-F mit anderen Methoden s. auch <https://www.energieforschung.at/assets/project/downloads/uvfposter.pdf>)

wären als jene ohne Brüche, denn sonst würde das Einbettungsmaterial über heißen Zellbereichen stärker fluoreszieren als bei Zellen ohne Brüche, (vi) mehrere Module besonders stark homogen fluoreszierende Bereiche über einzelnen Zellen aufweisen, was auf Reparatur<sup>28</sup> von Modulen in der Fertigung hinweist, wobei ein Einbettungsmaterial mit geringerem Anteil oder gänzlich ohne UV-Absorber frontseitig verbaut wurde.

Auf der Basis der Untersuchungen im [IEA-PVPS T13-01:2014](#) zu den Messmethoden auf Modulebene wurden in einem nächsten Schritt die Detektionsmethoden der Infrarot-Thermografie und Elektrolumineszenz noch weiter verfeinert. Dieser umfangreiche Review-Report, [IEA-PVPS T13-10:2018](#) „*Review on IR and EL Imaging for PV Field Applications*“ stellt die Methoden vergleichend dar und gibt praktische Hinweise zum möglichst nutzbringenden Einsatz dieser und neuer Verfahren im Feld für Module und PV-Systeme, siehe auch [24]. Abb. 20 stellt die Abläufe bei der IR-Anlageninspektion dar.

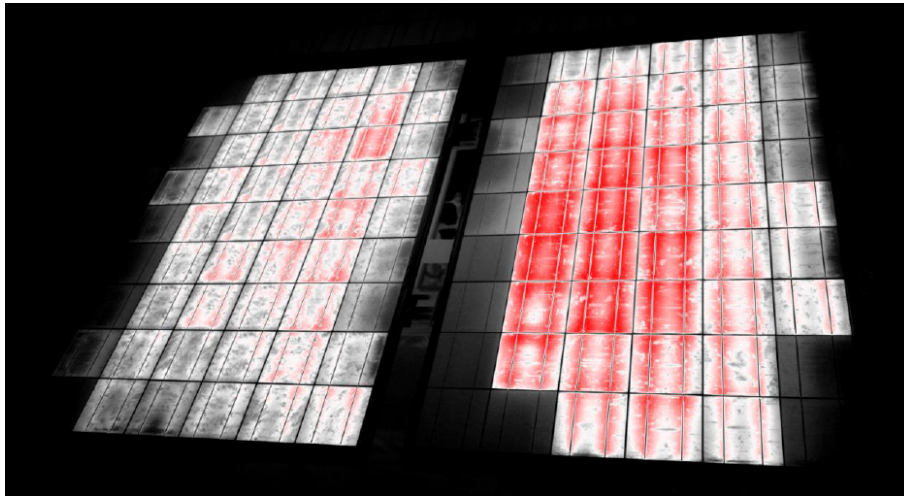


*Abb. 20: Übersicht zu den Abläufen bei der Anlageninspektion mit Infrarot-Thermografie: Vorbereitung im Vorfeld, Inspektion mit Dokumentation des Ablaufs und der Umgebungsbedingungen, eventueller Check mit zusätzlichen Methoden zur Abklärung, Post-Processing und Detailanalyse der Ergebnisse. [IEA-PVPS T13-10:2018](#).*

Diese Aktivitäten im Task 13 führten auch zu der Erstellung eines Normentwurfs zur IR-Thermografie im Feld als Qualitätssicherungsmaßnahme an PV-Anlagen in der Reihe IEC 62446 „*Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance*“ bei, der 2017 als Teil 3 veröffentlicht wurde [66].

<sup>28</sup> Einzelne schlechte, gebrochene oder mangelhaft kontaktierte Zellen wurden nach dem Abziehen der Rückseitenfolie aus dem Laminat geschnitten und erneut mit neuem Einbettungsmaterial und neuer Rückseitenfolie laminiert. Normalerweise enthält die Fronteinkapselung UV-Absorber, die die rückseitige Einbettungsfolie vor UV von der Vorderseite schützt. Reflektiertes UV von der Rückseite wird von der Rückseitenfolie geblockt. Da der frontseitige Patch viel stärker fluoresziert als das sonst verwendete Material fehlen die UV-Absorber, es ist also das rückseitige Material auch vorne eingesetzt worden, und es laufen daher raschere Photodegradationsprozesse, siehe auch Abb. 17.

In der Abb. 21 wird das Ergebnis einer Inspektion mittels Elektrolumineszenz dargestellt. Die Module sind von einer potentialinduzierten Degradation (PID-s, siehe [IEA-PVPS T13-09:2018](#) und [IEA-PVPS T13-01:2014](#)) betroffen, die den Parallelwiderstand von Zellen am Rand reduziert, wodurch die Leistung des gesamten Strangs, der Serienschaltung von Modulen am Eingang des Wechselrichters reduziert wird.



*Abb. 21: Nacht Elektrolumineszenz mit einer modifizierten Spiegelreflexkamera (Infrarotfilter vor dem CMOS-Sensor entfernt). Dunkle Bereiche: geringe EL-Emission, Zellen haben geringen Parallelwiderstand, PID-s; Helle Bereiche: normale Funktion; Rote Bereiche: sehr starke EL-Emission. [IEA-PVPS T13-10:2018](#) und [20].*

Die Untersuchungen zur Elektrolumineszenz an PV-Modulen trugen ebenfalls zu einer entsprechenden Normentwicklung bei, die in der Serie IEC 60904, „Photovoltaic devices“ 2018 als Teil 13 veröffentlicht wurde [67].

#### 4.4. Subtask 4: Dissemination

Die zuvor erläuterten Aktivitäten zu den drei Subtasks 1 bis 3 enthalten natürlich auch Maßnahmen zur Verbreitung der im Task 13 erarbeiteten Informationen. Um diese besser zu koordinieren besteht dafür ein eigener Subtask 4, Dissemination. Siehe dazu auch das folgende Kapitel 5 und die Publikationslisten im Kapitel 5, Vernetzung und Ergebnistransfer, wobei

- die veröffentlichten **IEA-PVPS Task 13 Reports** am Anfang des Kapitel 7 zusammengestellt sind. Der eingebettete Link führt jeweils auf die internationale PVPS Webseite des Task 13<sup>29</sup> und ermöglicht den direkten Download aller Reports.
- Vorträge, Konferenzen, Zeitschriftenpublikationen im Zusammenhang mit Task 13 bilden den zweiten Abschnitt, und
- **Weiterführende Literatur** zur Thematik den Abschluss.

Ebenfalls via PVPS Homepage öffentlich zugänglich sind, wie zuvor angegeben, die „Data collection documents“ zur Sichtprüfung von Photovoltaikmodulen und zur Dokumentation von Photovoltaik-Anlagenfehlern, sowie die Erläuterungen dazu, <http://iea-pvps.org/index.php?id=344>:

<sup>29</sup> <http://iea-pvps.org/index.php?id=57>

- Documentation of module condition (xls-Format)
- Explanation PV-failure survey
- PV-failure survey (xlsm-Format)

Die PV Performance Datenbank<sup>30</sup> ist ebenfalls öffentlich zugänglich, wobei dazu eine Registrierung erforderlich ist, und dann ein Passwort übermittelt wird. Denn es ist auch für den Task 13 von Interesse welche Personen und Institutionen den Zugang zur Datenbank nutzen.

Die zwölf bisher im Task 13 erstellten detaillierten Reports, die zahlreichen gemeinsamen Präsentationen auf nationalen und internationalen Workshops und Konferenzen, sowie die veröffentlichten Originalarbeiten in internationalen Qualitätsjournalen zeigen, dass die Arbeit im Task 13 selbst eine sehr gute ist, die auch von nationalen und internationalen Stakeholdern im Photovoltaikbereich sehr geschätzt wird.

Auch die Zugriffe auf den Task 13 Bereich der internationalen IEA-PVPS Homepage sind lebhaft, und auch die angebotenen online Webinare [19] erfreuten sich großer Aufmerksamkeit.

## 5. Vernetzung und Ergebnistransfer

### 5.1. Österreichische Zielgruppe, für die Task 13 Ergebnisse relevant sind

Die österreichischen Adressaten der im Task 13 erarbeiteten Informationen sind Hersteller von Materialien und Komponenten für PV-Anlagen, zu denen in Österreich auch Firmen zählen, die den Weltmarkt bedienen. Ebenso sind Errichter, Eigentümer und Investoren Nutznießer. Da die Öffentlichkeit die Errichtung von PV-Anlagen durch garantierte Einspeisetarife und/oder Investitionsförderungen unterstützt, besteht auch hier ein Interesse, dass PV Anlagen hoher Qualität langfristig gute Erträge erbringen. Daher ist es auch essentiell die Inhalte des Task 13 auch in Lehre und Ausbildung zu verankern.

Sowohl das PCCL, als auch das AIT sind auch im Bildungsbereich tätig: das PCCL ist in die Studiengänge der Kunststofftechnik<sup>31</sup> an der Montanuniversität Leoben eingebunden, das AIT organisiert in Partnerschaft mit der Erwachsenenbildungseinrichtung WIFI Kurse für zertifizierte Photovoltaiktechniker<sup>32</sup>, und betreut auch häufig Bachelor- und Masterarbeiten in Kooperation mit der FH Technikum Wien, und der Universität und Technischen Universität, sowie der Universität für Bodenkultur Wien. Womit auch andere Forschungsinstitutionen, die nicht unmittelbar Partner im Task sind, von den Ergebnissen profitieren.

---

<sup>30</sup> Die Performance Datenbank des Task 13, zugänglich unter <http://77.245.18.90/>, enthält Daten einer großen Anzahl von PV Anlagen auf Monatsbasis, d.h. das zeitlich hochaufgelöste Daten zu Monatswerten kumuliert zur Verfügung gestellt werden. Siehe auch Fußnote 21 auf Seite 24.

<sup>31</sup> Department Kunststofftechnik der Montanuniversität Leoben, <http://www.kunststofftechnik.at/de/5483/>

<sup>32</sup> Weiterbildungskurs, in Kooperation mit dem Programm klimaaktiv der Klimaschutzinitiative des Lebensministeriums und dem WIFI zu Zertifizierten Photovoltaiktechnikern bzw. –planern, <https://www.ait.ac.at/index.php?id=3591>

## 5.2. Einbindung relevanter Stakeholder im Task 13, Relevanz und Nutzen der Projektergebnisse

Die im Task 13 vertretenen österreichischen Forschungsinstitute PCCL und AIT sind nicht nur mit der internationalen Forschungsgemeinschaft gut vernetzt, sondern z.B. auch in der Österreichischen Technologieplattform Photovoltaik<sup>33</sup> (TTPV), vertreten. Gemeinsame Forschungsprojekte industrieller Forschung sorgen dafür, dass Ergebnisse aus dem Task 13 nicht im sprichwörtlichen Elfenbeinturm verbleiben, sondern unmittelbar in die industrielle Praxis einfließen und damit helfen, die Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Firmen zu erhalten. Natürlich sind innovative österreichische Firmen<sup>34</sup> auch auf internationalen Fachkonferenzen und Seminaren aktiv, wo sie ebenfalls von den internationalen Aktivitäten der österreichischen und internationalen Taskmitglieder profitieren.

Aus dem Europäischen Infrastruktur- und Vernetzungsprojekt Sophia entstand vor sechs Jahren ein internationaler, jeweils zweitägiger Workshop der vom Deutschen Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fh ISE), das auch einen der Taskleiter des Task 13 stellt, gemeinsam mit wechselnden Partnern organisiert wird [11]. Obwohl das EU FP7 RI Projekt Sophia inzwischen beendet ist, wird diese Workshop-Serie zur Zuverlässigkeit von Photovoltaik fortgeführt. 2016 wurde der 6. Sophia-Workshop am AIT in Wien organisiert<sup>35</sup>, wobei hier die Themen und Inhalte des Task 13 auch durch internationale Vortragende vertreten waren. Österreichische Partner aus Industrie und Forschung wurden aktiv an der Durchführung beteiligt und Seminarbesucher die Mitglieder der österreichischen Photovoltaiktechnologieplattform sind, wurde das Seminar stark ermäßigt angeboten. Dadurch wurden die Kontakte zwischen internationalen Playern im Bereich der Photovoltaik mit den Österreichischen Akteuren vernetzt. Der 9. Sophia-Workshop 2019 wird erneut in Österreich stattfinden, und vom PCCL vom 28.-29. Mai in Graz<sup>36</sup> organisiert.

Die rege nationale und internationale Beteiligung am Task 13 zeigt die Notwendigkeit und erklärt das anhaltend große Interesse an Themen der Ertrags- und Qualitätssichersicherheit von Photovoltaikanlagen und ihrer Materialien und Komponenten. Selbstverständlich sind die Inhalte des Tasks 13 mit den anderen Tasks des IEA PVPS Programms koordiniert, was durch die zweimal jährlich stattfindenden Treffen des PVPS ExCo sichergestellt wird. Zudem gab es im Rahmen der 6. Weltkonferenz der photovoltaischen Energiekonversion, der 6<sup>th</sup> WPEC 2014 in Kyoto einen Parallel-Workshop unter Beteiligung aller aktiven IEA PVPS Tasks, wobei auch PCCL und AIT aktiv teilnahmen. Auch bei Workshops in Bozen [12], [14] und Hameln [26] wurden Vorträge vom PCCL und AIT gehalten. Im Frühjahr 2018 wurde in Wien ein österreichischer IEA-PVPS Vernetzungsworkshop „*IEA-PVPS Sustainable Photovoltaics Workshop*“ mit internationaler Beteiligung abgehalten, bei dem Teilnehmer aus den PVPS Tasks Task 12 - Umweltaspekte der Photovoltaik, Task 13 - Leistungsfähigkeit, Betrieb und Zuverlässigkeit von Photovoltaiksystemen, Task 15 – Rahmenbedingungen für Förderung und Entwicklung gebäudeintegrierter Photovoltaik sowie der PVPS Task 1 - Strategische Photovoltaik-

---

<sup>33</sup> Österreichische Technologieplattform Photovoltaik: Siehe auch: [tppv.at](http://tppv.at)

<sup>34</sup> Jürgen Sutterluti, Business Development Manager, Bereich Energie bei Gantner Instruments, Schruns, Vorarlberg, <https://www.gantner-instruments.com/de/gi-magazine/new-employees/>, arbeitete auch intensiv am Report IEA-PVPS T13-11:2018 zu den PV-Modulmessungen mit.

<sup>35</sup> Siehe [https://www.ait.ac.at/news-events/single-view/detail/2456/?no\\_cache=1](https://www.ait.ac.at/news-events/single-view/detail/2456/?no_cache=1)

<sup>36</sup> Für Details und Anmeldung siehe <https://www.pv-reliability.com/>

Analyse und das EXCO – PVPS Programmausrichtung eingebunden waren, siehe [22]. Diese Veranstaltung wurde an die österreichische PV-Konferenz gekoppelt [69].

### **5.3. Kompetenzaufbau, konkrete Umsetzungen**

Wie zuvor ausgeführt, arbeiten die österreichischen Partner im Task 13 mit weiteren Partnern aus der österreichischen Industrie und Forschung an gemeinsamen Forschungsprojekten industrieller Forschung, womit Ergebnisse aus dem Task 13 unmittelbar in die industrielle Praxis einfließen.

Inhaltlich gibt es auch eine Wechselbeziehung der Themen des Task 13 mit anderen Themenfeldern im IEA PVPS, aber auch im IEA SHC (Solar Heating and Cooling) Programm. Da die österreichischen Projektpartner des Task 13 auch in anderen IEA Tasks aktiv sind, und zum Beispiel über die Technologieplattform vernetzt sind, gibt es auch hier einen regen Austausch zwischen den Beteiligten zu den Inhalten des Task 13 und den anderen IEA-Tasks.

Wichtige Impulse aus dem Task 13 erhält auch die nationale (OVE TSK E03)<sup>37</sup>, europäische (CEN/CLC TC82)<sup>38</sup> und internationale (IEC TC82)<sup>39</sup> Photovoltaik-Normung, in die AIT NormungsexpertInnen, aber auch andere Vertreter aus der österreichischen Forschung und Industrie eingebunden sind.

### **5.4. Nutzen für den (Technologie)Bereich in Österreich; genereller Mehrwert und Nutzen der Task 13 Beteiligung**

Die Aktivitäten des Tasks 13 sind Querschnittsthemen, die für alle Stakeholder im Bereich der Photovoltaik bedeutsam sind. Die über die Webseite des IEA PVPS angebotenen, bisher im Task 13 erarbeiteten zwölf Berichte und die Tools zur Charakterisierung von Modul- und Systemfehlern, siehe Verzeichnis und Links zu den IEA-PVPS Task 13 Reports auf Seite 36, stehen allen und damit auch den österreichischen Firmen zur Verfügung. Je vielfältiger, internationaler und breiter das Konsortium des Tasks 13 ist, desto größer ist die Relevanz der erarbeiteten Inhalte. Ohne österreichische Beteiligung wäre der Informationsaustausch weniger gehaltvoll, da die österreichischen Partner im Task intensiv mitarbeiten. Umgekehrt würde ein reduzierter Umfang der Österreichischen Beteiligung am PVPS und insbesondere am Task 13 auch die Dissemination zu den Österreichischen Stakeholdern verringern.

In den letzten beiden Jahren wurde – auch von den österreichischen Partnern im Task 13 - intensiv daran gearbeitet, ein neues Arbeitsprogramm<sup>40</sup> für die nächste Verlängerung des Task 13

---

<sup>37</sup> Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Technisches Subkomitee Photovoltaik: [https://www.ove.at/normung-ock/gremien-uebersicht/?tx\\_ockgremienliste\\_gremienliste%5Bitemid%5D=E&tx\\_ockgremienliste\\_gremienliste%5Bsubkomitees%5D=1&tx\\_ockgremienliste\\_gremienliste%5Bsubkomitee%5D=E03&tx\\_ockgremienliste\\_gremienliste%5Baction%5D=detail&tx\\_ockgremienliste\\_gremienliste%5Bcontroller%5D=JsonItem&cHash=d598ee6e992488802852f83fb6f5ff4](https://www.ove.at/normung-ock/gremien-uebersicht/?tx_ockgremienliste_gremienliste%5Bitemid%5D=E&tx_ockgremienliste_gremienliste%5Bsubkomitees%5D=1&tx_ockgremienliste_gremienliste%5Bsubkomitee%5D=E03&tx_ockgremienliste_gremienliste%5Baction%5D=detail&tx_ockgremienliste_gremienliste%5Bcontroller%5D=JsonItem&cHash=d598ee6e992488802852f83fb6f5ff4).

<sup>38</sup> European Committee for Electrical Standardization, CENELEC, <https://www.cenelec.eu/>; Photovoltaik: <https://www.cenelec.eu/aboutcenelec/whatwedo/technologysectors/solarphotovoltaicsystems.html>.

<sup>39</sup> International Electrical Commission, <https://www.iec.ch/>; Technical Committee Photovoltaic, [https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::FSP\\_ORG\\_ID:1276](https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::FSP_ORG_ID:1276)

<sup>40</sup> TASK 13 Work Plan 2018 – 2021, [3]. Prepared by: U Jahn, C Zhou, B Farnung, C Reise, DE; JS Stein, USA; D Moser, IT; and by the following activity leaders: KA Berger, G Oreski, AT; M Köntges, C Schill, K-A Weiß, W Herrmann, M Herz, M Schweiger, DE; M Green, ISR; R French, USA.

auszuarbeiten [3]. Zusätzlich zu den bisherigen Partnern AIT und PCCL beabsichtigt nun auch das OFI<sup>41</sup> sich an der Arbeit im Task 13 zu beteiligen.

## 6. Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Das Projektteam hat durch die Vernetzung im Task 13 erweiterte Möglichkeiten an wesentlichen Themen der Photovoltaikforschung teilzunehmen, wovon auch die anderen österreichischen Stakeholder profitieren. Diese Themen werden auch in anderen kooperativen Projekten weiter vertieft. So arbeiten AIT und PCCL schon seit langem mit der österreichischen Industrie zusammen an Projekten im Themenfeld des Task 13 - Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit von Photovoltaik s. etwa [9], [10], und auch im PV-Leitprojekt Infinity [63]. Wie schon in Kapitel 4 ausgeführt, gibt es einen breiten Kreis von Institutionen und Personen, die von den Erkenntnissen profitieren. Auch in aktuellen Proposals für Energieforschungsprojekte sind/waren die Themen des Tasks 13 relevant, allerdings wird die weit überwiegende Mehrheit eingereichter Projekte zwar von der Jury als wichtig befunden und zur Förderung empfohlen, allerdings scheitert dies fast immer an den begrenzten zur Verfügung stehenden Fördermitteln, weshalb die Technologieplattform Photovoltaik einen offenen Brief an BM Hofer gesandt hat, siehe [68]. Im laufenden Leuchtturmprojekt<sup>42</sup> „PV Re<sup>2</sup> -Sustainable Photovoltaics“ sind – neben den Inhalten des Task 12 - natürlich auch Ertrag und Zuverlässigkeit wesentlich, vergleiche dazu Abb. 7 und Abb. 8 auf Seite 13.

Im Oktober 2018 wurde die Weiterführung des Internationalen IEA-PVPS Task 13 mit dem Kick-Off Meeting am ISFH in Emmerthal bei Hameln gestartet. Welche Inhalte durch die österreichischen Partner dabei tatsächlich im internationalen Kontext bearbeitet werden können hängt einerseits wesentlich davon ab, dass es ausreichend nationale und internationale Projekte gibt, um an den Inhalten arbeiten zu können, die in den Task 13 eingebracht werden sollen, und andererseits eine gewisse Basisfinanzierung der Arbeit im Task 13 zur Verfügung steht, um an den Treffen und Workshops des Tasks partizipieren zu können, und an den geplanten neuen Reports mitarbeiten zu können.

Die rasche Weiterentwicklung der Photovoltaik bedeutet, dass laufend neue Forschungsfelder, Märkte, Anwendungen und Herausforderungen entstehen, für die die bisherigen Erkenntnisse nicht immer direkt übertragbar sind. Mit Chile und Südafrika sind nun auch zwei neue, sehr interessante und aufstrebende Photovoltaikmärkte im internationalen Task 13 vertreten. Die Arbeit ist wieder in drei inhaltliche Subtasks und einen zur Dissemination strukturiert, siehe [3].

Der Subtask 1 zu *Neuen Modulkonzepten und neuartigem Photovoltaik-Systemdesign*, trägt dem Umstand Rechnung, dass in letzter Zeit neue Materialien wie flexible transparente Frontmaterialien, neue Einbettungsmaterialien, neue Zellverbindungstechnologien wie z.B. geklebte Zellverbinder, „Smart wire Technology“, geschindelt verklebte Photovoltaikzellen, neue Arten von Modul-Bypassdioden, Matrix-Moduldesign, neue und bifaziale Zell- und Modultechnologien, etc. in den Markt

---

<sup>41</sup> OFI Technologie & Innovation GmbH, Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik (OFI), siehe auch Fußnote 13 auf Seite 17.

<sup>42</sup> Leuchtturmprojekt „PV Re<sup>2</sup> -Sustainable Photovoltaics“, <https://projekte.ffg.at/projekt/3036505>. Im Rahmen des Projekts wird in Wien am 5.3.2019 beim OFI ein PV-Recycling Workshop gehalten, [https://www.ofi.at/images/com\\_ahevents/eventdocs/iqzxubec/Einladung%20PV%20Re%C2%B2%20Workshop%20Wien\\_3.pdf](https://www.ofi.at/images/com_ahevents/eventdocs/iqzxubec/Einladung%20PV%20Re%C2%B2%20Workshop%20Wien_3.pdf)

drängen, ohne dass ausreichend Erfahrungen vorliegen wie sich diese technologischen Änderungen auf die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit auswirken. Auch für neue Anlagenkonzepte, die z.B. in Verbund mit elektrischen Speichersystemen<sup>43</sup> errichtet werden, sind neue Methoden erforderlich, deren Leistungsfähigkeit zu beurteilen.

**Tabelle 3: Beabsichtigtes Arbeitsprogramm und Berichte des Task 13 von 2018-2021 [3].**

| Subtask Leader    |                                                                       | No.   | IEA PVPS Task 13 Deliverables (2018 - 2021)                                                                                                           | Activity |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| SANDIA/PCCL       | <b>Subtask 1: New Module Concepts and System Designs</b>              | D 1-1 | Report: "Designing New Materials for Photovoltaics: Opportunities for Lowering Cost and Increasing Performance through Advanced Material Innovations" | ST 1.1   |
| SANDIA/PCCL       | 1.1 New Module-Concepts, -Designs and -Materials                      | D 1-2 | Report: "Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications"                        | ST 1.2   |
| SANDIA/ISE        | 1.2 Bifacial Photovoltaic Modules and Concepts                        | D 1-3 | Report: "Performance of New Photovoltaic System Designs"                                                                                              | ST 1.3   |
| ISFH              | 1.3 Performance of New Photovoltaic System Designs                    | D 1-4 | Report: "Service Life Estimation Models for Photovoltaic Modules"                                                                                     | ST 1.4   |
| FhG ISE           | 1.4 Service Life Prediction                                           | D 1-5 | Report: "Effect of Module Degradation on Photovoltaic Power Plants"                                                                                   | ST 1.4   |
| EURAC             | <b>Subtask 2: Performance of Photovoltaic Systems</b>                 | D 2-1 | Report: "Uncertainties in Yield Assessments: From Modelled to Real LCOE of PV Projects"                                                               | ST 2.1   |
| EURAC             | 2.1 Uncertainty in Yield Assessments and PV LCOE                      | D 2-2 | Report: "The Use of Advanced Algorithms in PV Failure Monitoring"                                                                                     | ST 2.2   |
| MG Israel / EURAC | 2.2 Predictive Monitoring                                             | D 2-3 | Report: "Guidance for Energy Rating of Different PV Module Technologies in Different Climates"                                                        | ST 2.3   |
| TRE               | 2.3 Climatic Rating of Different Technologies for Different Countries | D 2-4 | Report: "Assessment of Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants"                                                       | ST 2.4   |
| FhG ISE           | 2.4 Impact of Soiling on PV System Performance and Reliability        | D 2-5 | Report: "How to Calculate Degradation / PLR in PV Projects Based on Different Data Quality?"                                                          | ST 2.5   |
| EURAC / CWRU      | 2.5 Assessment of Performance Loss Rate                               | D 3-1 | Report: "Cost-Benefit Analysis of O&M Strategies – How to Quantify the Impact of Risk Mitigation Measures"                                            | ST 3.1   |
| TÜV Rheinland     | <b>Subtask 3: Monitoring - Operation &amp; Maintenance</b>            | D 3-2 | Report: "Good Practice Recommendations to Qualify Photovoltaic Power Plants using Mobile Devices"                                                     | ST 3.2   |
| TRE/EURAC         | 3.1 Quantification of Technical Risks during O&M                      | D 3-3 | Report: "Guidelines for Operation & Maintenance Procedures in Different Climates/Countries"                                                           | ST 3.3   |
| TRE/AIT           | 3.2 Characterization of PV Power Plants using Mobile Devices          |       |                                                                                                                                                       |          |
| TUV R/FhG ISE     | 3.3 Guidelines for O&M Procedures in Different Climates/Countries     |       |                                                                                                                                                       |          |

Weiters wurde in den bisherigen Reports des Task 13 bereits viel Material zur Lebensdauerabschätzung (Service Life Prediction) unter wechselnden Klimabedingungen zusammengestellt, aber auch hier sind weiterführende Arbeiten wertvoll.

Der Subtask 2 zur *Leistungsfähigkeit von PV-Systemen* erweitert die Untersuchungen in Hinblick auf die Stromgestehungskosten (Levelised Cost of Energy, LCOE), setzt die Ansätze zur vorbeugenden Wartung aufgrund von Betriebsdaten und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Klimabedingungen und zur Anlagendegradation (Climatic Rating, Performance Loss Rate) und deren Modellierung weiter fort.

Der Subtask 3 zu Betriebsdaten (Monitoring), Betriebs- und Wartungsstrategien (Operation and Maintenance, O&M) setzt sich mit der Quantifizierung der Technischen Risiken, mit neuen im Feld anwendbaren Charakterisierungsverfahren, und mit der Klima-Adaption der Betriebsführung und Wartung auseinander.

Wie bisher bündelt der Subtask 4 die Disseminierungsmaßnahmen, indem Reports erstellt, Workshops und Webinare organisiert werden, und die Inhalte des Task 13 auf Konferenzen und in Fachpublikationen eingebracht werden.

Kurz gesagt: Es gibt vielfältige neue Herausforderungen und es würde uns freuen, auch weiterhin aus den erfolgreichen internationalen Aktivitäten des Task 13 und der intensiven Mitarbeit österreichischer Vertreter an diesen, auch von uns mitdefinierten Aufgaben, berichten zu können.

DI Karl A. Berger (AIT) und Dr. Gernot Oreski (PCCL)

Jänner 2019

<sup>43</sup> Unter Mitarbeit des AIT und des österreichischen Unternehmens FRONIUS, das unter anderem PV-Wechselrichter und Heimspeichersysteme herstellt wurde als D-A-CH Initiative ein Effizienzleitfaden erstellt [70].

## 7. Verzeichnisse

### IEA-PVPS Task 13 Reports

1. Periode des Task 13, 2010-05 ... 2014-04 (Fortsetzung des ursprünglichen Task 2, beendet 2008)

IEA-PVPS T13-01:2014 *Review of Failure of PV Modules*, 140 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=275>

IEA-PVPS T13-02:2014 *Characterization of Performance of Thin-Film PV Technologies*, 69 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=277>

IEA-PVPS T13-03:2014 *Analytical Monitoring of PV Systems*, 90 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=276>

IEA-PVPS T13-04:2014 *Degradation Behaviour of PV Modules under Accelerated Stress Conditions*, internal, 32 p.

IEA-PVPS T13-05:2014 *Analysis of Long-Term Performance of PV Systems*, 60 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=305>

[1] IEA PVPS TASK 13: *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems. Work Plan 2014 - 2017, Final Version*. Prepared by: Ulrike Jahn, Cathy Zhou, Christian Reise (DE), and Karl Berger (AT), Daniela Dirnberger (DE), Gabi Friesen (CH), Sigifredo Gonzalez (US), Mike Green (IL), Cliff Hansen (US), Marc Köntges (DE), Stefan Mau (ES), Thomas Nordmann (CH), Gernot Oreski (AT), Zainal Salam (MY), Josh Stein (US), Wilfried van Sark (NL), Caroline Tjengdrawira (BE), Achim Woyte (BE), August 2014, 37 p.

[2] IEA PVPS (ed.); *Task 13: Performance and reliability of photovoltaic systems*. Flyer introducing the Task 13, 2015, 2p.

2. Periode des Task 13, 2014-05 ... 2017-04 (erste Verlängerung um drei Jahre)

IEA-PVPS T13-06:2017 *PV Performance Modeling Methods and Practices*, 98 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=423>

IEA-PVPS T13-07:2017 *Improving Efficiency of PV Systems Using Statistical Performance Monitoring*, 57 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=427>

IEA-PVPS T13-08:2018 *Technical Assumptions Used in PV Financial Models*, 101 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=426>

IEA-PVPS T13-09:2018 *Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field*, 120 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=435>

IEA-PVPS T13-10:2018 *Review on IR and EL Imaging for PV Field Applications*, 99 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=480>

IEA-PVPS T13-11:2018 *Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice*, 134 p. <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=493>

IEA-PVPS T13-12:2018 *Uncertainties in PV System Yield Predictions and Assessments*, 74 p.

<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=477>

[3] IEA-PVPS TASK 13 *Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems: Work Plan 2018 - 2021. Final updated Version*, 2018-03, [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/intranet/task13/IEA-PVPS\\_Task\\_13\\_Workplan.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/intranet/task13/IEA-PVPS_Task_13_Workplan.pdf), 37 p.

## Vorträge, Konferenzen, Zeitschriftenpublikationen im Zusammenhang mit Task 13

- [4] Gabriele Eder, Karl Berger: *Workshop Qualität, Zuverlässigkeit und Umweltbewertung von PV-Systemen*. 16. Österreichische Photovoltaik Tagung, IMC FH Krems, 22-23.11.2018
- [5] Karl A. Berger: *Leistung und Zuverlässigkeit von Photovoltaiksystemen, PVPS Task 13 und Normung*. Vortrag beim IEA Vernetzungstreffen 2015, 29 p.
- [6] Karl A. Berger: *Langzeitperformance gebäudeintegrierter Photovoltaikmodule. Fassadenbautagung Zukunftsperspektiven im Fassadenbau (06-2016)*. TU Wien, Dpmt. of Building Physics and Building Ecology (BPI), 62 p.
- [7] Sabrina Novalin, M. Rennhofer, J. Summhammer: *Electrical metastabilities in chalcogenide photovoltaic devices*; Thin Solid Films, TSF-31112 (2013), 535; p. 261 - 264
- [8] Marc Köntges, Sascha Altmann, Tobias Heimberg, Ulrike Jahn, Karl A. Berger: *Mean degradation rates in PV systems for various kinds of PV module failures*. 32<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, München 2016, p. 1435-43
- [9] G. Oreski, M. Knausz, K.A. Berger, G.C. Eder, Y. Voronko, T. Koch, G. Pinter: *Reliability testing of backsheets: Thermal analysis for comparing single and module aged films*. Photovoltaics International 3/2014, pp82-88
- [10] Voronko, Y., Eder, G.C., Knausz, M., Oreski, G., Koch, T., Berger, K.A.: *Correlation of the loss in photovoltaic module performance with the ageing behaviour of the backsheets used*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, (2015) 23 (11), pp. 1501-1515
- [11] K.A. Berger: *IEA PVPS Task13 & EU FP7 SOPHIA - Performance & Reliability of PV Systems: Lebensdauerabschätzungen von PV-Modulen*. 5.11.2014 12. Österr. PV-Tagung Linz, 45 S.
- [12] K.A. Berger: *Potential Induced Degradation of PV Modules and Systems*. IEA PVPS Task 13 open Workshop, EURAC, Bolzano 8.4.2016, 35 S.
- [13] G. Oreski: *Material interactions in PV module degradation modes*. 14. Österreichische PV Tagung, Villach, 29.11.2016
- [14] G. Oreski: *Influence of Backsheet on PV Module Reliability*. Intersolar Munich IEA Side-Event: PV Module Reliability and System Performance Analysis, München, 09.06.2015
- [15] G. Oreski: *Influence of polymeric encapsulation materials on PV Module Reliability*. Hochleistungskunststoffe im Fokus, 22.3.2017, Technologiezentrum Mittelburgenland, Neutal
- [16] D. Rosewater, J Johnson (Sandia NL, US); M. Verga, R. Lazzari (RSE, IT); C. Messner, R. Bründlinger, J. Kathan (AIT, AT), J. Hashimoto, K. Otani (FREA, JP): *"International Development of Energy Storage Interoperability Test Protocols for Photovoltaic Integration"*; Vortrag: 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2015), Hamburg, Proceedings EU PVSEC 2015, 11 S.
- [17] A. Morlier, M. Köntges, A. Heimberg, U. Jahn., K. A. Berger: *Degradationsraten für verschiedene Arten von Photovoltaik- Modulfehlern und Zuverlässigkeit anderer Systemkomponenten*. Tagungsband 32. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany, (2017).

- [18] R. Bründlinger, T. Strasser, G. Lauss, A. Hoke, S. Chakraborty, G. Martin, B. Kroposki, J. Johnson, E. Jong: *Lab Tests: Verifying That Smart Grid Power Converters Are Truly Smart*; IEEE Power and Energy Magazine, Volume 13, Issue 2 (2015), S. 30 - 42.
- [19] 3<sup>rd</sup> Task 13 Webinar: *Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field*. Speakers: Gernot Oreski (PCCL, AT) and Ulrike Jahn (TUV Rh Energy, DE). 16 Oct 2017, 15-16h CEST. [http://go.leonardo-energy.org/171016PVPS06\\_Join.html](http://go.leonardo-energy.org/171016PVPS06_Join.html)
- [20] B. Kubicek, T. Schlager, and M. Halwachs, "Outdoor Lock-In Thermographie von PID-Modulen," in 31. Symposium Photovoltaische Solarenergien, 2017.
- [21] G. Oreski: *Material interactions in PV modules: The role of polymers in PV module degradation*. 10 Jahres Symposium Ulbrich, Forchtenstein, 31.08.2017
- [22] IEA-PVPS Sustainable Photovoltaics Workshop. Vernetzungs-Workshop IEA PVPS Task 12, 13 & 15. 2018-03-19, WKO Wien, <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/veranstaltungen/2018/20180319-workshop-sustainable-photovoltaics.php>
- [23] G. Oreski: *Material interactions in PV modules: The role of polymers in PV module degradation*. SAYURI PV Workshop, Otsu (J), 11.11.2018
- [24] J. A. Tsanakas, U. Jahn, M. Herz, M. Köntges, D. Parlevliet, M. Paggi, J. S. Stein, K. A. Berger, B. Kubicek, S. Ranta, R. French, M. Richter, and T. Tanahashi: *Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications: An Overview of the Latest Report by IEA PVPS Task 13*. WIP (Hrsg.): Proceedings of the 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1440-1447, Brussels, Belgium, (2018).
- [25] G. Oreski, A. Omazic, G. Eder, L. Neumaier, C. Hirschl, M. Edler, W. Krumlacher, R. Ebner: *PV materials and modules developed for certain climatic zones*. 8<sup>th</sup> SOPHIA PV-Module Reliability Workshop, September 4 - 5, 2018; University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering, Slovenia
- [26] Bernhard Kubicek: *Exceptional UV features in the field*. 54 p. Workshop UV Fluorescence Measurement for Damage Assessment of PV Modules. Emmerthal bei Hameln, Deutschland, 12. Oktober 2018
- [27] M. Halwachs, L. Neumaier, N. Vollert, L. Maul, S. Dimitriadis, Y. Voronko, G. C. Eder, A. Omazic, W. Mühleisen, Ch. Hirschl, M. Schwark, K. A. Berger, R. Ebner: *Statistical evaluation of PV system performance and failure data among different climate zones*. Journal Renewable Energy, 37 p. in Print, 2019
- [28] Hsinjin Edwin Yang, Roger French, Laura Bruckman (Eds.): *Durability and Reliability of Polymers and Other Materials in Photovoltaic Modules*. Elsevier, In print: Publ. date 04-2019, 250 p.

## Literatur zur Thematik

- [29] IEA PVPS: *Trends 2018 in Photovoltaic Applications. 23<sup>rd</sup> Ed., Survey Report of selected IEA countries between 1992 and 2017*, Report IEA PVPS T1-34: 2018, 88 p., <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=trends>
- [30] Wissenschaftlicher Beirat der Deutschen Bundesregierung (WBGU) - Globale Umweltveränderungen: *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit*. Berlin, 2003

- [31] Mark Diesendorf, Ben Elliston: *The feasibility of 100% renewable electricity systems: A response to critics*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 93 (Oct. 2018), p. 318-330, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.042>
- [32] US National Aeronautics and Space Administration (NASA) and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): *Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally*. January 18, 2017; <https://climate.nasa.gov/news/2537/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally/>
- [33] Maurer C., Koch E., Hammerl C., Hammerl T., Pokorny E. (2009): *BACCHUS temperature reconstruction for the period 16th to 18th centuries from Viennese and Klosterneuburg grape harvest dates*. Journal of Geophysical Research 114, D22106, doi:10.1029/2009JD011730
- [34] R. Böhm, I. Auer, W. Schöner, M. Ganekind, C. Gruber, A. Jurkovic, A. Orlik, M. Ungersböck: *Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitätsklimadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760*. Wiener Mitteilungen Bd. 216: Hochwässer, Risikoanalyse und Vorhersage. Wien, 2009, 14p; <http://www.zamg.ac.at/histalp/>
- [35] IPCC 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp
- [36] Ren 21: *Renewables 2018 Global Status Report*. REN21 Secretariat Paris, 2018
- [37] A. Jäger-Waldau: *PV Status Report 2018*, EUR 29463 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97465-6, doi:10.2760/826496, JRC113626, 95 p. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/pv-status-report-2018>
- [38] American Physical Society (APS), Alan Chodos (Ed.): *This Month in History: April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell*. APS News April 2009 (Volume 18, Number 4), <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>, Ridge, NY
- [39] National Renewable Energy Laboratory (NREL): *Research Cell Record Efficiency Chart*. Version 2019-01, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiency-chart.20190103.pdf>, and *Champion Module Efficiencies*, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/research-module-efficiency-chart.20190128.pdf>
- [40] IRENA: *Renewable Energy Statistics 2016*, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2016, 300 p., s. [resourceirena.irena.org](https://resourceirena.irena.org)
- [41] Pérez-López P, Gschwind B, Blanc I, et al. *ENVIPV: an interactive Web Client for multi-criteria life cycle assessment of photovoltaic systems worldwide*. November 23, 2016. <https://doi.org/10.1002/pip.2841> Prog.Photovolt. Vol.25/7 (Special Issue: Key Papers from EU PVSEC 2016), July 2017, Pages 484-498
- [42] bmvit: *Berichte aus Energie- und Umweltforschung: H. Fechner, C. Mayr, A. Schneider, M. Rennhofer, G. Peharz: Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich*. (15/2016), Wien, Juni 2016, 50 p., s. [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at)
- [43] Haas, R., Resch, G., Burgholzer, B., Totschnig, G., Lettner, G., Geipel, J., *Endbericht - Stromzukunft Österreich 2030 - Analyse der Erfordernisse und Konsequenzen eines ambitionierten Ausbaus erneuerbarer Energien*, Technische Universität Wien, Mai 2017, [https://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at\\_pages/research/downloads/PR\\_464\\_final\\_report\\_Stromzukunft\\_Oesterreich\\_2030\\_\(TU\\_Wien\\_-\\_EEG\\_Mai\\_2017-final\).pdf](https://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/research/downloads/PR_464_final_report_Stromzukunft_Oesterreich_2030_(TU_Wien_-_EEG_Mai_2017-final).pdf)
- [44] bmvit: *Berichte aus Energie- und Umweltforschung: Innovative Energietechnologien in Österreich. Marktentwicklung 2017* (4/2018), 257 p., s. [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at)

- [45] Caroline Tjengdrawira, David Moser, Ulrike Jahn, Matthias v. Armansperg, Ioannis-Thomas Theologitis, Máté Heisz: *PV Investment Technical Risk Management - Best Practice Guidelines for Risk Identification, Assessment and Mitigation*. D5.8 (20/02/2017), 32 p. [http://www.eurac.edu/en/research/technologies/renewableenergy/publications/Documents/Solar\\_Bankability\\_Final\\_Report.pdf](http://www.eurac.edu/en/research/technologies/renewableenergy/publications/Documents/Solar_Bankability_Final_Report.pdf)
- [46] D. Riley and J. Johnson; *Photovoltaic prognostics and health management using learning algorithms*, in 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012, pp. 1535–39.
- [47] Jan Vedde, et.al.: *Technical Parameters used in PV financial Models*. 7DO.14.4, 32nd EU PVSEC 2016, p. 2892-97
- [48] IEC TC82 WG2 (working group PV modules): IEC 61853-3 Ed.1 (2018): *Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 3: Energy Rating of PV Modules*. 26 p.
- [49] IEC TC82 WG2 (working group PV modules): IEC 61853-4 Ed.1 (2018): *Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 4: Standard reference climatic profiles*. 16 p.
- [50] Dirk C. Jordan, Sarah R. Kurtz, Kaitlyn VanSant, Jeff Newmiller: *Compendium of photovoltaic degradation rates*. Prog. Photovolt: Res. Appl. Febr. 2016; 24: 978–989
- [51] WMO – World Meteorological Organization: *WMO Provisional statement on the State of the Global Climate in 2018*, [http://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/Draft\\_Statement\\_26\\_11\\_2018\\_v12\\_approved\\_jk\\_0.pdf?VXUDp1UTyslkHog4\\_TTuiHslzZ6A9D93](http://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/Draft_Statement_26_11_2018_v12_approved_jk_0.pdf?VXUDp1UTyslkHog4_TTuiHslzZ6A9D93), 12 p.
- [52] ZAMG: *HISTALP Langzeitklimareihen – Österreich, Jahresbericht 2018*, [https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok\\_news/dok\\_histalp/jahresbericht-2018/bericht](https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_news/dok_histalp/jahresbericht-2018/bericht), 5p.
- [53] Maurer C., Koch E., Hammerl C., Hammerl T., Pokorny E. (2009): *BACCHUS temperature reconstruction for the period 16th to 18th centuries from Viennese and Klosterneuburg grape harvest dates*. Journal of Geophysical Research 114, D22106, doi:10.1029/2009JD011730
- [54] IEA PVPS Task 1: *Global PV Market 2017 snapshot*, 2018. <http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/Snapshot2018-infographic.JPG>
- [55] BM E. Köstinger: *Vortrag an den Ministerrat; Erneuerbaren Ausbau Gesetz 2020 – EAG 2020. Änderung ÖSG 2012, ElWOG 2010, GWG 2011, und weiterer*. BMNT-555.300/0079-VI/3/2018, 5.12.2018, 16 p. [https://www.bundeskanzleramt.gv.at/documents/131008/1111440/38\\_17\\_mrv.pdf/f8fb7455-79b7-4939-b6f2-a9cd8f70b6da](https://www.bundeskanzleramt.gv.at/documents/131008/1111440/38_17_mrv.pdf/f8fb7455-79b7-4939-b6f2-a9cd8f70b6da)
- [56] Österreichs Energie: *E-Wirtschaft definiert Rahmen für Erneuerbaren-Ausbau*. Presseaussendung OTS0071, 8. Nov. 2018, [https://www.ots.at/presseaussendung/OTS\\_20181108\\_OTS0071/e-wirtschaft-definiert-rahmen-fuer-erneuerbaren-ausbau](https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20181108_OTS0071/e-wirtschaft-definiert-rahmen-fuer-erneuerbaren-ausbau)
- [57] Photovoltaik Austria: *Konzept zum 100.000 Dächer und Speicherprogramm als Beitrag zu 100% erneuerbarem Strom. Management Summary*, 7 p., 2018, <https://www.pvaustria.at/konzept/>
- [58] Gustav Resch, Bettina Burgholzer, Gerhard Totschnig, Georg Lettner, Hans Auer, Jasper Geipel, Reinhard Haas: *Stromzukunft Österreich 2030 - Analyse der Erfordernisse und Konsequenzen eines ambitionierten Ausbaus erneuerbarer Energien*. Mai 2017, 98 p. [https://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at\\_pages/research/downloads/PR\\_464\\_final\\_report\\_Stromzukunft\\_Oesterreich\\_2030\\_\(TU\\_Wien\\_-\\_EEG\\_Mai\\_2017-final\).pdf](https://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/research/downloads/PR_464_final_report_Stromzukunft_Oesterreich_2030_(TU_Wien_-_EEG_Mai_2017-final).pdf)
- [59] Forschungsforum 2/2005: *Das Schiestlhaus am Hochschwab – Alpiner Stützpunkt in Passivhaustechnologie. Umsetzung eines integrierten Gebäudekonzepts in „Insellage“ im Rahmen*

- von „Haus der Zukunft“. Nachhaltig wirtschaften konkret, 6 p., [https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw\\_pdf/fofo/fofo2\\_05\\_de.pdf](https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/fofo/fofo2_05_de.pdf)
- [60] National Renewable Energy Laboratory (NREL): *Research Cell Record Efficiency Chart*. Version 2017-01-17, <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart>
- [61] Caroline Tjengdrawira, Jan Vedde: *Subtask 1: Economic of PV System Performance and Reliability*, Präsentation beim Task 13 Meeting am 17.3.2015 in Leoben, 16 p.
- [62] PEARL PV COST Action CA16235 - *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems: Evaluations of Large-Scale Monitoring Data*, <https://www.cost.eu/actions/CA16235/> und Webseite Pearl-PV: <https://www.pearlpv-cost.eu/>.
- [63] INFINITY - *Climate sensitive long-time reliability of photovoltaics*. Leitprojekt EF, 1. Ausschreibung. FFG-Nr. 850.414, <https://www.ctr.at/fe-kompetenz/fe-projekte/ffg-programme/infinity/>
- [64] SOLAR TRAIN – *Photovoltaic modules life time forecast and evaluation*. EU-H2020 GA. No. 721.452, Marie Skłodowska Curie-Action, <https://solar-train.eu>
- [65] E-control: *Technisch organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen. Teil D: Besondere technische Regeln. Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen*. Version 2.3 vom 1.7.2016. [https://www.e-control.at/documents/20903/388512/TOR\\_D4\\_V2.3+ab+1.7.2016.pdf/1fbc3aff-36a6-4eee-8de5-6027eaa53a89](https://www.e-control.at/documents/20903/388512/TOR_D4_V2.3+ab+1.7.2016.pdf/1fbc3aff-36a6-4eee-8de5-6027eaa53a89), 47 p.
- [66] IEC TS 62446-3: Ed. 1 2017 *Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 3: Photovoltaic modules and plants - Outdoor infrared thermography*. International Electrotechnical Commission, Geneva 2017, 37 p.
- [67] IEC TS 60904-13: Ed. 1 2018 *Photovoltaic devices - Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules*. International Electrotechnical Commission, Geneva 2018, 40 p.
- [68] TPPV: *Brief an BM Ing. Norbert Hofer zur Erhöhung der Forschungsmittel im Bereich Erneuerbare Energie*. <http://tppv.at/2018/02/26/brief-an-bm-ing-norbert-hofer-zur-erhoehung-der-forschungsmittel-im-bereich-erneuerbare-energie/>
- [69] Österreichische Photovoltaik-Konferenz 2018, WKO Wien, [https://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/2018-03-20\\_PVA-Kongress-2018.pdf](https://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/2018-03-20_PVA-Kongress-2018.pdf)
- [70] Deutscher Bundesverband Energiespeicher (BVES) & BSW Solar; Hrsg.: *Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme*. Ausgabe 03/2017, 43 p., [https://www.bves.de/wp-content/uploads/2017/04/Effizienzleitfaden\\_V1.0.4\\_April2017.pdf](https://www.bves.de/wp-content/uploads/2017/04/Effizienzleitfaden_V1.0.4_April2017.pdf)

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1: Globale Endenergie und Anteile erneuerbarer Energieträger 2016 .....      | 6  |
| Abb. 2: Anteil der PV im ele. Energiemix der Länder 2017 .....                    | 7  |
| Abb. 3: Entwicklung der Photovoltaik Zell- und Modulwirkungsgrade .....           | 9  |
| Abb. 4: Jährliche PV-installationen und regionale Verteilung 2015-2017 .....      | 10 |
| Abb. 5: Weltmarktpreise von PV-Modulen und Kosten für Haus-PV-anlagen .....       | 10 |
| Abb. 6: Anforderungen an Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit ..... | 11 |
| Abb. 7: IEA-PVPS Task 12 online-Tool: Wien und Nicosia: PR = 80%, 25a.....        | 13 |
| Abb. 8: IEA-PVPS Task 12 online-Tool: Wien und Nicosia: PR = 90%, 40a.....        | 13 |
| Abb. 9: PV-Anlage mit Überschusseinspeisung .....                                 | 20 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 10: Schema Finanzierungsmodells von PV-Kraftwerken .....                  | 21 |
| Abb. 11: Tornado-Plot: Sensitivitätsanalyse für ein Kraftwerksprojekt .....    | 21 |
| Abb. 12: Auswertung von Daten einer Österreichischen PV-Anlage .....           | 22 |
| Abb. 13: Vergleich Prognosemodelle für morgigen Ertrag .....                   | 23 |
| Abb. 14: Messunsicherheiten bei der Modul-Performance .....                    | 24 |
| Abb. 15: Fehlerarten und Fehlerentwicklung bei PV Modulen .....                | 25 |
| Abb. 16: Struktur des xls-m-Erhebungsbogens zu PV-Anlagenfehlern .....         | 26 |
| Abb. 17: Modulfehler, Degradationsraten in Köppen-Geiger Hauptklimazonen ..... | 26 |
| Abb. 18: Degradationsprozesse beim Vergilben (und Bleichen) von EVA .....      | 27 |
| Abb. 19: Nacht UV-Fluoreszenzaufnahme mit AIT 60W UV-LED Handlampe .....       | 28 |
| Abb. 20: Übersicht Anlageninspektion mit Infrarot-Thermografie .....           | 29 |
| Abb. 21: Nacht Elektrolumineszenz, PID-s Module .....                          | 30 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Im IEA-PVPS TCP aktive Tasks .....                                          | 8  |
| Tabelle 2: Subtask-Struktur des IEA PVPS Task 13 .....                                 | 17 |
| Tabelle 3: Beabsichtigtes Arbeitsprogramm und Berichte des Task 13 von 2018-2021 ..... | 35 |

## Abkürzungsverzeichnis

Entfällt, die wenigen verwendeten Abkürzungen werden jeweils direkt im Text erklärt.

## 8. Anhang

In den Verzeichnissen sind jeweils die entsprechenden Links zu den Publikationen des Tasks 13 und zu weiterführenden Informationen angegeben, die frei verfügbar sind.

