



Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



School of
Engineering

IEFE Institut für Energiesysteme
und Fluid-Engineering

Datum: 05.12.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW School of Engineering, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE)
Technikumstrasse 9, CH-8401 Winterthur
www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/iefe/

Autor/in:

Franz Baumgartner, ZHAW IEFE, bauf@zhaw.ch
Cyril Allenspach, ZHAW IEFE, alls@zhaw.ch
Fabian Carigiet, ZHAW IEFE, cari@zhaw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502247-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

In den letzten Jahren haben Hersteller von Power Optimizer Systemen deutlich an Marktanteil gewonnen. Dafür gibt es verschiedene Gründe, wie Verschattungssituationen, Einzelmodulüberwachung, Brandschutz und einfachere Planung. Im Gegenzug zahlt der Endkunde durch die zusätzliche Elektronik einen höheren Preis für die Photovoltaikanlage. Den Kunden wird in der Regel vermittelt, dass der Optimierer immer die technisch effizienteste Lösung ist. Für Kunden, Planer, Installateure und Wissenschaftler ist es von zentraler Bedeutung, wann genau mit welchem System, String-Wechselrichter oder Optimierer im Jahresdurchschnitt Mehrerträge erzielt werden. Um diese Frage zu beantworten, gibt es hingegen kaum Studien und Untersuchungen, die reproduzierbar sind. Die Expertengruppe für Photovoltaikanlagen an der ZHAW IEFÉ untersucht deshalb in diesem vom BFE geförderten Projekt diese Fragen, unter anderem mit dem Ziel, quantitativ fundierte Aussagen und Empfehlungen für die Praxis abzuleiten. Die Simulationen unter verschiedenen Verschattungsbedingungen werden wiederum mit Labormessungen verifiziert. Der Schlussbericht 2023 finalisiert die Projektergebnisse, wobei die Projekt-Meilensteine der Periode 2023 im Detail beschrieben werden. Zunächst werden die finalen Ergebnisse der Power Optimizer Wirkungsgradmessungen präsentiert, welche das Fundament für alle weiteren Untersuchungen darstellten. Anschliessend werden neue, praxisrelevante Verschattungssituationen visualisiert und beschrieben. Anders als bisher und wie in den Zwischenberichten 2021 und 2022 zu finden ist, wurden nicht neue Verschattungsobjekte untersucht, sondern die Auswirkungen von bekannten Verschattungsobjekten auf unterschiedliche Photovoltaikmodultypen analysiert. Weiter wird im Schlussbericht die neue Definition der Gewichtungsfaktoren für die Berechnung der «Shading Adaption Efficiency» unterschiedlicher Verschattungsobjekte vorgestellt, wobei eine Reduktion von sechs auf fünf Faktoren vorgenommen wurde. Als letztes Ergebnis werden die Messresultate der DC/AC-Wirkungsgrade von fünf verschiedenen Modulwechselrichtermodellen präsentiert und ein Vergleich mit Power Optimizer gezogen. Zum Schluss findet sich eine Übersicht aller Publikationen die als Teil des Projekts umgesetzt wurden und in welchen die detaillierten Ergebnisse und Analysen zu finden sind.



Résumé

Ces dernières années, les fabricants de systèmes d'optimisation de la puissance ont gagné des parts de marché. Il y a plusieurs raisons à cela, comme les situations d'ombrage, la surveillance des modules individuels, la protection contre les incendies et une planification plus simple. En contrepartie, le client final paie un prix plus élevé pour l'installation photovoltaïque en raison de l'ajout de l'électronique. On fait généralement croire aux clients que l'optimiseur est toujours la solution la plus efficace sur le plan technique. Pour les clients, les planificateurs, les installateurs et les scientifiques, il est essentiel de savoir quand exactement tel système, tel onduleur de chaîne ou tel optimiseur permet d'obtenir des rendements supplémentaires en moyenne annuelle. Pour répondre à cette question, il existe peu d'études et de recherches reproductibles. C'est pourquoi le groupe d'experts en installations photovoltaïques de la ZHAW IEFÉ étudie ces questions dans le cadre de ce projet soutenu par l'OFEN, notamment dans le but d'en tirer des conclusions quantitativement fondées et des recommandations pour la pratique. Les simulations réalisées dans différentes conditions d'ombrage sont à nouveau vérifiées par des mesures en laboratoire. Le rapport final 2023 finalise les résultats du projet et décrit en détail les étapes du projet pour la période 2023. Tout d'abord, les résultats finaux des mesures de rendement de l'optimiseur de puissance, qui ont servi de base à toutes les autres études, sont présentés. Ensuite, de nouvelles situations d'ombrage pertinentes pour la pratique sont visualisées et décrites. Contrairement à ce qui a été fait jusqu'à présent, et comme on peut le voir dans les rapports intermédiaires 2021 et 2022, ce ne sont pas de nouveaux objets d'ombrage qui ont été étudiés, mais les effets d'objets d'ombrage connus sur différents types de modules photovoltaïques. Le rapport final présente également la nouvelle définition des facteurs de pondération pour le calcul de l'efficacité d'adaptation à l'ombrage des différents objets d'ombrage, qui a été réduite de six à cinq facteurs. Enfin, les résultats des mesures du rendement DC/AC de cinq modèles différents d'onduleurs de modules sont présentés et comparés à Power Optimizer. Enfin, vous trouverez un aperçu de toutes les publications réalisées dans le cadre du projet, dans lesquelles les résultats détaillés et les analyses sont disponibles.



Summary

In recent years, manufacturers of Power Optimizer systems have gained significant market share. There are various reasons for this, such as shading situations, individual module monitoring, fire protection and simpler planning. In return, the end customer pays a higher price for the photovoltaic system due to the additional electronics. Customers are usually told that the optimizer is always the most technically efficient solution. For customers, planners, installers and scientists, it is of central importance when exactly with which system, string inverter or optimizer additional yields are achieved on an annual average. However, there are hardly any studies and investigations that are reproducible that proof the additional yields by Power Optimizer systems. The expert group for photovoltaic systems at the ZHAW IEFEE is therefore investigating these questions in this project, which is funded by the SFOE, with the aim, among other things, of deriving quantitatively sound statements and recommendations for practical application. The simulations under different shading conditions are in turn verified with laboratory measurements. The final report 2023 finalizes the project results, describing the project milestones of the 2023 period in detail. First, the final results of the Power Optimizer efficiency measurements are presented, which formed the basis for all further investigations. Subsequently, new, practically relevant shading situations are visualized and described. Contrary to previous analyses, which were part of reports 2021 and 2022, not new shading objects were investigated, but the effects of known shading objects on different photovoltaic module types were analyzed. Furthermore, the new definition of the weighting factors for the calculation of the "Shading Adaption Efficiency" of different shading objects is presented in the final report, with a reduction from six to five factors. As a last result, the measurement results of the DC/AC efficiencies of five different module inverter models are presented and a comparison with Power Optimizer is made. Finally, there is an overview of all publications that were implemented as part of the project and in which the detailed results and analyses can be found.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele	8
2 Anlagenbeschrieb	10
3 Vorgehen und Methode.....	11
4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	13
4.1 Übersicht der Projekt-Meilensteine 2023	13
4.2 Laborkomponenten.....	16
4.3 Labormessungen	19
4.4 Ergebnisse gemäss Meilensteinen.....	23
5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse.....	28
6 Nationale und internationale Zusammenarbeit	29
7 Publikationen	30
8 Literaturverzeichnis	31
9 Anhang	32



Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom
DC	Gleichstrom
DUT	Devices-under-test
Euro	Europäisch
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEFE	Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
MLPE	Module-level power electronic
MPP	Maximum Power Point
PPA	Precision power analyzer
PV	Photovoltaik
REEE-Lab	Renewable Energy Electrical Efficiency Laboratory
SAE	Shading adaption efficiency
SAS	Modular solar array simulator
SC	Shading cases
SINV	Strangwechselrichter-System ohne MLPE
V	Volt
W	Watt
WR	Wechselrichter
ZHAW	Zürcher Hochschule der angewandten Wissenschaften



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Wie bereits in Zwischenreport 2021 beschrieben wurde, kam der Antragssteller vor über einem Jahrzehnt, als Topic Organizer, Photovoltaic (PV) Balance of System Components bei der Europäischen Solarenergiekonferenz 2010 in direkten Kontakt mit dem Thema der Leistungselektronik auf Modulebene. In diesem Jahr stellte nämlich das Startup SolarEdge erstmalig ihr Konzept der Optimizer vor und versprach deutliche Mehrerträge im Jahresgewinn im zweistelligen Prozentbereich [1]. Seither war die Firma am Markt erfolgreich, ist Weltmarktführer in diesem Segment mit über 100 Millionen verkauften Power Optimizern und hat heute einen Umsatz von über einer Milliarde Dollar. Die Ertragsmaximierung bei einer dezentralen Regelung auf Modulebene verspricht bei Beschattung theoretische Mehrerträge im hohen einstelligen Prozentbereich. Dies ist jedoch abhängig von der Art und Form der Teilverschattungen, wobei in Realität die grössere Anzahl an Leistungselektronikkomponenten weitere Verluste verursachen und sich somit entweder der Ertragsvorteil reduziert oder sich über das Jahr ein Ertragsverlust einstellt.

1.2 Motivation des Projektes

Die Hersteller von dezentraler PV-Leistungselektronik sprechen von möglichen jährlichen Ertragssteigerungen von bis zu 20% mithilfe ihrer Komponenten, obwohl bisher nur ein Maximum von 7% beobachtet wurde. Wie im Zwischenbericht 2021 erwähnt, warben führende Hersteller auf der letztjährigen Messe Intersolar 2021 in München mit Hinweisen auf Mehrerträge von über 30% (siehe Zwischenbericht 2021, Anhang, Kapitel 10). Dies verdeutlicht den immer dringenderen Bedarf an unabhängigen wissenschaftlichen Fakten zur Quantifizierung der Leistungsunterschiede dieser komplexen, intelligenten, dezentralen PV-Anlagen. In diesem Forschungsprojekt wollen wir Methoden und transparente Lösungen für den Leistungsvergleich dieser Systeme bereitstellen.

1.3 Projektziele

Die Ertragsunterschiede von MLPE im Vergleich zu konventionellen String-Wechselrichtern werden für typische Verschattungsszenarien quantifiziert. Die dafür entwickelte Methodik basiert auf Messreihen zu Referenzzeitpunkten, nachdem einige dezentrale Leistungswandler im Labor auf ihre Effizienz getestet wurden. Durch eine statistische Analyse der theoretisch maximalen Leistung der Photovoltaikanlage im Vergleich zur tatsächlich erzeugten Leistung der leistungselektronischen Komponenten im Laufe eines Jahres werden Gewichtungsfaktoren ermittelt. Diese Gewichtungsfaktoren können dann mit den gemessenen Wirkungsgraden der Komponenten in vordefinierten Betriebspunkten multipliziert und summiert werden. Der daraus resultierende Parameter "Shading Adaption Efficiency" beschreibt, wie effizient das untersuchte System unter bestimmten Verschattungsbedingungen arbeitet. Eine detaillierte Beschreibung der Methode findet sich in Abschnitt 4.4.

Der vorgeschlagene Ansatz stellt eine Weiterentwicklung der in der Praxis etablierten Methode zur Bestimmung des durchschnittlichen Jahreswirkungsgrades von PV-Strangwechselrichtern dar. Die Ergebnisse dieser Forschung fließen bereits in internationale Kooperationen wie die IEA PVPS Task 13 und die IEC-Normung ein [2,3]. Damit wurde die Grundlage für die Aufnahme dieser Wirkungsgradkennzahlen für Teilverschattung in die Datenblätter der Hersteller von String- und MLPE-Komponenten für typische Verschattungsszenarien geschaffen.



- **Methodik**

Die universelle Machbarkeit des Effizienzvergleichs im Jahresertrag von unterschiedlichen Verschattungsfällen und Systemen von PV-Leistungswandlern konnte aufgezeigt werden, auf Basis von Labormessungen und Gewichtungsfaktoren für den mittleren Wirkungsgrade in der Jahresbilanz. Im Methodenfindungsprozess werden auch vielfältige kontinuierlich Labormessungen über grössere Zeiträume, Tage im Minutenschnitt am realen Set von vielen in Serie verschalteten Leistungswandler ausgewertet und die notwendigen Messunsicherheiten der eingesetzten Messgeräte und die Stabilität der anderen Komponenten werden bestimmt.

- **Detailresultat-Shading-Cases**

Für zwölf unterschiedliche Verschattungsvarianten bzw. Dachsituationen SC (shading cases), vorrangig auf Einfamilienhäusern, werden die Testsequenzen für die Referenzmessungen erstellt und im Labor getestet. Dabei wird die Vielfalt obiger SC noch durch zwei weitere Parameter gesteigert, der Anzahl der Solarmodule im String und die Orientierung der Generatorfläche, aber auch Jahreseinstrahlungssumme am jeweiligen Anlagenstandort.

- **Detailresultat-Wandler-Verlustmodelle**

Im Labor werden Testsequenzen entwickelt, um die Verluste eines MLPE in allen Arbeitsbereichen zu messen, ausgeführt an zehn in Serie geschalteten Optimizer. Der Arbeitsbereich wird von der Eingangsleistung und der Eingangs- sowie der Ausgangsspannung bestimmt. Daraus werden Verlustmodelle entwickelt, welche die durch Messungen bestimmten Verlustkoeffizienten von vier unterschiedlichen kommerziellen MLPE nutzen. Zu diesen statischen Wirkungsgraden werden noch die typischen dynamischen MPP-Trackingverluste mittels transienter Messungen bestimmt. Die Ergebnisse werden allgemein zugänglich gemacht. Sie allein erlauben aber noch nicht die Bewertung der jährlichen Verschattungsverluste, sondern sind lediglich ein Baustein dafür. Das Potential der in Zukunft erwarteten Effizienzsteigerung der MLPE-Komponenten werden aufgezeigt.

- **Verifikation-Parametervariation**

Die Abweichung der Resultate mit den Gewichtungsfunktionen wird durch Parametervariation bestimmt. Dies soll z.B. eine laterale Verschiebung eines Verschattungsobjekte wie ein Schornstein zu m PV-Generator sein, oder eine Abänderung der Anzahl der Module im String, oder eine andere Ausrichtung des Daches. Die gleiche Methode der Ermittlung der Verschattungseffizienz wird auch an Stringinverter getestet und für ganze Tage in Minuten-Labormessreihen mit den Resultaten der dezentralen Wandler verglichen.

- **Verifikation-Outdoor**

Die Outdoor-Messergebnisse realer MLPE PV Systemen werden mit dem eigens entwickelten Softwaretool MLPEShade unter Einbezug der Verlustmodelle der Optimizer verglichen.

- **Zusatzaspekte**

Weitere Vor- und Nachteile der dezentralen Leistungswandler werden im Ausblick diskutiert, wie thermischer Hotspot, Spannungsfreischaltung, Langzeitstabilität, um weiterführende Forschungsthemen zu adressieren.



2 Anlagenbeschreibung

Für die Messung und Analyse von MLPE im Labor der ZHAW School of Engineering, wurde die folgende Systemstruktur aufgebaut:

- An zehn Laborarbeitsplätzen sind je ein Solaredge Power Optimizer P405 und P370, ein Tigo TS4-A-O, sowie ein Huawei SUN2000-450W-P fest installiert.
- Jeder Optimizer ist mit einen «Modular Solar Array Simulator» (SAS) des Typ E4361A der Firma Keysight verbunden. Die SAS Geräte können anhand von Strom- und Spannungswerten eine I-V Kurve eines PV-Moduls bilden, wobei anhand von 4'096 Punkten das Verhalten des Moduls elektrisch wiedergegeben wird.
- Am Eingang, sowie am Ausgang der Optimizer besteht eine Verbindung zum Leistungsmessgerät, 4th Newton PPA1530, welches die Strom-/Spannungs- und Leistungswerte misst. Mit den Messdaten am Ein-/Ausgang können folglich die Wirkungsgrade und Performance der Geräte präzise erfasst werden (typisch 0.25%, Unsicherheit $k=1$, für die hier untersuchten Power Optimizer).
- Der String aus zehn Optimizer werden mit den Wechselrichtern verbunden, wobei folgende Typen zu Verfügung stehen: Solaredge SE3500, SE3500H, SMA SB3.6 oder Huawei SUN2000-3.68KTL.
- Für die Messung der Gesamtanlage und des Wechselrichters ist ein 4th Newton PPA5530 angeschlossen, welcher die DC- sowie AC-seitige, Strom-, Spannungs- und Leistungsmessung übernimmt.

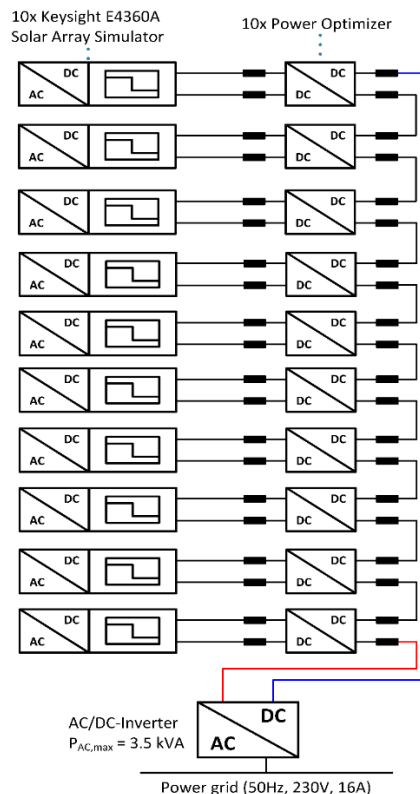


Abbildung 1: Schaltschema des MLPE-Testsystems in den Räumlichkeiten des ZHAW SoE REEE-Labs



3 Vorgehen und Methode

Indoor-Labor – Performance Tests:

Die Effizienzanalyse von MLPEs durch Labormessungen in den Räumlichkeiten der ZHAW IEFE wurde durch Erkenntnisse aus der Literatur vorangetrieben. Diese Analyse erfolgt mithilfe des REEE-Labors (Renewable Energy Electrical Efficiency Lab), einer etablierten Laborinfrastruktur an der ZHAW IEFE, die in den letzten Jahren aus öffentlichen Mitteln gefördert wurde. Im Rahmen des Projekts wurden zusätzliche "devices-under-test" (DUT) finanziert, installiert und anschliessend getestet, gemessen und in das MLPEShade-Softwaretool integriert.

Im IEFE REEE-Lab stehen zehn Arbeitsplätze zur Verfügung, die jeweils mit einem Solar Array Simulator und einem präzisen Power Analyzer ausgestattet sind. Diese Konfiguration ermöglicht die gleichzeitige Messung von zehn MLPEs, die in Reihe geschaltet sind (siehe Kapitel 2). Durch umfassende Messungen der Optimierer in verschiedenen Betriebspunkten werden Verlustmodelle für die MLPEs entwickelt. Diese Modelle berücksichtigen die verschiedenen Arten von Leistungsverlusten, die mit den Betriebsarten verbunden sind, wie z. B. die Aufwärts- oder Abwärtswandlung in der Betriebskennlinie ($k = I_{OUT}/I_{IN}$, grösser oder kleiner als 1).

Die daraus resultierende Matrix von Verlustmodellen beschreibt den Wirkungsgrad verschiedener Typen und Topologien der Optimierer. Um den Gesamtwirkungsgrad des MLPE-Systems zu bestimmen, wird der gemessene Wirkungsgrad des endgültigen DC/AC-Wechselrichters berücksichtigt. Dieser Ansatz erleichtert die Bewertung des AC-Energieertrags des gesamten Systems.

Tabelle 1: Devices-under-test im IEFE REEE-Lab für Performance Tests

PV-Wechselrichter	Power Optimizer
SMA SunnyBoy 3.6	Solaredge P370
Solaredge SE3500	Solaredge P370i
Solaredge SE3500H	Solaredge P405
Huawei SUN2000-3.68KTL	Solaredge S500B
Fronius Symo 5kW	Huawei SUN2000-450W-P
	Tigo TS4-A-O



Abbildung 2: Räumlichkeiten des IEFE REEE-Labs



Abbildung 3: Power Analyser und zwei Optimizer



Simulation der Verschattung:

In den vergangenen Jahren wurde am IEFE die Kompetenzen der Feinanalyse von Outdoor-Messungen am EKZ-Referenzsystem in Dietikon aber auch von vertikalen bifazialen Modulen mit der Modellierung der Solarstrahlung aufgebaut [6]. So erfolgte 2020 am IEFE der Start zur Entwicklung des internen Softwaretools, MLPEShade, für die Berechnung von IV-Kennlinien eines Strings mit und ohne Abschattungssituation, aufgelöst auf Zellebene und mit Zeitaufösungen im Minuten-bereich. Es beinhaltet neben den Einstrahlungs- und Verschattungsanalyse auch die Bestimmung der Stromspannungscharakteristik, inklusive Bypassdioden aller Module im System und die jeweils aktualisierten Verlustmodelle der MLPE's. Dieses Tool liefert zum einen die Ansteuerparameter für die Solar Array Simulatoren für die Vermessung der Optimizern im Indoor REEE-Lab und zum anderen eine Jahresertragssimulation des Optimizer- bzw. Stringwechselrichter-Systems für die gegebene Abschattungssituation.



4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

4.1 Übersicht der Projekt-Meilensteine 2023

- M1c: 3 weitere Verschattungsfälle die in Rücksprache mit internationalen Partnern, wie z.B. USA und den dort typischen Dach- und Meteodaten selektiert sind liegen als DC-Output vor.
- M3b: Resultate zu AP3d-f liegt vor:
- d) 3 weitere Verschattungsfälle nach M1c vermessen und die Gewichtung bestimmt
 - e) Vermessung von Modulinverter DC/AC und Ausblick auf Multistringinverter
 - f) Vorschlag für Referenzmessungen in anderen Labors nach dieser Methode
- M4b: Resultate zu AP4c-d liegt vor:
- c) Diskussion anderer Vor-/Nachteile MLPE, Betriebsdauer, Sicherheit, EMV aus Literatur
 - d) Potential der Wirkungsgradsteigerung durch Komponentenwahl, SiC, GaN
- M5c: Mindestens drei internationale Publikationen mit Partner liegen vor, nach AP5c:
- c) Einbindung in internationale Gremien, IEA und gegebenenfalls Normengremien, internationale Konferenzen, gemeinsame Fachpublikationen mit internationalen Forschungspartnern liegen vor

Bewertung der Meilensteine

- M1c: Die Verschattungsfälle «Kamin» und «Gaube (L)» wurden mit Halbzellen, Dirltelzellen, sowie mit verschattungsresistenten Modultypen (Vier-Quadrant Shingled Modul und Zelldioden Modul) analysiert und alle Kennwerte der Module liegen als Zeitreihe für ein Jahr vor.

Stand: **Vollständig erfüllt**

- M3b: d) Gewichtungsfaktoren aller Verschattungsfälle wurde optimiert, von 6 auf 5 Faktoren reduziert und in Abgleich mit Labormessungen verifiziert.

Stand: **Vollständig erfüllt**

e) Mehrere Modulwechselrichter (DC/AC) wurden im ZHAW-Labor vermessen und deren Verlustkoeffizienten definiert. Ein Ausblick auf die Vorteile von Multistringinverter, speziell im tiefen Leistungsbereich (<10kVA), wurde in der Dissemination festgehalten.

Stand: **Vollständig erfüllt**

f) Eine Messmethode für die einfache Bestimmung der Shading Adaption Efficiency von unterschiedlichen PV-Leistungselektroniksysteme in auswärtigen Labors wurde präsentiert. Die Integration in einer technischen Spezifikation unter IEC TC82 ist in Umsetzung.

Stand: **Vollständig erfüllt**



M4b: c) Weitere Vor-/Nachteile wurden in Branchen und Fachpublikationen (z.B. «Bulletin») aufgezeigt. Ausserdem wird in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen innerhalb des IEA Task 13 ST2.5 die Vor-/Nachteile von MLPE unabhängig von deren Leistungsfähigkeit weiter diskutiert. Die Ergebnisse im Bezug zur Performance, sowie die weiteren Vor-/Nachteile werden in einem IEA Report mit Veröffentlichung im Jahr 2024 festgehalten.

Stand: **Vollständig erfüllt** (Veröffentlichung in IEA Report im Jahr 2024)

d) Die potenzielle Wirkungsgradsteigerung durch Wide-Bandgap Materialien (GaN bzw. SiC) wurde als Teil der Wirkungsgradanalyse der vermessenen Power Optimizer diskutiert und in einer Journal Publikation festgehalten.

Stand: **Vollständig erfüllt**

M5c: Neben Publikationen wurden folgende Einbindungen in internationale Gremien, IEA bzw. IEC-Normengremien mit internationalen Forschungspartnern erreicht:

1. Erstellung und Einreichung einer technischen Spezifikation für die Bewertung von PV Power Conditioner (inkl. MLPE) im Rahmen der IEC TC82.
2. Leitung und Umsetzung des IEA PVPS Task 13 ST2.5: «Performance of partial shaded PV generators operated by optimized power electronics» mit Veröffentlichung im Jahr 2024.
3. Vorstellung der Erkenntnisse des EFPVShade Forschungsprojekts im offiziellen Parallel-Event: «System Design of Partial Shaded PV Generators Operated by Optimized Power Electronics», in Lissabon an der «40th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition» (EUPVSEC-40) organisiert von IEA PVPS.

Stand: **Vollständig erfüllt**

Auflistung der fürs Projekt ausgeführten ZHAW Arbeiten von Studierenden

Franz Baumgartner hatte bei allen Arbeiten die Betreuung

Abschluss	Art der Arbeit	Arbeitsstunden*	Autoren	Titel
2021 Okt	VT2 Master	12*30=180	Cyril Allenspach	Improvement of Labtests and Simulation of Buck/Boost-type MLPE
2021 Dez	PA Bachelor	2*6*30=360	Andrin Schneider Arturo Bänzinger	Partial shading simulations and indoor measurements of a SolarEdge P370 power optimizer system
2022 Juli	BA Bachelor	2*12*30=720	Arturo Bänzinger Andrin Schneider	Economical and technical performance analysis of photovoltaic power optimizer systems under partial shading conditions



2022 Dez	PA Bachelor	2*6*30= 360	Munder Selina Studer Nando	Entwicklung von Planungsempfehlungen für Solardächer mit Teilbeschattung und dem Einsatz von Independent-Optimizer
2023 Jan	MA Master	28*30= 810	Cyril Allenspach	Module Level Power Electronics Dynamic and Static Performance in Partial Shaded Photovoltaic Systems
2023 Jan	VT2 Master	12*30= 180	Luca Baumgart- ner	Elektrische Performance Analyse von PV Optimizer Systemen und Reduktion der Hot Spot Effekte

* 30 Arbeitsstunden pro erworbenen Credit



4.2 Laborkomponenten

Measurement device 1-10 for MLPE

Name	N4L PPA1530 Precision Power Analyzer
Bandwidth	DC, 10mHz ~ 1MHz
General Precision	[40Hz ~ 850Hz] Voltage measurement: $0.05 \% \text{ Rdg} + 0.05 \% \text{ Rng} + (0.005 \% \times \text{kHz}) + 5 \text{ mV}$ Current measurement: $0.05 \% \text{ Rdg} + 0.05 \% \text{ Rng} + (0.005 \% \times \text{kHz}) + 1 \text{ mA}$ Power measurement: $[0.1\% + 0.1\%/pf + (0.01\%/kHz)/pf] \text{ Rdg} + 0.05\% \text{ VA Rng}$
DC Precision	Voltage measurement: $0.1\% \text{ Rdg} + 0.1\% \text{ Rng} + 10\text{mV}$ Current measurement: $0.1\% \text{ Rdg} + 0.1\% \text{ Rng} + 5\text{mA}$ Power measurement: $0.20\% \text{ Rdg} + 0.20\% \text{ VA Rng} + 30\mu\text{W}$
Picture	

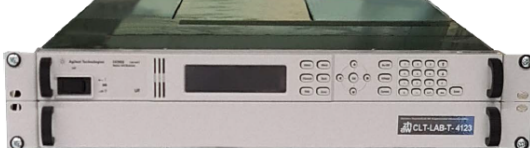
Measurement device 11 for Inverter

N4L PPA5530 Precision Power Analyzer
DC, 10mHz ~ 2MHz [40Hz ~ 850Hz] Voltage measurement: $0.01 \% \text{ Rdg} + 0.038 \% \text{ Rng} + (0.004 \% \times \text{kHz Rdg}) + 5\text{mV}$ Current measurement: $0.01 \% \text{ Rdg} + 0.038 \% \text{ Rng} + 0.004 \% \times \text{kHz} + 900 \mu\text{A}$ Power measurement: $[0.02\% + 0.03\%/pf + (0.005\%\times\text{kHz})/pf] \text{ Rdg} + 0.01\% \text{ VA Rng}$
Voltage measurement: $0.02 \% \text{ Rdg} + 0.076 \% \text{ Rng} + 10\text{mV}$ Current measurement: $0.02 \% \text{ Rdg} + 0.076 \% \text{ Rng} + 600 \mu\text{A}$ Power measurement: $0.04 \% \text{ Rdg} + 0.15 \% \text{ VA Rng} + 6 \mu\text{W}$


Mainframe 1-10 – for sources

Name	Keysight (formerly Agilent) E4360A – Mainframe
AC Nominal Input Rating	100/120/220/240 VAC; 50/60/400 Hz
Number of Module Slots	2
Maximum total output power	1200 W

Sources 1-10 – PV-Simulators

Name	Keysight E4362A Modular Solar Array Simulators
Rated Output DC Power	600 W
Max. DC Open-circuit Voltage	130 V
Max. DC Output Voltage V_{MPP}	120 V
Max. short-circuit Current	5 A
Max. rated Current I_{MPP}	5 A
Picture	

Sources 11-18 – PV-Simulators

Keysight E4361A-J01 Modular Solar Array Simulators
498 W
58.0 V
53.5 V
9.3 A
9.3 A



DUT 1-10 – Power Optimizer

Name	SolarEdge P405 Power Optimizer
Rated Input DC Power	405 W
Absolute Max. Input Voltage	125 Vdc
MPPT Operating Range	12.5 – 105 V
Max. Short Circuit Current	11 Adc
Max. Efficiency	99.5 %
Weighted Efficiency	98.8 %
Max. Output Voltage	85 Vdc
Max. Output Current	15 Adc
Picture	

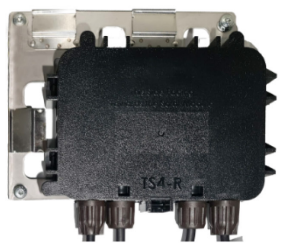
DUT 11-20 – Power Optimizer

Name	SolarEdge P370 Power Optimizer
Rated Input DC Power	370 W
Absolute Max. Input Voltage	60 Vdc
MPPT Operating Range	8 – 60 V
Max. Short Circuit Current	11 Adc
Max. Efficiency	99.5 %
Weighted Efficiency	98.8 %
Max. Output Voltage	60 Vdc
Max. Output Current	15 Adc
Picture	

DUT 21-30 – Power Optimizer

Name	Huawei SUN2000-450W-P
Rated Input DC Power	450 W
Absolute Max. Input Voltage	80 Vdc
MPPT Operating Range	10 – 80 V
Max. Short Circuit Current	14.5 Adc
Max. Efficiency	99.5 %
Weighted Efficiency	99.0 %
Max. Output Voltage	80 Vdc
Max. Output Current	15 Adc
Picture	

DUT 31-40 – Power Optimizer

Name	Tigo TS4-R-O
Rated Input DC Power	475 W
Absolute Max. Input Voltage	75 Vdc
MPPT Operating Range	16 – 75 V
Max. Short Circuit Current	12 Adc
Max. Efficiency	n.a.
Weighted Efficiency	n.a.
Max. Output Voltage	75 Vdc
Max. Output Current	15 Adc
Picture	



DUT 41 – PV-Inverter

Name	SolarEdge SE3500 Single Phase Inverter
Rated AC Output Power	3500 VA
Nominal AC Frequency	50 ± 5 Hz
AC Output Voltage	230 V
Max. Cont. Output Current	16 A
Max. DC Input Power	4.7 kWp
Max. DC Input Voltage	500 Vdc
Nominal DC Input Voltage	350 Vdc
Max. Input Current	13.5 Adc
Maximum Inverter Efficiency	97.6 %
European weighted Efficiency	97.5 %
Picture	

DUT 42 – PV-Inverter

Name	Huawei SUN2000-3.68KTL-L1
Rated AC Output Power	3680 VA
Nominal AC Frequency	50 ± 5 Hz
AC Output Voltage	230 V
Max. Cont. Output Current	16 A
Max. DC Input Power	5.520 kWp
Max. DC Input Voltage	600 Vdc
Nominal DC Input Voltage	360 Vdc
Max. Input Current	12.5 Adc
Maximum Inverter Efficiency	98.4 %
European weighted Efficiency	97.3 %
Picture	

DUT 43 – PV-Inverter

Name	SMA Sunny Boy 3.6
Rated AC Output Power	3680 VA
Nominal AC Frequency	50 ± 5 Hz
AC Output Voltage	230 V
Max. Cont. Output Current	16 A
Max. DC Input Power	5.5 kWp
Max. DC Input Voltage	600 Vdc
Nominal DC Input Voltage	365 Vdc
Max. Input Current	15 Adc
Maximum Inverter Efficiency	97.0 %
European weighted Efficiency	96.5 %
Picture	

DUT 44 – PV-Inverter

Name	SolarEdge SE3500H
Rated AC Output Power	3500 VA
Nominal AC Frequency	50 ± 5 Hz
AC Output Voltage	230 V
Max. Cont. Output Current	16 A
Max. DC Input Power	5.425 kWp
Max. DC Input Voltage	480 Vdc
Nominal DC Input Voltage	380 Vdc
Max. Input Current	10 Adc
Maximum Inverter Efficiency	99.2 %
European weighted Efficiency	98.8 %
Picture	



4.3 Labormessungen

- **Statische Wirkungsgrade von 450W-P und P370 [7]**

In Abbildung 4 ist der DC/DC-Wirkungsgrad, $\eta_{DC/DC}$, des Leistungsoptimierers SolarEdge P370 (Version 2020) dargestellt, der im Buck-, Switchless- und Boost-Betrieb arbeiten kann. Im Modus ohne Schaltbetrieb der Transistoren ($k_I = 1$) zeigt der gemessene Wirkungsgrad die höchsten Werte mit 98.3% bei 350W, 99.5% bei 110W und 98.0% bei 20W. Es ist dabei anzufügen, dass die genannten Werte mit den Datenblattangaben des P370 für den maximalen (99.5 %) und den gewichteten (98.5 %) $\eta_{DC/DC}$ -Wert übereinstimmen. Ausserhalb der Switchless-Mode sinken die Wirkungsgradwerte jedoch deutlich. Im Boost-Mode-Betrieb sind die höchsten Wirkungsgradwerte bei 160 W ($k_I = 0,88$) mit 98.5 % zu finden, während der durchschnittliche Wirkungsgrad bei etwa 98 % liegt. Für den Tiefsetzstellerbetrieb liegen die $\eta_{DC/DC}$ -Werte im Allgemeinen zwischen 97.5 % und 98.3 % bei relevanter Leistung (50 - 350 W), mit einem Höchstwert von 98.5 % bei 160 W ($k_I = 1,13$).

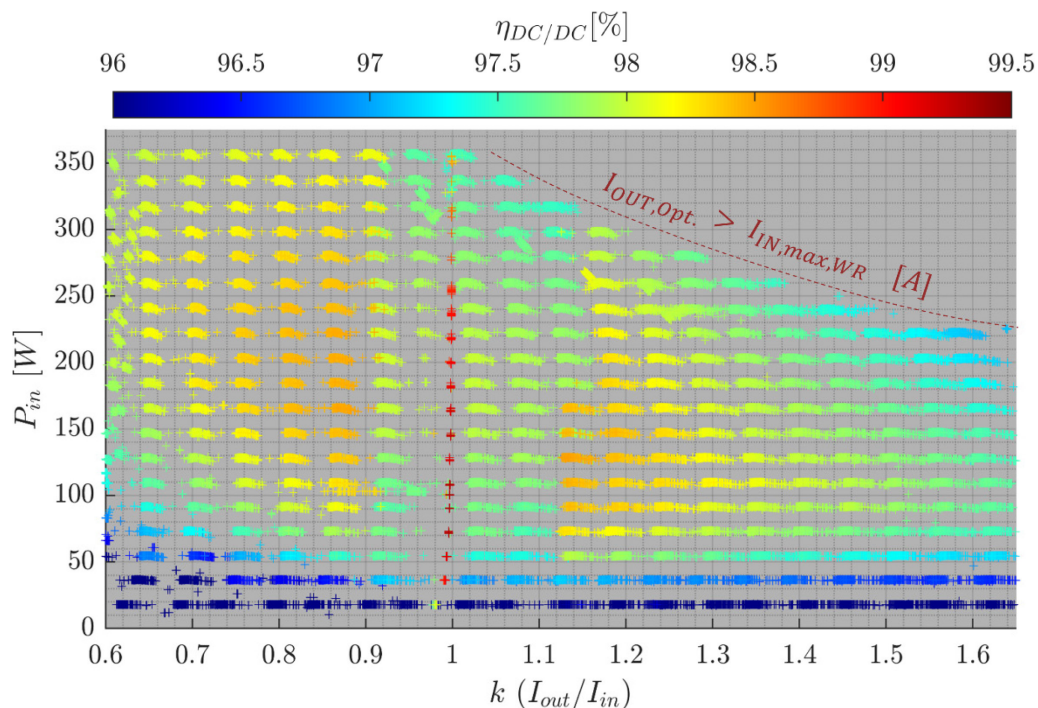


Abbildung 4: Wirkungsgrad-Mapping des P370 bei Eingangsspannung 35V als Funktion von P_{in} und k

Dementsprechend weisen beide Schaltmodi ähnliche durchschnittliche Wirkungsgrade auf, und in jedem Fall nehmen die DC/DC-Werte mit zunehmendem Abstand von $k_I = 1$, d. h. mit höherem Schaltbetrieb, allmählich ab, wie es auch für das Solaredge S500B (Modell 2022) in Abbildung 5 ersichtlich ist. Andererseits wird mit zunehmender Leistung ein höherer Strom durch die Transistoren geleitet, wodurch oberhalb von 160 W aufgrund des quadratischen Verhältnisses der ohmschen Verluste zum Strom durch den Widerstand $R_{DS(on)}$ zu einem geringeren Wirkungsgrad führt.

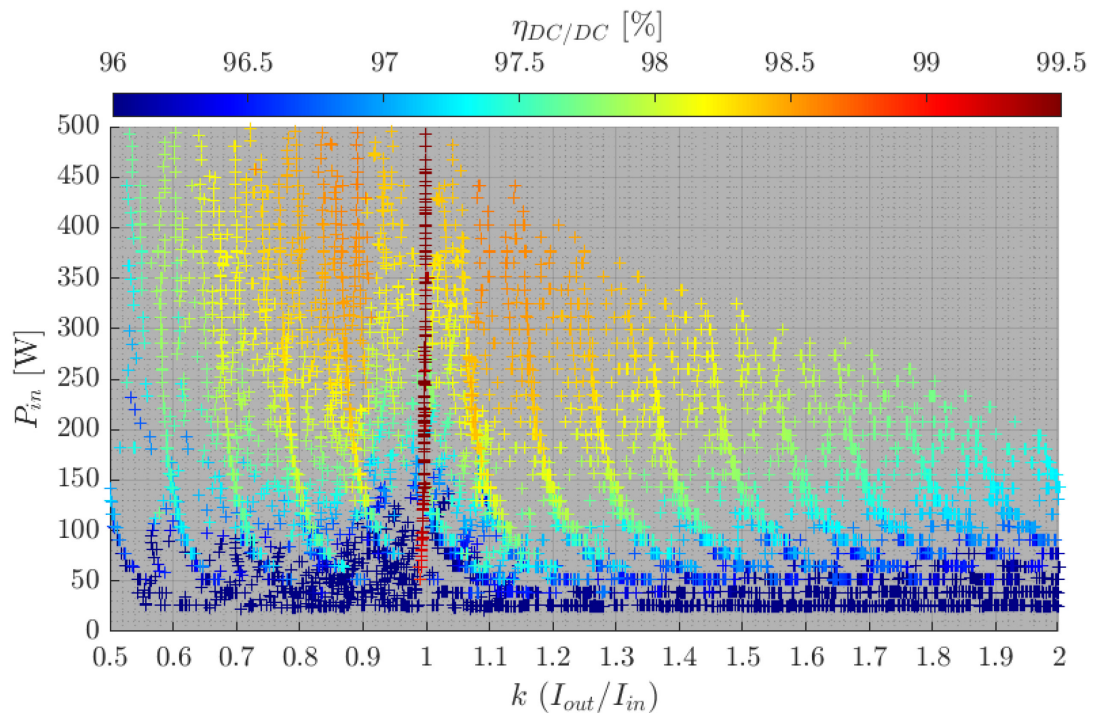


Abbildung 5: Wirkungsgrad-Mapping des S500B bei Eingangsspannung 35V als Funktion von P_{in} und k

Während der Leistungsoptimierer P370 von SolarEdge nur für ein MLPE-System verwendet werden kann, in dem alle PV-Module mit Power Optimizer ausgestattet sind, kann der Huawei 450W-P (Version 2022) als unabhängiger Optimierer in einem String-Wechselrichtersystem eingesetzt werden, um PV-Module, die einer Teilverschattung ausgesetzt sind, selektiv zu unterstützen. Daher bietet der 450W-P nur den Abwärtsmodus und den Durchlassbetrieb ohne Wandlung. Die gemessenen DC/DC-Wirkungsgrade des erwähnten Leistungsoptimierers sind in Abbildung 6 dargestellt, mit den höchsten $\eta_{DC/DC}$ -Werten von 99.5% bei 235W ($k_l = 1$). Neben den Werten des Switchless Betrieb wird der höchste Wirkungsgrad im Schaltbetrieb bei der gleichen Leistung von 235W ($k_l = 1,01$) mit 99 % gefunden. Insgesamt ergibt sich ein durchschnittlicher Wirkungsgrad des Buck-Mode von ca. 98.3 % für relevante Leistungswerte von 50 - 450 W. Ähnlich wie beim P370 sinkt der Wirkungsgrad des 450W-P allmählich bei höheren k_l -Verhältnissen (Zunahme der Schaltverluste) und bei Leistungen über 235W (Zunahme der ohmschen Verluste). Bei den ohmschen Verlusten zeigt der Huawei 450W-P bei gleichen Stromwerten geringere Verluste als der P370 - sichtbar bei $k=1$ und über 260W -, was auf niedrigere RDS(on)-Werte der verwendeten Transistoren hinweist.

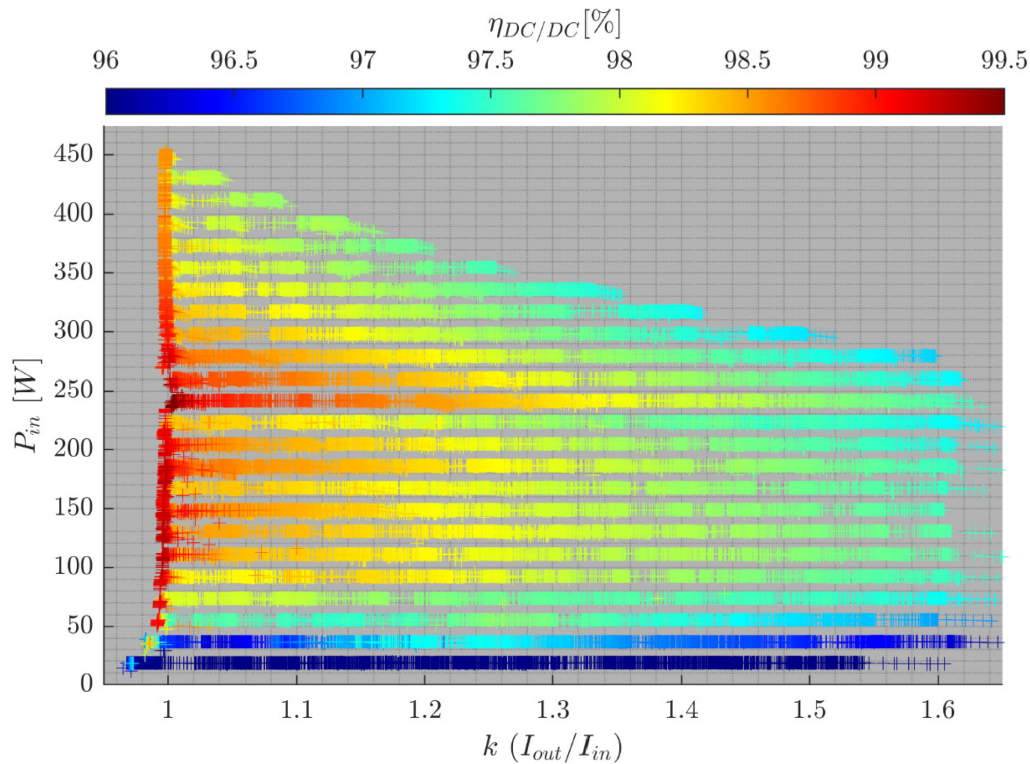


Abbildung 6: Wirkungsgrad-Mapping des Huawei 450W-P bei Eingangsspannung 35V in Funktion von P_{in} und k

Während die Leistungsoptimierer von Huawei nur mit PV-Wechselrichtern der gleichen Marke kompatibel sind und die SolarEdge-Optimierer hauptsächlich mit ihren eigenen Produkten empfohlen werden, sind die Tigo TS4-A-O und TS4-R-O Leistungsoptimierer mit einer Vielzahl von PV-Wechselrichtermarken kompatibel. Da sie als unabhängige Optimierer funktionieren, arbeiten sie nur im Buck- oder Switchless-Modus, ähnlich wie der 450W-P von Huawei. In Abbildung 7 ist der gemessene DC/DC-Wirkungsgrad, $\eta_{DC/DC}$, des Tigo TS4-R-O (Version 2019) dargestellt. Wie bei den anderen Leistungsoptimierern wurde der höchste Wirkungsgrad im schaltfreien Betrieb ($k_I = 1$) bei einer Leistung von 110 W und 99.8 % festgestellt. Möglicherweise enthält der TS4-R-O eine Bypass-Funktion, mit der der Transistorwiderstand $R_{DS(on)}$ umgangen werden kann und sich somit ein nahezu verlustfreier Betrieb einstellt. Im Buck-Mode arbeitet der Power Optimizer mit einem maximalen Wirkungsgrad von 99.3 % bei $k_I = 1,02$ und 110 W. Demgegenüber zeigen nur Werte zwischen 100 - 200W Wirkungsgrade mit Werten deutlich über 98 %, während sich bei den meisten anderen Betriebspunkten $\eta_{DC/DC}$ -Werte im Bereich von 96.5 – 97.8 % einstellen. Der durchschnittliche Wirkungsgrad liegt somit bei ca. 97.7 % für relevante Leistungswerte im Bereich von 50 - 460 W.

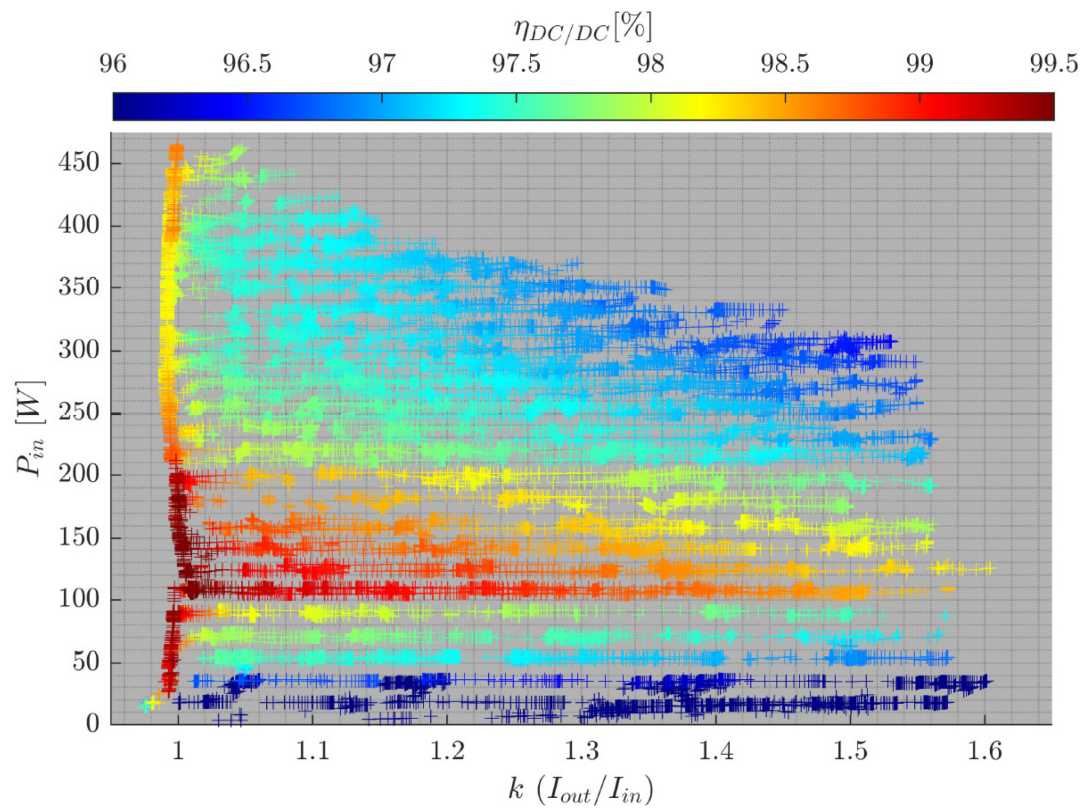


Abbildung 7: Wirkungsgrad-Mapping des Tigo TS4-R-O bei Eingangsspannung 35V in Funktion von P_{in} und k



4.4 Ergebnisse gemäss Meilensteinen

Im Gegensatz zu der bisherigen Änderung der Verschattungsobjekte für die Bewertung von neuen Verschattungssituationen, wurden bestehende Verschattungssituationen mit unterschiedlichen PV-Modultypen untersucht. Folglich wurde überprüft, inwiefern die interne Verschattung eines PV-Moduls, den Jahresertrag bei Verschattung verändert und ob die Anwendung dieser Module eine Alternative zum Einsatz von Leistungselektronik auf Modulebene darstellt. In Abbildung 8 und Abbildung 9, sowie in Tabelle 2 und Tabelle 3 ist ersichtlich, dass die Performance der Anlage mit «verschattungsresistenten» (engl. shading-resistant) PV-Module für alle PV-Systemelektronikvarianten steigt. Auffallend ist dabei, dass der Einsatz der genannten Module gleichviel oder einen höheren Ertrag (Kamin: ca. +1% und Gaube: ca. +2.9%) ermöglichen, als bei einem Einsatz von Power Optimizer bei konventionellen PV-Modulen realisiert wird (Kamin: ca. +0.8% und Gaube: ca. +1.3%). [12, 13]

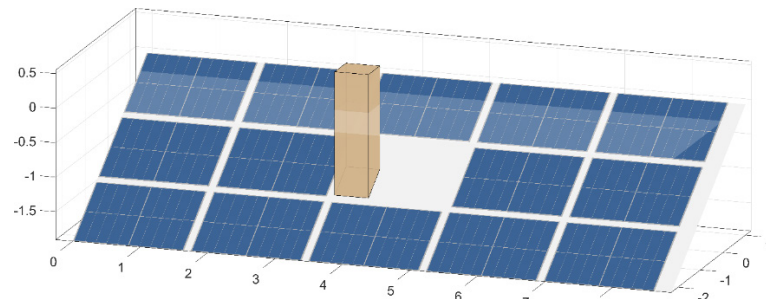


Abbildung 8: Visualisierung des Kaminverschattungsfalls mit 14 PV-Modulen mit Südausrichtung

Tabelle 2: Jahresertragsergebnisse der Kaminverschattung relativ zum Ertrag ohne Verschattung und Verluste

Relative Annual Energy		Full Cell PV Module	Half-cut cell PV Module	Third-cut cell PV Module	Shading-resistant 4 quadrant	Shading-resistant All Cells + Diode	
Unshaded + no losses		100					%
shaded + no losses		96.8	96.8	96.8	98.4	97.8	%
SINV	Relative Energy	93.0	92.9	92.7	94.0	93.9	%
indMLPE	Relative Energy	93.8	93.6	93.1	94.6	94.8	%
	MLPE Gain	0.9	0.8	1.1	0.6	0.4	%
allMLPE	Relative Energy	93.3	92.8	93.7	94.4	94.2	%
	MLPE Gain	0.3	-0.2	0.4	0.3	-0.1	%
Average Rel. Energy		93.3	93.1	93.2	94.4	94.3	%

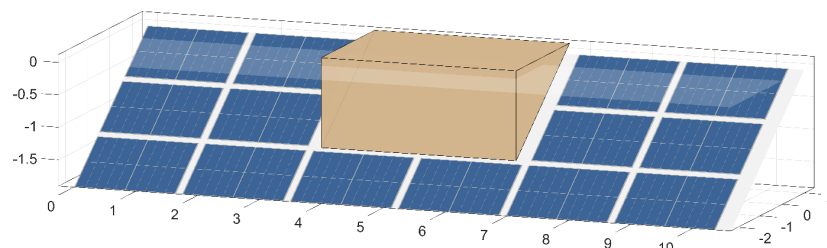


Abbildung 9: Visualisierung des Gaubenverschattungsfalls mit 14 PV-Modulen mit Südausrichtung

Tabelle 3: Jahresertragsergebnisse der Gaubenverschattung relativ zum Ertrag ohne Verschattung und Verluste

Relative Annual Energy		Full Cell PV Module	Half-cut cell PV Module	Third-cut cell PV Module	Shading-resistant 4 quadrant	Shading-resistant All Cells + Diode	
Unshaded + no losses		100					%
shaded + no losses		95.2	94.4	94.6	97.3	97.1	%
SINV	Relative Energy	90.1	89.1	88.9	92.1	92.9	%
indMLPE	Relative Energy	91.0	90.0	90.1	92.6	93.1	%
	MLPE Gain	1.0	1.1	1.4	0.6	0.3	%
allMLPE	Relative Energy	91.4	90.4	90.8	93.2	93.1	%
	MLPE Gain	1.5	1.5	2.1	1.2	0.3	%
Average Rel. Energy		90.8	89.8	90.0	92.6	93.0	%



Für eine einfachere Definition und Anwendung einer zukünftigen technischen Spezifikation für die Performance von PV «Power Conditioner» wurde die Anzahl Gewichtungsfaktoren für die Bestimmung der «Shading Adaption Efficiency» reduziert. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 4 bis Tabelle 6 dargestellt, welche sich auf die praxisrelevanten Verschattungsfälle als Teil des Forschungsprojekts beziehen.

Tabelle 4: Jahres-Performance Bewertung der praxisrelevanten Verschattungsfälle geordnet nach Intensität der Verschattung, beschrieben durch die Shading Ratio.

	No:	Shading Severity	Shading Ratio [%]	Energy (no shading + no loss) [kWh]	Energy (no losses) [kWh]	Energy allMLPE [kWh]	Energy SIN V [kWh]	MLPE Gain [%]
Dormer (s)	1	Low	0.9	4,410	4,368	4,207	4,247	-1.0
Vent. Pipe	2	Low	2.9	4,410	4,282	4,122	4,129	-0.2
Chimney	3	low	3.6	6,337	6,109	5,904	5,858	0.8
Tree 1	4	Medium	5.0	5,295	5,029	4,862	4,802	1.3
Tree 2	5	Medium	6.0	4,410	4,145	3,987	3,926	1.5
Building	6	Medium	7.9	4,410	4,062	3,905	3,802	2.7
Dormer (L)	7	Heavy	9.1	5,295	4,812	4,643	4,435	4.7
Roof Edge	8	Heavy	12.7	4,410	3,847	3,693	3,621	2.0

Tabelle 5: Shading Adaption Efficiency und entsprechender Ertragszuwachs des Power Optimizer Systems (MLPE Gain) der praxisrelevanten Verschattungsfälle geordnet nach Intensität der Verschattung.

	No:	Shading Severity	Shading Ratio [%]	SAE allMLPE [%]	SAE SIN V [%]	MLPE Gain [%]
Dormer (s)	1	Low	0.9	96.29	97.21	-1.0
Vent. Pipe	2	Low	2.9	96.23	96.38	-0.2
Chimney	3	low	3.6	96.6	95.8	0.8
Tree 1	4	Medium	5.0	96.65	95.45	1.3
Tree 2	5	Medium	6.0	96.16	94.70	1.5
Building	6	Medium	7.9	96.09	93.55	2.7
Dormer (L)	7	Heavy	9.1	96.50	92.17	4.7
Roof Edge	8	Heavy	12.7	95.98	94.09	2.0

Tabelle 6: Neudefinierte Gewichtungsfaktoren für die Bestimmung der Shading Adaption Efficiency mithilfe von Labormessung von PV-Systemkomponenten.

Shading Moments:		1	2	3	4	5
Power Ratio [%]:		0 – 30	31 – 44	45 – 60	61 – 78	79 – 100
Cases:	No:	1 – Wght.	2 – Wght.	3 – Wght.	4 – Wght.	5 – Wght.
Dormer (s)	1	0.10	0.23	0.31	0.28	0.08
Vent. Pipe	2	0.10	0.17	0.22	0.34	0.17
Chimney	3	0.10	0.16	0.17	0.28	0.29
Tree 1	4	0.07	0.17	0.28	0.22	0.26
Tree 2	5	0.10	0.14	0.23	0.35	0.18
Building	6	0.12	0.18	0.23	0.34	0.13
Dormer (L)	7	0.09	0.28	0.24	0.23	0.16
Roof Edge	8	0.08	0.18	0.39	0.30	0.05



Wirkungsgradmessung von Modulwechselrichter

Als Teil des EFPVShade Projekts wurden im Labor der ZHAW die DC/AC-Umwandlungswirkungsgrade von fünf unterschiedlichen Mikro- bzw. Modulwechselrichtermodelle vermessen. In den Grafiken in Abbildung 10 bis Abbildung 14 sind die Messergebnisse der DC/AC-Wirkungsgrade der Geräte visualisiert. Die Abbildungen sind in chronologischer Reihenfolge nach dem Jahrgang der Modelle präsentiert.

Die tiefsten mittleren Wirkungsgrade wurden beim Modulwechselrichter Envertech EVT300 (Modell 2019) mit 94.5% festgestellt, während der Enphase IQ7+ (Modell 2019) mit 96.8% den höchsten mittleren Wirkungsgrad verzeichnete. Folglich zeigen sich unabhängig vom Jahr der Modelle merkbare Unterschiede in der Performance. Andererseits sind beim Vergleich zweier Modelle vom Marktführer Enphase, dem M250 (Modell 2015) und dem neueren IQ7+ (Modell 2019), eine signifikante, mittlere Wirkungsgradsteigerung von 1% erkennbar.

Im Gegensatz zu den Power Optimizer Modellen liegen die mittleren Umwandlungswirkungsgrade der Modulwechselrichter zwischen 1 bis 3.5% tiefer. Zwingend nennenswert ist dabei jedoch, dass Modulwechselrichter eine DC/AC-Wandlung umsetzen, während Power Optimizer lediglich eine DC/DC-Wandlung vornehmen. Deshalb ist bei Systemen mit Power Optimizer stets noch eine nachgelagerte DC/AC-Umwandlung mithilfe eines PV-Wechselrichters notwendig. Folglich reduziert sich der Gesamtwirkungsgrad eines vollausgestatteten Power Optimizer Systems mit Wechselrichter mit einem Euro-Wirkungsgrad η_{EURO} , zwischen 97.5 und 99%, noch um weitere 1 bis zu 2.5%. Folglich ergeben sich bei Systemen mit effizienten Modulwechselrichtermodellen und einem vollausgestatteten Power Optimizer System beinahe gleichwertige Gesamtwirkungsgrade. Andererseits weisen Power Optimizer im Schnitt grössere Spannungsbereiche des MPP-Trackings auf als dies bei Modulwechselrichter der Fall ist. Entsprechend ist es möglich, dass sich bei einem Mikrowechselrichtersystem in bestimmten Verschattungssituationen ein tieferer Ertrag einstellt.

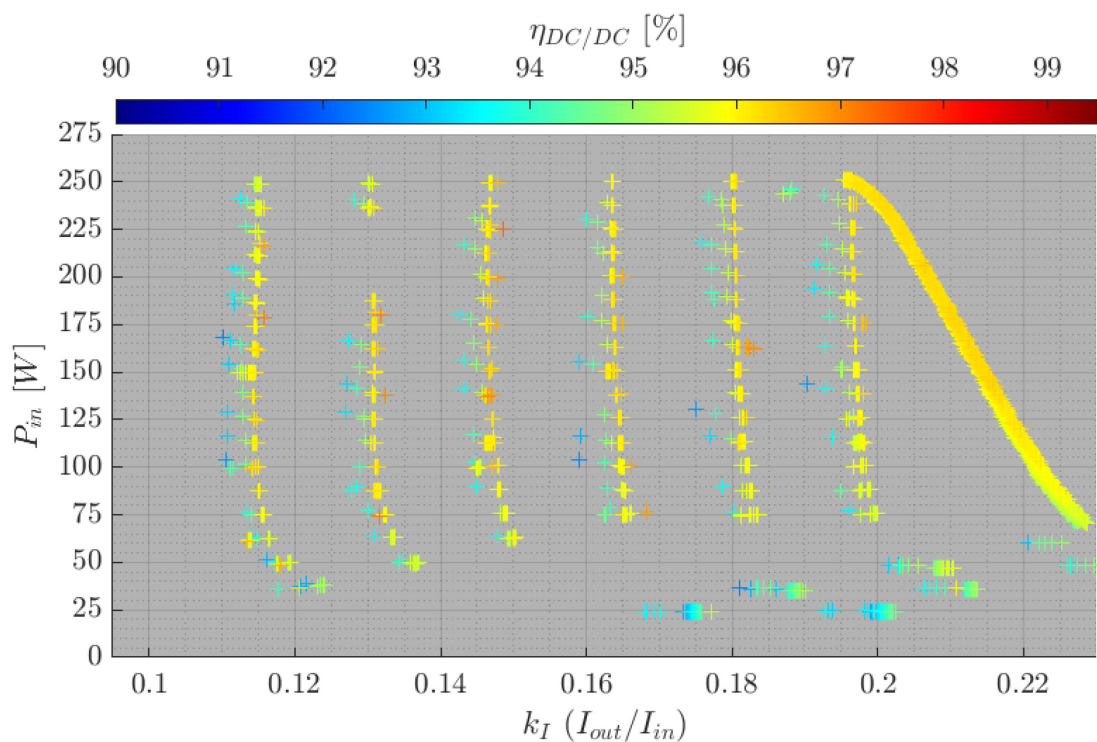


Abbildung 10: Wirkungsgrad-Mapping des Enphase M250 (Modell 2015) bei Eingangsspannungen $U_{IN} = [26, 31, 35, 39, 43, 47]$ V in Funktion von P_{in} und k

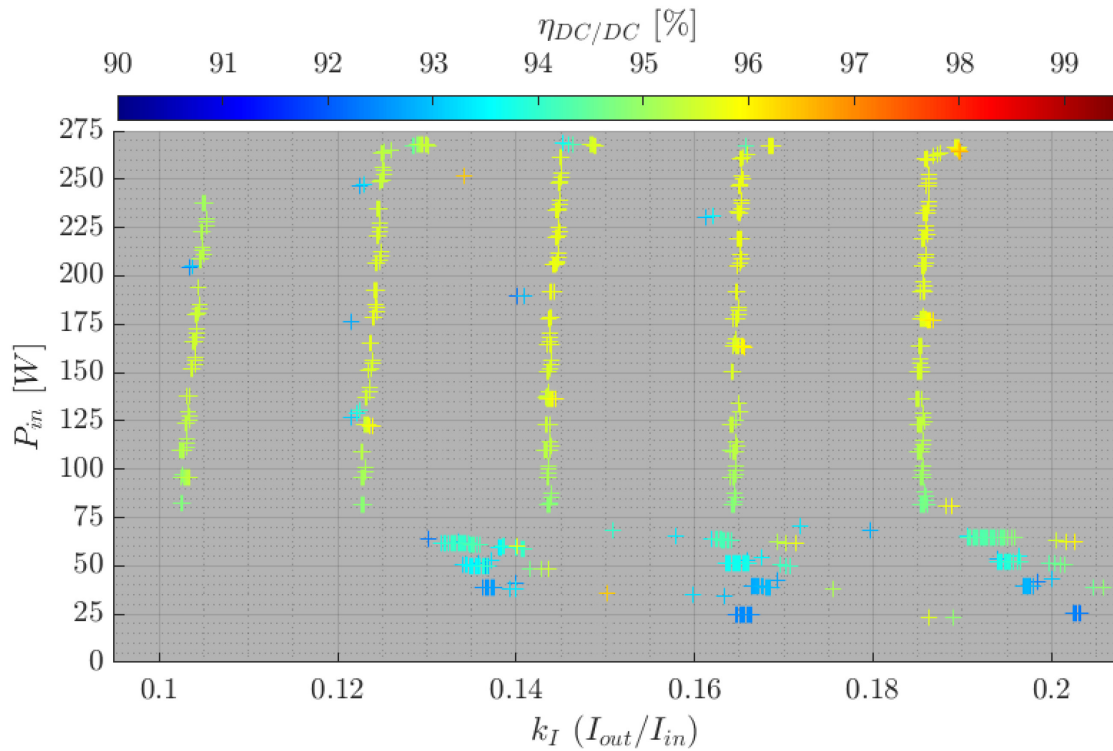


Abbildung 11: Wirkungsgrad-Mapping des Omnik SMP300 (Modell 2017) bei Eingangsspannungen $U_{IN} = [24, 29, 34, 39, 44]$ V in Funktion von P_{in} und k

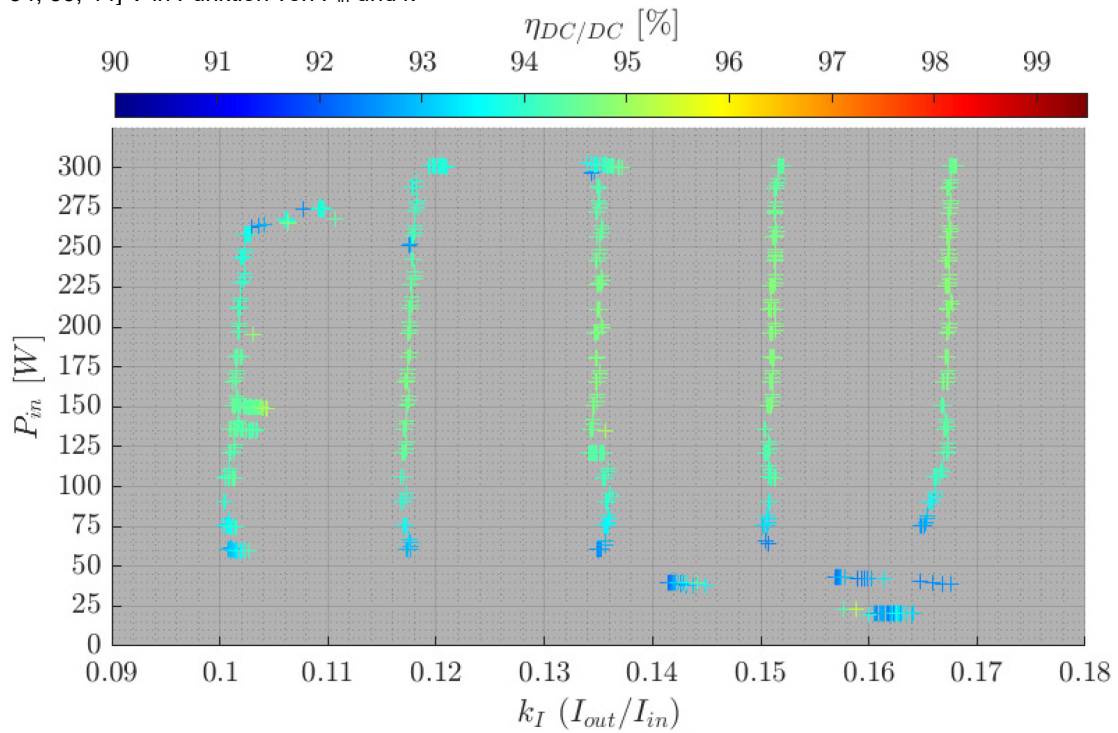


Abbildung 12: Wirkungsgrad-Mapping des Envertech EVT300 (Modell 2019) bei Eingangsspannungen $U_{IN} = [24, 28, 32, 36, 40]$ V in Funktion von P_{in} und k

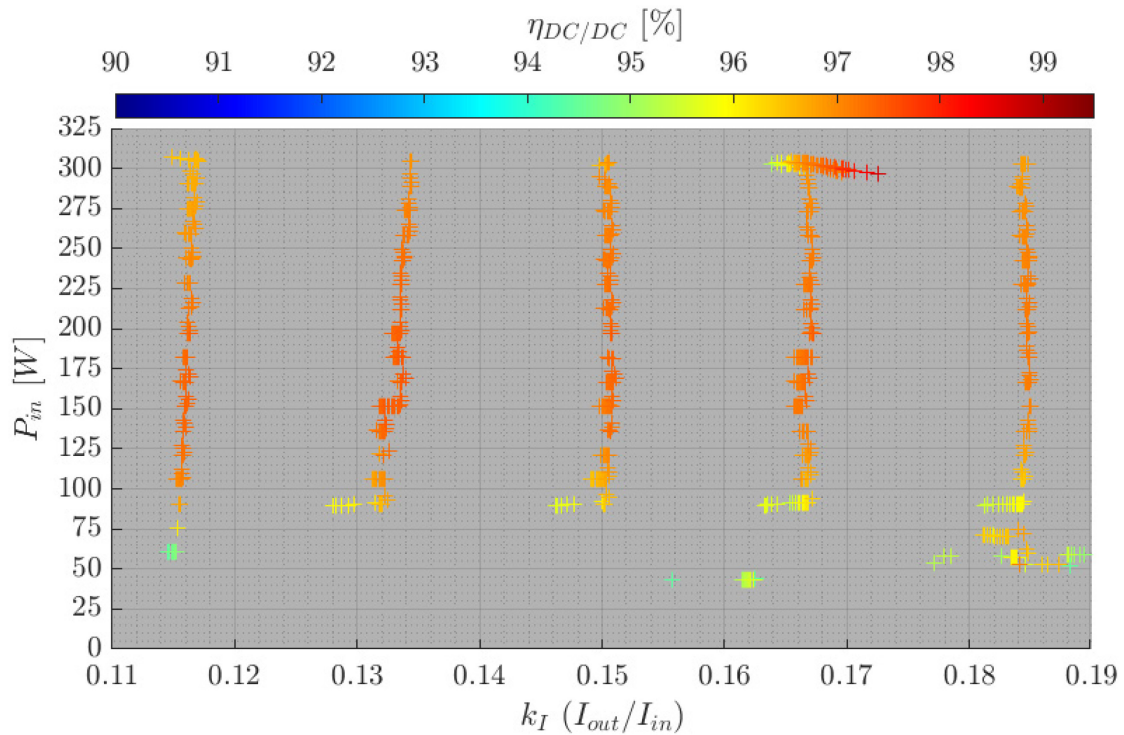


Abbildung 13: Wirkungsgrad-Mapping des Enphase IQ7+ (Modell 2019) bei Eingangsspannungen $U_{IN} = [27, 31, 35, 39, 43]$ V in Funktion von P_{in} und k

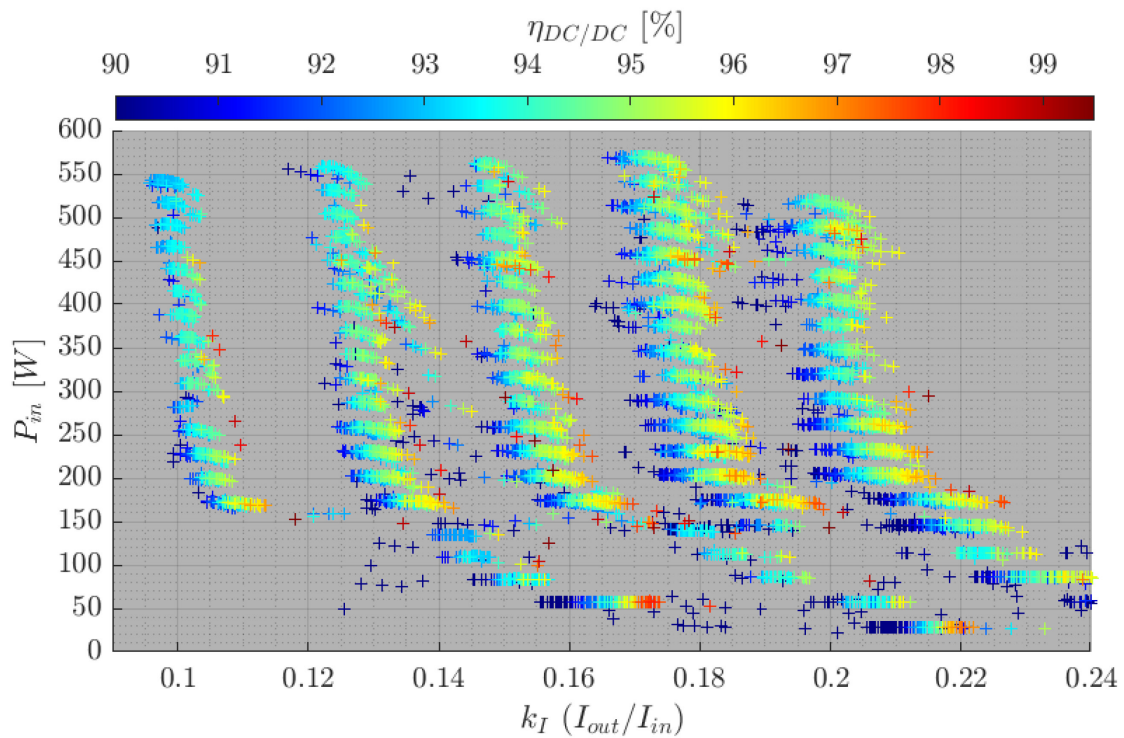
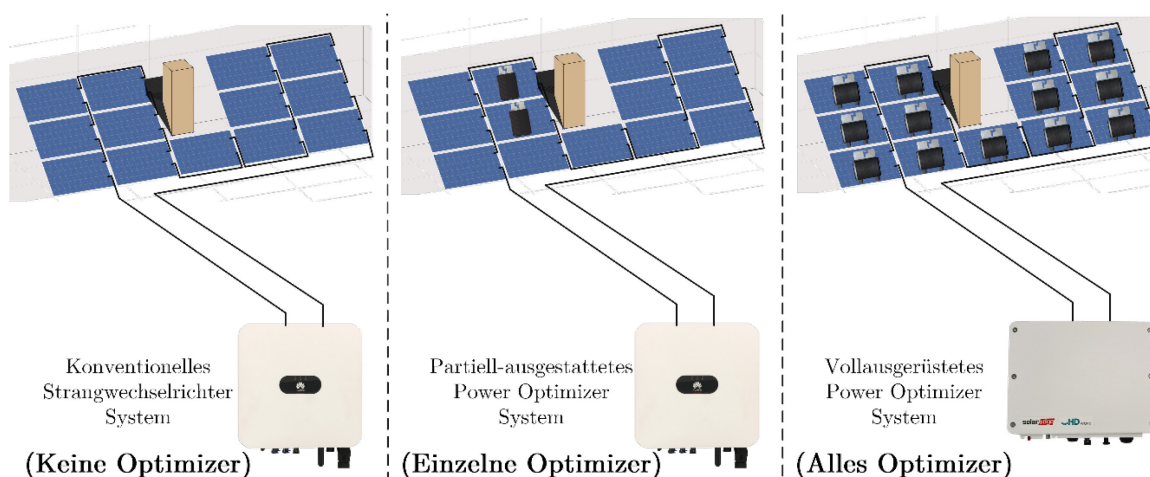


Abbildung 14: Wirkungsgrad-Mapping des Northern Electric BDM-600X (Modell 2022) bei Eingangsspannungen $U_{IN} = [26, 32, 38, 44, 50]$ V in Funktion von P_{in} und k



5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

Bereits letztes Jahr konnten erste Erkenntnisse im Bezug zu den Betriebsmodi und statischen Wirkungsgrade der MLPE-Komponenten gewonnen werden. In den Arbeitspaketen von diesem Jahr wurde weitere Verschattungsfällen untersucht, im Speziellen in Verbindung mit verschiedenen PV-Modultypen. Mit den neuinstallierten Komponenten (z.B. SolarEdge S500B) konnten Analysen von neuen Power Optimizer Typen durchgeführt werden und konkrete Planungshilfen zu MLPE-Systemen für Installateure erstellt werden. Mit der Kombination aus Simulationstool und Indoor-Labormessungen wurden eindeutige Vergleiche und Analysen von praxisrelevanten Verschattungsfällen umgesetzt, welche wiederum für eine Empfehlung für Planer und Installateure, aber auch für die Festsetzung in einer technischen Spezifikation zu MLPE essenziell sind. Weiterführende Untersuchungen von MLPE in Form von Mikro-wechselrichter unterstützen die Formulierung von Anwendungsempfehlungen für Installateure zusätzlich. [13]



Szenarien	Keine Optimizer	Einzelne Optimizer	Alles Optimizer
Keine Verschattung	Empfohlen	●	● ●
Leichte Verschattung	Empfohlen	✓	●
Mittlere Verschattung	●	Empfohlen	✓
Starke Verschattung	●	✓	Empfohlen
Lange Stränge + wenige Ausrichtungen	✓✓ (mehrere zentrale MPPT)	●	✓
Kurze Stränge + mehrere Ausrichtungen	● ● (Änderung zukünftig möglich)	✓	✓✓

Empfohlen -> Beste Lösung gemäss Ertragsanalyse
✓✓ -> Höchste Erträge (basierend auf Schätzung)
✓ -> Annehmbare Alternative
● -> Tiefe Performance
● ● -> Signifikanter Ertragsverlust
-> Basierend auf Schätzungen

Abbildung 15: Untersuchte PV-Systemkonfigurationen und Performance-Bewertung für deren Einsatz



6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

In den Meetings der IEA Task 13 Work-group wurde die Einteilung von gängigen Verschattungsobjekten nach dem Schweregrad deren Einflüsse auf Photovoltaikanlagen durchgeführt. Zusätzlich ist eine Ergänzung von häufigen Dachobjekten der verschiedenen Mitgliedsländer in Arbeit. Innerhalb der IEC TC82 Working-Groups wurde eine Definition für eine technische Spezifikation formuliert und dabei die Methode der «Shading Adaption Efficiency» vorgeschlagen.



7 Publikationen

Paper:

- F. Baumgartner, C. Allenspach et. al., IEA PVPS T13, Report 2021.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/03/IEA-PVPS_Task-13_R15-Performance-of-New-PV-system-designs-report.pdf
- F. Baumgartner et al., Paper bei der «Europäischen PV Conf.», Sept 2021.
<https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?fulltext=franz+baumgartner&paper=50084>
- F. Baumgartner, «Optimizer: Nur ein Hype oder die Zukunft?», bulletin.ch 5 / 2021.
<https://www.bulletin.ch/de/news-detail/optimizer-nur-ein-hype-oder-die-zukunft.html>
- F. Carigiet et al., «Stringwechselrichter oder doch Optimizer?», Gebäudehülle 6 / 2022.
- C. Allenspach et al., Paper bei der «Weltkonferenz PV-Energieübertragung», Sept. 2022.
- C. Allenspach et al., Paper im Journal «Solar RRL» von Wiley, Okt. 2022.
<https://doi.org/10.1002/solr.202200596>
- F. Carigiet et al., «Optimales Design mit oder ohne Optimizer», Bulletin 10 / 2022.
<https://www.bulletin.ch/de/news-detail/optimales-design-mit-oder-ohne-optimizer.html>
- C. Allenspach et al., Paper bei der «Europäischen PV Conf.», Sept 2023.
- F. Baumgartner et al., «PERFORMANCE GAIN OF SHADING TOLERANT PV MODULES IN DIFFERENT ELECTRICAL PV SYSTEM SETUPS»; Paper «Europäischen PV Conf.», Sept 2023.

Poster:

- C. Allenspach et al., Poster bei der «20. Nationale PV-Tagung», März 2022
- C. Allenspach et al., Poster bei der «Weltkonferenz PV-Energieübertragung», Sept. 2022
- C. Allenspach et al., Poster bei der «21. Nationale PV-Tagung», März 2023
<https://doi.org/10.21256/zhaw-27169>

Vorträge:

- F. Baumgartner et al., Vortrag bei der «Europäischen PV Conf.», Sept 2021.
<https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?fulltext=franz+baumgartner&paper=50084>
- C. Allenspach, Vortrag, «Intersolar 2021» in München, Okt 2021.
<https://www.intersolar.de/media/doc/615ee2e1c6c3586ec9447f12>
- C. Allenspach, Vortrag, «TaiyangNews Conf. on Inverter for Rooftop Solar», Okt 2021.
<http://taiyangnews.info/technology/inverters-for-rooftop-solar-update/>
- C. Allenspach, Vortrag, «Swissolar PV Update romand 2021» in Yverdon-les-bains, Nov 2021.
<https://www.swissolar.ch/en/about-swissolar/agenda/detail/event/pv-update-romand-2/>
- F. Baumgartner, Vortrag, «Swissolar Solar-Update 2021» in Solothurn, Nov 2021.
<https://www.swissolar.ch/ueber-swissolar/agenda/detail/event/solar-update-2021/>
- C. Allenspach et al., Vortrag bei der «Europäischen PV Conf.», Sept 2023.
- F. Baumgartner et al., Vortrag bei der «Europäischen PV Conf.», Sept 2023

siehe auch Kap. 4.1 Liste der aller fürs Projekt ausgeführten ZHAW Arbeiten von Studierenden



8 Literaturverzeichnis

- [1] H. Mann, S. Bar-Asher, A. Fishelov, A. Rosner, L. Handelsman, J. Berdner; 25th EUPVSEC, Valencia, p.3806 Proceedings, Talk 4CO.1.2, Online: www.eupvsec-proceedings.com, 2010.
- [2] International Energy Agency (IEA); "PVPS: Task 13, ST 2.5 Performance of Photovoltaic Systems", 2022.
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC); TC82: Solar photovoltaic energy systems - WG6: BOS components 2022.
- [4] A. Bänziger, A. Schneider; Economical and technical performance analysis of photovoltaic power optimizer systems under partial shading conditions, Bachelorarbeit, ZHAW SoE, 2022.
- [5] L. Pfyffer; Elektrische Performance Analyse von PV Optimizer Systemen und Reduktion der Hot-Spot Effekte, Vertiefungsarbeit MSc, ZHAW SoE, 2022.
- [6] F. Carigiet; Einfluss der diffusen Einstrahlung auf die Performance kristalliner Solarzellen, Masterarbeit, ZHAW SoE IFE und Universität Loughborough, CREST, 2015.
- [7] C. Allenspach et al., Performance Analysis of Power Optimizers by Indoor Lab Testing and Shading Simulation, WCPEC-8, Sept. 2022.
- [8] C. Allenspach et al., Paper im Journal «Solar RRL» von Wiley, Okt. 2022 (Online: <https://doi.org/10.1002/solr.202200596>).
- [9] F. Baumgartner (Author), N. Pearsall (Editor), The Performance of Photovoltaic (PV) Systems, Chapter 5: Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters (references to EN 50530:2010+A1:2013), Elsevier, London, GB, 2017.
- [10] W. Bower, C. M. Whitaker, W. Erdman, M. B. Behnke, M. Fitzgerald, Performance test protocol for evaluating inverters used in grid-connected photovoltaic systems, Technical report, Sandia National Laboratories, 2004.
- [11] Baumgartner, Franz; Vogt, Roman; Allenspach, Cyril Armand; Carigiet, Fabian, 2021. Performance analysis of shaded PV module power electronic systems; Proceedings of the 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), online, 6-10 September 2021.München, pp. 650-654. Available from: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20212021-4CO.3.1>
- [12] F. Baumgartner et al., «PERFORMANCE GAIN OF SHADING TOLERANT PV MODULES IN DIFFERENT ELECTRICAL PV SYSTEM SETUPS»; Paper bei der «Europäischen PV Conf.», Sept 2023, Lissabon.
- [13] F. Baumgartner, Maximizing photovoltaic system performance: Insights on partial shading and power electronics; PV magazine International, 9. Nov. 2023; Available form: <https://www.pv-magazine.com/2023/11/09/maximizing-photovoltaic-system-performance-insights-on-partial-shading-and-power-electronics/>



9 Anhang

Übersicht der Arbeitspakete und Meilensteine gemäss Vertrag SI/502247-01:

AP1	Repräsentative Dachverschattungsfälle - auswählen und DC Output berechnen In Rücksprache mit internationalen Fachgruppen und Vertreter aus der Praxis werden 7 typische Dachverschattungstypen bestimmt. Mit der Weiterentwicklung der MLPE-Shade Software am IEFEE werden neben neuen Verschattungsobjekte, PV Modulreihen fürs Flachdach aber auch die Einstrahlungsmodelle, weiter diffuse Strahlungsmodelle auch für Standorte ausserhalb der Schweiz untersucht.
M1a	2 Dachverschattungsfälle sind bestimmt und die Strom- / Spannungscharakteristik aller Module liegen als Zeitreihe für ein Jahr vor
M1b	5 weitere Dachverschattungsfälle mit Bereich der Modulzahl liegt als DC Output vor
M1c	3 weitere Verschattungsfälle die in Rücksprache mit internationalen Partnern, wie z.B. USA und den dort typischen Dach und Meteodaten selektiert sind, liegt als DC Output vor
AP2	Messungen im REEE Labor zur Verifikation der Methode a) Messung zur Bestimmung des Verlustmodells des DC/DC Wandlers b) Verlustmessung aller MLPEs im funktionsfähigen emulierten PV Kraftwerk /Indoor c) Analyse der von a) und b) und Verifikation des Gewichtungmodells für M1a d) Zwei Sets von Referenzmesspunkten wurden qualifiziert und bewertet e) Für diese Referenzpunkte werden zwei kommerzielle Stringinverter vermessen
M2a	Die Verlustkoeffizienten von 3 gemessene kommerziellen MLPEs liegen vor
M2b	Methode der Jahresverlust Analyse auf Basis Gewichtungskoeffizienten Methode ist qualifiziert. Diskussion zur Aussagekraft der Verlustanalyse dieser beiden Verschattungsvarianten und jeweiligen Kombination von MLPE Typen zu Stringinverter liegt vor
AP3	Messungen im REEE Labor zu einzelnen Verschattungsvarianten/Detailanalysen a) Verschieben der Verschattungsobjekte in der Sensitivitätsanalyse b) Transiente Vorgänge und Verluste der unterschiedlichen Regelkreise c) 5 weitere Verschattungsfälle nach M1b vermessen u. die Gewichtung bestimmt d) 3 weitere Verschattungsfälle nach M1c vermessen u. die Gewichtung bestimmt e) Vermessung von Modulnverter DC/AC und Ausblick auf Multistringinverter f) Vorschlag für Referenzmessungen in anderen Labors nach dieser Methode
M3a	Report zu AP3a-c liegt vor
M3b	Report zu AP3d und f liegt vor
AP4	Bewertung/Ausblick a) Outdoormessungen und Analyse zum Einfluss von MLPE zu Hotspot Wirkungen b) Vergleich der Verifikation obiger Methode mit realen Messergebnissen von bestehenden realen Outdoor PV Anlagen bei Teilverschattung über ein Jahr c) Diskussion anderer Vor-/Nachteile MLPE, Betriebsdauer, Sicherheit, EMV aus Literaturdaten..... d) Potential der Wirkungsgradsteigerung durch Komponentenwahl, SiC, GaN.
M4a	Report zu AP4a-b liegt vor
M4b	Report zu AP4c-d liegt vor
AP5	Publikation / Dissemination a) Journal Publikation zur Methode der Gewichtungsfaktoren für einen Verschattungsfall, um den Ertragsunterschied MLPE versus String zu bestimmen, und eine Conference Proceedings Publ. mit Vortrag bei der Euro PV Conference erstellt b) Publikation Erkenntnisse in Schweizer Fachmedien, Bulletin, Fachblatt Gebäudehülle, Schweizer Solarfachtagung c) Einbindung in internationale Gremien, IEA und gegebenenfalls Normengremien, internationale Konferenzen, gemeinsame Fachpublikationen mit internationalen Forschungspartnern liegen vor
M5a	Publikation zu AP5a liegt vor
M5b	Mindesten drei angewandte Publikationen in der Schweiz sind erstellt, nach AP5b
M5c	Mindesten drei internationale Publikationen mit Partner liegen vor, nach AP5c

Zeitplan auf Basis Tab. 1 (ist nochmals gleich in Abschnitt 3.4 aufgeführt)

	2021	2022	2023
AP	1,2,5a	1,3a-c,4a,5b	1,2,3d-f,4b,5c
M	1a, 2a-b, 5a	1b, 3a; 4a; 5b	1c, 3b, 4b, 5c