

Artikel (unverbindliche Übersetzung auf Deutsch aus dem Englischen)

Effizienz-Ranking von Photovoltaik-Mikrowechselrichtern und Abschätzung des Energieertrags für Balkonkraftwerke [†]

Stefan Krauter * und Jörg Bendfeld

Universität Paderborn, EET-NEK, 33098 Paderborn

* Korrespondenz: stefan.krauter@upb.de; Tel.: +49-5251-60-2301

[†] Dieser Beitrag ist eine erweiterte Fassung unseres Beitrags, welcher in den „Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion“, Mailand, Italien, 26-30 September 2022, veröffentlicht wurde.

Zusammenfassung: Der Markt für Mikro-Wechselrichter wächst, insbesondere in Europa. Angetrieben von steigenden Strompreisen und einer Lockerung der Gesetzgebung ab 2024 werden immer mehr Mini-Photovoltaik-Anlagen installiert. An der Universität Paderborn werden seit 2014 Indoor- und Outdoor-Studien zu Mikro-Wechselrichtern durchgeführt. Im Indoor-Labor wurden die Umwandlungswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Last mit hoher Genauigkeit gemessen und nach Euro- und CEC-Gewichtungen eingestuft; die neuesten Rankings aus dem Jahr 2024 sind in diesem Papier enthalten. Im Freilandlabor wurden die Energieerträge mit identischen und kalibrierten kristallinen Silizium-PV-Modulen gemessen; bis 2020 wurden die Messungen mit 215-W_p-Modulen durchgeführt. Aufgrund der steigenden Leistung der PV-Module wurden von 2020 bis 2024 360-W_p-Module verwendet. Im Jahr 2024 wurden die Testmodule auf 410-W_p-Module aufgerüstet, wobei die Erhöhung der Grenzwerte für die Wechselrichterleistung von 600 W auf 800 W berücksichtigt wurde, was für eine vereinfachte Betriebsgenehmigung („Plug-in“) in vielen europäischen Ländern im Rahmen einer einheitlichen Gesetzgebung für solche Mini-Photovoltaikanlagen oder „Balkonkraftwerke“ geeignet ist. Diese Gesetzgebung für den vereinfachten Betrieb gilt auch für überdimensionierte Minianlagen, wobei die maximale AC-Leistung auf 800 W begrenzt bleibt. Zurzeit werden im Freilandlabor Ertragsmessungen durchgeführt, die mindestens ein Jahr dauern werden, bis sie gültig und vergleichbar sind. Auch Bausätze, bestehend aus PV-Modulen, Wechselrichtern und Montagesystemen, werden bewertet. Aufgrund der Verwendung verschiedener MPPT-Algorithmen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Genauigkeiten bei der Annäherung an den MPP weichen die Ertragswerte manchmal von den Wirkungsgradwerten ab. Um die Ertragsbewertung zu beschleunigen, haben wir eine neuartige, einfache Formel entwickelt, um den Energieertrag für jede Modul- und Wechselrichterkonfiguration zu bestimmen, auch für Systeme mit zu hoher Leistung. Es handelt sich um einen linearen Ansatz, der durch nur zwei Koeffizienten, a und b , bestimmt wird, die für mehrere Wechselrichter angegeben sind. Um die Kosten zu senken, werden die Wechselrichter in Zukunft in den Modulrahmen oder in den Modulanschlusskasten integriert.

Zitierung: Krauter, S.; Bendfeld, J. Efficiency Ranking of Photovoltaic Microinverters and Energy Yield Estimations for Photovoltaic Balcony Power Plants. *Energies* **2024**, *17*(22), 5551.

<https://doi.org/10.3390/en17225551>

Akademische Redakteure: Xingshuo Li und Yongheng Yang

Erhalten: 31. Juli 2024

Überarbeitet: 30. Oktober 2024

Angenommen: 4. November 2024

Veröffentlicht: 6. November 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren. Eingereicht für eine mögliche Open-Access-Veröffentlichung unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution (CC BY) Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Stichworte: Mikrowechselrichter; EU-Wirkungsgrad; CEC-Wirkungsgrad; MPPT; Energieertragsbestimmung; Balkonkraftwerk; Systemleistung; AC-Module

1. Introduction

Mikro-Wechselrichter sind Wechselrichter, die oft an ein einzelnes PV-Modul (oder gelegentlich an zwei Module; es gibt nur wenige für vier Module, und diese werden hier nicht berücksichtigt) angeschlossen werden. Somit fungiert jede Modul-Wechselrichter-Kombination als ein unabhängiges Kraftwerk. Der Mikro-Wechselrichter besteht aus einem Maximum Power Point Tracker (MPPT), dem DC-AC-Wechselrichter und einer Insel-schutz-einheit [1]. Für höhere Leistungsanforderungen werden mehrere Modul-

Wechselrichter-Kombinationen auf der AC-Ausgangsseite parallel geschaltet. Diese Konfiguration bietet verschiedene Vorteile, u.a. eine einfachere Planung und Installation sowie die einfache Auf- und Abwärtsskalierung einer Anlage, wodurch Erweiterungen oder Reparaturen während des Kraftwerksbetriebs durchgeführt werden können. Die Logistik wird vereinfacht, und die Auswirkungen von Abschaltungen sind sehr begrenzt. Aufgrund der niedrigen Systemspannungen kommt es nicht zu einer potenzialinduzierten Verschlechterung (PID). Einen Überblick über die Topologien, die Entwicklung und die Vorteile von Mikro-Wechselrichtern haben S.B. Kjær et al. [2], J.M.A. Myrzik und M. Calais [3], H. Oldenkamp [4] und Stellbogen et. al. [6] gegeben. Allerdings sind die Kosten von Kraftwerken, die auf Mikrowechselrichtern basieren, etwa 10–20 % höher als bei Systemen mit String- oder Zentralwechselrichtern. Einige der Wechselrichter können nicht selbst betrieben werden und benötigen eine Steuereinheit (oft in Kombination mit einer Fernabschaltungsoption und einem Überwachungssystem) oder eine Schutzvorrichtung für die Netzanbindung (je nach nationalen Vorschriften), was zusätzliche Kosten verursacht. Außerdem ist der Umwandlungswirkungsgrad möglicherweise nicht so hoch wie bei Zentralwechselrichtern. Aufgrund intelligenter Master-Slave-Konzepte können zentralisierte Lösungen mit mehreren, aber relativ großen Wechselrichtern bei schwachen Lichtverhältnissen höhere Erträge liefern. Ein Leistungsvergleich von Systemen mit Mikro-Wechselrichtern, Leistungsoptimierern und Zentralwechselrichtern findet sich in [5]. Dieser Beitrag ist eine erweiterte Version (neue Messungen) unseres Beitrags, der auf der 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2022 [10] veröffentlicht wurde.

2. Messmethoden

2.1. Methoden zur Messung der Wirkungsgrade (Indoor)

Aufgrund der reproduzierbaren Testbedingungen im Indoor-Labor wurden die Wechselrichter einzeln mit vordefinierten und kontrollierten Eingangsdaten untersucht. Während eine herkömmliche Untersuchung der elektronischen Schaltkreise in den Wechselrichtern aufgrund von umfangreichen Vergussmassen, Bauteilen mit gelöschten Nummernschildern und geheimen Steuerungsalgorithmen in den Mikrocontrollern fast unmöglich war, folgte die Untersuchung einem „Black-Box“-Ansatz, bei dem das Eingangs- und Ausgangsverhalten des Geräts beobachtet wurde. Als Eingang diente ein PV-Modulsimulator, dessen Daten den im Außentest verwendeten Modulen entsprachen. Die wichtigsten Ausgangsdaten waren die von den Wechselrichtern gelieferte AC-Leistung, die in das öffentliche Netz eingespeist wird. Die Leistung ist auch eine Funktion der Eingangsspannung. Wenn die Eingangsspannung zu niedrig ist, stellen die Wechselrichter ihren Betrieb ein. Die folgenden Untersuchungen basierten auf dem möglichen Bereich der Eingangsdaten (einschließlich der Spannung), der für das spezifische PV-Modul, das für die Freilanduntersuchung verwendet wurde, angegeben wurde. Die Wirkungsgradmessungen wurden unter Verwendung der DC-Eingangs- und AC-Ausgangsmessungen (siehe Abb. 1) durchgeführt, die mit einem kalibrierten Präzisions-Leistungsmessgerät ZIMMER® LMG 670 (Oberursel, Deutschland) durchgeführt wurden. Die Messgenauigkeit betrug 0,025–0,1 % (je nach Messtyp und Messbereich). Die für die Wechselrichter verwendeten Ausgangsleistungswerte (eingestellt durch Regelung des DC-Eingangsstroms) wurden kontinuierlich in 1024 Schritten von 0 bis zum Maximum erhöht. Darüber hinaus wurde alle 500 ms eine Messung für denselben Leistungspegel für 8 s durchgeführt. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für das Messverfahren. Wir haben jeden Wechselrichter auf seine maximale Leistung geprüft, die manchmal etwas höher sein kann als die Nennleistung. Dieses Verfahren diente lediglich dazu, den allgemeinen Verlauf der Wirkungsgradkurve zu ermitteln. Die genauen Messungen zur Bestimmung der Wirkungsgrade erfolgten durch direkte Annäherung an die relevanten Werte für die

EU- und CEC-gewichteten Wirkungsgrade. Es wurden zwischen 90 und 150 Messungen zu je 500 ms durchgeführt, so daß transiente Effekte nicht relevant waren.

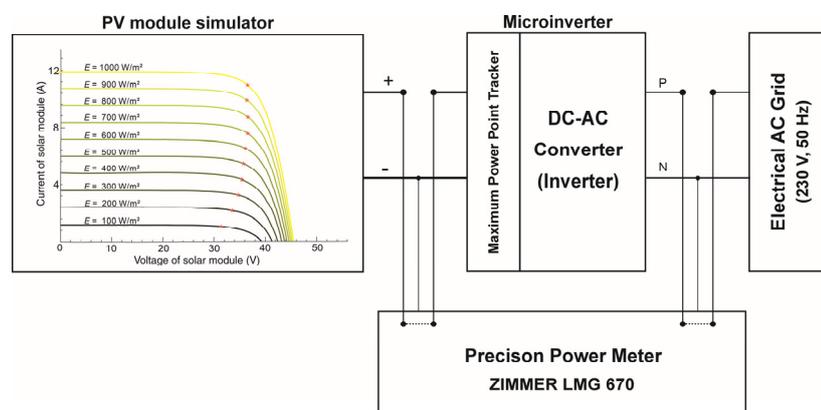


Abbildung 1. Aufbau der Leistungs- und Effizienzmessungen in Innenräumen mit einem Black-Box-Ansatz unter Verwendung eines Präzisionsleistungsmessers für Ein- und Ausgänge.

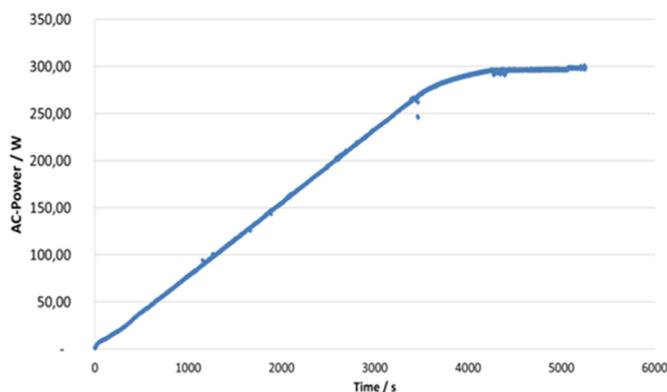


Abbildung 2. Gemessene AC-Ausgangsleistung (in Watt) als Funktion der Messdauer (in Sekunden) für einen linear ansteigenden DC-Eingangsstrom für einen 300-W-Wechselrichter.

Der Spitzenwirkungsgrad wird oft in der Nähe der maximalen Last des Wechselrichters erreicht. Der Spitzenwirkungsgrad (der oft in Datenblättern angepriesen wird) ist kein hilfreicher Wert, da die Wechselrichter in den meisten Fällen unter nicht trockenen Bedingungen im Bereich von 20% bis 40% ihrer Nennleistung arbeiten. Daher ist ein angemessen gewichteter Wirkungsgrad ein nützlicherer Wert zur Bewertung von Umwandlungsgeräten. Eine Art gewichteter Wirkungsgrad ist der „Europäische Wirkungsgrad“ η_{Euro} , der wie folgt berechnet wird:

$$\eta_{\text{Euro}} = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,1 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,2 \cdot \eta_{100\%} \quad (1)$$

Der andere ist der „CEC-Wirkungsgrad“ der California Energy Commission (CEC). Der CEC-Wirkungsgrad η_{CEC} wird als Durchschnittswert der Gleichstrom-Wechselstrom-Wirkungsgrade bei sechs vordefinierten relativen Ausgangswerten zwischen 10% und 100% der Nennleistung (mit Schwerpunkt auf höheren Einstrahlungswerten) berechnet und wird wie folgt ermittelt:

$$\eta_{\text{CEC}} = 0,04 \cdot \eta_{10\%} + 0,05 \cdot \eta_{20\%} + 0,12 \cdot \eta_{30\%} + 0,21 \cdot \eta_{50\%} + 0,53 \cdot \eta_{75\%} + 0,05 \cdot \eta_{100\%} \quad (2)$$

Für den „Europäischen Wirkungsgrad“ sind die Gewichtungsfaktoren für hohe relative Leistungswerte entsprechend der europäischen Einstrahlungsstatistik niedriger. $\eta_x\%$ steht für den Umwandlungswirkungsgrad bei x% der relativen Last.



Abbildung 4. Anordnung der PV-Module des PV-Freilandlabors im Jahr 2023 für den Vergleich der elektrischen Energieerträge von Mikro-Wechselrichtern unter Verwendung von acht bis zehn gleichen, kalibrierten PV-Modulen (mit je 360 W_p) als Eingänge.

3. Ergebnisse

3.1. Wirkungsgradmessungen (Indoor)

Die gemessenen DC-AC-Umwandlungswirkungsgrade über den gesamten Betriebsbereich aller Wechselrichter sind in Abbildung 5 (mit einem Eingang für ein Modul) und Abbildung 6 (mit zwei Eingängen für zwei Module) dargestellt.

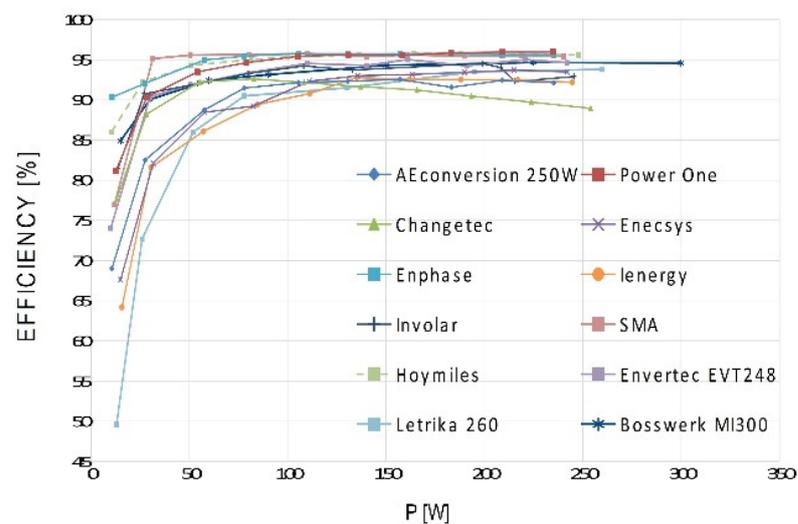


Abbildung 5. Gemessene DC-AC-Wandlungswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung für 12 Mikro-Wechselrichter mit einzelnen PV-Moduleingängen.

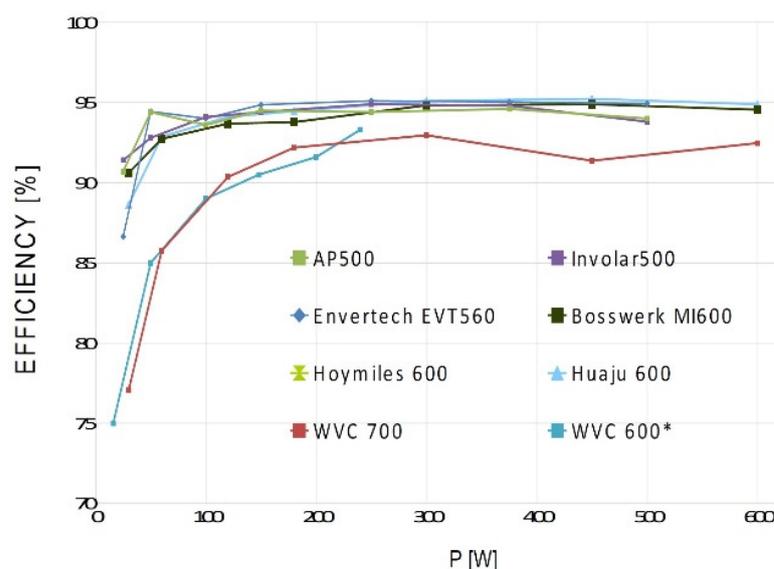


Abbildung 6. Gemessene DC-AC-Wandlungswirkungsgrade in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung für acht Mikro-Wechselrichter mit zwei PV-Moduleingängen. * ausgefallen.

Auf der Grundlage dieser Messungen wurden die EU- und CEC-Wirkungsgrade für die Mikrowechselrichter gemäß (1) und (2) berechnet. Insgesamt elf Mikrowechselrichter waren für Einzelmodule ausgelegt, neunzehn Wechselrichter hatten Eingänge für zwei PV-Module: Anker Solix MI 60; APSystems YC 500, DS3-S; Involar MAC 500; Deye Sun 600 G3; Ecoflow Powerstream 600; Envertech EVT-560; Hoymiles MI 500, 600, 700, 800; Huaju HY 600; NEP BDM 600; Bosswerk Mi 600; Parkside PBKW-300-A1; Technaxx TX 204; Tsun TSOL-MS600; und WVC 600, 700.

Die Rangfolge unter Berücksichtigung des EU-Wirkungsgrads (1) ist in Tabelle 1 dargestellt. Envertech EVT 560 und PowerOne/ABB Micro-0.25-i hatten den gleichen Umwandlungswirkungsgrad und teilen sich den fünften Platz. Hoymiles HMS-800W-2T, DeyeSun G3 und Huaju HY600 hatten den gleichen EU-Wirkungsgrad und teilen sich Rang sieben. Dies gilt auch für Involar MAC 500 und Bosswerk Mi600, die sich den 10. Platz teilen, während AEconversion INV 250-45 und Enecsys SMI-S-240W auf Platz 25 rangieren.

Tabelle 1. Rangfolge der getesteten Mikro-Wechselrichter nach dem gewichteten „Europäischen Umwandlungswirkungsgrad“ gemäß (1). Die Nennleistung (in W) ist in der Typenbezeichnung angegeben.

Rang	Fabrikat/Typ	EU Wirkungsgrad
1	SMA Sunnyboy 240	95,4%
2	Enphase M 215	95,2%
3	Hoymiles MI 500	95,0%
4	Hoymiles MI 600	94,7%
5	Envertech EVT-560	94,6%
5	PowerOne/ABB Micro-0,25-i	94,6%
7	Hoymiles HMS-800W-2T	94,5%
7	Deye Sun 600 G3	94,5%
7	Huaju HY 600	94,5%
10	Involar MAC 500	94,3%
10	Bosswerk Mi 600	94,3%
12	Technaxx TX 204	94,2%
13	APSystems YC 500	94,1%
14	Anker Solix MI 60	93,6%

15	Bosswerk Mi 300	93,5%
16	Enverttech EVT-248	93,2%
17	APSystems DS3-S	93,0%
18	Ecoflow Powerstream 600	92,7%
18	Involar MAC 250	92,7%
20	Hoymiles HM 700	92,5%
20	NEP BDM 600	92,5%
22	Tsun TSOL-MS600	92,4%
23	WVC 700 (at 600 W)	91,6%
24	Changetech ELV 300-25	90,9%
25	AEconversion INV 250-45	90,4%
25	Enecsyst SMI-S-240W	90,4%
27	Ienergy GT 260	89,9%
28	Parkside PBKW-300-A1	88,9%
29	Letrika 260	88,7%
30	WVC 700 (at 700 W)	73,3%
31	WVC 600 (failed)	0,0%

Tabelle 2 zeigt die gleiche Art von Rangfolge, jedoch unter Anwendung der CEC-Wirkungsgradformel (2). Hoymiles HMS-800W-2T 600 und Huaju HY 600 hatten den gleichen CEC-Wirkungsgrad und teilen sich daher den sechsten Platz. Enverttech EVT-560, Involar MAC 500 und Bosswerk Mi600 hatten den gleichen Umwandlungswirkungsgrad (innerhalb der Messgenauigkeit) und teilen sich den neunten Platz. Bosswerk Mi 300 und Enverttech EVT-248 belegten beide Rang 14, während Anker MI 60 und Involar MAC 250 sich Rang 16 teilten. Ecoflow Powerstream 600 und NEP BDM 600 teilen sich Rang 18, und Hoymiles HM 700 und Letrika 260S-C60-P260 teilen sich Rang 24.

Tabelle 2. Rangfolge aller Mikro-Wechselrichter nach „CEC-Wirkungsgrad“ gemäß (2). Die Nennleistung (in W) ist in der Typenbezeichnung angegeben.

Rang	Fabrikat/Typ	CEC Wirkungsgrad
1	Enphase M 215	95,6%
2	PowerOne/ABB 0.25-i	95,5%
3	Hoymiles MI 500	95,4%
4	SMA Sunnyboy 240	95,1%
5	Hoymiles MI 600	95,0%
6	Hoymiles HMS-800W-2T 600	94,9%
6	Huaju HY 600	94,9%
8	Technaxx TX 204	94,8%
9	Envertech ENV-560	94,6%
9	Involar MAC 500	94,6%
9	Bosswerk Mi 600	94,6%
12	APSystems YC 500	94,5%
13	Deye Sun 600 G3	94,4%
14	Bosswerk Mi 300	94,1%
14	Envertech EVT-248	94,1%
16	Anker Solix MI 60	93,9%
16	Involar MAC 250	93,9%
18	Ecoflow Powerstream 600	92,9%
18	NEP BDM 600	92,9%
20	Tsun TSOL-MS 600	92,8%
21	APSystems DS3-S	92,7%
22	Enecsys SMI-S-240W	92,0%
23	WVC 700 (at 600 W)	91,6%
24	Hoymiles HM 700	91,5%
24	Letrika 260	91,5%
26	Ienergy GT 260	91,4%
27	AEconversion 250	91,2%
28	Changetech ELV 300-25	90,9%
29	Parkside PBKW-300-A1	89,7%
30	WVC 700 (at 700 W)	87,5%
31	WVC 600 (failed)	0,0%

Der WVC 600 fiel bei einer gemessenen Leistung von 250 W aus. Nach einem Testlauf bei höheren Temperaturen fiel der Wechselrichter immer wieder aus. Da die Wechselrichter WVC 600 und WVC 700 bei Tests äußerst schlecht funktionierten, wurde ihre Nennleistung angenommen. Aus diesem Grund ist der WVC 700 in der Tabelle zuerst mit einer Nennleistung von 600 W (auf Platz 23) und dann mit der angenommenen Nennleistung von 700 W (gemäß seiner Typenbezeichnung) aufgeführt; die letztendlich gemessene maximale Leistung des WVC 700-Wechselrichters betrug jedoch nur 600 W.

Einfluss der Betriebstemperatur auf die Ergebnisse

Bei den Vergleichsmessungen verschiedener PV-Mikrowechselrichter traten Probleme auf, die bei den konventionellen Wirkungsgradmessungen nicht beobachtet wurden, die aber einen Einfluss auf den elektrischen Energieertrag haben können. Zunächst wurden entweder sehr langsame oder sehr nervöse Algorithmen zur Nachführung des maximalen Leistungspunkts festgestellt, die zu einem geringeren Energieertrag führten. Dieses Problem wurde bei den anschließenden Ertragsmessungen im Freien angegangen.

Es wurden auch thermische Probleme festgestellt. Als erste Erklärung für den geringeren Energieertrag wird angenommen, dass die Umwandlungseffizienz bei höheren Betriebstemperaturen abnimmt. Daher wurden Messungen des Umwandlungswirkungsgrads und der langfristigen Leistungsabgabe bei erhöhten Temperaturen von 40 °C, 50 °C und 65 °C in einer Heizkammer, genauer gesagt in einem Heratherm-Ofen (von Thermo Scientific Inc., Waltham, MA USA), durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in [7] veröffentlicht. Bei Temperaturen bis zu 50 °C konnte trotz der hochpräzisen Messungen und wiederholten Prozeduren keine Veränderung des Wirkungsgrades festgestellt werden. Diese Ergebnisse stimmten mit den oben dargestellten Ergebnissen überein. Es wurde jedoch festgestellt, dass einzelne Wechselrichter bei längeren Betriebszeiten und höheren Temperaturen vorübergehend den Betrieb unterbrachen oder ganz ausfielen und auch eine Verringerung der maximalen Leistung zu beobachten war, was zu Ertragseinbußen führen kann. Daher ist auf eine situations- und temperaturgerechte Auswahl der Wechselrichter zu achten. Leider sind die Angaben in den Datenblättern nicht immer ausreichend und zuverlässig, und im Low-Cost-Segment fehlen diese Angaben oft.

3.2. Ergebnisse der Energieertragsmessungen (Outdoor)

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für die gesammelten Daten eines einzigen Tages. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung konnten einige spezifische Merkmale beobachtet werden, z. B. das Startverhalten, das MPP-Tracking (Genauigkeit und Geschwindigkeit), Ausfälle und die Leistung

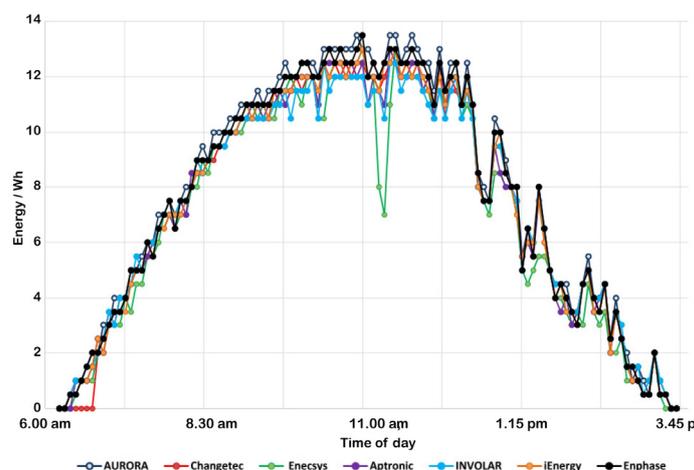


Abbildung 7. Gemessene Werte der AC-Energieerzeugung (über Zeitbereiche von 5 Minuten) für sieben Mikro-Wechselrichter während 31. Oktober 2013.

Abbildung 8 zeigt ein Beispiel der erfassten Daten für einen einzigen Tag im Frühjahr 2015 (einschließlich des neuen SMA-Mikrowechselrichters). Einige Wechselrichter hatten Schwierigkeiten, den schnellen Änderungen der Einstrahlungswerte an diesem Tag zu folgen (z. B. Ienergy).

Eine erste Rangliste des gesamten AC-Energieertrags der Mikrowechselrichter während des gemeinsamen Betriebszeitraums (Winter/Frühjahr 2014/15) wurde in [5] veröffentlicht, aber die spezifischen Ergebnisse sind inzwischen weitgehend veraltet.

Neben den bereits bei den 215-W_p-Modulen beobachteten Effekten, wie den unterschiedlichen Umwandlungswirkungsgraden bei unterschiedlichen Einstrahlungswerten, Geschwindigkeiten und Genauigkeiten der MPPT-Algorithmen sowie den Mindestschwellen für die Betriebsauslösung, wurden bei einigen Wechselrichtern mit den 360-W_p- und 405-W_p-Modulen auch zeitliche Sättigungseffekte beobachtet.

Die sich daraus ergebenden elektrischen Energieerträge im Laufe eines Tages für die verschiedenen Mikro-Wechselrichter und Modulkonfigurationen sind in Abbildung 9

dargestellt. Bis zu einem gewissen Grad konnten die oben erwähnten Effekte beobachtet werden. Während die verschiedenen Arten von Effekten die Vorhersage eines Energieertrags für mehrere Konfigurationen an einigen Standorten erschwerten, wurde durch die Durchführung einer Ertragsdatenanalyse eine verbraucherfreundlichere Methode zur Vorhersage des Ertrags entwickelt.

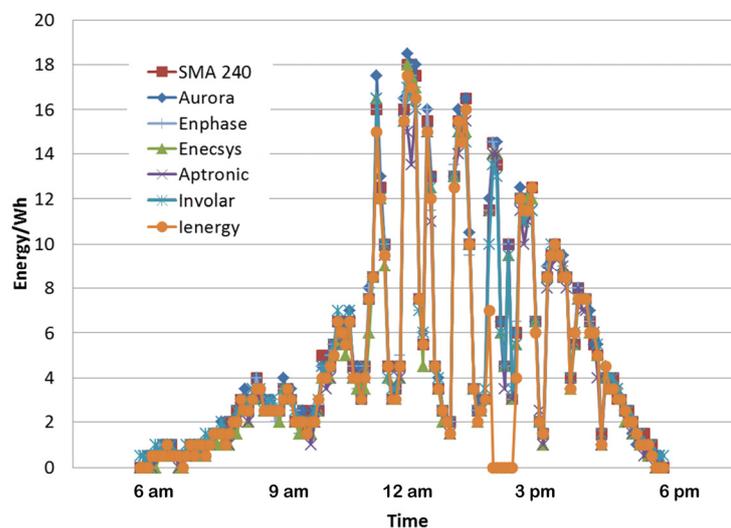


Abbildung 8. Meßwerte der AC-Energieerzeugung von sieben Mikrowechselrichtern (über Zeitbereiche von 5 Minuten) während des 6. April 2015.

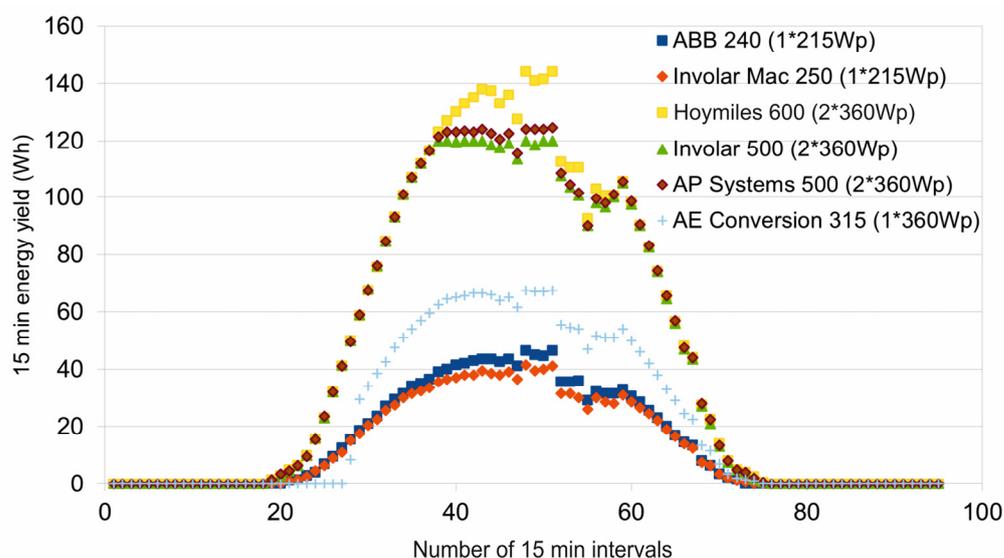


Abbildung 9. Beispiel für Messungen des elektrischen Energieertrags (in 15-minütigen Intervallen) verschiedener Wechselrichter und zweier unterschiedlicher PV-Modulgrößen an einem überwiegend klaren Tag (einige Wolken am Nachmittag).

4. Universelle Ertragsbestimmung

Um die Charakterisierung einer bestimmten Kombination aus PV-Modul und Mikro-Wechselrichter zu vereinfachen, wurde eine lineare Gleichung auf die gut untersuchten Referenzcharakteristika eines sehr guten Wechselrichters (der keine Probleme mit geringer Einstrahlung, MPPT und Sättigung aufweist) angewandt. Als Referenzwechselrichter wurde der Enphase M 215 gewählt, der in der CEC-Effizienzrangliste auf Platz 1 steht.

Das Auftragen einer Funktion des tatsächlichen durchschnittlichen Tagesertrags (y) gegen den Referenzertrag (x) ergab $y = a x + b$ mit den einfachen Koeffizienten $a = 1$ und $b = 0$ für die Referenzkonfiguration (Enphase M 215 mit dem Q-cells-215- W_p -Modul). Abbildung 10 zeigt die ursprüngliche Konfiguration mit den Wechselrichtern für Einzelmodule, die an 215- W_p -Module angeschlossen sind. Die Koeffizienten der verschiedenen Wechselrichter für die Gleichung für den relativen Ertrag $y = a x + b$ sind in Tabelle 3 angegeben. Es ist z. B. zu beobachten, dass der Involar MAC 250 bei niedrigen Tageserträgen etwas besser abschneidet als die Referenz, so dass b über 0 liegt. Bei hohen Erträgen nimmt seine Leistung (im Vergleich zur Referenz) ab, so dass a über 1 liegt. Die Eigenschaften des Envertech EVT 300 waren genau umgekehrt: Bei niedrigen Erträgen war er schlechter als die Referenz, so dass b negativ war. Die relative Leistung nahm zu hohen Referenzerträgen hin zu, so dass die Steilheit der Kurve höher war und $a > 1$.

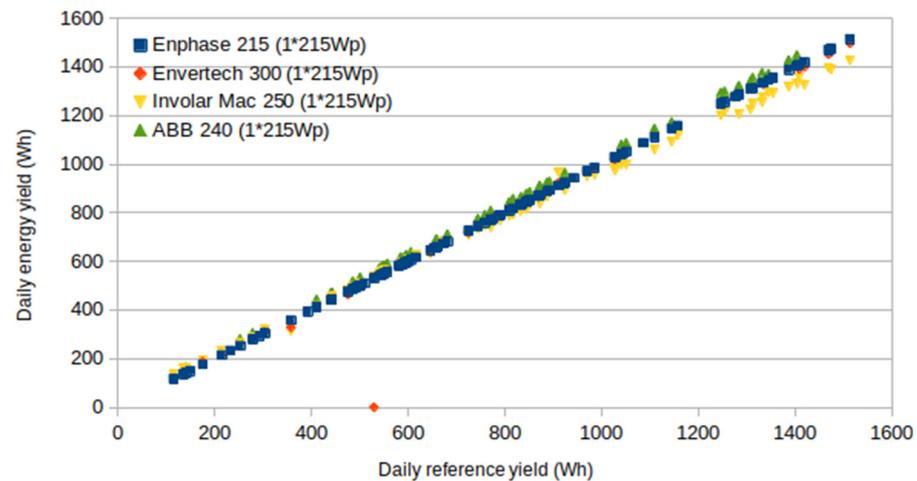


Abbildung 10. Elektrische Energieerträge verschiedener Wechselrichter für einzelne PV-Module, jeweils angeschlossen an ein einzelnes 215- W_p -Modul. Der tägliche Referenzertrag (x -Achse) ist der Energieertrag (AC), der von einem Enphase M 215-Wechselrichter mit einem einzelnen 215- W_p -Modul erzielt wird.

Tabelle 3. Koeffizienten für den relativen Tagesertrag $y = a x + b$ (bezogen auf Enphase M 215, alle mit einem einzelnen 160- W_p -, 215- W_p - oder 360- W_p -Modul). Der Ertrag wird in täglicher durchschnittlicher elektrischer AC-Energie angegeben, und die Reihenfolge ist alphabetisch.

Hersteller	Typ (Modulleistung)	a	b (Wh)
APSystems	DS-L (1 × 360 W_p)	1,66	−17
Bosswerk	Mi 300 (1 × 215 W_p)	0,97	+5
Enphase	M 215 (1 × 215 W_p)	1,00	±0
Envertech	EVT 300 (1 × 215 W_p)	1,02	−33
Involar	MAC 500 (1 × 215 W_p)	0,92	+43
Lidl Parkside	PBKW-300-A1 (1 × 160 W_p)	0,67	−41
Power One/Aurora/ABB	Micro-0.25-i (1 × 215 W_p)	1,01	+26

Abbildung 11 zeigt die Eigenschaften verschiedener Mikro-Wechselrichter, die zwei Module versorgen können, entweder mit zwei 215-W_p-Modulen (ältere Messungen) oder zwei 360-W_p-Modulen (neueste Messungen). Tabelle 4 zeigt die entsprechenden Koeffizienten a (für „Steilheit“) und b (für „Offset“) der relativen Tagesertragskurve.

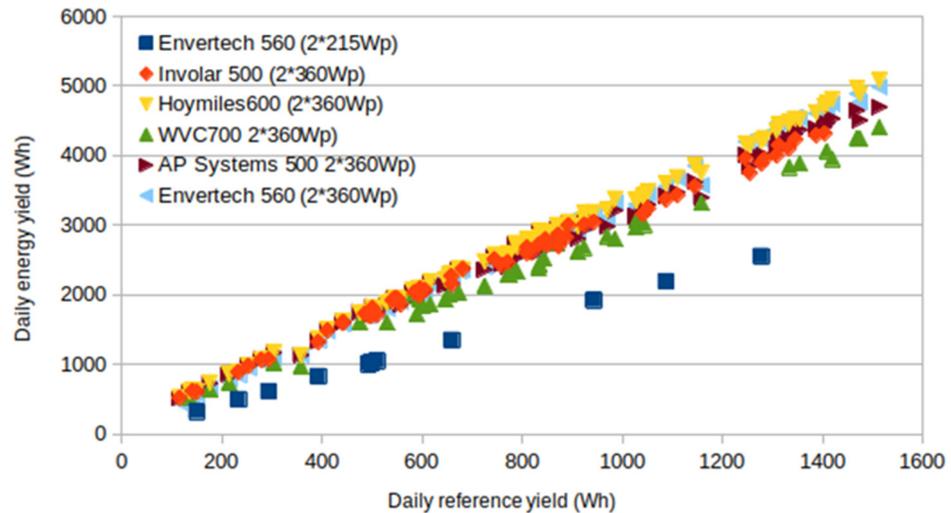


Abbildung 11. Durchschnittliche tägliche Energieerträge (AC) verschiedener Wechselrichter für zwei Module mit zwei angeschlossenen 215-W_p- oder 360-W_p-Modulen. Der Referenzertrag (x-Achse) ist der Ertrag, der von einem Enphase M 215 mit einem einzelnen 215-W_p-Modul erzielt wird.

Tabelle 4. Koeffizienten für den relativen Tagesertrag $y = a \cdot x + b$ für Mikrowechselrichter, die zwei Module mit einer Leistung von 215 W_p, 360 W_p oder 405 W_p versorgen (bezieht sich auf Enphase M 215 mit einem 215 W_p-Modul). Der Ertrag wird als durchschnittliche elektrische AC-Energie pro Tag angegeben, und die Reihenfolge ist alphabetisch.

Hersteller	Typ (Modullesitung)	a	b (Wh)
APSystems	DS-S (2 × 360 W _p)	3,20	+63
APSystems	DS-M (2 × 405 W _p)	3,90	+112
APSystems	YC 500 (2 × 360 W _p)	2,95	+255
Bosswerk	Mi 600 (2 × 360 W _p)	3,12	+112
Deye	Sun 600 G3 (2 × 215 W _p)	1,88	+62
Deye	Sun 600 G3 (2 × 360 W _p)	3,12	+92
Deye	Sun 800 G4 (2 × 405 W _p)	3,68	+90
Envertech	EVT 560 (2 × 215 W _p)	1,98	+38
Envertech	EVT 560 (2 × 360 W _p)	3,23	+110

Hoymiles	MI 600 (2 × 360 W _p)	3,19	+168
Hoymiles	MI 700 (2 × 360 W _p)	3,25	+133
Hoymiles	MI 700 (2 × 405 W _p)	3,64	+296
Hoymiles	HM 800–T2 (2 × 405 W _p)	3,81	+142
Huaju	HY 600 (2 × 360 W _p)	3,14	+154
Involar	MAC 500 (2 × 360 W _p)	2,89	+181
NEP	BDM 600 (2 × 360 W _p)	2,70	+276
Technaxx	TX 204 (2 × 360 W _p)	3,16	+190
WVC	WVC 700 (2 × 360 W _p)	2,75	+172

Die Bestimmungskoeffizienten R für alle Regressionen aller Messwerte zur Bestimmung der Koeffizienten a und b lagen bei ca. 0,98.

5. Schlussfolgerungen

Es wurde ein Vergleich der meisten auf dem europäischen Markt befindlichen Mikrowechselrichter in Bezug auf die Gleichstrom-Wechselstrom-Wirkungsgrade (die den gesamten Bereich der Lastbedingungen abdecken) durch Präzisionsmessungen durchgeführt. Entsprechend den Anforderungen an den gewichteten europäischen und den CEC-Wirkungsgrad wurde eine Rangliste erstellt, die über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren regelmäßig aktualisiert wurde. Dies ermöglicht es dem Leser, die gewichteten Wirkungsgradunterschiede im Rahmen eines Kosten-Nutzen-Vergleichs der bevorzugten Typen und Marken von Mikro-Wechselrichtern zu relativieren.

Der Einfluss des Betriebs in einer Hochtemperaturumgebung wurde untersucht. Es wurde festgestellt, dass einzelne Wechselrichter bei längeren Betriebszeiten und höheren Temperaturen den Betrieb vorübergehend unterbrechen oder ganz einstellen, und es wurde auch eine Verringerung der maximalen Leistung beobachtet.

Wirkungsgrade allein spiegeln aufgrund unterschiedlicher MPPT-Fähigkeiten nicht unbedingt den Energieertrag wider, daher sind Ertragsmessungen hilfreich, die in früheren Veröffentlichungen, z. B. [5], durchgeführt und beschrieben wurden. Aufgrund der drastisch gesunkenen Modulpreise und der relativ stabilen Wechselrichterpreise ist die Überleistung jedoch recht häufig geworden, was spezifische Ertragsmessungen aufgrund der enormen Anzahl möglicher Konfigurationen von Wechselrichter- und Modulgrößen unwirksam macht.

Die Verwendung einer Referenzkonfiguration zusammen mit den beiden Koeffizienten einer linearen Gleichung ist eine einfache Methode zur Beschreibung der täglichen Ertragsleistung eines beliebigen Mikro-Wechselrichters in Kombination mit einem beliebigen PV-Modul, auch mit einem zu kleinen oder zu großen. Da die Preise für PV-Module schneller sinken als die Preise für Mikrowechselrichter, werden wir in Zukunft immer häufiger Konfigurationen mit überdimensionierten Modulen und gesättigten Mikrowechselrichtern sehen. Gesetzgeber in verschiedenen Ländern (z. B. in Österreich, Deutschland und der Schweiz) erwägen überdimensionierte Systeme, die oft nur die Leistung auf der AC-Seite begrenzen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer Methode, wie die hier beschriebene, um den Energieertrag hochzurechnen.

6. Ausblick

Während die Kosten der PV-Module heute in der Regel niedriger sind als die Kosten der Wechselrichter, ist der Druck zur Kostensenkung bei den Wechselrichtern offensichtlich. Nach einer Kostenuntersuchung der internen Komponenten eines typischen Mikro-Wechselrichters wurde festgestellt, dass weitere Kostensenkungen auf dieser Seite nicht möglich sind. Bei den externen Komponenten wie Kabeln, Steckverbindern und Gehäusen kann jedoch eine Kostenreduzierung möglich sein, wenn der Wechselrichter in den Modulanschlusskasten oder den Rahmen des Moduls integriert werden kann, wodurch die meisten externen Komponenten überflüssig werden. Ein Schritt in diese Richtung wurde von der Firma SolarNative[®] unternommen, die den Wechselrichter in ein Vierkantrohr integriert hat, das in den Modulrahmen eingesetzt werden kann. In einem weiteren Schritt würde dies zu einem „AC-Modul“ führen, das das Gehäuse des Modulrahmens oder des Modulanschlusskastens nutzt, so dass die Gleichstromverdrahtung nur noch intern erfolgt, was Gleichstromstecker überflüssig macht und somit die Installation der gesamten PV-Anlage erleichtert. Solche AC-Module sind in der Literatur beschrieben worden, z. B. [4,8,9]; sie haben es jedoch noch nicht über den Prototypenstatus hinaus geschafft. Eine große Herausforderung sind die strengen Tests für die Zertifizierung von PV-Modulen auf der Grundlage der IEC 61215, die auch für den integrierten Wechselrichter durchgeführt werden müssten. Dazu gehören schnelle Temperaturwechsel zwischen -40 °C und +85 °C und ein 1000-stündiger feuchter Wärmetest bei 85 °C und 85 % Luftfeuchtigkeit. Normalerweise versagt die Elektronik unter solchen Bedingungen.

Beiträge der Autoren: Konzeptualisierung, S.K. und J.B.; Methodik, J.B. und S.K.; Messungen, J.B.; Validierung, S.K.; Datenpflege, S.K.; Erstellung des schriftlichen Originalentwurfs, S.K.; schriftliche Überprüfung und Bearbeitung, S.K.; Visualisierung, J.B.; Überwachung, S.K.; Projektverwaltung, S.K.; Beschaffung von Finanzmitteln, S.K. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und ihm zugestimmt (englische Version).

Finanzierung: Diese Forschungsarbeit erhielt keine externe Finanzierung.

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Referenzen

1. Lai, W.-F.; Chen, S.-M.; Liang, T.-J.; Lee, K.-W.; Ioinovici, A. Design and Implementation of Grid Connection Photovoltaic Inverter. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Raleigh, NC, USA, 15–20 September 2012; S. 2426–2432.
2. Kjær, S.B.; Pedersen, J.K.; Blaabjerg, F. Power inverter topologies for photovoltaic modules—A review. In Proceedings of the Conference Record of the Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, Pittsburgh, PA, USA, 13–18 October 2002; Volume 2, S. 782–788. <https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042648>.
3. Myrzik, J.M.A.; Calais, M. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—A review. In Proceedings of the Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna (2003), Bologna, Italy, 23–26 June 2003; Volume 2. <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304589>.
4. Oldenkamp, H.; de Jong, I.J. The return of the AC-module inverter. In Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 21–25 September 2009; S. 3101–3104.
5. Krauter, S.; Bendfeld, J. Cost, performance, and yield comparison of eight different micro-inverters. In Proceedings of the IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans, LA, USA, 14–19 June 2015; S. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355821>.
6. Stellbogen, D.; Lechner, P.; Senger, M. Field and laboratory performance characterisation of microinverter and Power optimizer systems. In Proceedings of the 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, 21–26 June 2016; S. 1654–1659.
7. Krauter, S.; Bendfeld, J. Elevated Temperatures Affecting Efficiency, Overall Performance and Energy Yield of PV Microinverters. In Proceedings of the 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Marseille, France, 13 September 2019; S. 1179–1180.

8. Wills, R.H.; Hall, F.E.; Strong, S.J.; Wohlgemuth, J.H. The AC photovoltaic module. In Proceedings of the Conference Record of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, DC, USA, 13–17 May 1996. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1996.564354>.
9. Leuenberger, D.; Biela, J. PV-Module-Integrated AC Inverters (AC Modules) With Subpanel MPP Tracking. *IEEE Trans. Power Electron.* **2016**, *32*, 6105–6118. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2615078>.
10. Krauter, S.; Bendfeld, J. Microinverter PV Systems: New Efficiency Rankings and Formula for Energy Yield Assessment for any PV Panel Size at Different Microinverter Types. In Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Milano, Italy, 26–30 September 2022; S. 1165–1169. <https://doi.org/10.4229/WCPEC-82022-4EO.2.6>.

Haftungsausschluss/Hinweis des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die des/der jeweiligen Autors/Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder dem/den Herausgeber(n). MDPI und/oder der/die Herausgeber lehnen jede Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die sich aus Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten ergeben, auf die im Inhalt Bezug genommen wird.