



Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen

Ein Systemvergleich

David Joss, Ramona Stoll, Christof Bucher
v1.1, 08.02.2023



Berner
Fachhochschule

Institut für Energie- und Mobilitätsforschung
Labor für Photovoltaiksysteme

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Testdesign	4
3	Systeme	7
4	Module	13
5	Wechselrichter	15
6	Fazit	17
7	Auftraggeberin und Finanzierung	19
8	Abbildungsverzeichnis	19
9	Tabellenverzeichnis	20
10	Literaturverzeichnis	20
11	Versionskontrolle	20
12	Anhang	21

1 Einführung

Aufgrund der Energiemangellage sind Plug-&Play-Photovoltaikanlagen – auch Balkonsolar oder Steckersolar genannt – aktuell sehr gefragt. Vor allem Personengruppen, welche nicht über Wohneigentum verfügen und dennoch eine «eigene» Photovoltaikanlage haben möchten, setzen gerne Plug-&Play-Photovoltaikanlagen ein. Eine Plug-and-play PV-Anlage besteht im Minimum aus einem PV-Modul, einem Wechselrichter und einem Anschlusskabel mit geeignetem Stecker für den Anschluss an einer Haushaltssteckdose. Die einzelnen Komponenten müssen eine Einheit bilden, über eine Schutzfunktion vor unzulässiger Rückspeisung verfügen und gelten mit vorhandener Konformitätserklärung über die Einhaltung aller relevanten Normen als elektrisches Erzeugnis.

Die Rechtsgrundlage für Plug-&Play-Photovoltaikanlagen in der Schweiz ist überschaubar und weist noch gewisse Unklarheiten auf. Zentrales Dokument ist ein Artikel vom Eidgenössischen Starkstrominspektorat ESTI vom Juli 2014 in der Fachzeitschrift Bulletin des VSE. Darin ist definiert, dass pro Bezügerleitung (also typischerweise pro Stromzähler) steckerfertige mobile PV-Anlagen bis zu einer AC-seitigen Nennleistung von gesamthaft maximal 600 W an freizügigen 230 V Steckdosen eingesteckt sein dürfen. Weiter werden Anforderung an das Meldewesen, die Systemzusammensetzung und -dokumentation definiert (ESTI - Marty Dario 07.2014). Punkto Haftbarkeit bei Schäden aufgrund einer Plug-and-play PV-Anlage ist man sich uneins (Tagesanzeiger - Grimm Fabienne 2022) (Solaranlagen für den Balkon 2022) und die involvierten Parteien planen u. A. Interventionen auf Bundesebene (Tagesanzeiger - Alexandra Aregger 2022). Eine wertvolle Sammlung von Wissenswertem zum Thema hat das Bundesamt für Energie zusammengestellt (EnergieSchweiz 2023). Ansonsten gibt es keine den Autoren aktuell bekannten Regulatorien mit besonderem Bezug zu Plug-&Play-Photovoltaikanlagen. Kurzum: Der Einsatz einer Plug-and-play PV-Anlage ist unter Einhaltung gewisser Regeln in der Schweiz erlaubt, jedoch in juristischer Hinsicht noch nicht restlos geklärt.

Am Labor für Photovoltaiksysteme der Berner Fachhochschule wurden im Zeitraum von Oktober 2022 bis Januar 2023 sieben Plug-&Play-Photovoltaikanlagen hinsichtlich Installation, Handhabung, Sicherheit und Energieertrag analysiert und untereinander verglichen. Nachfolgend sind die Ergebnisse dieses Systemvergleichs dokumentiert.

Plug-&Play-Photovoltaikanlagen sowie deren Einsatz werden zurzeit viel und kontrovers diskutiert. Mit diesem Kurzbericht und den Folgearbeiten will das PV-Labor zu einer sachlichen Diskussion und zu einer sicheren, pragmatischen Nutzung der Sonnenenergie auch mittels Kleinanlagen beitragen.

2 Testdesign

Der Auftrag war es, sieben aktuell am Markt verfügbare Plug-&Play-Photovoltaikanlagen zu beschaffen, diese hinsichtlich Installation, Handhabung, Sicherheit und Energieertrag zu analysieren und untereinander zu vergleichen sowie zu bewerten. Die Beurteilungskriterien und das Bewertungsraster wurden gemeinsam mit der Auftraggeberin ausgearbeitet. Der Testzeitraum war Oktober 2022 bis Januar 2023. Die Labormessungen als auch der Feldtest fand am PV-Labor der BFH in Burgdorf statt. Die unten aufgeführten und in der Tabelle 1 charakterisierten Systeme wurden analysiert.

1. ADE!geranium 330W
2. Solarkraftwerk 365W für Balkon - Plug & Play Solaranlage mit APP - inkl. Montagematerial
3. Plug-in PV:LightMate B 360x1
4. erneuerbar 385 Wp Plug & Play Solar (DE)
5. Gosolar Plug&Play Solar Kit 600 Watt inkl. Fi Typ B + Montage Kit + Handy App
6. Solarbalkon mit 1 Panel à 2m und 310W
7. 380W Plug&Play Solaranlage

Tabelle 1 Übersicht getestete Systeme am PV-Labor

System-Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Bezugsquelle	energiegenossenschaft.ch	autosolar.ch	Photovoltaik-Shop-EET Schweiz (solmate.ch)	go-erneuer.bar	solarenergy-shop.ch	solarbalkon.ch	solarblitz
Bezeichnung Modul	aleo X83	JA Solar, JAM60S20-385/MR	SEMI-Flexibel solar panel OS100-40MFX	Meyer Burger White 390	Axitec AC-345MH/120V	SUNMAN (ZhenJiang) SMF310M-5X12DW	TrinaSolar TSM-415NEG9.28
Hersteller Modulnennleistung [Wp] (gesamt)	330	385	200	390	690	310	415
Modul ID	M5-1	M5-2	M5-4, M5-5	M5-6	M5-7, M5-9	M5-8	M5-10
WR-ID	I1-20	I1-21	I1-23	I1-24	I1-25	I1-26	I1-27

2.1 Labormessungen

Im Labor wurden folgende Messungen durchgeführt:

2.1.1 Kennlinienmessung der PV-Module mit Plausibilisierung der Datenblattwerte

Zur Plausibilisierung der Datenblattwerte für die Modulnennleistung P_{mpp} wurden Flasher- oder Outdoor-ClearSky-Messungen durchgeführt und die Abweichung ausgewertet.

2.1.2 Elektrolumineszenzmessung der PV-Module für die Beurteilung des Modulzustandes

Mittels Elektrolumineszenzmessung wurden die Module auf Zellbeschädigungen untersucht. Zur Anwendung kam die Klassierungs-Methode der SUPSI (Mauro Cattivio 2016)

2.1.3 Verhalten des Systems bei Erdschluss auf DC-Plus- und DC-Minusleitung

Auf der DC-Plus- als auch auf der DC-Minusleitung wurde unabhängig voneinander ein Erdschluss mit einem Belastungswiderstand von $1k\Omega$ simuliert. Dieser Test sollte zeigen, welches Spannungsniveau sich im Zeitverlauf beim Vorliegen eines Isolationsfehlers in der DC-Verkabelung einstellt.

2.1.4 Verhalten des Systems bei Ausziehen des Netzsteckers

Das Spannungsniveau des Polleiters gegenüber Erdpotenzial wurde im Zeitverlauf nach Trennung der Plug-and-play PV-Anlage vom Netz analysiert. Diese Messung wurde einmal im Leerlauf (AC-seitige Steckkontakte in Luft) und einmal mit einem Belastungswiderstand von $1k\Omega$ simuliert. Dieser Test

sollte zeigen, welche Elektrisierungsgefahr von einem ausgezogenen Netzstecker der Plug-&-Play PV-Anlage ausgeht.

2.2 Feldtest

Im Feldtest wurden folgende Aspekte betrachtet:

2.2.1 Montage

Anhand der Lieferantenanleitungen montierte das Testteam die Systeme an einer für alle identischen Balkonbrüstung. Dabei wurden sämtliche mitgelieferten Materialien verwendet und nötigenfalls mit zusätzlichem Installationsmaterial ergänzt. Jedes System wurde zusätzlich mit einem Drahtseil gegen Absturz im Fehlerfall der mechanischen Befestigung gesichert.

2.2.2 Inbetriebnahme

Die Systeme wurden nach Anleitung überprüft und in Betrieb genommen. Der Prozess wurde bis zur Anzeige des Einspeisebetriebes mittels Signalisation am Wechselrichter oder Überwachungsapp durchlaufen.

2.2.3 Betrieb

Alle Systeme wurden im ganzen Dezember 2022 unverändert am Montageort belassen. Während der gesamten Betriebsphase wurde die effektive Einstrahlung in die Modulebene für den Vergleich gegenüber der Einstrahlung im langjährigen Mittel aufgezeichnet. Ebenso wurde je System der Leistungsfluss (Bezug und Abgabe) erfasst. Auf Basis der Leistungsflüsse wurde die eingespeiste und bezogene Energie je Plug-and-play PV-Anlage für die Messperiode bestimmt und normiert auf die Anlagennennleistung für den Vergleich vorbereitet.

2.2.4 Demontage

Die Demontage wurde analog dem Montageprozess durchgeführt.

2.3 Bewertungskriterien

Gesamthaft wurden folgende Kriterien bewertet:

2.3.1 Produktionskosten

Die Produktionskosten wurden als Stromgestehungskosten über 20 Jahre, mit einem Kapitalzins von 2% und ohne Berücksichtigung von Betriebskosten auf Basis der gemessenen Energieproduktion berechnet. Die produzierte Energie wurde auf ein Normjahr für den Standort und die Einstrahlung in die geneigte Fläche und dann linear auf 20 Betriebsjahre extrapoliert. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde dabei auf die Betriebskosten (mutmasslich notwendiger Ersatz des Wechselrichters nach ca. 15 Jahren) verzichtet.

2.3.2 Qualität

In das Bewertungskriterium Qualität flossen technische Mängel, der Vergleich der genormten Energieproduktion (kWh/kWp, PR), der Qualitätseindruck der Systeme nach Einschätzung des Testteams, ein auffälliges Systemverhalten punkto erhöhten Eigenverbrauchs und Aussetzern sowie der Vergleich der Produktgewährleistung mit ein.

2.3.3 Handhabung

Das Bewertungskriterium Handhabung beinhaltet die unter Feldtest beschriebenen Schritte der Montage, Inbetriebnahme und Demontage und basiert auf den Einschätzungen des Testteams.

2.3.4 Sicherheit (Personenschutz)

Unter das Kriterium Sicherheit fallen die entsprechenden Messungen im Labor (2.1.3, 2.1.4) sowie durch das Testteam festgestellte sicherheitsrelevante Aspekte am Gesamtsystem (z.B. Montagesicherheit, Absturzsicherung, Berührungsschutz)

2.3.5 Technische Angaben und Normenkonformität

Die Labormessungen an den PV-Modulen (2.1.1, 2.1.2) und das Vorhandensein der notwendigen Selbstdeklarationen respektive Konformitätserklärungen wurden in diesem Kriterium bewertet. Auch das Vorhandensein eines vom ESTI geforderten Fehlerstromschutzes vom Typ B wird unter diesem Punkt gewertet.

2.3.6 Überwachung Anlagestatus

Die Art der Überwachungsmöglichkeiten sowie gegebenenfalls vorhandene Überwachungsapps wurden vom Testteam beurteilt.

2.3.7 Kommunikation/Kundendienst

Die Beratung am Telefon oder per Email, die subjektiv wahrgenommenen Auskunftsbereitschaft wie auch -qualität flossen als Bewertung des Testteams mit einer minimalen Gewichtung in den Systemvergleich ein.

2.4 Weiteres zum Testdesign

Die Gewichtung und thematische Zuweisung innerhalb der Bewertungskriterien wurden gemeinsam mit der Auftraggeberin ausgearbeitet. Für Hintergrundinformationen wird an Sie verwiesen.

Diskussion und Abgrenzung: RCMU und RCD Typ B

Gemäss der ESTI-Mitteilung (ESTI - Marty Dario 07.2014) wird entweder eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (PRCD, Typ B, 30mA) im Netzkabel/im Netzstecker auf der AC-Seite des Erzeugnisses oder eine allstromsensitive Fehlerstromüberwachungseinheit (RCMU) im Wechselrichter respektive der Netzschnittstelle gefordert.

Die Notwendigkeit der Schutzfunktion ist unbestritten. Die Forderung des ESTI begründet auf der Annahme, dass eingesetzte Wechselrichter auf der AC-Seite möglicherweise einen DC-Fehlerstrom zulassen könnten, welcher die herkömmlichen Fehlerstromschutzgeräte (FI/RCD, Typ A, 30mA) jeder Haushaltssteckdose im schlimmsten Fall komplett in ihrer Schutzfunktion hindern könnten. Folge dessen wird ein zusätzlicher Fehlerstromschutzschalter im System benötigt, der sowohl AC- wie auch DC-Fehlerströme erkennen und abschalten kann. Dieser kann entweder im Wechselrichter integriert sein (RCMU) oder extern gemäss Forderung.

In der Praxis ist die überwiegende Mehrheit der eingesetzten Modulwechselrichter jedoch so aufgebaut, dass sie gar keine DC-Fehlerströme auf der AC-Seite zulassen. Die Geräte sind mit einem Hochfrequenz-Transformator versehen, der die DC- von der AC-Seite galvanisch trennt. Diese galvanische Trennung verhindert es, dass der herkömmliche Fehlerstromschutzschalter Typ A in der Haushaltinstallation in ihrer Schutzfunktion gestört werden und lässt implizit das Argument zu, dass technisch gesehen die zusätzlichen Schutzgeräte bei Wechselrichtern mit galvanischer Trennung in der Plug-and-Play PV-Anlage nicht benötigt werden.

In der Realität werden viele der Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen nicht genau den ESTI-Mitteilung entsprechend verkauft und eingesetzt. Dies heisst aus den oben genannten Gründen aber nicht, dass Sie keinen Personenschutz im Sinne der Niederspannungsinstallationsnorm NIN bieten. So wäre zum Beispiel gemäss NIN 2020 Kap. 7.12.4.1.1.3 das Kriterium der einfachen Trennung zwischen AC- und DC-Seite gegeben, womit auf den RCD Typ B verzichtet werden könnte.

Die heutige Rechtslage basiert primär auf einer ESTI-Mitteilung sowie Analogieüberlegungen zur NIN. Ein ordentlicher Prozess zur Normengebung hat bisher nicht stattgefunden. Unter Berücksichtigung dieser Rechtsunsicherheit hat sich das Testteam für eine Vorgabenunabhängige Untersuchung (Spannungsniveau-Untersuchung) entschieden und eine eigene Sicherheitsbeurteilung vorgenommen.

Es ist wichtig, dass diese Unklarheit in den künftigen Diskussionen zu regulatorischen Vorgaben rund um Plug-&-Play-Photovoltaiksysteme beseitigt werden kann. Das PV-Labor der BFH beteiligt sich an den Prozessen zum Schaffen einer pragmatischen und sicheren Lösung.

3 Systeme

3.1 Systembetrachtung und Handhabung für Montage, Inbetriebnahme und Betrieb

Alle analysierten Systeme sind für die Installation an einem Balkongeländer vorgesehen. Zwei grundsätzliche Varianten haben sich durchgesetzt und wurden getestet.

3.1.1 Konstruktion mit Profilschienen und Dachhaken

Unter Nutzung eines gerahmten PV-Moduls wird dieses mit Modulklammern an zwei Profilschienen montiert und an diesen wiederum ein Dachhaken oder Geranienhaken befestigt. An diesem Haken wird das System dann über die Balkonbrüstung gehängt. Der Wechselrichter wird entweder am Modulrahmen oder an der Profilschiene mit einer Schraube befestigt.

3.1.2 Rahmenlose Konstruktion

Kommen rahmenlose PV-Module zum Einsatz, erfolgt deren Befestigung mit den mitgelieferten Klettbändern oder Zurrgurten. Ergänzend kamen auf Entscheidung der Testdurchführenden zur Erhöhung der Sicherheit Kabelbinder parallel zum Einsatz. Der Wechselrichter wird entweder mittels mitgeliefertem Metallkabelbinder oder mit Kabelbindern am Balkongeländer befestigt.

3.1.3 Kritik an den Systemen

Im Gegensatz zur Montagequalität und -stabilität von fest installierten PV-Anlagen fallen die Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen zurück. Sie sind einfach gehalten, eignen sich bei den getesteten Systemen eigentlich nur für Metallbalkongeländer und der Lieferumfang reicht oft nicht aus, um eine alternative Montage vorzunehmen. In vielen Fällen musste bei der Installation improvisiert werden und mindestens Kabelbinder mussten zusätzlich besorgt werden – in mehreren Fällen sogar weitere Schrauben oder anderes Zubehör. Gesamthaft kann resümiert werden, dass keines der Systeme den Ansprüchen einer langfristigen dauerhaften Installation ohne zusätzliche Massnahmen gerecht wird. Insbesondere negativ aufgefallen ist, dass bei der Mehrheit der Systeme mit Profilschiene und Dachhaken eigentlich eine Sicherung gegen Herabfallen fehlt. Ein Hersteller (ADE!geranium) erwähnt in seinem Installationsanleitungsvideo, dass man die Konstruktion mit einem Drahtseil sichern soll. Diese Sicherungsmethode wurde im Feldtest, wenn möglich angewendet. Dafür legten die Testdurchführenden eine Drahtseilschleife durch das Montageprofil, die Montageöffnungen im PV-Modul und durch den Haken der Konstruktion. Die Schleife wurde mit 2 Drahtseilsicherungen geschlossen.

Während bei den rahmenlosen Modulen die gesicherte Befestigung der Module weniger problematisch war, stellte sich die dauerhafte Befestigung der Wechselrichter als herausfordernder dar. Auch hier wurde von keinem Systemlieferanten eine Montagelösung für möglichst viele Anwendungen mitgeliefert, sondern es musste mit zusätzlichen Komponenten gearbeitet werden. In Feldtest fiel die Wahl auf Kabelbinder, von welchen davon ausgegangen werden kann, dass sie auch in der realen Anwendung für die Befestigung beigezogen werden könnten. Zu beachten ist, dass es bei Kabelbindern grosse Qualitätsunterschiede gibt. Es sind nur Produkte zu verwenden, die den Witterungseinflüssen dauerhaft standhalten.

In jedem Fall ist es sehr wichtig zu erwähnen, dass der Wechselrichter mit genügend Abstand zum PV-Modul installiert werden soll. Die beiden Teilkomponenten sollten sich im Betrieb nie berühren. Bei einem System wurde ein grösserer Wechselrichter verwendet (Gosolar), welcher mit dem mitgelieferten Zubehör nicht an einer Balkonbrüstung installiert werden konnte. Stattdessen sollte eine Wandmontage durchgeführt werden, wofür die nötigen Installationskomponenten beiliegen. Doch wenn die Wand schon nur 2m entfernt zu den beiden PV-Modulen des Systems entfernt ist, müssten zusätzliche Kabel für den Anschluss der PV-Module an den Wechselrichter beschafft werden. Die branchenübliche und von vielen Herstellern geforderte Regel, nur baugleiche DC-Steckverbindungen einzusetzen, wurde kaum beachtet.

Alle getesteten Plug-and-play Systeme sind in der Handhabung prinzipiell recht einfach und für handwerklich durchschnittlich begabte Anwender geeignet. Entweder werden die Systeme bereits installationsfertig angeliefert oder sind mit den beigelegten oder im Internet abrufbaren

Installationsanleitungen mehr oder weniger einfach zusammenzubauen und an Balkonbrüstungen zu montieren. Passt ein System nicht an den bestehenden Balkon, braucht es Kreativität und erweiterte handwerkliche Fähigkeiten für die Montage. Es ist immer empfehlenswert, die Installationsarbeiten zu zweit auszuführen.

Drei Systeme weisen einen Schutzleiter-/Potenzialausgleichs-Anschluss mit Kabel auf (Gosolar, Solarbalkon, EET-Solmate). Bei zwei Systemen wird nicht darauf eingegangen, was mit diesen Kabeln zu tun ist (Solarbalkon, EET-Solmate). Bei einem System wird explizit erwähnt, dass der Wechselrichter und die Unterkonstruktion mit dem lokalen Potenzialausgleich zu verbinden ist (Gosolar). Laien dürften dies kaum tun oder mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht wissen wozu.

Alle Systeme konnten einzig durch Einstecken in eine nahegelegene Balkonsteckdose in Betrieb genommen werden, was dem Begriff Plug-&-Play PV gerecht wird. Den Betriebsmodus signalisieren die Wechselrichter bei den meisten Systemen mit LEDs und entsprechenden Blinkcodes, welche in den Herstellerunterlagen aufgeschlüsselt sind. Ein System (Autosolar) weist eine integrierte WLAN/Bluetooth-Schnittstelle zur Betriebs-Überwachung mit einer App des Wechselrichterherstellers auf. Im Test funktionierte diese problemlos. Ein zweites System (Gosolar) bietet ebenfalls die Möglichkeit zur Betriebsüberwachung über eine App an. Im Test klappte es nicht, die Messdaten vom Wechselrichter ans Herstellerportal zu übermitteln und somit funktionierte die Betriebsüberwachung nicht wie erwartet.



Abbildung 1 Bildschirmfoto der Überwachungapp (Autosolar). (Die Genauigkeit der Angaben wurde nicht überprüft.)

3.2 Energieertrag und Stromgestehungskosten

Während des ganzen Dezembers 2022 wurden alle Systeme einem Betriebstest unterzogen. Dafür wurden alle Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen auf dem Dach des PV-Labors an einer temporär errichteten Balkonbrüstung mit gleicher Ausrichtung montiert und in Betrieb genommen. Über den ganzen Montagezeitraum wurden mittels Energiezählern die Produktionsdaten erfasst und danach ausgewertet. Ebenfalls wurden auf Basis einer Jahresextrapolation der Produktionsdaten die erwarteten Stromgestehungskosten berechnet.

Das Vorgehen war wie folgt:

- Reelle Produktion aller Systeme im Dezember messen
- Reelle Produktion normieren auf langjähriges Mittel in die geneigte Fläche (Anstellwinkel: 90°, Azimut: 29° West)¹
- Normierte Dezemberproduktion extrapolieren auf Normjahr
- Berechnung spezifischer Jahresenergieertrag
- Stromgestehungskosten auf Basis von 20 Normjahren berechnen. (Vereinfachung: Keine Degradation, Keine Betriebskosten)



Abbildung 2 Produktionsdaten (Verlauf über mehrere Tage) der Plug-&-Play-Photovoltaiksysteme auf der Testanlage

Die Produktionsdaten konnten auch hinsichtlich Unregelmässigkeiten im Betrieb untersucht werden. Drei Wechselrichter zeigten ein auffälliges Verhalten (Gosolar, EET-Solmate, Solarbalkon). Alle drei Wechselrichter hatten im Schwachleistungsbereich vereinzelte kurze Zeitintervalle, in welchen keine oder eine verminderte Rückspeisung stattfand, während die anderen Systeme in derselben Periode einwandfrei funktionierten. Ein Wechselrichter wurde im Betrieb merklich wärmer als die anderen (Autosolar).



Abbildung 3 Beispielhafte Darstellung eines WR-Aussetzers um zirka 13:25 Uhr. Bei 3 der 7 getesteten Wechselrichtern war dieses Verhalten erkennbar.

¹ Dafür wurden Einstrahlungsdaten aus Meteonorm 8 verwendet und der gemessenen Einstrahlung (Pyranometer in Modulebene) gegenübergestellt.

Ein Wechselrichter (Gosolar) schaltete sich bei Dämmerung immer merklich später ein als die anderen Geräte. Derselbe Wechselrichter drosselte seine Produktion ebenfalls früher als die anderen Systeme und bezog regelmässig noch eine kleine Energiemenge (einige Wh) aus dem Hausnetz (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4 Ausschaltverhalten des Systems mit Hausnetzbezug

Die Auswertung der Energiedaten zeigte, dass alle Systeme in der Testperiode mit unterdurchschnittlichen Einstrahlungswerten für den Dezember genügende bis sehr gute Produktionsleistungen hatten. 4 Systeme zeigten einen genügenden respektive guten Solarertrag während 3 Systeme einen sehr guten Energieertrag aufwiesen. Kein System fiel merklich ab oder performte ungenügend. Der tiefste, einstrahlungskorrigierte spezifische Ertrag lag bei 683 kWh/kWp/a und der höchste bei 860 kWh/kWp/a.

Tabelle 2 Energieertrag in der Messperiode sowie extrapoliert auf Norm-Dezember, Norm-Jahr. Spezifischer Ertrag und PR auf Basis von extrapoliertem Normjahr im langjährigen Mittel für die geneigte Fläche gemäss Meteonorm 8.

System	ADEIgeranium	Autosolar	EET-Solmate	Erneuerbar	Gosolar	solarbalkon	Solarblitz
System-Nr	1	2	3	4	5	6	7
Energieertrag gem. im Dez 2022 [kWh]	8.925	8.303	4.556	10.289	15.750	7.072	11.265
Energieertrag extrapol. auf Norm-Dezember [kWh]	12.18	11.33	6.22	14.04	21.49	9.65	15.37
Energieertrag extrapol. auf Normjahr [kWh]	282.75	263.05	144.34	325.99	498.97	224.07	356.88
Spez. Energieertrag extrapol. auf Normjahr [kWh/kWp/a]	857	683	722	836	723	723	860
Performance Ratio (PR) ²	0.90	0.72	0.76	0.88	0.76	0.76	0.90

² Berechnet auf Basis von Energieertrag extrapol. auf Normjahr [kWh]

Weiter wurde die Performance Ratio (PR) aller Plug-&Play-Photovoltaiksysteme für verschiedene Perioden berechnet und betrachtet. Die Messperiode im Dezember 2022 war ein guter Anhaltspunkt zur Bewertung des zu erwartenden Jahresenergieertrags der Systeme anhand der PR (siehe blaue Balken in Abbildung 5).

Aufgrund der kurzen Messperiode wurden die Resultate mit zwei weiteren Messungen plausibilisiert:

- a) Die Messwerte von zehn Januartagen (siehe orange Balken in Abbildung 5).
- b) Die Leistungswerte zu einem stabil sonnigen Zeitpunkt am ertragsreichsten Tag im Dezember (siehe graue Balken in Abbildung 5).

Diese Plausibilisierungen zeigen, dass prognostizierten Jahreserträge mit anderen Messmethoden in einer ähnlichen Grössenordnung zu liegen kommen. Die grössten Abweichungen zeigen die Systeme von EET-Solmate und Solarbalkon, bei denen die Leistungswerte bei hoher Einstrahlung (graue Balken) auf einen höheren Jahresertrag hinweisen als dies aufgrund des Dezemberertrags (blaue Balken) zu vermuten wäre. Dies zeigt, dass diese Systeme bei geringer Einstrahlung (typischerweise bei bewölkten Tagen) relativ betrachtet einen tieferen Wirkungsgrad haben als die übrigen Systeme.

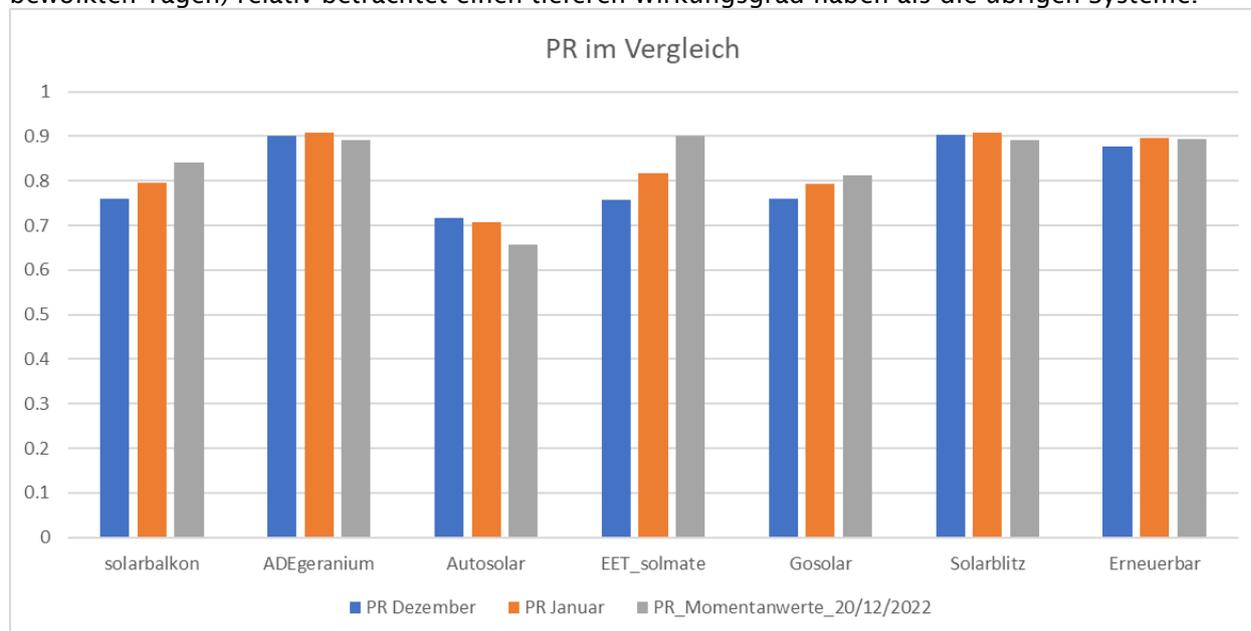


Abbildung 5 Vergleich der verschiedenen PR unter den Systemen und den verschiedenen Plausibilisierungsmethoden.

In den Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy, kurz LCoE) zeigten sich grosse Unterschiede. Der tiefste Energiepreis pro kWh Plug-and-play Strom vom eigenen Dach lag bei 10.3 Rp/kWh und der höchste bei 32.0 Rp/kWh. Der Berechnung liegt ein Zins von 2.0% und eine Anlagenbetriebsdauer (Systemamortisationszeit) von 20 Jahren zugrunde. Die Installations- und Betriebskosten wurden vernachlässigt.

Tabelle 3 Stromgestehungskosten der getesteten Systeme

System	solarbalkon	ADEgeranium	Autosolar	EET-Solmate	Gosolar	Solarblitz	Erneuerbar
LCOE [Rp/kWh]	22.38	12.11	20.81	32.01	19.23	11.14	10.32

3.3 Systemkosten

Die Systemkosten wurden für einen fairen Vergleich mit der System-PV-Nennleistung normiert, wie es branchenüblich ist. Die Bandbreite der analysierten Systeme beläuft sich von 1.41 CHF/Wp für das günstige bis zu 3.78 CHF/Wp für das teuerste Produkt. Hochgerechnet auf ein 600 W-System entspräche dies 846 CHF respektive 2268 CHF.

4 Module

4.1 Kennlinien und Leistungswerte

Mittels Kennlinienmessung der PV-Module³ wurden die Datenblattwerte für die Nennleistung P_{MPP} plausibilisiert. Von den 9 PV-Modulen (5 Systeme mit je 1 Modul, 2 Systeme mit 2 Modulen) waren 7 Module innerhalb der vom Hersteller spezifizierten Toleranz rund um den Nennwert (vgl. Datenblatt). 2 Module (EET-Solmate) waren im Mittel der Messungen mit 4.1% respektive 3.0% über den Spezifikationen des Lieferanten.

Tabelle 4 Plausibilisierungsmessungen der Modulnennleistungen ggü. Herstellerangaben am Flasher oder mit ClearSky-Messungen (Messunsicherheit: +/-2.8%)

Modul	Anbieter	Pmpp Herstellerangabe	Toleranzgrenze nach Hersteller	Pmpp gemessen BFH	%- Abweichung Ist-Soll
M5-1	ADEIgeranium	330	+/- 3% (0/+2.99W)	326.5	-1.1
M5-2	Autosolar	385	+/- 3% (0/+5W)	386.1	0.3
M5-4	EET-Solmate	100	+/- 3%	104.1	4.1
M5-5	EET-Solmate	100	+/- 3%	103.0	3.0
M5-6	Erneuerbar	390	+/- 3% (0/+5W)	384.3	-1.5
M5-7	Gosolar	345	+/- 3% (0/+4.9W)	339.0	-1.8
M5-9	Gosolar	345	+/- 3% (0/+4.9W)	340.2	-1.4
M5-8	Solarbalkon	310	+/- 5%	295.2	-4.8
M5-10	Solarblitz	415	+/- 3% (0/+5W)	406.1	-2.1

Aus Tabelle 4 und Abbildung 6 ist ersichtlich, dass sich die gemessenen MPP-Leistungen im Bereich von +/- 5% des Datenblattennwertes befinden, was branchenüblich ist.

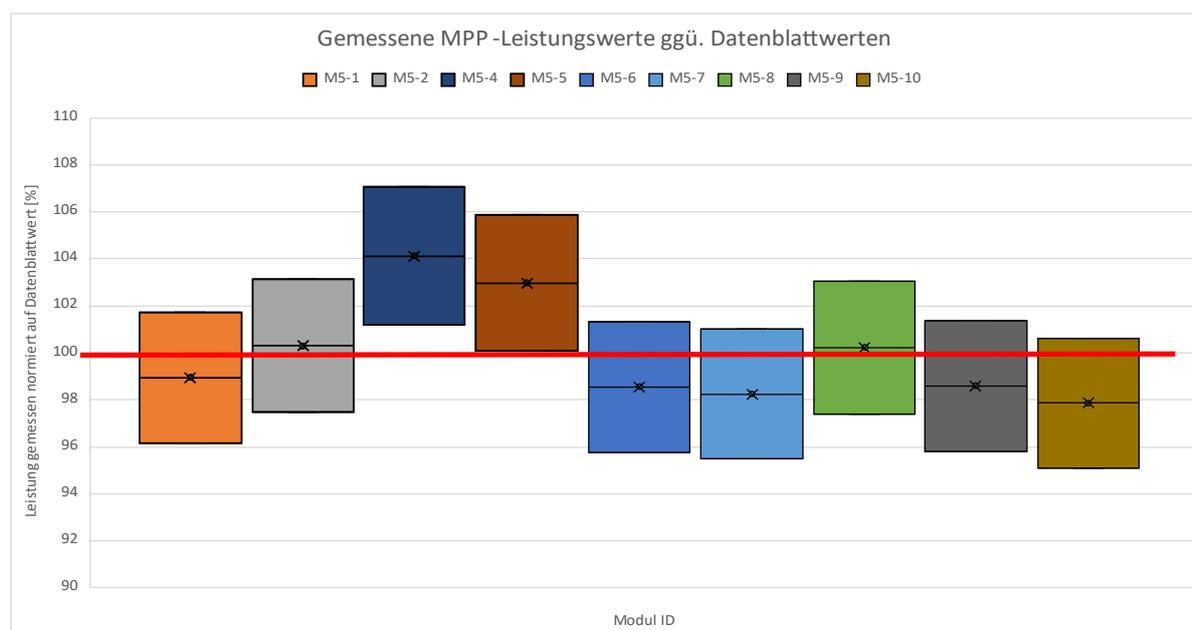


Abbildung 6 Graphische Darstellung der am PV-Labor gemessenen Leistungen ggü. den Nennleistungen gemäss Datenblatt (Messunsicherheit: +/-2.8% als Rechteck symbolisiert)

³ Flasher- oder ClearSky-Messungen.

4.2 Elektrolumineszenz

Eine Methode zur Überprüfung der mechanischen Unversehrtheit der angelieferten Module ist die Elektrolumineszenz, welche Mikrorisse oder gravierende Schäden an Zellen sichtbar macht. Für die Beurteilung wurde die Bewertungs-Skala nach SUSPI (Mauro Cattivio 2016) verwendet.

Tabelle 5 Beurteilung Elektrolumineszenzmessungen der Testmodule im PV-Labor

Modul ⁴	Anzahl Zellen Typ B	Anzahl Zellen Typ C	Modultyp
M5-1	2	0	A
M5-2	0	0	A+
M5-4	18	0	B
M5-5	2	3	C
M5-6	0	0	A+
M5-7	0	0	A+
M5-8	1	0	A
M5-9	0	0	A+
M5-10	0	0	A+

Von den 9 gemessenen Modulen konnten 4 mit A+ «Zellen ohne Mängel» eingestuft werden. Ein Modul (EET-Solmate) erhielt die Klassierung B «Zellen mit unkritischen Mikrorissen» und ein Modul (EET-Solmate) wurde mit C «Zellen mit kritischen Mikrorissen und Mängeln» beurteilt.

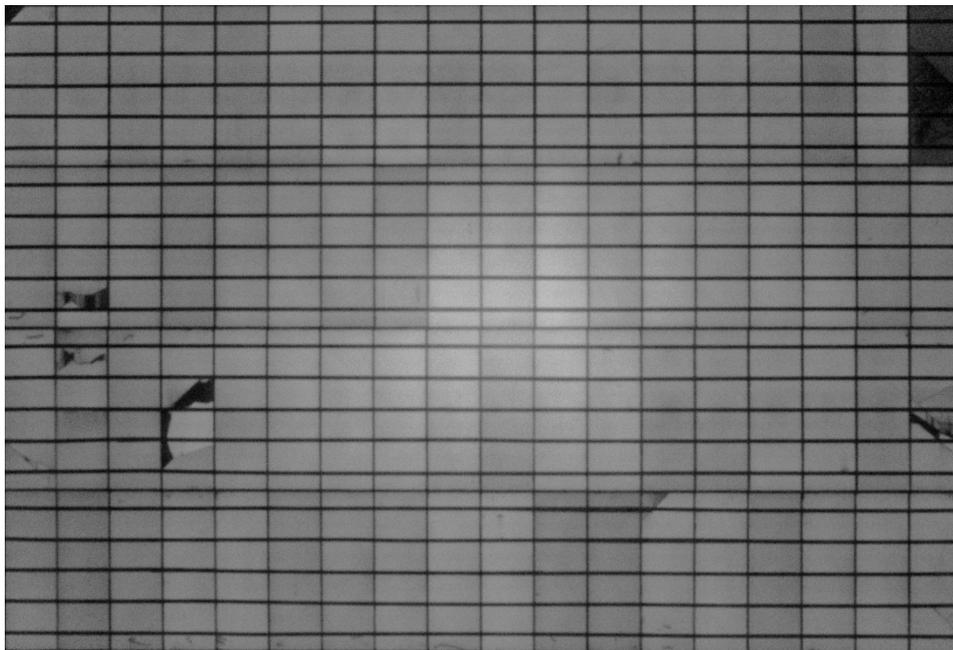


Abbildung 7 EL-Bild eines Moduls mit auffällig vielen Zellbrüchen (Schlechte Bildqualität; exemplarisch dennoch nutzbar)

Abbildung 7 zeigt das Modul mit den Zellschäden und der daraus resultierenden Beurteilung C. Obwohl die Zellschäden gravierend sind, weist das Modul aktuell noch keine auffällig tiefen Leistungswerte auf. Aufgrund der aktuellen Forschung können viele defekte Zellen innerhalb eines Moduls zur übermässigen Alterung dessen führen. Es ist durch geeignete Verpackungen zu gewährleisten, dass Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen beim Transport nicht beschädigt werden.

5 Wechselrichter

5.1 Spannungen und Ströme im Fehlerfall (DC und AC)

An beiden aktiven Leitern der DC-Seite der Plug-&Play-Photovoltaikanlagen wurden realistische Isolationsfehler emuliert. Ein Isolationsfehler könnte für eine Person im Berührungsfall je nach Anlagenausprägung potenziell gefährlich sein. Als Ersatzwiderstand für die berührende Person wurde 1 k Ω eingesetzt. Das Spannungsniveau und dessen Verlauf über die Zeit wurden analysiert zur Beurteilung beigezogen. Als Beurteilungskriterium wurde das Niveau der Schutzkleinspannung von 120 V_{DC} herangezogen.

Die Tabelle 6 zeigt, dass keines der Systeme den Schwellwert von 120 V_{DC} erreichte oder überschritt und Folge dessen so interpretiert wird, dass keine unmittelbare Lebensgefahr für die berührende Person besteht. Ein elektrischer Schlag könnte dennoch spürbar sein, welcher aber gemäss aktueller Betrachtung als nicht lebensbedrohlich angesehen werden kann – Sekundäreffekte ausgeklammert.

Tabelle 6 Resultate der Sicherheitstests DC- und AC-seitig an den Wechselrichtern im Betrieb

	Voc	Isc	System	Fehler DC	Netztrennung AC
I1-20	40.6	8.392	ADE!geranium	Unter 100V aber über 50V	U _{AC} < 50 V innert 200ms
I1-21	41.78	9.22	Autosolar	Unter 50V	U _{AC} < 50 V innert 200ms
I1-23	47.2	4.4	EET_Solemate	Unter 20V	U _{AC} < 50 V innert 200ms
I1-24	44.5	8.64	Erneuerbar	Unter 20V	U _{AC} < 50V innert 200ms mit Widerstand, ohne Widerstand über 200ms
I1-25	81.96	8.37	Gosolar	Unter 100V aber über 50V	U _{AC} < 50V innert 200ms mit Widerstand, ohne Widerstand über 200ms
I1-26	47.2	4.4	Solarbalkon	Unter 20V	U _{AC} < 50 V innert 200ms
I1-27 ⁵	42.7	9.81	Solarblitz	Unter 20V	U _{AC} < 50V innert 200ms mit Widerstand, ohne Widerstand über 200ms

Als Teil der Sicherheitsbeurteilung der Plug-&Play-Photovoltaikanlagen wurde auf der AC-Seite der Wechselrichter ein Test durchgeführt, welcher ein plötzliches Ausziehen des Netzsteckers simuliert. Dabei wurde das Spannungsniveau nach einer Netztrennung über die Zeit beobachtet, sowohl im Leerlauf als auch mit einer Belastung von 1 k Ω des Polleiters gegenüber dem Schutzleiter. Das Kriterium zur Beurteilung war eine Abschaltung innert 200 ms, wie es die Branchenempfehlung «NA-EEA 2020» des VSE vorsieht. Ein Unterschreiten von 50 V_{AC} galt dabei als «abgeschaltet».

Tabelle 6 zeigt, dass alle getesteten Systeme im belasteten Fall innert der Zeit von 200 ms entweder 50 V_{AC} oder weniger erreichten und somit bezüglich der Spannungsabsenkung als konform im Sinne der «NA-EEA2020» betrachtet werden können. Im unbelasteten Fall erreichten zwei Systeme die Schwelle erst nach 338 ms (Erneuerbar) respektive 396 ms (Gosolar). Ein leichter elektrischer Schlag könnte bei Berührung der Kontaktstifte nach Ausziehen spürbar sein. Dass dieser zu Verletzungen führt, wird als unwahrscheinlich betrachtet. Vorsicht ist dennoch bei Sekundäreffekten geboten. Ein Sekundäreffekt könnte z.B. sein, dass eine Person aufgrund eines nicht lebensgefährlichen elektrischen Schlags derart aufschreckt, dass sie hinfällt und sich dadurch verletzt.

Beide Messreihen (Modulseite und Netzseite) wurden an aktiven, operativen Systemen durchgeführt. Im Anhang sind die Messreihen sowie der Messaufbau im Detail dokumentiert.

⁵ Der Wechselrichter I1-27 ging während der Testarbeiten aufgrund einer Fehlmanipulation defekt. Er wurde mit einem typgleichen Gerät ersetzt.

5.2 Installationsvorschriften

Alle getesteten Systeme sind für den einphasigen Anschluss an einer Balkonsteckdose geeignet und weisen einen Stecker Typ 12 mit teilisolierten Kontaktstiften auf. Somit ist der Berührungsschutz AC-seitig für die im Betrieb spannungsführenden Teile dem heutigen Stand der Technik und den Installationsvorschriften entsprechend ausgeführt⁶. Ein System hat einen Stecker, der für den Aussenbereich nicht geeignet ist (IP20, Gosolar). Alle anderen AC-Stecker weisen eine geeignete IP-Schutzklasse für die zu erwartende Umgebung auf. 6 von 7 getesteten Systemen weisen eine galvanische Trennung zwischen DC- und AC-Seite auf, sodass theoretisch konstruktionsbedingt gar keine Ströme (DC) von der Modulseite auf die Hausinstallationsseite oder umgekehrt fliessen können. Das galvanisch verbundene System hat in den Messungen ebenfalls kein unsicheres Verhalten gezeigt und keine gefährlichen Ströme zugelassen. Vgl. hierzu: 5.1 Spannungen und Ströme im Fehlerfall.

Zwei Wechselrichter (Autosolar, ADE!Geranium) berühren im montierten Zustand die Modulrückseitenfolie. Dies entspricht nicht den geforderten Herstellerangaben und könnte zu irreparablen Schäden am System (Modul) führen. Durch aufgescheuerte Stellen an der dünnen Rückseitenfolie erhöht sich die Gefahr für einen elektrischen Schlag bei Berührung der offenen Stelle. Gemäss 5.1 stellen sich im Berührungsfall jedoch keine unmittelbar lebensbedrohlichen Spannungen ein.

Gemäss Mitteilung vom Eidgenössischen Starkstrominspektorat (ESTI - Marty Dario 07.2014) müssen die Systeme eine RCMU oder einen RCD Typ B eingebaut haben. Von 5 der 7 Systeme liegt eine Konformitätsbescheinigung entweder vom Wechselrichterhersteller oder vom Systemlieferanten vor, die das Vorhandensein einer RCMU bestätigt. Bei zwei Systemen (erneuerbar, Solarblitz) fehlt diese Konformitätserklärung. Streng genommen entsprechen diese Systeme nicht den geforderten Regeln. Aufgrund dessen, dass diese Systeme bei den Messungen zum Spannungsniveau vergleichbares Verhalten wie die anderen zeigen, wurde für diesen Test darauf verzichtet, die fehlende Konformitätserklärung abgesehen von der ungenügenden Benotung weiter zu bemängeln. Vgl. hierzu auch die Box unter 2.4 sowie das Kapitel 6.2.2.

Die meisten Systeme weisen Kreuzverbindungen von DC-Steckern auf, was nach wie vor ein Problem im Betrieb und bei der Einforderung der Gewährleistung darstellt. Kreuzverbindungen sind deshalb problematisch, weil angenommen werden muss, dass diese Steckverbindungen erhöhte Übergangswiderstände aufweisen und deshalb einem suboptimalen Alterungsprozess unterliegen (Friesen and Caccivio Mauro 2017). Verfrühte Anlagenausfälle mit erhöhtem Brandrisiko können die Folge sein.

Ein bislang und auch in diesem Test unbesprochenes Thema ist der mechanische Schutz der PV-Modulrückseiten generell. Auch wenn einige der heute verfügbaren PV-Module sehr widerstandsfähige Rückseitenfolien aufweisen, stellen sie dennoch die mechanisch schwächste Stelle am Modul dar. Durch eine Verletzung der Folie können direkt die Zellen-Rückseiten berührt werden, wobei das Risiko eines elektrischen Schlages besteht. Wenngleich, wie unter 5.1 gezeigt, das direkte Gefahrenpotenzial dieses Schlages gering ist, so sollte für die Anwendung der PV-Module in Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen dennoch in Betracht gezogen werden, einen höheren mechanischen Schutz zu fordern.

⁶ In der Schweiz ist der T12-Stecker ausnahmsweise für Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen zugelassen und es darf darüber eine Rückspeisung stattfinden.

6 Fazit

6.1 Diskussion der Erkenntnisse

Alle getesteten Systeme liessen sich mit etwas handwerklichem Geschick, teilweise mit Zusatzmaterial an einer Balkonbrüstung montieren und einfach in Betrieb nehmen. Die Montagesicherheit wird jedoch in den meisten Fällen als verbesserungswürdig beurteilt. Eine zusätzliche, dauerhafte Modulsicherung gegen Herunterfallen in Form einer Drahtseil-Sicherung wird vom Testteam für Systeme mit Modulrahmen und Befestigungsschienen empfohlen.

Bezüglich der elektrischen Sicherheit konnte bei keiner Plug-and-play PV-Anlage ein unmittelbar lebensgefährliches Verhalten im Betrieb und im Einfehlerfall festgestellt werden. Bei allen gemessenen Systemen war die Spannung auf den Anschlussleitungen im belasteten Berührungsfall (DC+ und DC-Leitung) gegenüber Erdpotenzial unter $120 V_{DC}$ und somit im Bereich der Sicherheitskleinspannung (SELV). Netzseitig zeigten alle getesteten Systeme beim simulierten Ausziehen des T12-Steckers mit Belastung durch einen Widerstand eine Reduktion der Spannung (L-PE) unter $50V_{AC}$ innerhalb von 200ms. Zwei Systeme erreichten dieselbe Schwelle im unbelasteten Zustand erst nach maximal 400ms, die anderen 5 bereits innert 200ms.

Nicht alle Anschlussstecker und Verbindungsstellen entsprechen dem geforderten IP-Schutz. Die branchenübliche und von den Herstellern vorgegebene Regel, bei den DC-Steckern keine Kreuzverbindungen zu machen, wurde nicht befolgt. Bei zwei Systemen berührt der Wechselrichter die Modulrückseite dauerhaft. Dies kann zu übermässiger Beanspruchung sowie bis zum Systemschaden führen. Ebenfalls könnten sich Personen an aufgeschauerten Kontaktstellen elektrisieren. Aus den Installationsunterlagen der Lieferanten geht meist nicht hervor, dass zwischen Wechselrichter und Modulrückseitenfolie ein Abstand sein muss.

Die Module sind hinsichtlich Einhaltung der Datenblattwerte für die Nennleistung P_{MPP} innerhalb der Spezifikationen der Hersteller. Zwei Module zeigten eine erfreuliche Mehrleistung von ca. 3.5% über dem Maximalwert (Nennleistung plus Spezifikationstoleranz) gemäss Datenblatt. Die Elektrolumineszenz-Messungen sind bei 5 von 7 gemessenen Modulen unauffällig und erwartungsgemäss. Ein Modul weist ein noch knapp akzeptables Mass an beschädigten Zellen auf, während eines bereits so viele Zellen mit Mikrorissen aufweist, dass ein Risiko zur übermässigen Leistungseinbusse im Betrieb besteht.

Die getesteten Plug-&-Play-Photovoltaiksysteme zeigen einen genügenden bis sehr guten Solarertrag. Die Spannweite für den spezifischen Ertrag erstreckt sich von 683 kWh/kWp/a bis 860 kWh/kWp/a. Kein System fiel merklich ab oder produzierte ungenügend.

In den Stromgestehungskosten zeigen sich grosse Unterschiede. Der tiefste berechnete Energiepreis pro kWh Plug-and-play Strom vom eigenen Balkonkraftwerk liegt bei 10.3 Rp/kWh und der höchste bei 32.0 Rp/kWh. Je nach Kosten für Strom aus dem lokalen Verteilnetz lohnt sich ein Grossteil der Plug-&-Play-Photovoltaikanlagen über eine Laufzeit von 20 Jahren.

Die getesteten Wechselrichter weisen bis auf ein Gerät eine galvanische Trennung zwischen AC- und DC-Seite auf und bieten damit einen architekturbedingten Schutz vor elektrischem Schlag auf der DC-Seite. Weil es jedoch keine unmittelbar anwendbare Sicherheits-Prüfnormen für steckbare PV-Wechselrichter gibt, ist ein abschliessende Sicherheitsfreigabe nicht möglich. Mindestens störend sind bei zwei Wechselrichtern fehlende Angaben zum Anschluss der vorhandenen Schutzleiterkabel und in zwei Fällen der Einsatz des Wechselrichters ohne Bestätigung oder Einsatz von RCMU respektive RCD Typ B.

6.2 Selbstkritik zur Systemvergleich

Oft liegt die Schwierigkeit von Vergleichen, die nicht nur rein auf Messdaten beruhen, darin die geeignete Objektivität in der Beurteilung sicherzustellen. Das Testteam führte die ihm beauftragten Arbeiten nach bestem Wissen und Gewissen und mit dem Ziel einer hohen Objektivität durch. Um eine Diskussion über mögliche Kritik an den Messungen zuzulassen, sind unten einige Themen als Selbstkritik festgehalten.

6.2.1 Vergleichbarkeit der Systeme

Auch wenn alle Systeme im Grundsatz aus PV-Modul(en), Montagestruktur, Wechselrichter und Anschlusskabel bestehen, waren ihre Ausprägungen doch sehr unterschiedlich. Der Versuch basiert, wo möglich, auf objektiven Kriterien (z.B. Stromgestehungskosten, genormte Energieproduktion und PR, Preis pro Wp). So fließen Technologieunterschiede möglichst nicht in die Bewertung ein.

6.2.2 Technische Angaben und Normenkonformität

Im Systemvergleich verliess sich das Testteam auf die direkt erhaltenen oder nachgefragten Unterlagen der Lieferanten (Konformitätserklärungen, Datenblätter). Gesichtet und bewertet wurden nur diese Dokumente. Eine systematische Überprüfung über deren Rechtmässigkeit fand nicht statt. Insbesondere das Thema RCMU/RCD Typ B wurde über die Selbstdeklarationspflicht beurteilt und nicht als zentrales NoGo-Kriterium gewertet und floss somit untergeordnet in den Test mit ein.

6.2.3 Beurteilung der Sicherheit anhand von Labor-Messungen

Wie bereits in der Box unter Testdesign sowie im vorhergehenden Abschnitt behandelt, wurde die Sicherheitsbeurteilung auf Basis von Labormessungen an den Wechselrichtern durchgeführt. Bewusst wurden die Systeme, wie sie in der Praxis zumeist installiert werden (ohne zusätzlichen RCD Typ B) auf Sicherheitsbedenken hin untersucht. Als Kriterium galten die Spannungspegel in den betrachteten Fällen auf der DC- und AC-Seite sowie die Zeit bis zur Unterschreitung eines bestimmten Niveaus.

6.2.4 Nichtberücksichtigung von WR-Ersatz, Betriebskosten und Systemdegradation

Der Einfachheit halber wurde für die Berechnung der Stromgestehungskosten auf die Berücksichtigung eines Wechselrichter-Ersatzes⁷ sowie der Systemdegradation aufgrund Alterung und verschwindend kleinen Betriebskosten verzichtet. Ebenso nicht enthalten sind die Kosten für den Transport und allenfalls weiteres Zubehör für die Montage.

⁷ Nach unserer eignen Studie über alle Kategorien gesehen im Mittel nach 15 Jahren fällig (Bucher et al. 2022.)

7 Auftraggeberin und Finanzierung

Die Messkampagne wurde zu grossen Teilen im Auftrag der Sendung Kassensturz des Schweizer Radio und Fernsehen SRF durchgeführt. Die Finanzierung setzt sich aus einem Eigenleistungsanteil der BFH und der Auftragsfinanzierung durch die SRG SSR zusammen.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Bildschirmfoto der Überwachungsapp (Autosolar). (Die Genauigkeit der Angaben wurde nicht überprüft.)	8
Abbildung 2 Produktionsdaten (Verlauf über mehrere Tage) der Plug-&Play-Photovoltaiksysteme auf der Testanlage	9
Abbildung 3 Beispielhafte Darstellung eines WR-Aussetzers um zirka 13:25 Uhr. Bei 3 der 7 getesteten Wechselrichtern war dieses Verhalten erkennbar.	9
Abbildung 4 Ausschaltverhalten des Systems mit Hausnetzbezug	10
Abbildung 5 Vergleich der verschiedenen PR unter den Systemen und den verschiedenen Plausibilisierungsmethoden.	11
Abbildung 6 Graphische Darstellung der am PV-Labor gemessenen Leistungen ggü. den Nennleistungen gemäss Datenblatt (Messunsicherheit: +/-2.8%)	13
Abbildung 7 EL-Bild eines Moduls mit auffällig vielen Zellbrüchen (Schlechte Bildqualität; exemplarisch dennoch nutzbar)	14
Abbildung 8: Netzausschaltung ohne Widerstand	23
Abbildung 9 : I1-20 DC plus	23
Abbildung 10 : Netzausschaltung mit 1 kΩ Widerstand	23
Abbildung 11 : I1-20 minus	23
Abbildung 12 : Netzausschaltung ohne Widerstand	24
Abbildung 13 : I1-21 DC plus	24
Abbildung 14: Netzausschaltung mit 1 kΩ Widerstand	24
Abbildung 15 : I1-21 DC minus	24
Abbildung 16 : Netzausschaltung ohne Widerstand	25
Abbildung 17: I1-23 DC plus	25
Abbildung 18 : Netzausschaltung mit 1 kΩ Widerstand	25
Abbildung 19: I1-23 DC minus	25
Abbildung 20 : Netzausschaltung ohne Widerstand	26
Abbildung 21: I1-24 DC plus	26
Abbildung 22 : Netzausschaltung mit 1 kΩ Widerstand	26
Abbildung 23: I1-24 DC minus	26
Abbildung 24 : Netzausschaltung ohne Widerstand	27
Abbildung 25: I1-25 DC plus	27
Abbildung 26 : Netzausschaltung mit 1 kΩ Widerstand	27
Abbildung 27: I1-25 DC minus	27

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht getestete Systeme am PV-Labor	4
Tabelle 2 Energieertrag in der Messperiode sowie extrapoliert auf Norm-Dezember, Norm-Jahr. Spezifischer Ertrag und PR auf Basis von extrapoliertem Normjahr im langjährigen Mittel für die geneigte Fläche gemäss Meteonorm 8.	10
Tabelle 3 Stromgestehungskosten der getesteten Systeme	11
Tabelle 4 Plausibilisierungsmessungen der Modulnennleistungen ggü. Herstellerangaben am Flasher oder mit ClearSky-Messungen (Messunsicherheit: +/-2.8%)	13
Tabelle 5 Beurteilung Elektrolumineszenzmessungen der Testmodule im PV-Labor	14
Tabelle 6 Resultate der Sicherheitstests DC- und AC-seitig an den Wechselrichtern im Betrieb	15

10 Literaturverzeichnis

Bucher, Christof; Wandel, Jasmin; Joss, David (2022): Life Expectancy of PV Inverters and Optimizers in Residential PV Systems.

EnergieSchweiz (2023): FAQ - Plug&Play Photovoltaikanlagen. Bundesamt für Energie BFE. Online. Available online at

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjmK7g0vf8AhVGsKQKHZPXD9AQFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fpubdb.bfe.admin.ch%2Fde%2Fpublication%2Fdownload%2F11259&usg=AOvVaw3q5rVTof9q2IKIhfYdn7qJ>, updated on 1/1/2023, checked on 2/2/2023.

ESTI - Marty Dario (07.2014): Plug-&Play-Photovoltaikanlagen.

Friesen, Gaby; Caccivio Mauro (2017): Qualitätsbewertung von PV Modulen im Labor.

Mauro Caccivio (2016): Qualitätsbewertung PV Module. Kriterien zur Beurteilung fabrikneuer Module. SUPSI - PVLab, updated on 02.2016, checked on 1/9/2023.

Solaranlagen für den Balkon. Wo dürfen Mieter die Panels anbringen? Solarpanels für den Balkon oder den Garten erleben einen Boom. Blick erklärt, was Mieterinnen und Mietern erlaubt ist und worauf sie achten müssen. (2022). In *Blick*, 8/22/2022. Available online at <https://www.blick.ch/wirtschaft/solaranlagen-fuer-den-balkon-wo-duerfen-mieter-die-panels-anbringen-id17808675.html>, checked on 1/9/2023.

Tagesanzeiger - Alexandra Aregger (2022): Streit um Solarpanels für den Balkon. Die Angst vor dem Blackout führt zu einem Boom von mobilen Mini-Solaranlagen. Nun wehren sich die Hauseigentümer und fordern eine Bewilligungspflicht. In *Tagesanzeiger*, 8/13/2022. Available online at <https://www.tagesanzeiger.ch/streit-um-solarpanels-fuer-den-balkon-399296430632>, checked on 1/9/2023.

Tagesanzeiger - Grimm Fabienne (2022): Er will eine Solaranlage auf dem Balkon bauen und scheitert am Vermieter. Um sich für einen Blackout zu rüsten, will ein Neftenbacher auf seinem Balkon eine Solaranlage installieren. Doch der Vermieter untersagt die Montage. Es ist kein Einzelfall. In *Tagesanzeiger*, 10/26/2022. Available online at <https://www.tagesanzeiger.ch/er-will-eine-solaranlage-auf-dem-balkon-bauen-und-scheitert-am-vermieter-484376142184>, checked on 1/9/2023.

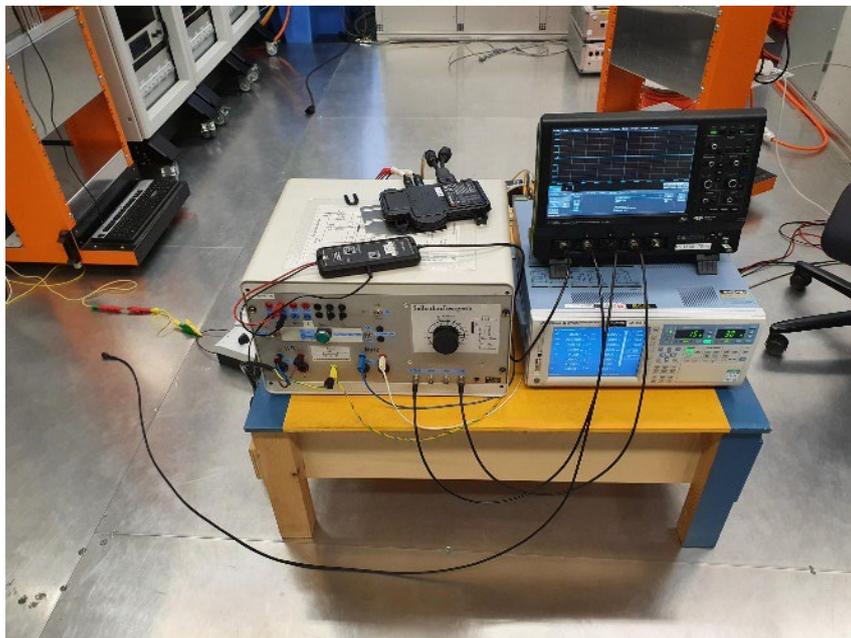
11 Versionskontrolle

Version	Datum	Beschreibung	Autor
1.0	05.02.2023	Version 1 erstellt	David Joss
1.1	08.02.2023	Version 1 ergänzt	David Joss

12 Anhang

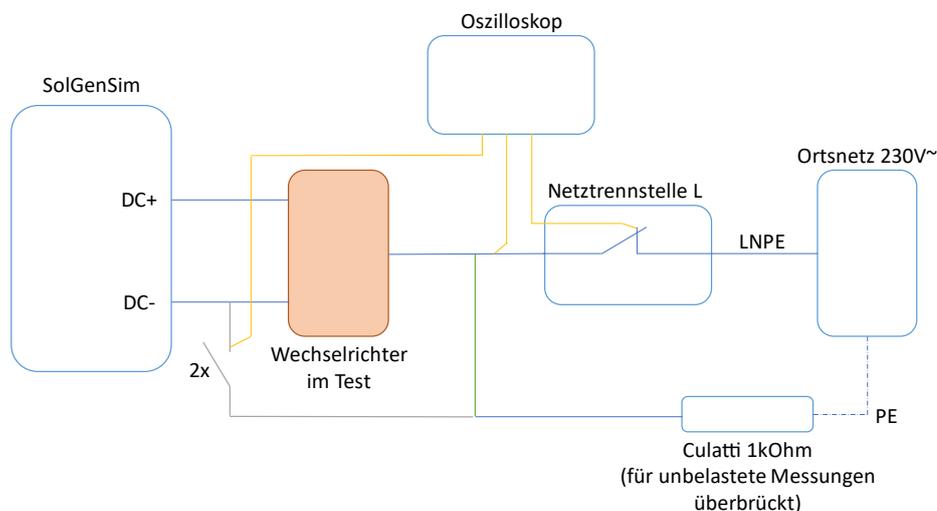
12.1 Messkurzbericht Wechselrichter Sicherheitsmessungen DC und AC

Zeitraum: 21.-22.11.2022
Durchführende: SOR1, BGL1
Messbedingungen: $U_{OC} = U_{OC@STC}$, $P_{MPP} = 0.8 \cdot P_{MPP@STC}$
Messaufbau:



Messmittel:
Yokogawa WT3000
LeCroy Wavesurfer 3034
Netztrennstelle Schwingkreistest
Differential Probe Tectron SI-9000
100kW-SolGenSim
Lasttrennschalter 2x
Culatti-Schiebewiderstand 12.5k Ω

Messschema:



Messschema ist für beide Testfälle (AC/DC) gezeichnet. Es ist nur die DC-Messung gezeichnet (graue Linien). DC+ hat gleichen Aufbau. Für den Netztrenntest gilt die grüne Linie (Mitte). Wahlweise war der Culattiwiderstand für die unbelasteten Messungen überbrückt.

Messvorgang DC: Fehlerfreier Einspeisebetrieb, DC+ Leitung wird über Lastschalter mit $1\text{ k}\Omega$ Belastungswiderstand gegenüber Erdpotenzial verbunden, Spannungsverlauf wird aufgezeichnet
Fehlerfreier Einspeisebetrieb, DC- Leitung wird über Lastschalter mit $1\text{ k}\Omega$ Belastungswiderstand gegenüber Erdpotenzial verbunden, Spannungsverlauf wird aufgezeichnet

Messvorgang AC: Unbelastet: Fehlerfreier Einspeisebetrieb, Polleiter wird über Netztrennstelle vom Ortsnetz getrennt und in «Leerlauf» belassen, Spannungs- und Stromverlauf wird aufgezeichnet (ohne grüne Linie im Schema)
Belastet: Fehlerfreier Einspeisebetrieb, Polleiter wird über Netztrennstelle vom Ortsnetz getrennt und mit $1\text{ k}\Omega$ Belastungswiderstand gegenüber Erdpotenzial belassen, Spannungs- und Stromverlauf wird aufgezeichnet (mit grüner Linie im Schema)

Messresultate: Folgeseite

Netzausschaltung

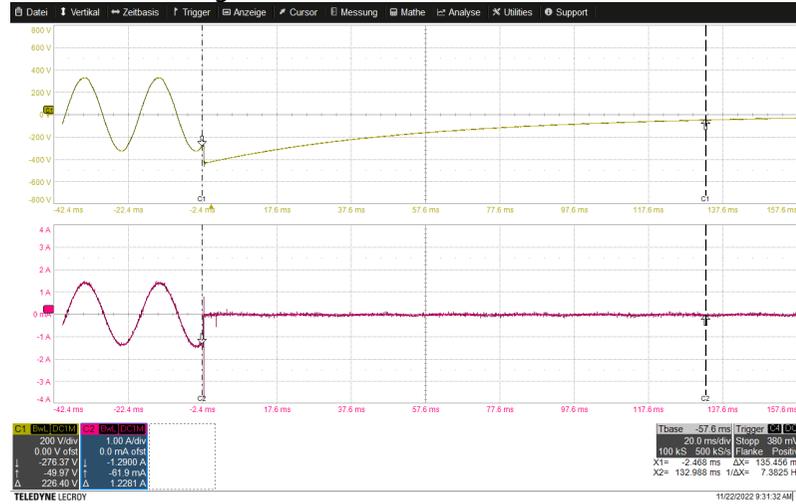


Abbildung 8: Netzausschaltung ohne Widerstand

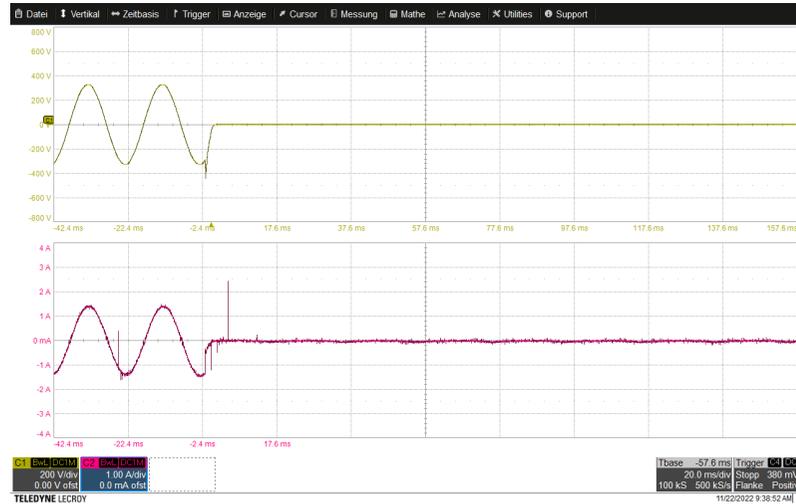


Abbildung 10 : Netzausschaltung mit 1kΩ Widerstand

DC-Seite mit 1kΩ Widerstand

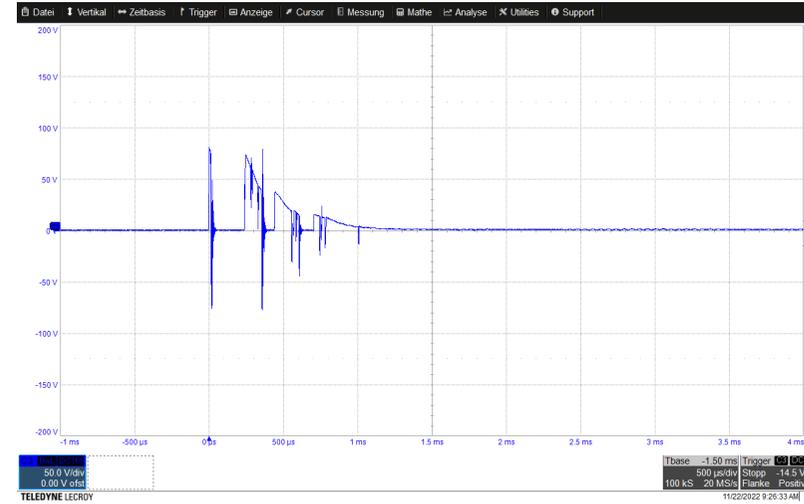


Abbildung 9 : I1-20 DC plus

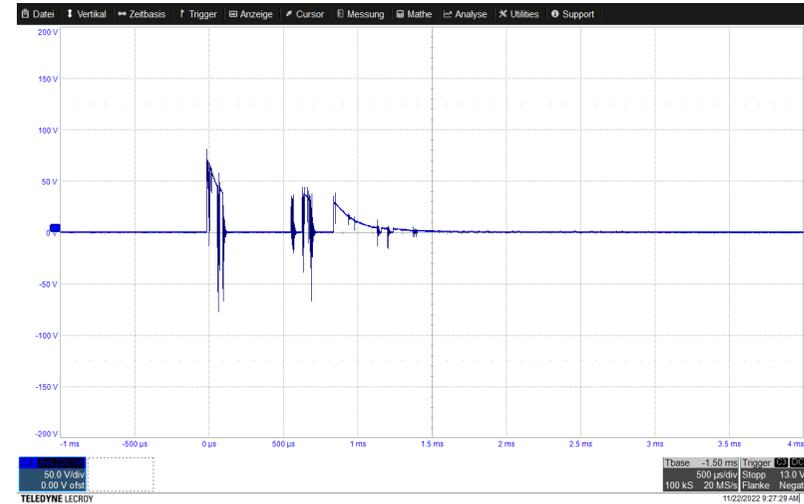


Abbildung 11 : I1-20 minus

I1-21 Autosolar



Abbildung 12 : Netzausschaltung ohne Widerstand

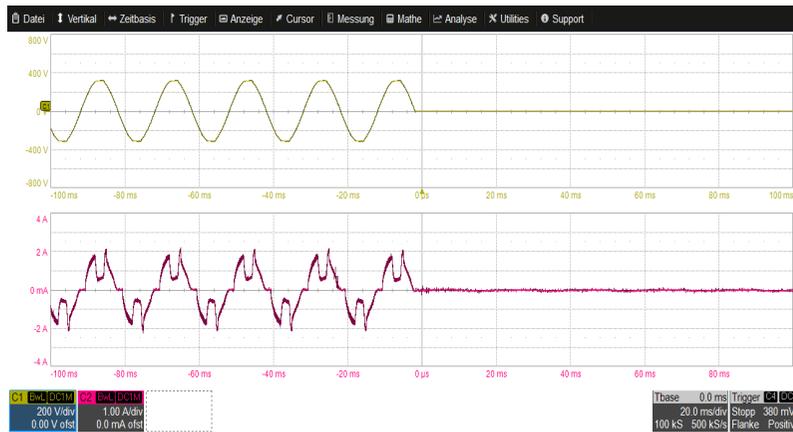


Abbildung 14: Netzausschaltung mit 1kΩ Widerstand



Abbildung 13 : I1-21 DC plus

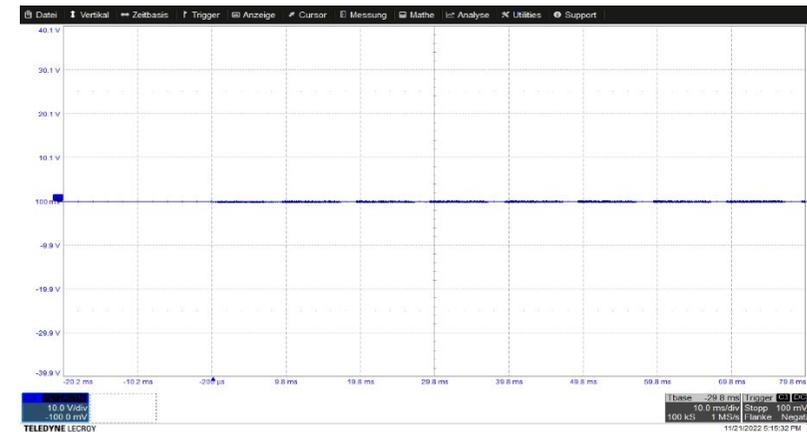


Abbildung 15 : I1-21 DC minus

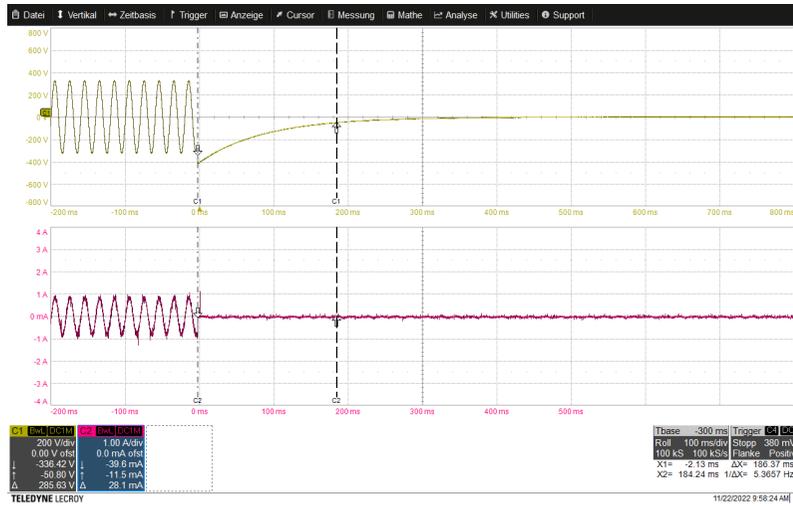


Abbildung 16 : Netzausschaltung ohne Widerstand

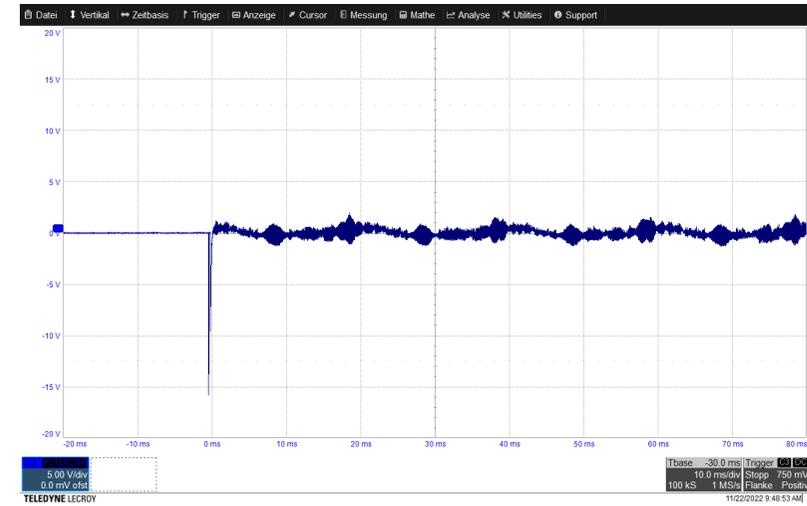


Abbildung 17: I1-23 DC plus

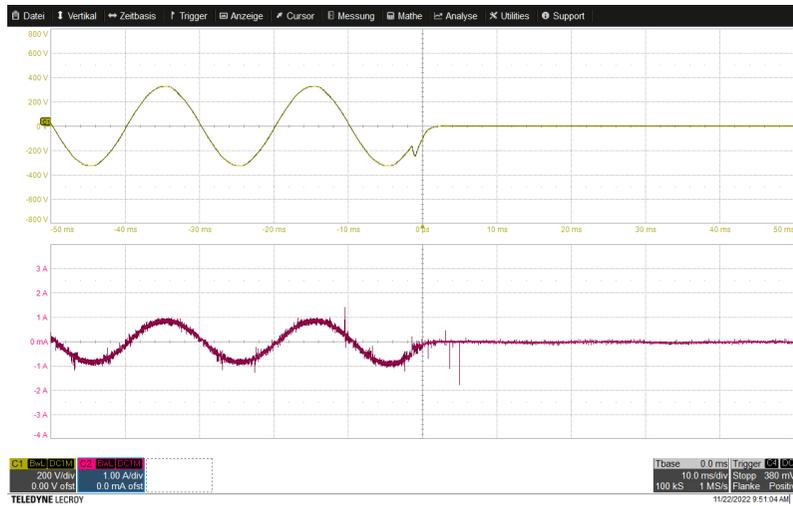


Abbildung 18 : Netzausschaltung mit 1kΩ Widerstand

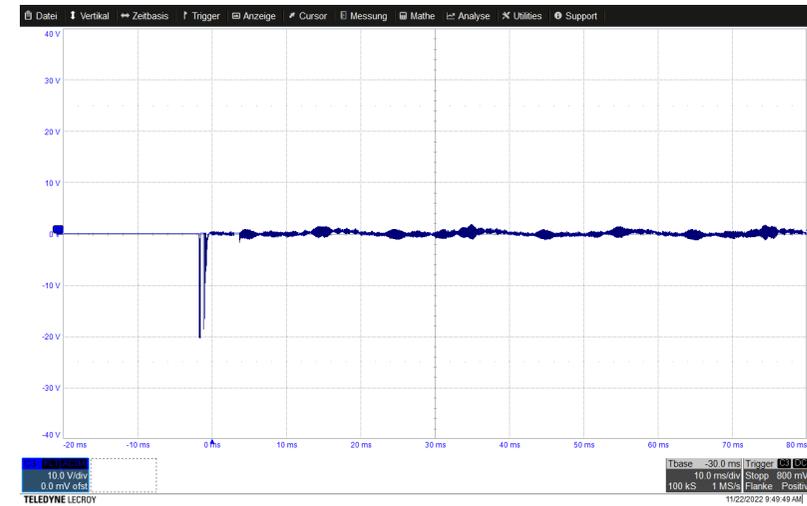


Abbildung 19: I1-23 DC minus

I1-24
Erneuerbar

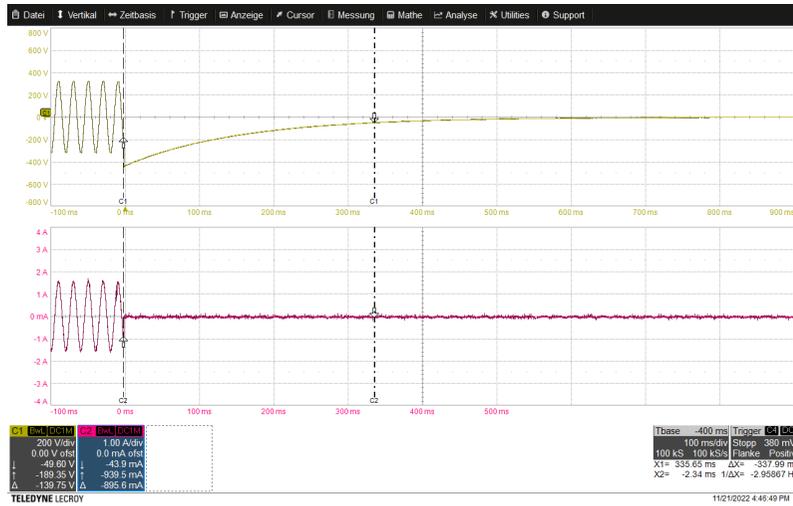


Abbildung 20 : Netzausschaltung ohne Widerstand

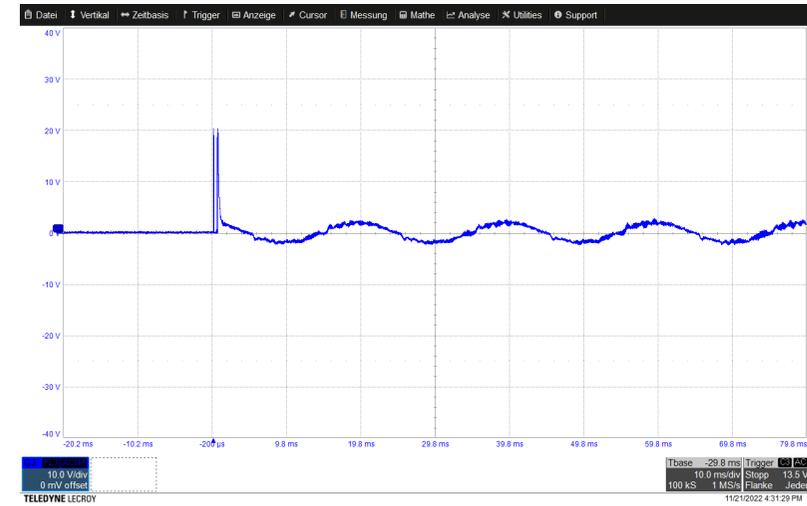


Abbildung 21: I1-24 DC plus

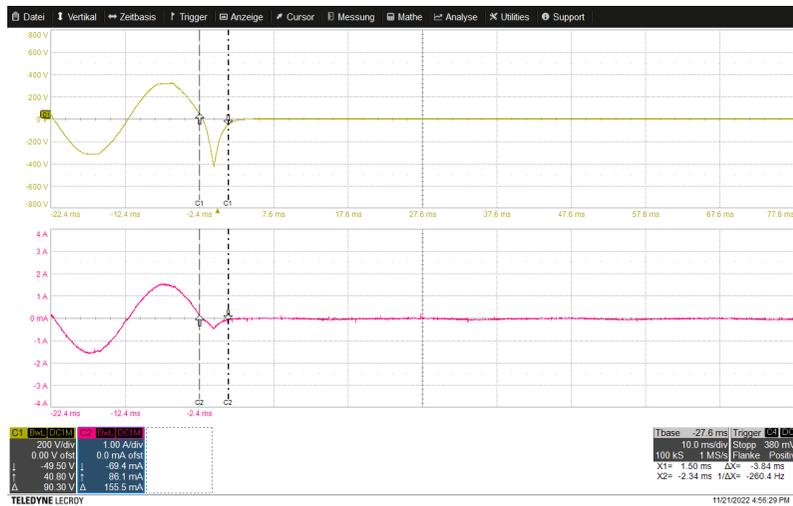


Abbildung 22 : Netzausschaltung mit 1kΩ Widerstand

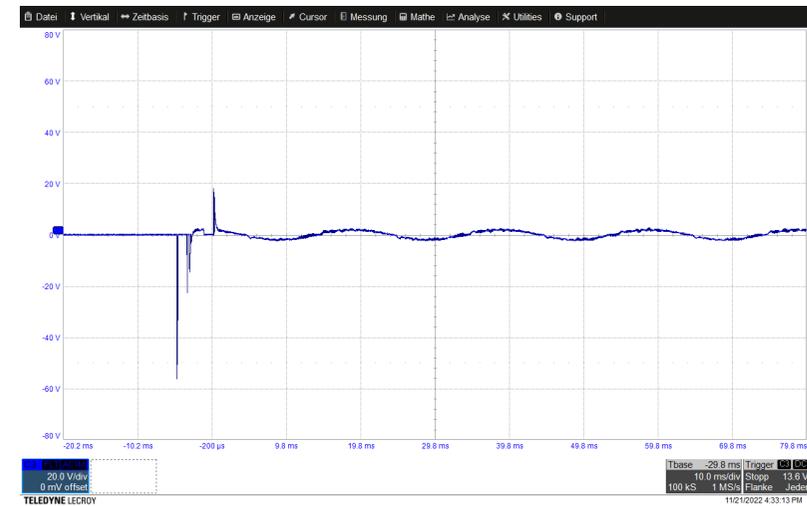


Abbildung 23: I1-24 DC minus

I1-25 Gosolar

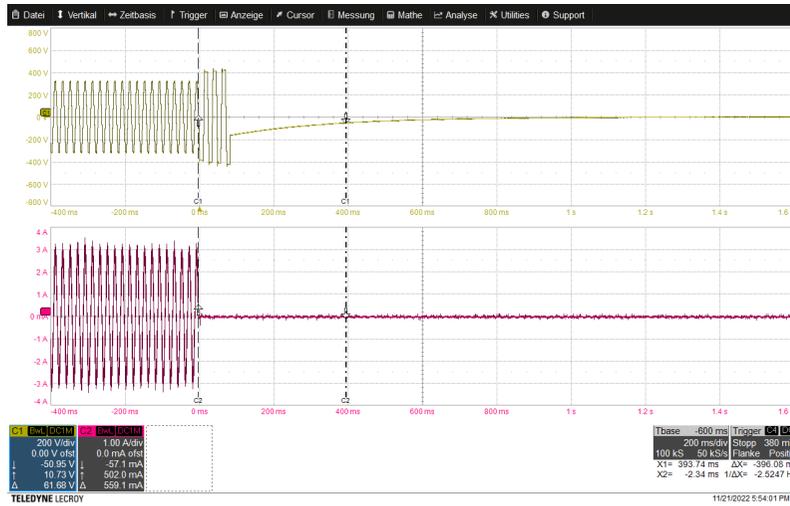


Abbildung 24 : Netzausschaltung ohne Widerstand

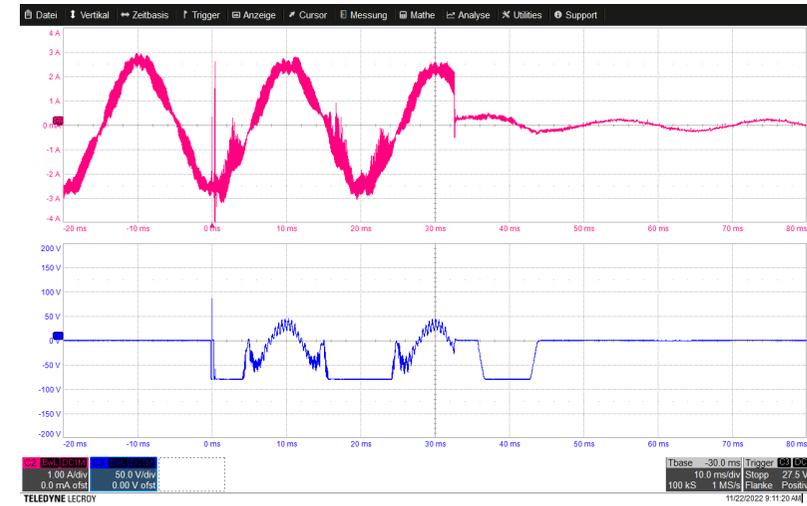


Abbildung 25: I1-25 DC plus



Abbildung 26 : Netzausschaltung mit 1kΩ Widerstand

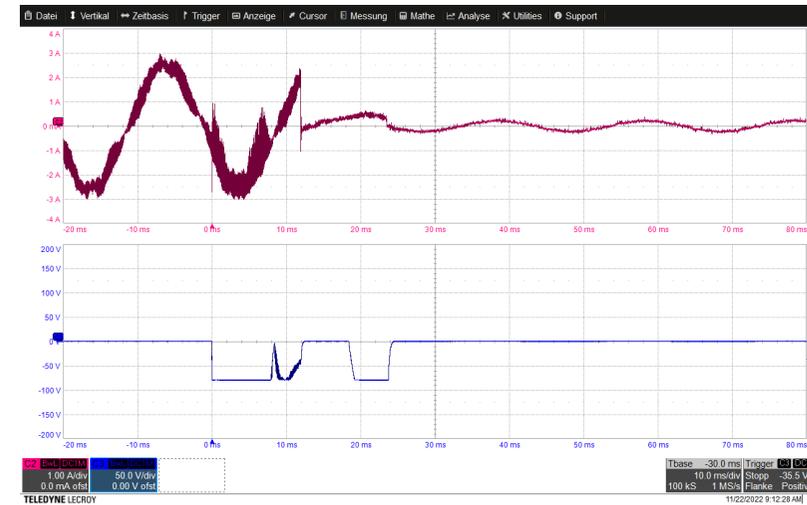


Abbildung 27: I1-25 DC minus

I1-26 Solarbalkon

Gleich wie I1-23