

Bewertung von persönlichen Sicherheitsaspekten von Plug & Play-PV-Wechselrichtern

Österreichische Fachtagung für Photovoltaik und Stromspeicherung, 4./5. November 2025, Wien

Alexander Erber, David Joss, Christof Bucher

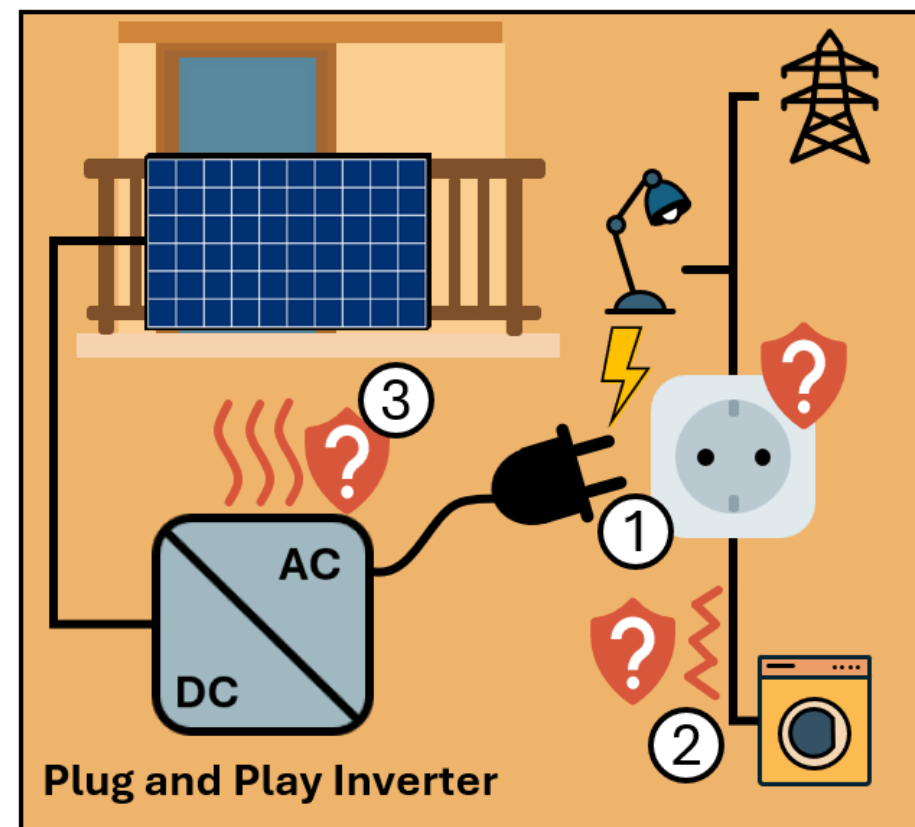
Labor für Photovoltaiksysteme, Berner Fachhochschule, Burgdorf, christof.bucher@bfh.ch

Die zunehmende Verbreitung von Plug & Play-Photovoltaiksystemen in Haushalten und Wohnungen hat Diskussionen hinsichtlich ihrer Sicherheit aufkommen lassen. Die derzeitigen Sicherheitsstandards und nationalen Regelungen für Wechselrichter von Plug & Play PV-Systemen und deren Installation decken diese Bedenken über das Gesamtsystem nur teilweise ab. In einer Messkampagne im Projekt «Plug & Play PV-Systems» wurden drei Sicherheitsaspekte an 25 Wechselrichtern untersucht und die Einhaltung der anwendbaren Grenzwerte überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass bei gewissen Wechselrichtern unter den getesteten Bedingungen Sicherheitsrisiken bestehen. Diese Risiken lassen sich jedoch durch technische Anpassungen beheben, um die sichere Anwendung von Plug & Play-PV-Anlagen zu gewährleisten. Weiter unterstützen die Ergebnisse die normativen Arbeiten in diesem Bereich.

Relevanz

Durch den einfachen Kauf von Plug & Play PV-Systemen und deren einfachen Anschluss mit einem Endgerätestecker durch Endkunden wurden vermehrt Bedenken im Kontext der Personensicherheit geäußert. Ein Großteil bezieht sich dabei auf die verwendeten Mikrowechselrichter. Die Fragestellungen in Bezug auf die Anlagensicherheit (Elektroinstallation) wurden bereits in einigen Publikationen thematisiert und analysiert [1-3]. Im Kontext dieser Arbeit sind die untersuchten Punkte die Restspannung am Netzstecker nach der Trennung vom Netz (1), die maximale Berührtemperatur (2) und die Erhöhung des Einspeisestroms bei geringen Netzspannungen (3). Aktuelle Normen, wie etwa die Sicherheitsnorm für Wechselrichter (IEC 62109), decken diese Aspekte nur teilweise ab oder gelten nicht für diese Geräteklasse. In Deutschland wird aktuell eine Sicherheitsnorm für diese kleinen PV-Systeme (E DIN VDE V 0126-95 [4]) erarbeitet, jedoch wurden keine systemischen Tests zu den Sicherheitsbedenken durchgeführt, welche als Basis für die normativen Anforderungen dienen könnten.

Daher wird im Projekt «Plug & Play PV-Systeme» ein messtechnischer Ansatz zur Bewertung des Personenschutzes mittels Tests an Wechselrichtern, wie sie in Plug & Play Systemen eingesetzt werden, durchgeführt. Das Ziel ist es, die Geräte in den drei Tests unter standardisierten Bedingungen und aus einer systemischen Perspektive zu bewerten.



Methodik und Messdurchführung

Auf Basis einer Literatur- und Normenrecherche sowie den Austausch mit Expert*innen erfolgt die Definition von drei Tests für die Labormessungen. Für die Tests im Labor für Photovoltaiksysteme der Berner Fachhochschule wurde ein «Black-Box»-Prüfansatz verfolgt, bei dem nur die im Normalbetrieb verwendeten Anschlüsse verwendet werden. Insgesamt wurden 25 Mikrowechselrichter von 11 Herstellern (siehe Tabelle 1) in den nachfolgenden drei Tests untersucht:

- Restspannung am Netzstecker nach der Trennung vom Netz**
Der Test wurde aus dem Entwurf der deutschen Steckersolargerätenorm (E DIN VDE V 0126-95:2024-6 [4]) in Übereinstimmung mit dem Black-Box-Ansatz übernommen und adaptiert. Der Grenzwert für den Test ist eine maximale Berührspannung von 34 V nach einer Sekunde. Der Test wird entgegen dem deutschen Normentwurf nur bei Nennleistung durchgeführt, da davon ausgegangen wird, dass dies die ungünstigste Bedingung darstellt. Für die Messdurchführung wurde eine automatisierte Netztrennvorrichtung mit einer realen Steckverbindung und Linearmotor realisiert (Abbildung 1a+b), welche eine hohe Wiederholgenauigkeit ermöglicht (30-50 Messungen pro Wechselrichter).
- Maximale Berührtemperatur:**
Die Berührungstemperaturen wurden unter zwei definierten Versorgungsbedingungen (1:1 und 1:1,5 AC-DC-Verhältnis / Overpaneling) gemessen und anhand der Grenzwerte für Berührungstemperaturen gemäß IEC 62109-1 bewertet (Metall: 70 °C / Polymer: 95 °C). Der Messaufbau ist in Abbildung 1c dargestellt.
- Erhöhung des Einspeisestroms bei geringen Netzspannungen:**
Der Test wurde nach den Bedingungen aus E DIN VDE V 0126-95:2024-6 [4] mit einem Grenzwert von 3,5 A (+2 %) durchgeführt.

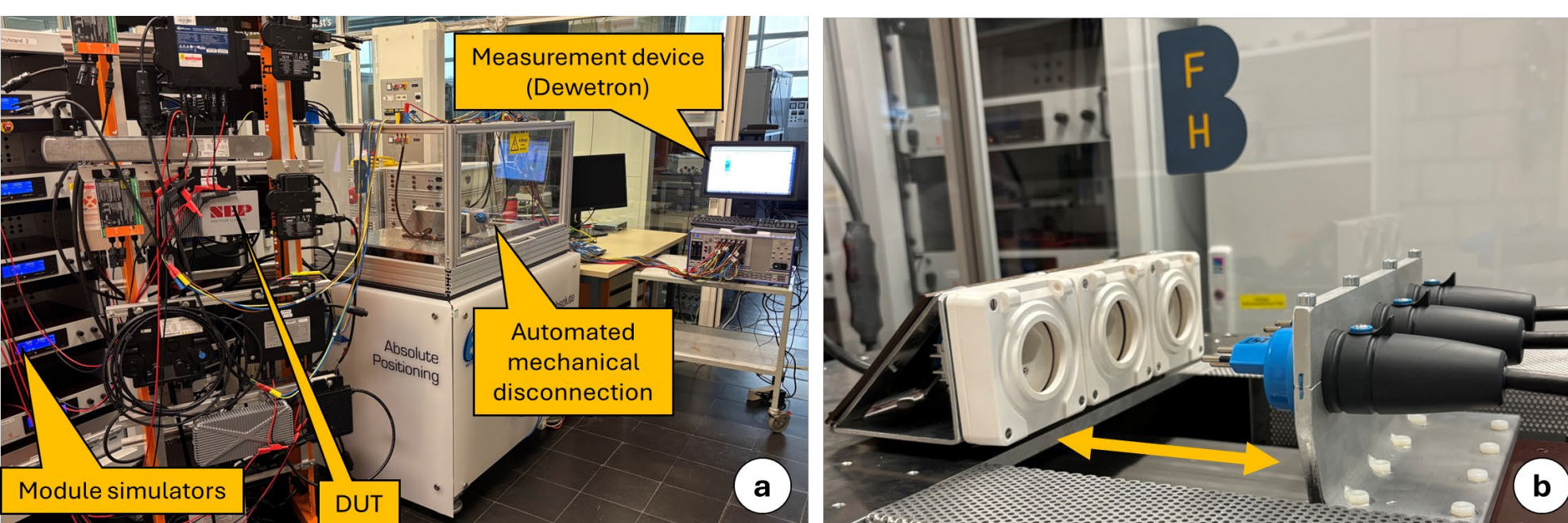
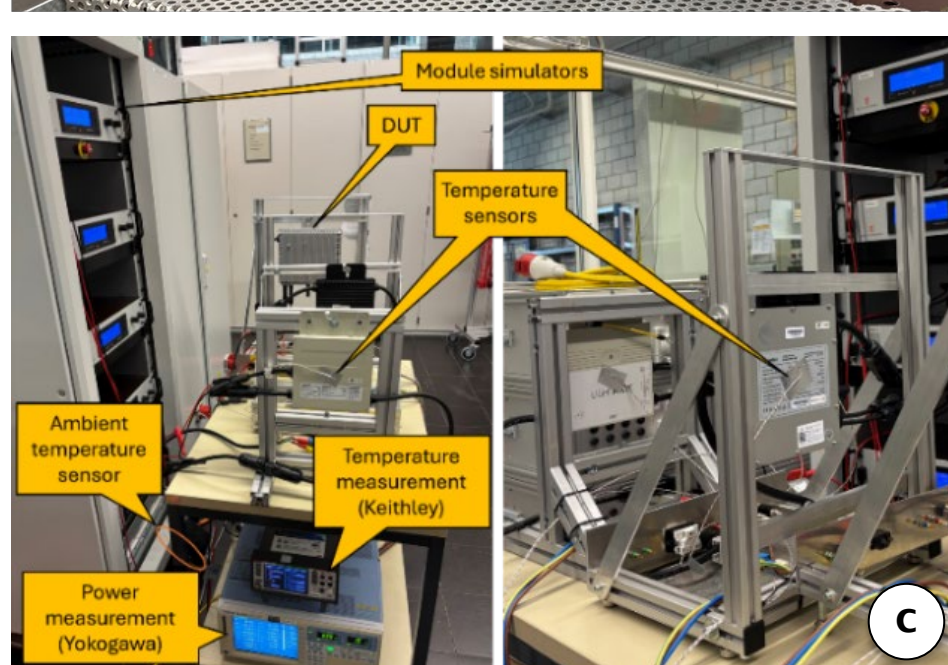


Abbildung 1: Aufbau der Restspannungsmessung (a+b) und Berührtemperaturmessung (c)

Tabelle 1: Einteilung der Wechselrichter in Leistungsklassen sowie Anzahl der getesteten Prüflinge pro Leistungsklasse

Power category	Power range of category [VA]	Power range of inverters	Number of inverters
A	<=600	300-600	16
B	>600 & <=800	601-800	5
C	>800	801-2000	4



Messung - Restspannung

Abbildung 2 zeigt den typischen Verlauf von Strom und Spannung eines Plug & Play Wechselrichters nach der Netztrennung. Die Berührspannungen weisen den typischen Spannungsverlauf einer Kondensatorentladung auf. Die Änderung des Spannungsgradienten ($t = 130$ ms) nach der Netztrennung kann auf das Öffnen des Sicherheitsrelais zurückgeführt werden. Die maximale Berührungsspannung im Beispiel unterschreitet den Spannungsgrenzwert von 34 V nach 791 ms und das Gerät erfüllt somit den Grenzwert der E DIN VDE V 0126-95:2024-6.

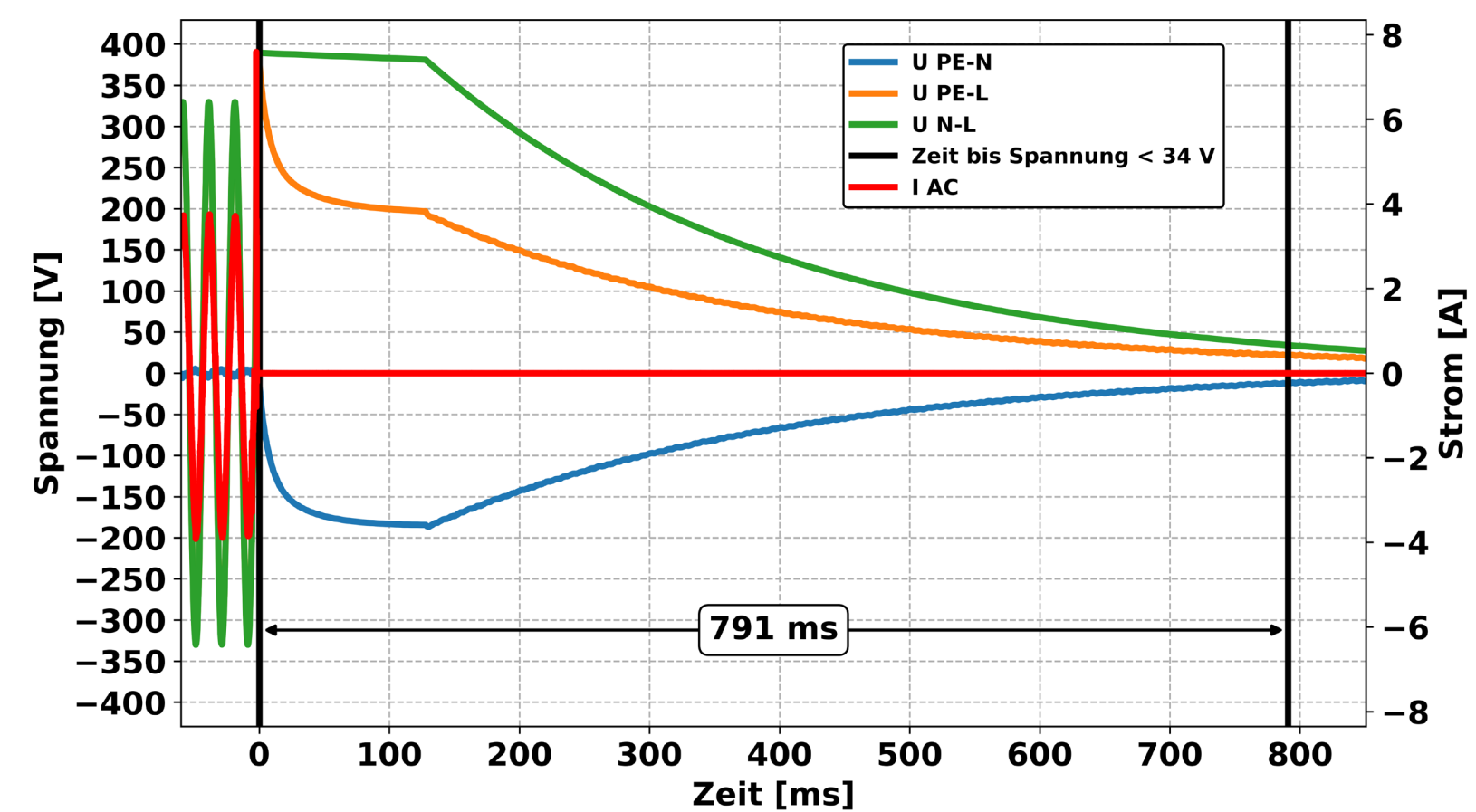


Abbildung 2: Strom- und Spannungsverlauf nach der Netztrennung eines Plug & Play Wechselrichters (600 W)[5]

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

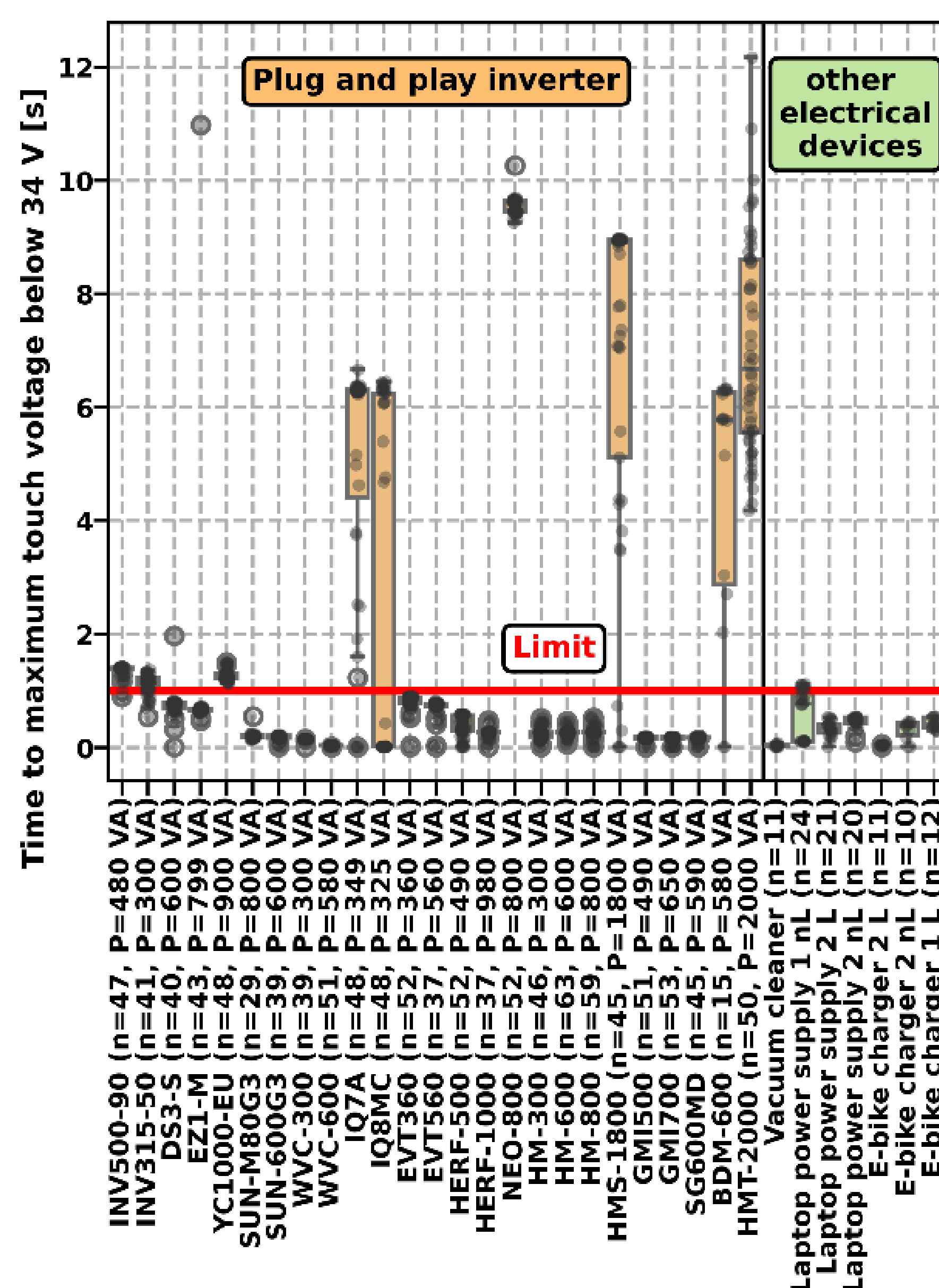


Abbildung 3: Ergebnisse der Restspannungsmessung (Grenzwert in Rot aus E DIN VDE V 0126-95:2024-6)[6]

1. Restspannung am Netzstecker nach der Trennung vom Netz

- 56 % der getesteten Wechselrichter erfüllen den Grenzwert mit allen Messungen (Abbildung 3).
- Bei Systemen mit mehreren Wechselrichtern sollte die Wechselrichter als System getestet werden, da sich durch mehrere Wechselrichter die Restspannungszeit verlängern kann.
- Durch Hinzufügen eines Sicherheitsadapters (Berührungsschutz und optionaler Entladungsfunktion) kann bei nicht konformen Geräten eine Konformität erreicht werden (Abbildung 4).
- Die konformen Geräte verhalten sich ähnlich wie die getesteten Elektrogeräte.

- An einem Wechselrichter wurde in einer von 52 Messungen eine Inselnetzbildung mit anschließendem Fault-Ride-Through (FRT) festgestellt. Dieses Verhalten ist zwar konform mit VDE AR-N 4105, verlängert aber die Restspannungszeit (siehe Abbildung 5) und ist bei der Plug & Play Anwendung nicht erwünscht.

→ Die Restspannung nach der Netztrennung überschreitet bei weniger als der Hälfte der getesteten Geräte den Grenzwert. Es ist zukünftig zu untersuchen, ob eine Überschreitung ein direktes Sicherheitsrisiko darstellt bzw. mit welchem Schweregrad. Das Restspannungsproblem kann mit technischen Lösungen und systemischen Anpassungen behoben werden (siehe Abbildung 6).

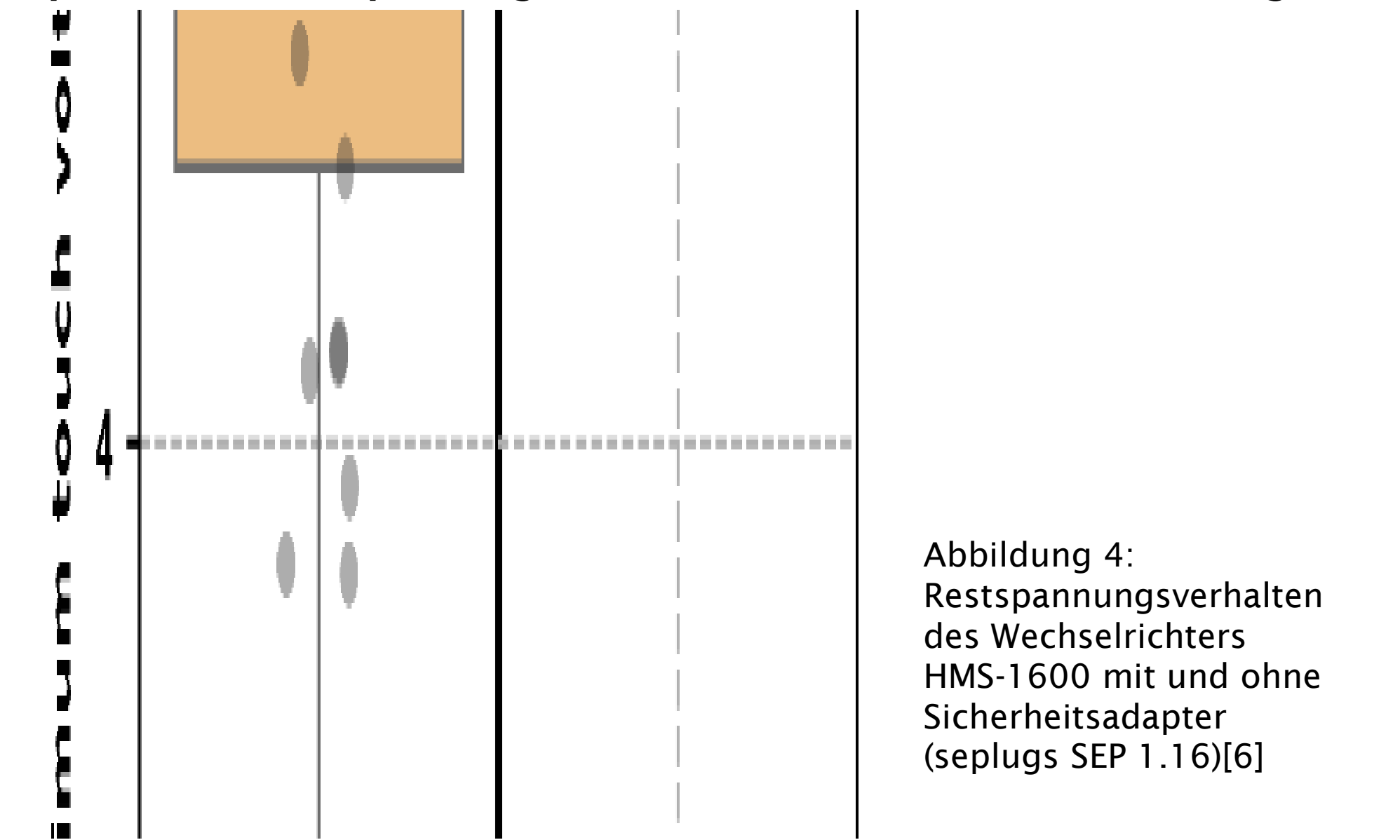
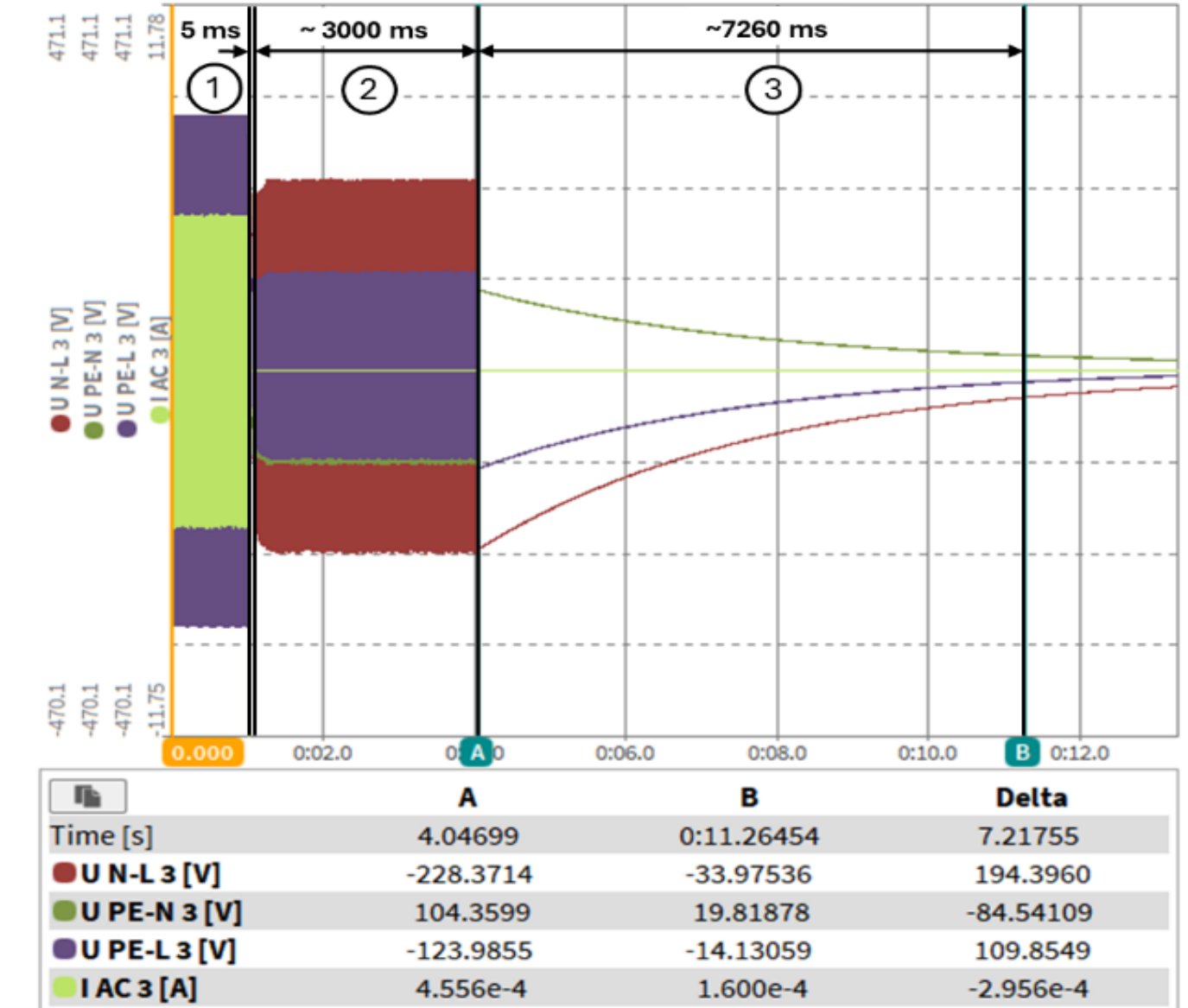


Abbildung 4: Restspannungsverhalten des Wechselrichters HMS-1600 mit und ohne Sicherheitsadapter (seplugs SEP 1.16)[6]

Abbildung 5: Messergebnisse eines Wechselrichters nach dem Trennen vom Netz (1) mit Inselbildung und FRT (2). Das NA-Relais stoppt dieses Verhalten nach 3 s und die Kondensator-Entladephase beginnt danach [6]



2. Maximale Berührtemperatur

- 18 Wechselrichter (75%) erfüllen den Grenzwert, jedoch hängt die Berührtemperatur aufgrund der passiven Kühlung von der Umgebungstemperatur ab
- Keine erhöhten Temperaturen bei Overpaneling
- Es gibt eine Korrelation zwischen der Leistungsdichte und der Berührtemperatur → Empfehlung: mehrere kleinere oder größere leistungslimitierte Wechselrichter einsetzen
- Mikrowechselrichter sind in normalen PV-Anlagen nichtberührbare Anlagenteile, in Plug & Play Systemen sind sie jedoch berührbare Teile, was eine Differenzierung hinsichtlich der Geräteanwendungsart in der Normprüfung erfordert.

3. Erhöhung des Einspeisestroms bei geringen Netzspannungen

- Erhöhung des Einspeisestroms von 1,7% bis 26,3% (je nach WR)
- Bei absolutem Limit → 4 nicht konforme Wechselrichter
- Bei relativem Limit → 1 konformer Wechselrichter

→ Für einheitliche Anforderungen wäre ein relatives Limit zu empfehlen.
→ Dieses Problem ist sehr wahrscheinlich durch ein Firmware-Updates behebbar.

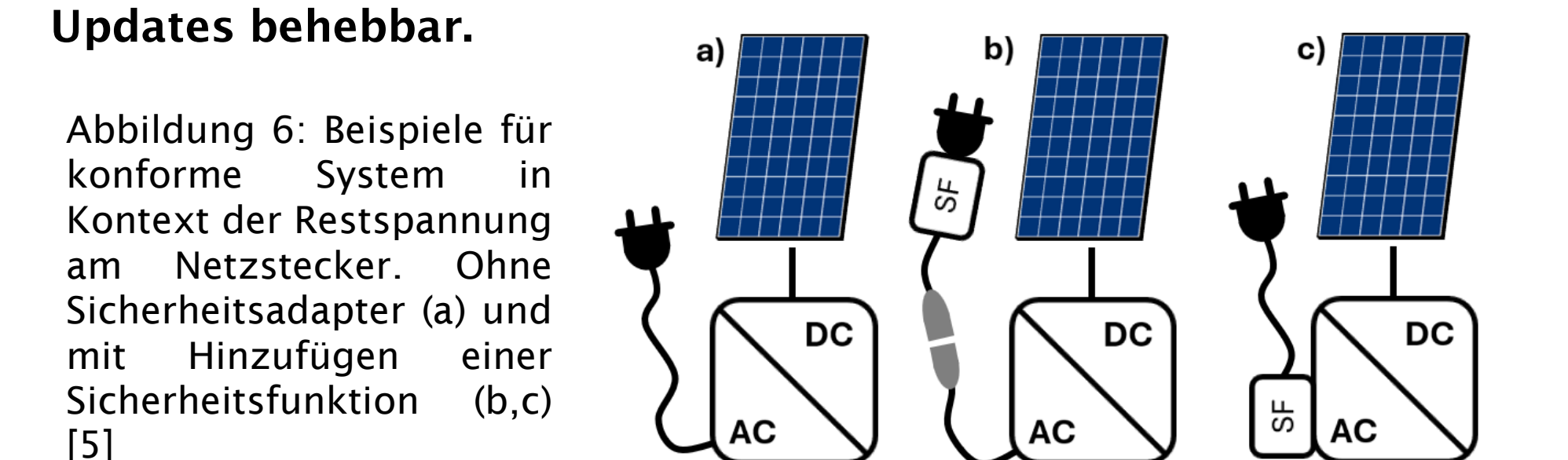


Abbildung 6: Beispiele für konforme System in Kontext der Restspannung am Netzstecker. Ohne Sicherheitsadapter (a) und mit Hinzufügen einer Sicherheitsfunktion (b,c) [5]

Zukünftig wird im Kontext der Anwendung und den geltenden Rahmenbedingungen zwischen Mikrowechselrichtern und Plug & Play Wechselrichtern (Mikrowechselrichter verwendet in Plug & Play PV-Systemen) zu differenzieren sein.

Dank

Die Arbeiten für diese Publikation wurden mit Unterstützung des Bundesamts für Energie durchgeführt (Projektnr. SI/502662). Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschließlich die Autoreninnen und Autoren verantwortlich.

Referenzen

- Vietzke, M., 2017. Untersuchung der Beeinflussung der Schutzkonzepte von Stromkreisen durch Stecker-Solar-Geräte.
- Bergner, J., 2025. Kurzbericht: Steckersolar 800 W.
- Haselhuhn, R., 2022. Steckersolargeräte: Mythos und Wahrheit: Wie gefährlich sind sie wirklich? Vorort- und Komponentennmessungen von gealterten Elektroinstallationen. Sonnenenergie 30–33.
- E DIN VDE V 0126-95, 2024. Steckersolargeräte für Netzparallelbetrieb - Sicherheitsanforderungen und Prüfungen.
- Erber, A., Joss, D., Bucher, C., 2025. Assessment of Personal Safety Concerns of Plug and Play Photovoltaic Inverters Using a Black Box Approach and Laboratory Measurements, Solar RRL 2025, <https://doi.org/10.1002/solr.202500539>
- Erber, A., Joss, D., Bucher, C., 2025. Assessment of Personal Safety Concerns of Plug and Play Photovoltaic Inverters Using a Black Box Approach and Laboratory Measurements, EU PVSEC 2025, [Submitted for Production]