

# Erneuerbare Energien

Die Kraft der Natur sicher und effizient nutzen



Design the future  
of energy



4

Lösungen für elektrische Sicherheit  
und Hochverfügbarkeit

5

Windenergieanlagen

6

PV-Großanlagen

10

IT-System als Netzform

12

Geringes Isolationsniveau -  
Herausforderung und Lösung

14

Batteriespeichersysteme



# Lösungen für elektrische Sicherheit und Hochverfügbarkeit

Sicherheit und Effizienz für erneuerbare Energien

Erneuerbare Energien sind der zentrale Bestandteil einer nachhaltigen und klimafreundlichen Energieversorgung. Betreiber von Photovoltaik-, Windkraft-, Wasserkraft- und Biogasanlagen stehen vor der Aufgabe, natürliche Ressourcen optimal zu nutzen und dabei höchste Sicherheitsstandards einzuhalten.

**Elektrische Gefährdungen oder ungeplante Ausfallzeiten können die Verfügbarkeit der Anlagen erheblich beeinträchtigen.**

Unsere weltweit bewährten, zuverlässigen Lösungen sind speziell auf die Anforderungen von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien abgestimmt:

- mögliche elektrische Gefährdungen frühzeitig erkennen
- Sicherheit von Personen und Anlagen gewährleisten
- kritische Betriebszustände sofort identifizieren
- Ausfallrisiken und Betriebsunterbrechungen minimieren
- hohe Anlagenverfügbarkeit durch präventives Eingreifen sicherstellen
- Messdaten aus Anlagen verwalten



# Windenergieanlagen

Früherkennung statt Stillstand

Für Betreiber von Windenergieanlagen steht die maximale Verfügbarkeit und Betriebssicherheit an oberster Stelle. Jeder unerwartete Ausfall bedeutet finanzielle Einbußen und zusätzlichen Wartungsaufwand. Insbesondere Offshore Windparks sind aufgrund ihrer exponierten Lage und der schwierigen Wartungsbedingungen auf ein hohes Maß an Betriebssicherheit angewiesen.

Eine entscheidende Rolle spielt hierbei die elektrische Sicherheit. Unentdeckte Isolationsfehler können nicht nur zu plötzlichen Stillständen führen, sondern auch das Brandrisiko signifikant erhöhen. Zudem verursachen ungeplante Serviceeinsätze hohe Kosten, da der Zugang zu den Anlagen, insbesondere bei Offshore Windparks, oft nur mit erheblichem logistischen Aufwand möglich ist.

**Häufigste Ursache für Isolationsfehler bzw. Fehlerströme sind mangelhafte Isolierungen durch:**

- mechanische Beschädigungen der Leitungen aufgrund von:
  - Vibration
  - Torsion
  - extremen Temperaturschwankungen
- Kriechströme verursacht durch:
  - Feuchtigkeit
  - Getriebe- und Hydrauliköle
  - Schmutz
- Blitzeinschlag und dessen Folgeschäden

**Fehlerströme bzw. Isolationsfehler haben zumeist gravierende Folgen wie:**

- hohe Kosten durch Betriebsunterbrechung
- erhöhte Brandgefahr
- Ausfall sicherheitskritischer Systeme
- ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen
- unerwartetes Auslösen von Schutzeinrichtungen
- Gefährdung von Wartungspersonal

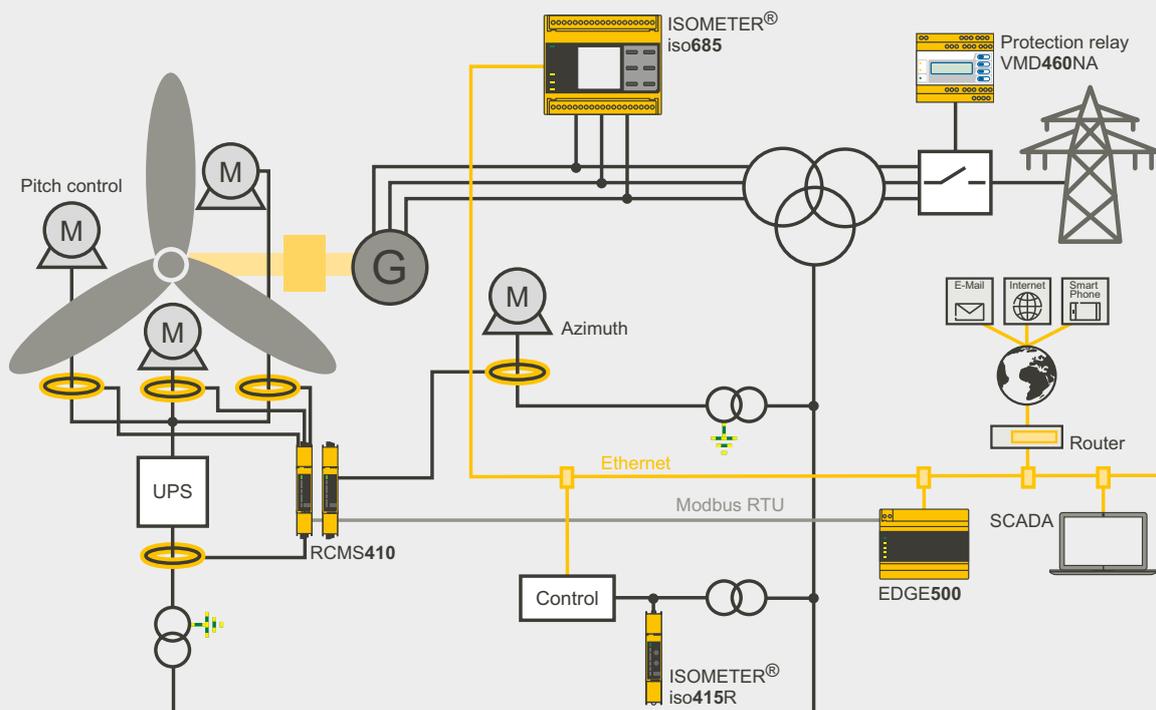


Bild 1: Darstellung Windenergieanlage

# PV-Großanlagen

## Geforderte Schutzmaßnahmen und normative Anforderungen

Photovoltaikanlagen stellen besondere Anforderungen an die elektrische Sicherheit, insbesondere im Fehlerfall. Da PV-Generatoren tagsüber kontinuierlich elektrische Energie erzeugen, ist eine automatische Abschaltung als Schutzmaßnahme nicht möglich – die Anlagen stehen nahezu rund um die Uhr unter Spannung und sind lediglich bei Dunkelheit spannungsfrei.

Die einzig wirksame Schutzmaßnahme ist daher die doppelte und verstärkte Isolierung gemäß DIN VDE 0100-410 (IEC 60364-4-41), Abschnitt 412, in Kombination mit einer dauerhaften Überwachung der Anlage. In der DIN VDE heißt es:

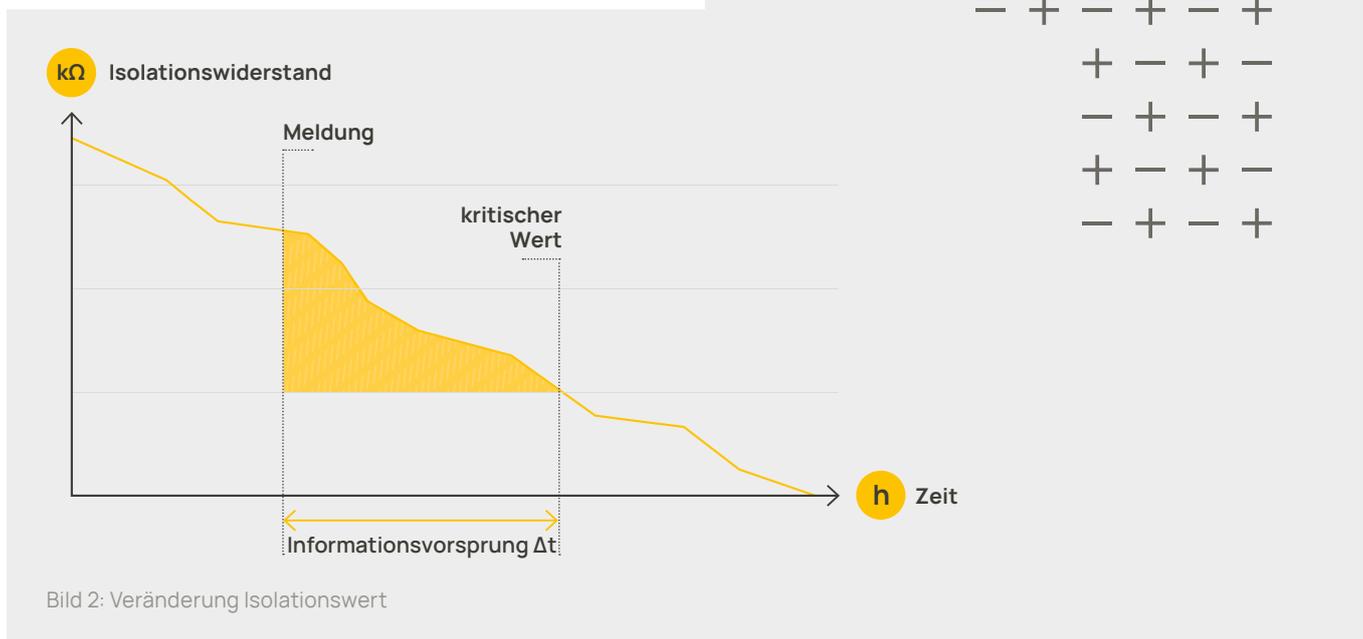
„In Fällen, wo diese Schutzmaßnahme als alleinige Schutzmaßnahme angewendet wird (z. B. wenn für einen Stromkreis oder einen Teil einer Anlage vorgesehen ist, nur Betriebsmittel mit doppelter oder verstärkter Isolierung zu errichten), muss nachgewiesen werden, dass effektive Maßnahmen ergriffen werden, z. B. wirksame Überwachung, so dass keine Änderung durchgeführt werden kann, die die Wirksamkeit dieser Schutzmaßnahme beeinträchtigt.“

Um diesem Nachweis gerecht zu werden, ist eine kontinuierliche Überwachung des Isolationswiderstands erforderlich. Die ISOMETER®-Serie von Bender ermöglicht es, den Isolationswiderstand im zeitlichen Verlauf zu messen und zu visualisieren.

Trotz umfangreicher Prüfungen im Rahmen der Bauartzulassung von PV-Modulen gemäß DIN VDE 0100-712 (IEC 60364-7-712) – „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 7-712: Anforderungen an Betriebsstätten, Räume und Anlagen der besonderen Art – Photovoltaik-(PV)-Stromversorgungssysteme“ – zeigen sich immer wieder neue Schwachstellen in der Errichtung und im Betrieb von PV-Anlagen.

**Durch eine messtechnische Überwachung erhält der Betreiber einen entscheidenden Informationsvorsprung und kann kritische Zustände frühzeitig erkennen, bevor diese zu ernsthaften Problemen führen.**

+	-	+	-	+	-
-	+	-	+	-	+
+	-	+	-	+	-
-	+	-	+	-	+
		+	-	+	-
		-	+	-	+
		+	-	+	-
		-	+	-	+





### Praxisbeispiel:

Bei einer neu errichteten 15 MW PV-Anlage, bestehend aus mehreren Strängen mit jeweils 1,7 MW Leistung, hat morgendliche Feuchtigkeit die Ableitkapazität  $C_e$  der Stränge um das 10-fache erhöht und parallel dazu den Isolationswiderstand  $R_f$  um 30% reduziert. Ausgehend davon, dass die Alterungsprozesse in Form von Materialverschleiß zukünftig den Isolationswert zusätzlich negativ beeinflussen, können sehr schnell kritische Werte erreicht werden.

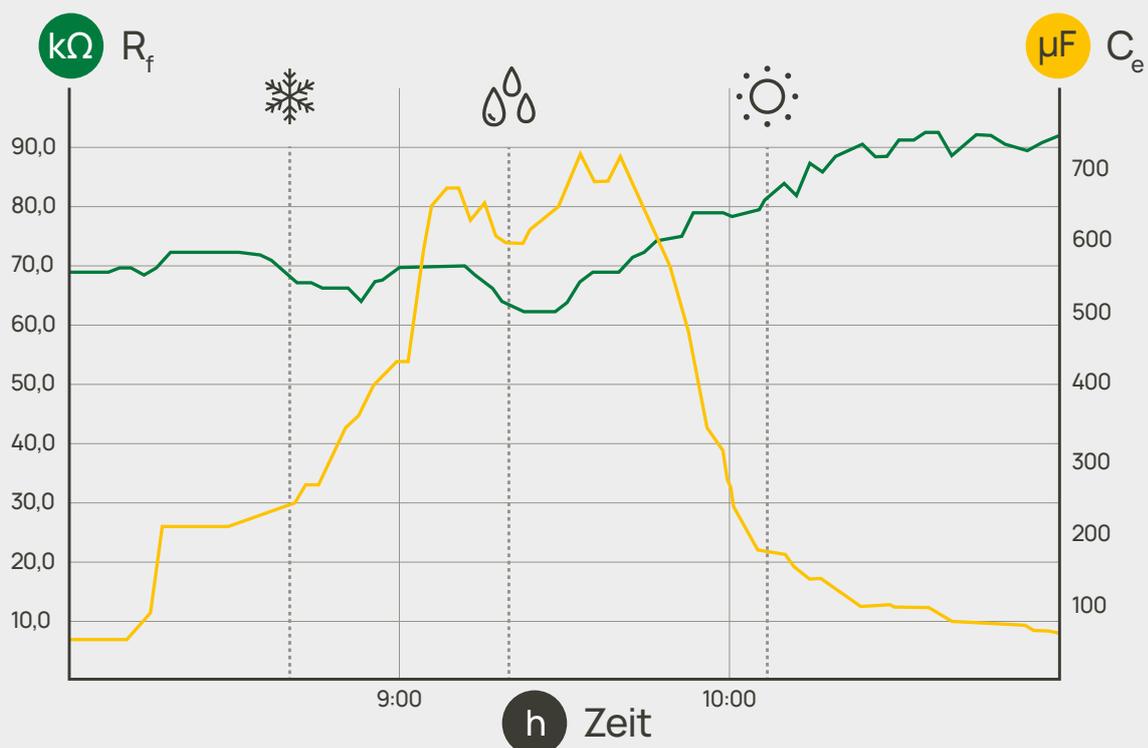


Bild 3: Messwerte von Isolationswiderstand und Ableitkapazität

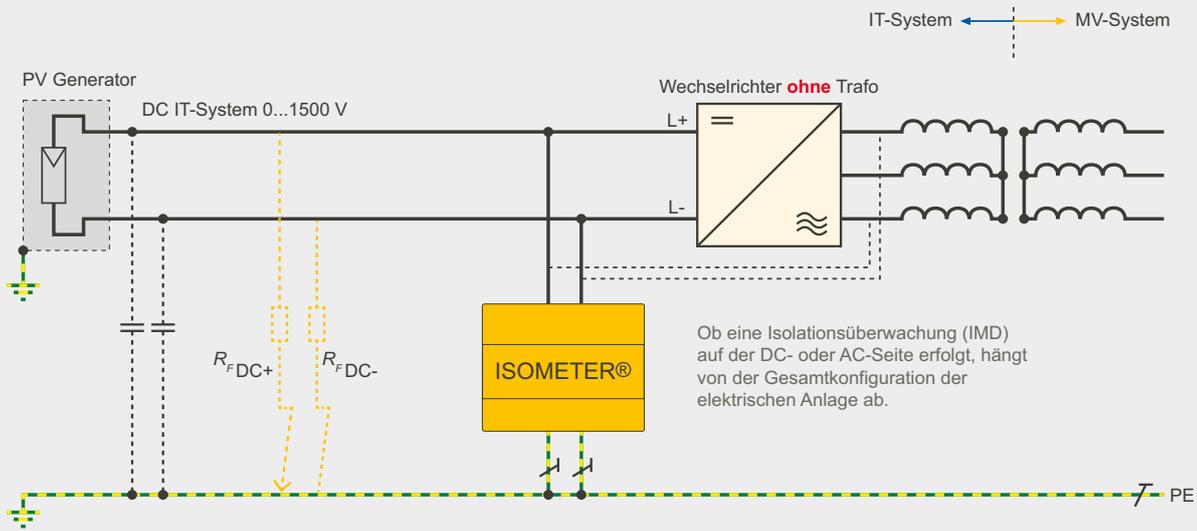


Bild 4: Wechselrichter **ohne** Transformator

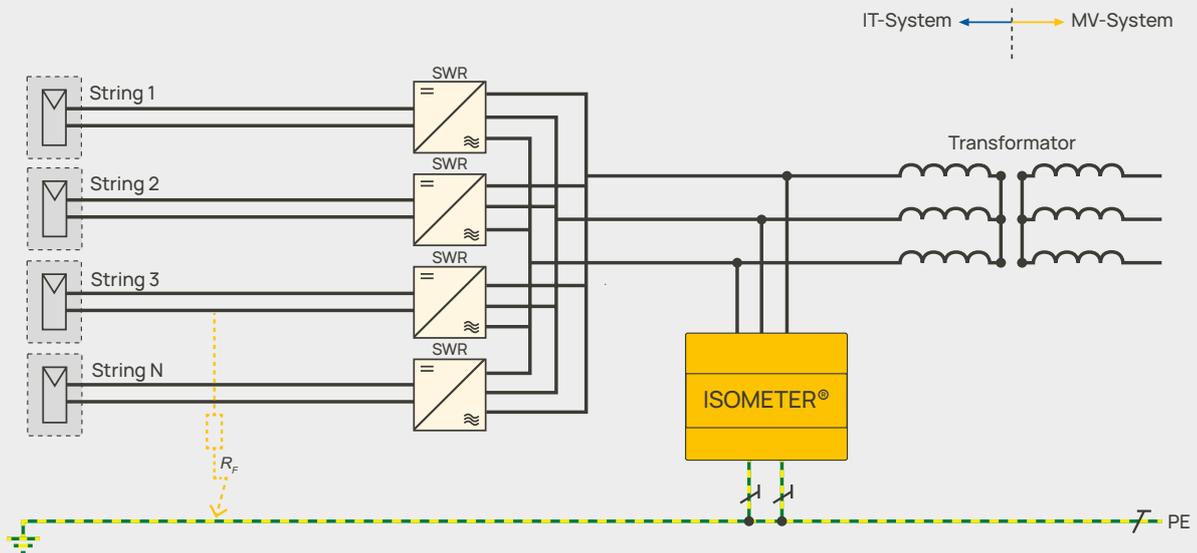


Bild 5: Dezentrale Stringwechselrichter (SWR)





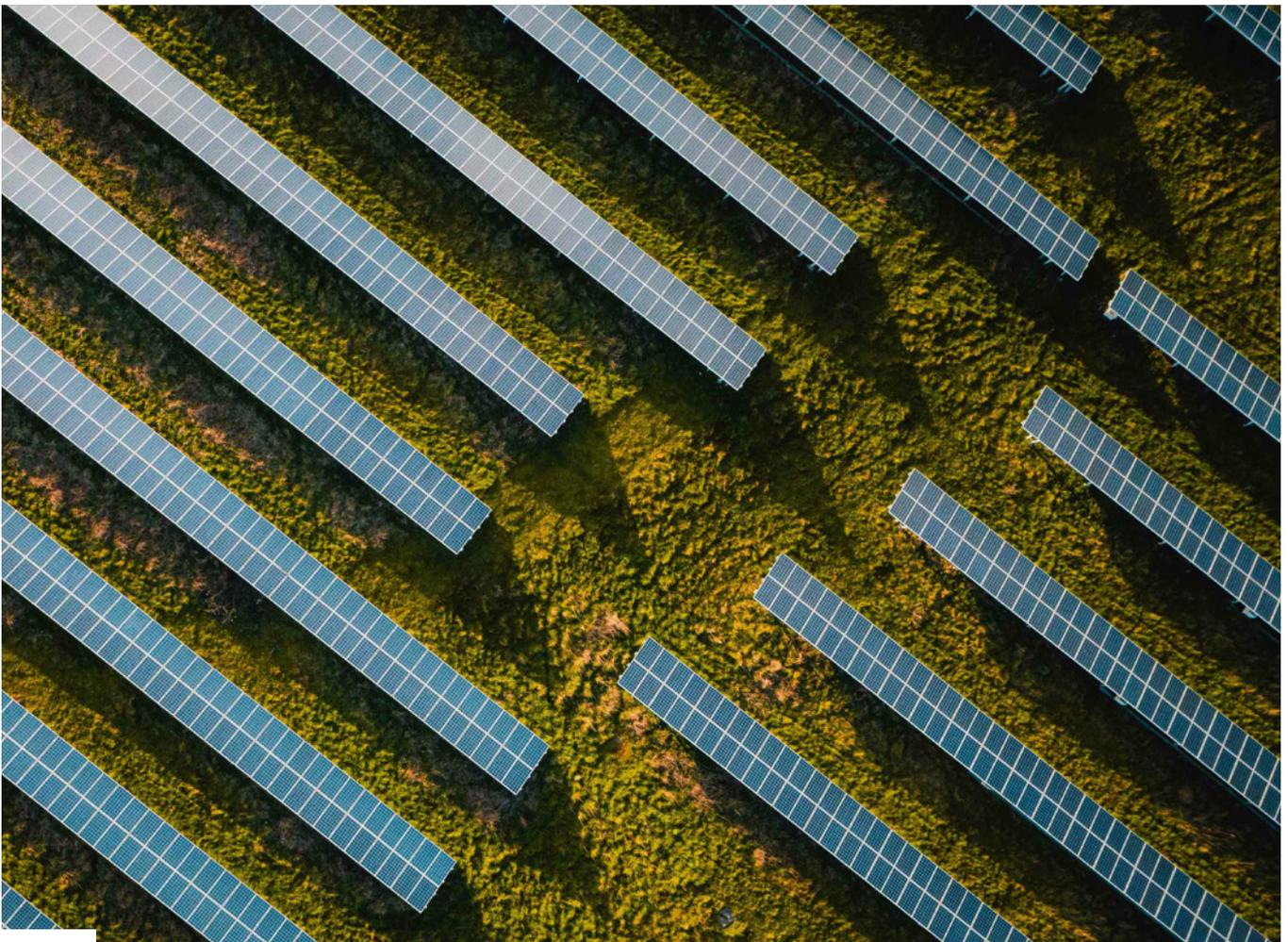
## Netzform: IT-System

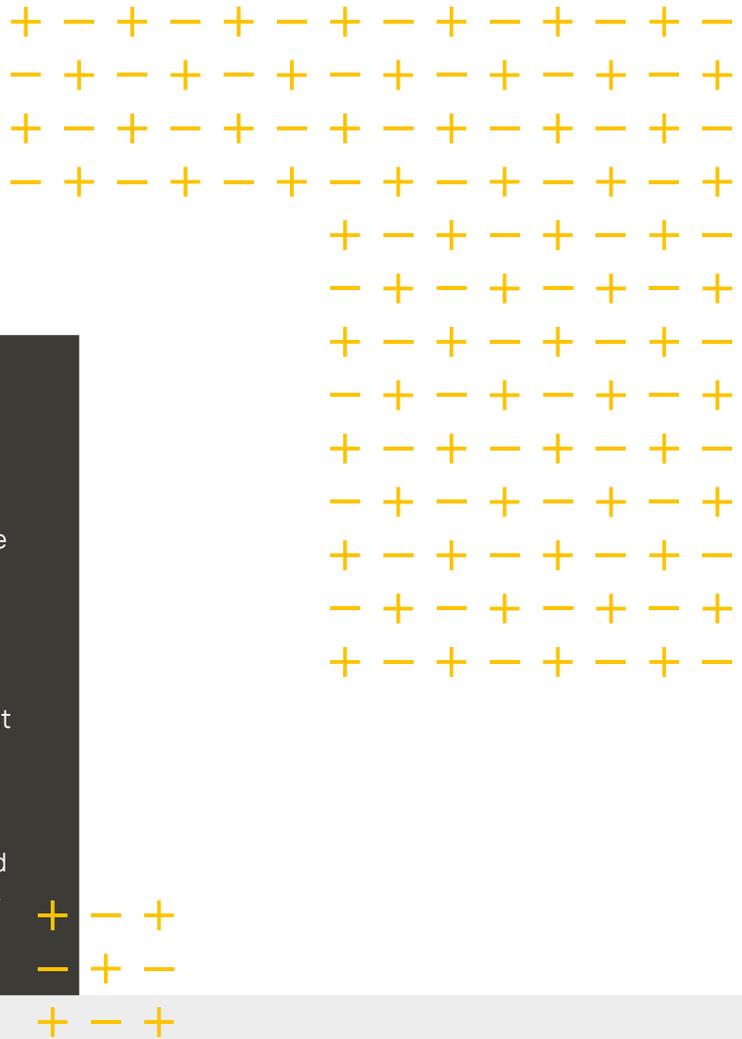
Photovoltaikanlagen werden üblicherweise in der Netzform IT (Isolé Terre; keine galvanische Verbindung der aktiven Leiter zur Erde) aufgebaut. Gründe hierfür sind sowohl eine einfache Verkabelung wie auch die höhere Verfügbarkeit, da in IT-Netzen der erste Fehler nicht zur Abschaltung bzw. Unterbrechung führen muss. Großflächige Photovoltaikanlagen im Bereich von einigen Megawatt [MW] sind in einzelne Strings unterteilt. Diese Strings verfügen entweder über einzelne Stringwechselrichter (Bild 5) oder werden an einen Zentralwechselrichter angeschlossen (Bild 6). Im Allgemeinen sind Wechselrichter – in Abhängigkeit der Leistung und Anwendung – mit oder ohne Transformator ausgeführt (Bild 4). Bei ausreichender Sonneneinstrahlung erfolgt innerhalb der Stringwechselrichter eine kurzzeitige Isolationsmessung und erst danach wird auf „Netzbetrieb“ umgeschaltet.

Das IT-Netz erstreckt sich jetzt von den Photovoltaik-Panels bis hin zur Sekundärwicklung des Transformators. Ein zentraler Isolationswächter (IMD), wie in Bild 5 und 6 dargestellt, überwacht bei „Netzbetrieb“ das Isolationsniveau des gesamten IT-Netzes.

### **PID – Potential Induzierte Degradation**

Der PID Effekt bei PV-Modulen mit kristallinen Si-Zellen führt zu einer schleichenden Leistungsminderung (Degradation), welche im Verlauf der Zeit kritische Werte annehmen kann und den Ertrag deutlich reduziert. Die bekannte Gegenmaßnahme der Potentialanhebung des PV-Generators nach Sonnenuntergang steht nicht im Widerspruch zu einer zentralen Isolationsüberwachung mittels IMD, denn der Wechselrichter befindet sich zu diesem Zeitpunkt nicht mehr im Netzbetrieb.





### Komplexes Messverfahren

Die stromführenden Leitungen des IT-Systems stellen gegenüber des Erdpotentials PE eine Art Kondensator dar. Die daraus resultierende Netzableitkapazität  $C_e$  und die kapazitiven Eigenschaften der Photovoltaik-Panels erzeugen einen Netzableitstrom. Dieser wird durch die Gesamtfläche  $[m^2]$  und durch die Feuchtigkeit der Anlage maßgeblich beeinflusst. Die Isolationsüberwachungsgeräte ISOMETER® von Bender verwenden ein eigens für diese Applikation entwickeltes Messverfahren und passen sich für die Ermittlung des Isolationswiderstandes  $R_f$  dem Anlagenzustand an.

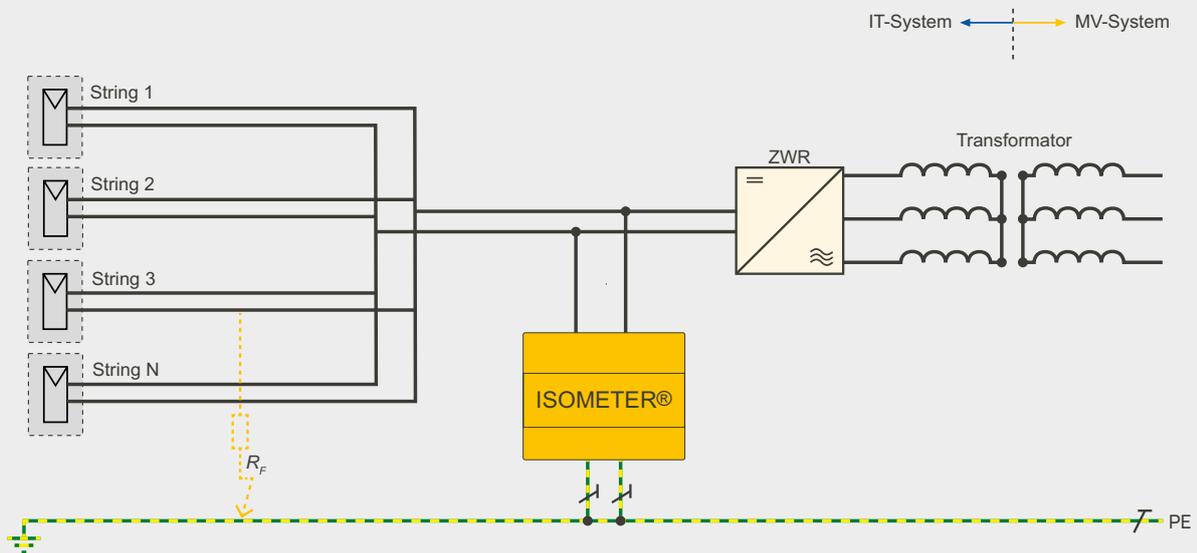
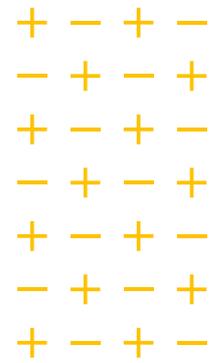


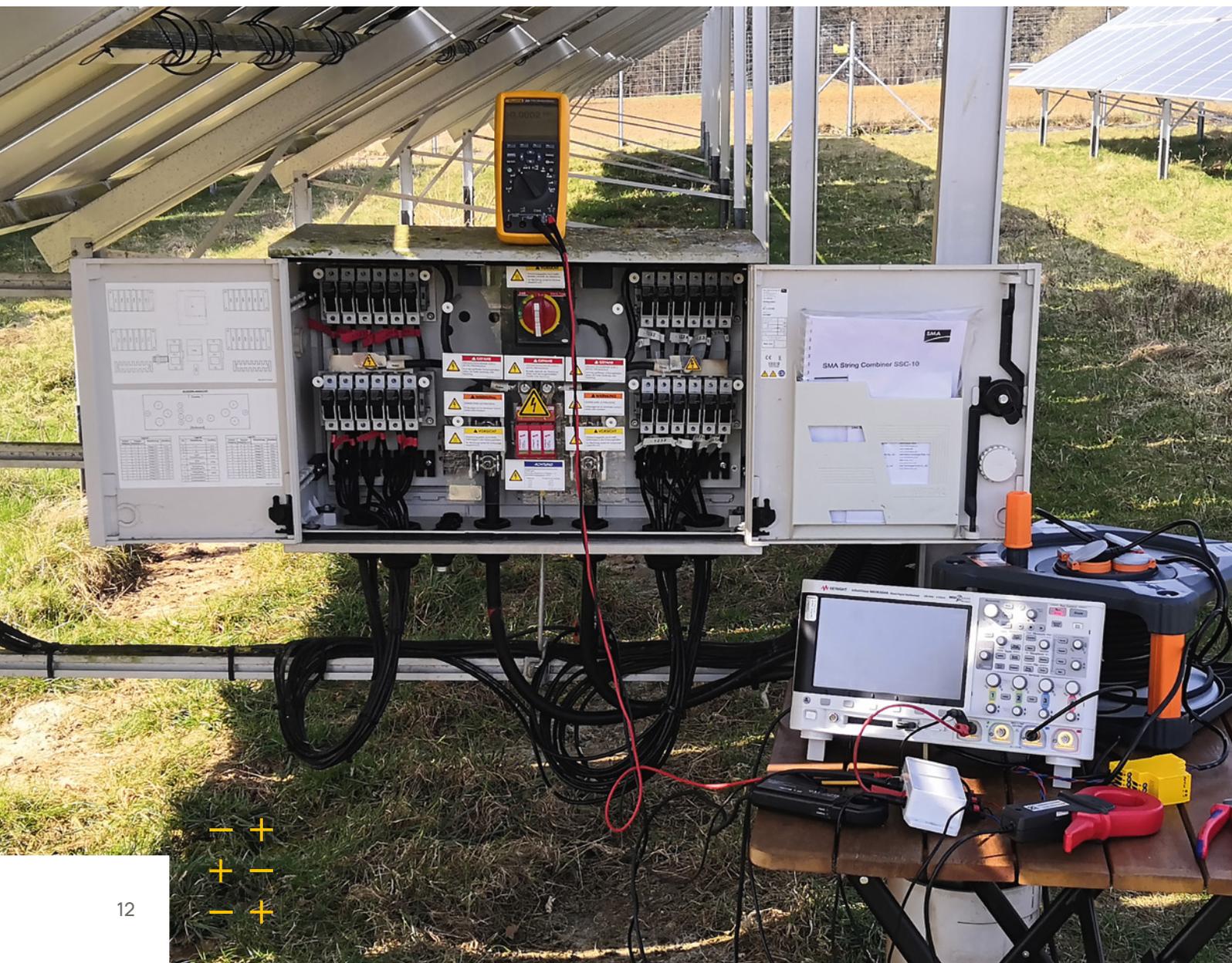
Bild 6: Zentralwechselrichter (ZWR)

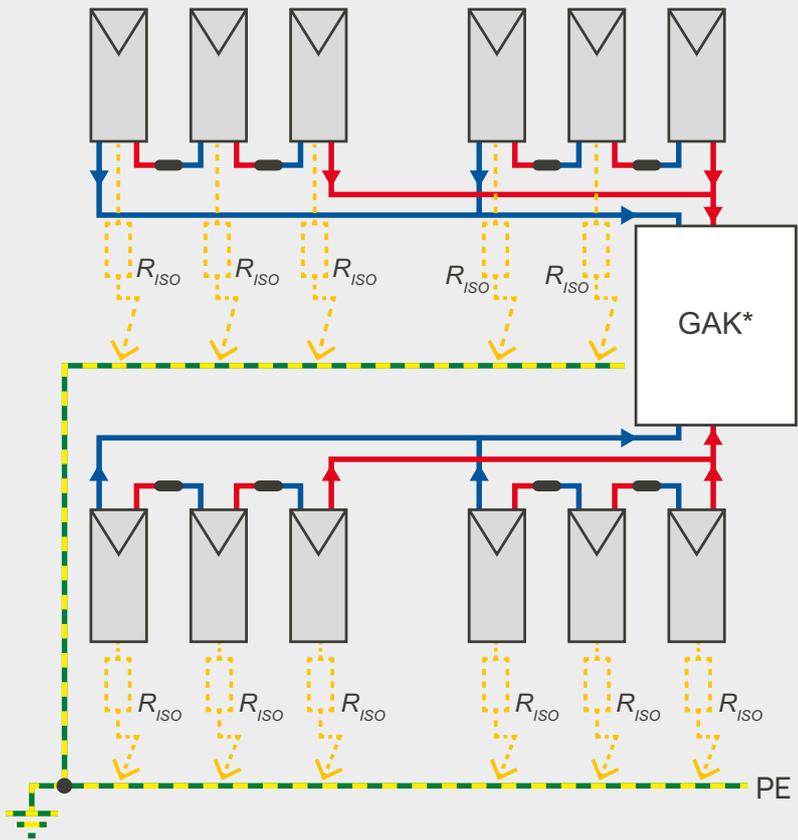
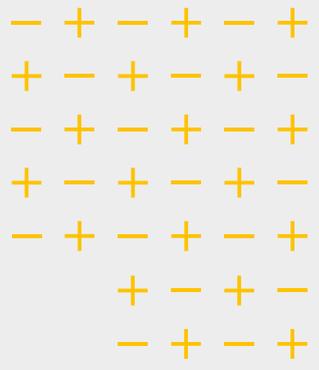
## Gerignes Isolationsniveau - Herausforderung und Lösung



Photovoltaikanlagen bestehen aus einer Vielzahl von Modulen, die elektrisch in Reihe und parallelgeschaltet sind. Gegenüber Erde ergibt sich jedoch eine Parallelschaltung des Isolationswiderstands, wodurch das gesamte Isolationsniveau der Anlage erheblich reduziert wird. Nach IEC 61215 beträgt der minimale Isolationswiderstand eines einzelnen PV-Moduls mindestens  $40 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}^2$ . In großflächigen Solarparks mit mehreren Megawatt Leistung kann dieser Wert jedoch aufgrund der hohen Anzahl an PV-Modulen auf einige  $\text{k}\Omega$  absinken.

Die zuverlässige Überwachung des Isolationswiderstands ist essenziell, um Fehler frühzeitig zu erkennen und Sicherheitsrisiken zu minimieren. Die ISOMETER® der isoPV-Serie von Bender bieten präzise und kontinuierliche Messungen, um den Zustand der Isolation zu erfassen. Unsere Technologie gewährleistet höchste Sicherheit und Verfügbarkeit – ein entscheidender Vorteil für den sicheren und effizienten Betrieb von PV-Großanlagen.





\*Generatoranschlusskasten

Bild 7: Anschauungsbeispiel Isolationswiderstand  $R_{ISO}$

1. Die Isolationswiderstände der einzelnen PV-Module stellen eine Parallelschaltung zur Erde dar und addieren sich nach dem Ohmschen Gesetz.
2. Der Gesamtwiderstand der gesamten PV-Anlage nimmt mit der Anzahl der PV-Module ab.
3. Nach der internationalen Norm IEC 61215 muss der **Mindestisolationswiderstand** eines PV-Moduls  $\geq 40 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}^2$  sein.



**Beispielrechnung:**

Ein 5 MW Solarkraftwerk bestehend aus PV-Modulen mit jeweils 400 W Leistung.

Fläche eines PV-Moduls:  $1\text{m} \times 2\text{m} = 2\text{m}^2$  / Nennleistung: 400W

$$R_{ISO} = \frac{40\text{M}\Omega \cdot \text{m}^2}{2\text{m}^2} = 20\text{M}\Omega \text{ (pro Modul)}$$

$5\text{MW} / 400\text{W} = 12,500$  Module (200MΩ pro Modul)\*

\*Die Erfahrung zeigt, dass neue Module einen 10-fach höheren Wert haben

$$R_{ISO} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{Modul (1)}}} + \frac{1}{R_{\text{Modul (2)}}} + \frac{1}{R_{\text{Modul (n)}}}} = 16\text{k}\Omega!$$

Im günstigsten Fall beträgt der  $R_{ISO}$  dieses neu installierten 5MW-Solarparks ca. 16kΩ.

# Batteriespeichersysteme

Mit der steigenden Nachfrage nach umweltfreundlicher Energie entwickeln sich Stromerzeugung und intelligente Netze stetig weiter. Fortschritte in der Photovoltaik und Batteriespeichertechnologie eröffnen neue Möglichkeiten, stellen jedoch gleichzeitig hohe Anforderungen an den Schutz von Personal und Anlagen.

Batteriespeichersysteme (BESS) werden in der Regel als ungeerdete IT-Systeme betrieben, bei denen alle aktiven Leiter bewusst von der Erde isoliert sind. Diese Konfiguration ermöglicht den Weiterbetrieb der Systeme selbst bei einem ersten Erdschluss. Dennoch ist es entscheidend, diesen Fehler frühzeitig zu erkennen, zu melden und zu beheben. Denn bleibt der Fehler bestehen, kann ein zweiter Fehler zu einer gefährlichen Überstromsituation führen und die Sicherheit der gesamten Anlage gefährden.

## Vorteile

**Fehlererkennung ohne Betriebsunterbrechung**  
Isolationsfehler oder Probleme mit Isolationsdurchbrüchen können frühzeitig erkannt und präzise lokalisiert werden – und das ohne Unterbrechung des Anlagenbetriebs.

## Reduzierte Wartungskosten

Die hohe Genauigkeit bei der Fehlererkennung verringert den Bedarf an manuellen Eingriffen und minimiert so die Wartungskosten erheblich.

## Automatische Fehlerortung

Mit der automatisierten Fehlerortung entfällt die Notwendigkeit, Abzweigschalter zu öffnen oder Geräte abzuschalten. Dies spart Zeit und reduziert die Risiken während der Fehleranalyse.

## Erhöhte Sicherheit

Die präzise Erdschlussortung an Batterie-Stacks oder Batteriesträngen minimiert das Risiko von Stromschlägen für Mitarbeiter. Zudem trägt eine schnelle Reparatur zur Vermeidung von Bränden und weiteren Schäden bei.



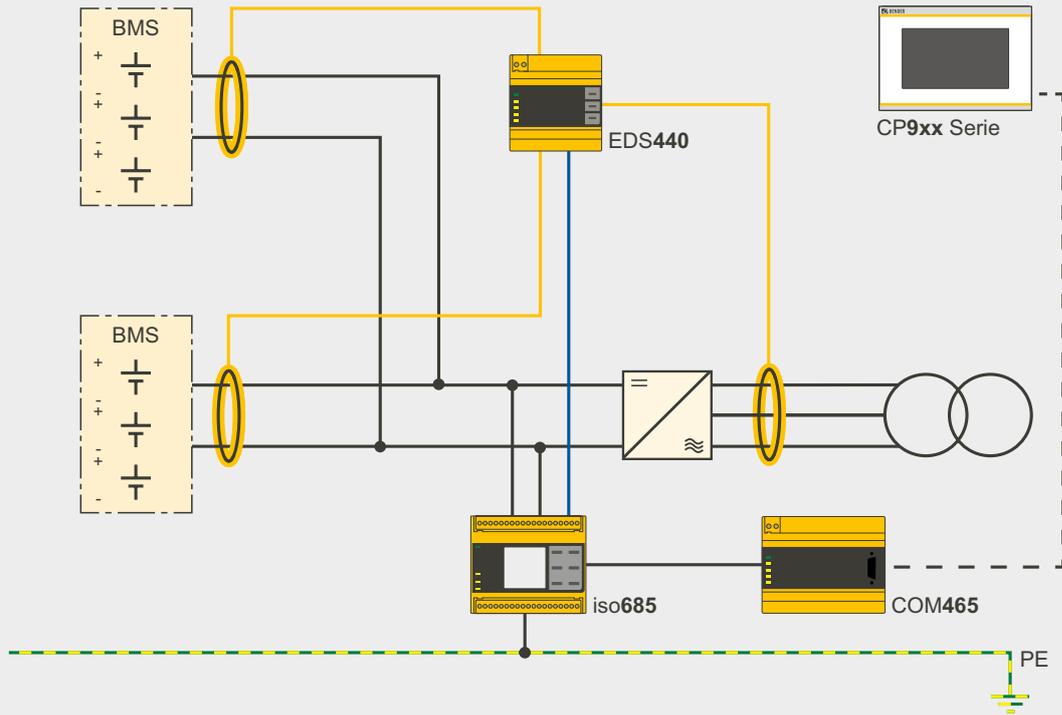


Bild 8: Beispiel ungeerdetes System

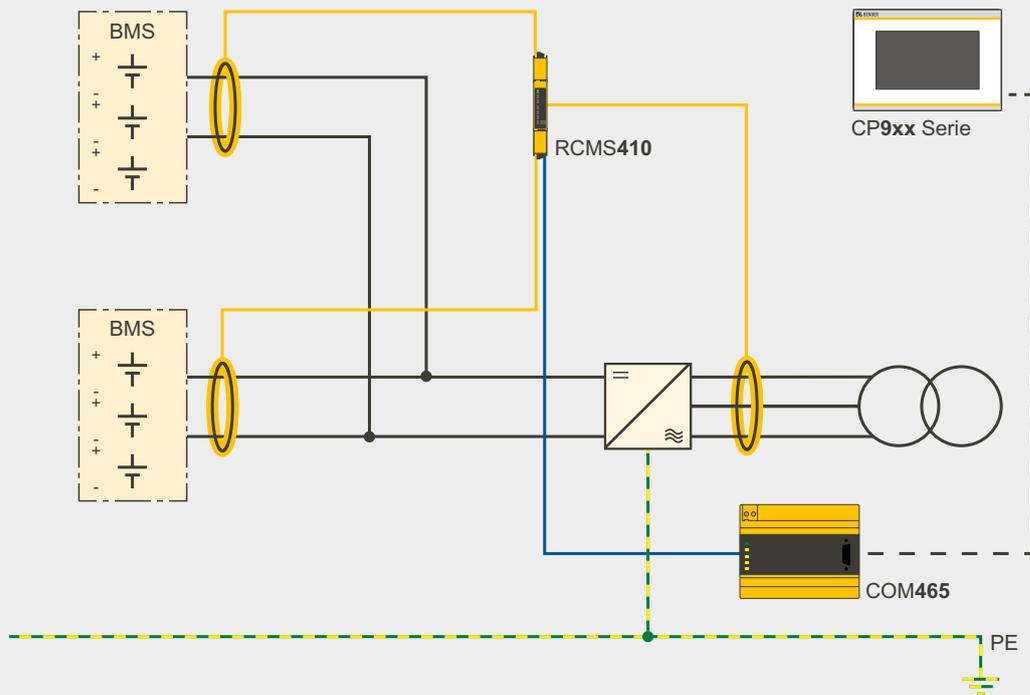
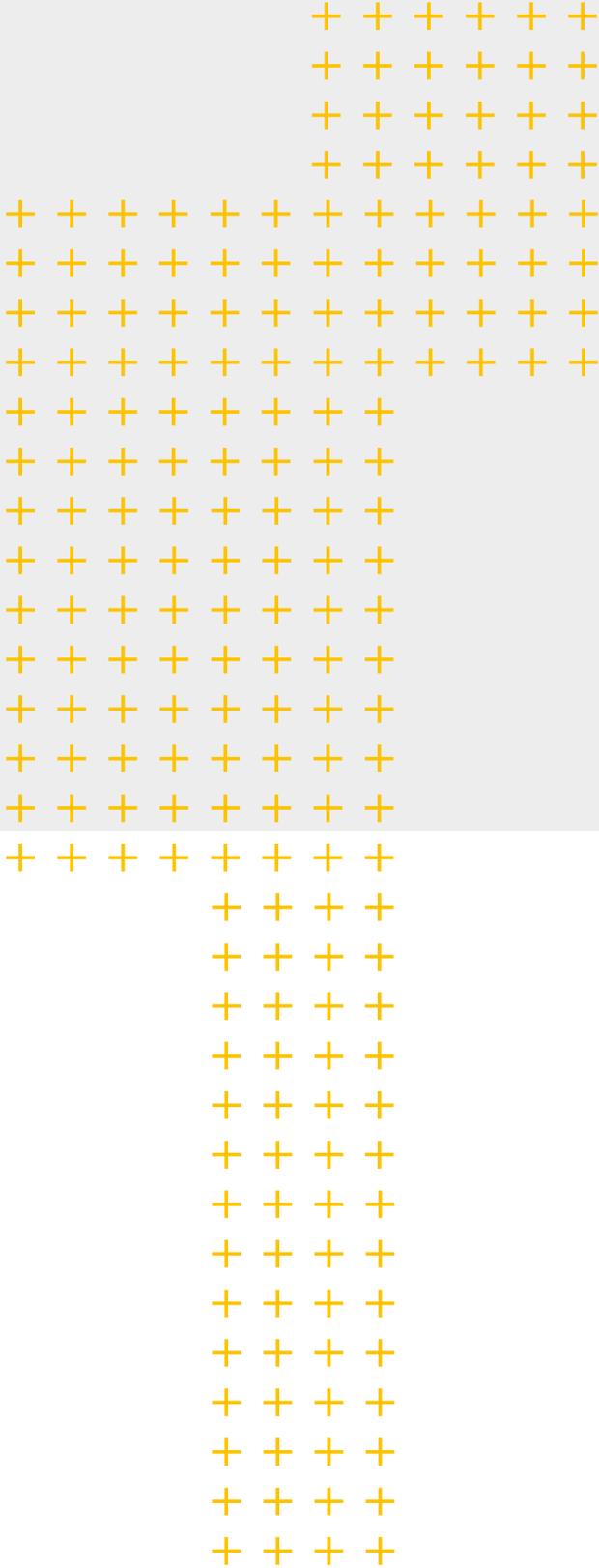


Bild 9: Beispiel geerdetes System



**Bender GmbH & Co. KG**

Londorfer Straße 65  
35305 Grünberg  
Germany

Tel.: +49 6401 807-0  
info@bender.de  
www.bender.de

Fotos: AdobeStock (@MikeMareen, @mimadeo, @malp, @ClaytonD/peopleimages.com, @Kampan, @Benoit, @phonlamaipphoto) und Bender Archiv.

2162de / 03.2025 / © Bender GmbH & Co. KG, Germany – Änderungen vorbehalten! Die angegebenen Normen berücksichtigen die zum Zeitpunkt der Drucklegung gültige Ausgabe.

