Studie „Photovoltaik auf Mittelspannungsebene“

Gerd Becker[2] · Gregor Dötter[3] · Said El-Barbari[1] · Oliver Mayer[1]
Hans-Joachim Möller[4] · Sönke Rogalla[3] · Ingo Schwirtlich[5]· Omar Stern[1]
Stephan Wieder[6] Marcus Zettl[1]

[1] GE Global Research · Freisinger Landstrasse 50 · 85748 Garching bei München
[2] Hochschule München · Lothstr. 64 · 80335 München · becker@ee.hm.edu
[3] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE · Heidenhofstraße 2 · 79110 Freiburg · gregor.doetter@ise.fraunhofer.de
[4] Institut für Experimentelle Physik · TU Bergakademie Freiberg · Leipzigerstr. 23 · 09599 Freiberg
[5] CEM Concept GmbH · Josef-Wirth-Strasse 36 · 63897 Miltenberg
[6] SCHOTT Solar AG · Carl-Zeiss-Straße 4 · 63755 Alzenau

1 Einführung

Zukünftige photovoltaische Kraftwerke werden größere Nennleistungen (> 100 MW) aufweisen. Sie werden in das Mittel- und Hochspannungsnetz einspeisen, ggf. direkt ohne Transformatoren oder mit solchen kleinerer Baugröße. Es stellt sich die Frage, ob photovoltaische Solargeneratoren mit höheren Gleichspannungen betrieben werden können, angedacht ist der Bereich von > 1 kV bis zu 30 kV. Die oben genannten Mitglieder der Arbeitsgruppe „PV-Mittelspannung“ haben die Rahmenbedingungen für einen solchen Betrieb untersucht und erste Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen. In zwei Teilprojekten wurden die Modultechnik sowie die Systemtechnik detaillierter untersucht.

2 Erstes Teilprojekt

Im ersten Teilprojekt (durchgeführt vom Institut für Experimentelle Physik der TU Bergakademie Freiberg) wurde untersucht, welche Materialveränderungen und Degradationserscheinungen in einem Modul unter hohen Spannungen auftreten können und ob sich daraus Begrenzungen ergeben. Ziel war es festzustellen, ob Module bis zu einer Gesamtspannung von größenordnungsmäßig 30 kV in Reihe verschaltet werden können. In einem Modul liegen dann Spannungen von bis zu ± 15 kV zwischen dem Rahmen, der geerdet ist, und der Zellmatrix an. Diese hohen Spannungen erzeugen Feldstärken, die je nach Aufbau der Module an den verschiedenen Teilen wie Frontglas, Polymerfolien und Solarzellen anliegen. Diese hohen Felder zerstören eventuell den Modul oder beeinflussen langfristig seine Leistung durch elektro-chemische Vorgänge.

2.1 Experimentelles Vorgehen

Es wurde ein Messplatz aufgebaut, in dem Module unter Hochspannung gesetzt werden können. Zur Charakterisierung des elektrischen Verhaltens wurden verschiedene Methoden eingesetzt, um Material- und Leistungsänderungen zu untersuchen.

2.2 Auswahl und Charakterisierung der Module

Für die Untersuchungen wurden verschieden hergestellte Module der Firma Schott zur Verfügung gestellt. Es handelt es sich um drei kristalline Silizium-Glas-Folien-Modul und drei Silizium-Doppelglasmodule. Ein Teil der Module wurde vorher einem Klimatest unterzogen.

Für die ersten Untersuchungen wurde ein neues Silizium-Doppelglasmodul verwendet. Es wurden daran Kennlinien- und Elektrolumineszenzmessungen (EL) durchgeführt. Die EL Messungen zeigen, dass an den Modulen bereits stellenweise Kurzschlüsse vorliegen. Dieser sind typischerweise aber durch defekte Kontakte verursacht. Die später beobachteten Veränderungen an dem Modul werden daher auf den Ausgangszustand bezogen.

Weiterhin wurden die Module mit der Infrarothermographie (IR) abgebildet. Hier wurden lokale Stromkonzentrationen, die zu einer lokalen Temperaturerhöhung führen, sichtbar.

2.3 Hochspannungsmessplatz und Ergebnisse

Es wurde ein Messaufbau realisiert, in dem man den fließenden Strom unter angelegter Spannung messen kann. Ein typisches Ergebnis ist in **Abbildung 1** zu sehen. Charakteristisch ist, dass nach dem Einschalten einer positiven Spannung zwischen Rahmen und Zelle ein Leckstrom fließt, der zeitlich innerhalb von ca. 2 h abnimmt und dann konstant bleibt. Beim Abschalten der Spannung kehrt sich die Stromrichtung um, und der Strom nimmt innerhalb des etwa gleichen Zeitraums ab und verschwindet.

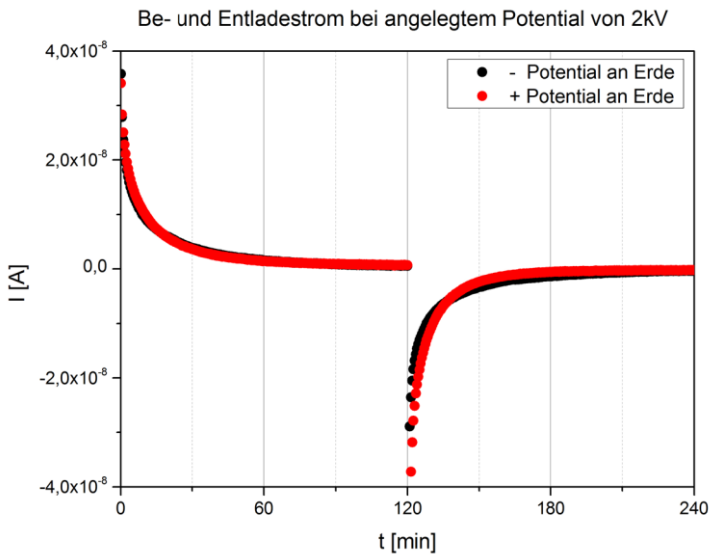


Abbildung 1: Be- und Entladestrom eines Moduls nach Einschalten und Ausschalten einer positiven Spannung zwischen Rahmen und Zelle.

Man kann dieses Verhalten damit erklären, dass sich das Modul wie ein Kondensator langsam auf- und wieder entlädt. In **Abbildung 2** ist ein entsprechendes Ersatzschaltbild gezeigt.

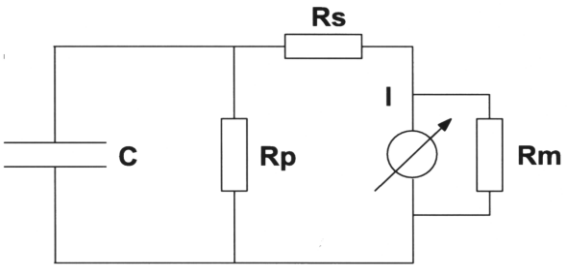


Abbildung 2: Ersatzschaltbild für ein Modul am Lastwiderstand Rm.

Praktisch das gleiche Verhalten sieht man bei Umkehrung der Polarität.

Das Ladeverhalten ändert sich aber im Laufe der Zeit und bei Erhöhung der Spannung, siehe **Abbildung 3**. Aus den Messkurven lassen sich Kapazität, Serien- und Kurzschlusswiderstand bestimmen, die charakteristisch sind für das jeweilige Modul und den Zustand, in dem es sich befindet. Das Messen der Zeitabhängigkeit des Be- und Entladestrom eines Moduls liefert daher detaillierte Information über den Ladungstransport in einem Modul.

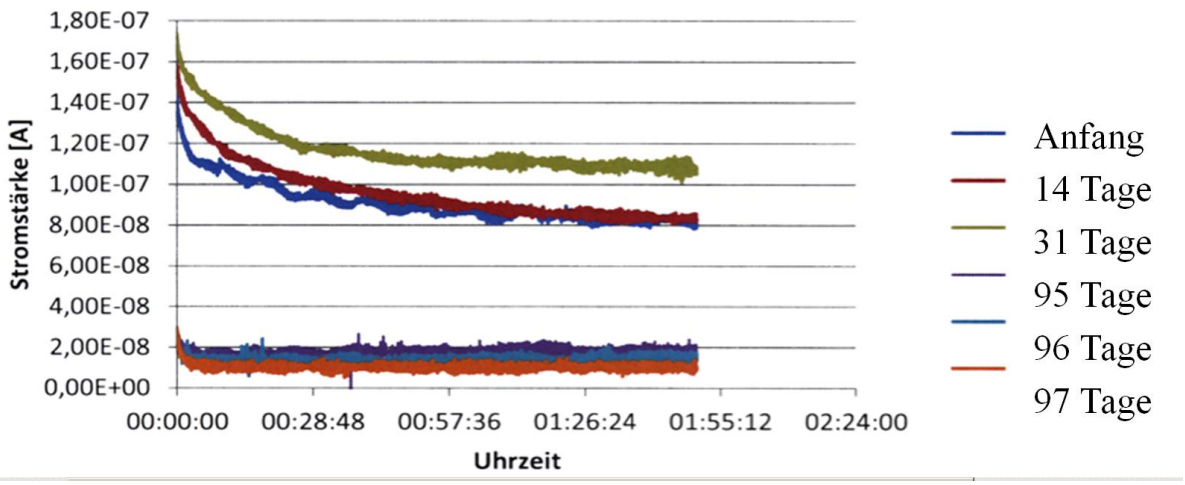
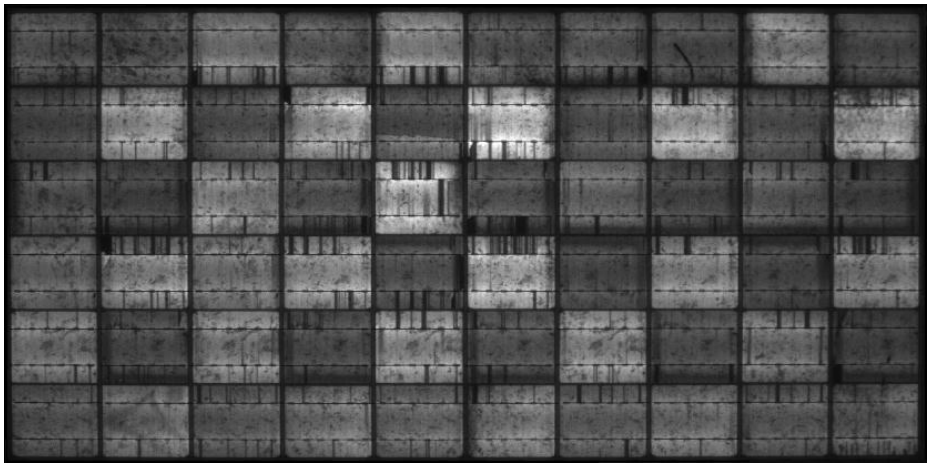


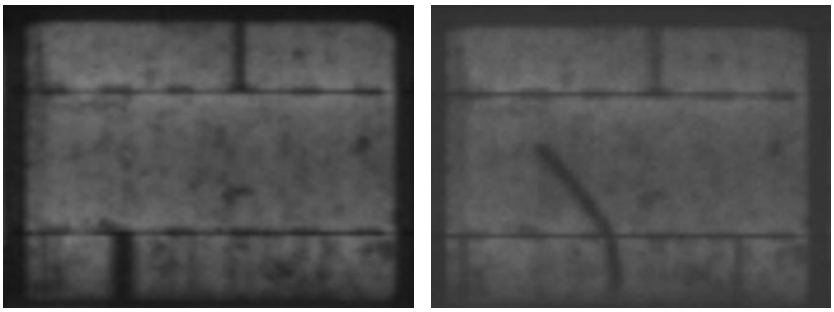
Abbildung 3: Ladestrom eines Moduls nach Einschalten einer positiven Spannung zwischen Rahmen und Zelle im Bereich zwischen 1 - 6 kV. Die Spannung wurde im Laufe der Zeit kontinuierlich um 1 kV erhöht.

Durch das Anlegen von sehr hohen Spannungen größer als 1 kV, die im heutigen Betrieb von Solaranlagen nicht auftreten, hat man nicht nur die Möglichkeit, die Transportmechanismen beschleunigt ablaufen zu lassen, sondern man kann auch auftretende Schäden an den Modulen schneller herbeiführen. Damit lassen sich eventuell Schäden an Modulen, die im Normalbetrieb erst langfristig sichtbar werden, bereits nach Stunden erzeugen.

Abbildung 4 zeigt im EL - Bild eines Moduls, dass eine lokale Schädigung an einer Zelle nach dem Anlagen von 6,5 kV aufgetreten ist. Dieser machte sich im Leckstrom durch eine plötzliche Erhöhung bemerkbar. Nach dem Vermessen der Kennlinie des Moduls ergab sich eine reduzierte Leistung des Moduls durch diese lokale Schädigung.



(a)



(b) **(c)**

Abbildung 4: Elektrolumineszenzbild eines Moduls, der einer Spannung von 6,5 kV ausgesetzt war (a). Es tritt eine lokale Schädigung an einer Zelle auf, die im unter Bild vergrößert dargestellt ist (c). Zum Vergleich dieselbe Zelle im Ausgangszustand (b).

2.4 Diskussion

Man kann grundsätzlich zwei Probleme bei hoher Modulspannung unterscheiden:

- Beschädigung des Moduls durch kurzzeitige Stromdurchbrüche bei hohen Spannungen
- Allmähliche Degradation der Leistung des Moduls

Die Messungen an einem Testmodul haben gezeigt, dass das Glas-Folien-Modul bei ca. 6,5 kV einen Stromdurchbruch zeigte und dadurch geschädigt wurde. Man kann vermuten, dass heutige Module zwar Spannungen größer als 1 kV aushalten , eine generelle Aussage zur Spannungsfestigkeit einzelner Modultypen kann aber nicht gemacht werden. Eine Spannungsfestigkeit bis 3 kV für einzelne Modultypen ist aber denkbar.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits im Spannungsbereich unterhalb von 1 kV Leckströme in einem Modul fließen. Deren zeitliches Verhalten ließ sich so deuten, dass dabei Ladungsträger entlang der Glasoberflächen wandern und sich dort anlagern. Ein Teil dieser Ladungen kann durch das Einbettmaterial wandern, sich auf den Zelloberflächen anlagern und zu einer Degradation der Zell- und Modulleistung führen. Dieser Effekt ist seit einigen Jahren als „Potential Induced Degradation“ (PID) bekannt und genauer untersucht geworden. Viele Details sind bisher noch nicht genau verstanden. Man kennt aber einige Bedingungen, unter denen dieser Effekt auftritt. Er hängt ab von

- Polarität und Größe der Spannung
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- Zell- und Moduldesign

Da der PID Effekt auch von der Spannung abhängt, ist damit zu rechnen, dass er bei Erhöhung der Systemspannung verstärkt auftritt. Da die genauen Ursachen noch nicht vollständig geklärt sind, wird es schwierig, generelle Empfehlungen für Änderungen am Moduldesign zu geben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man die Systemspannung eventuell auf 3 kV (+/- 1,5 kV) anheben kann, indem man geringfügige Änderungen am Zell- und Modulaufbau vornimmt. Inwieweit der PID Effekt dabei die Langzeitstabilität beeinträchtig ist zur Zeit noch nicht absehbar, da man die Wirkungsmechanismen noch nicht endgültig geklärt hat. Höhere Systemspannungen sind aber sicherlich mit derzeitigen Modulen nicht erreichbar und erfordern umfangreiche Weiterentwicklungen.

3 Zweites Teilprojekt

Im zweiten Teilprojekt (durchgeführt vom Fraunhofer ISE) wurde die erforderliche Systemtechnik untersucht. Fragen des Aufbaus und der Komponenten des Solargenerators wurden diskutiert. Für die Wechselrichter sind verschiedene Systemtopologien möglich. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass der Aufbau eines Solargenerators mit sehr hoher Spannung gekennzeichnet ist durch klassische Serienschaltung mit Anpassung aller Komponenten „ab der Anschlussdose“ und entsprechender Isolation im Modul oder Aufteilung in isolierte Teilgeneratoren mit Freischalter zur Wartung und Fehlerabschaltung sowie isolierter Aufständerung. Ebenso betrachtet wurden Fragen wie Schutzkonzepte, der Zutritt zum Kraftwerk sowie die relevanten Normen. Letztlich wurde in einer Beispielrechnung ein Systemvorschlag erarbeitet.

3.1 Erhöhung der Spannung des Solargenerators

Durch Serienschaltung mehrerer Photovoltaikmodule kann die Spannung des Solargenerators erhöht werden. In **Abbildung 5** ist die Serienschaltung von aktuell am Markt verfügbaren Modulen bis zu einer Spannung von 30 kV gezeigt. Dabei wurde jeweils ein Modul eines Typs entsprechend oft in Serie verschaltet. Die Grafik zeigt anschaulich, dass bei Erhöhung der Stringspannung die Stringleistung bis in den dreistelligen Kilowattbereich ansteigen kann.

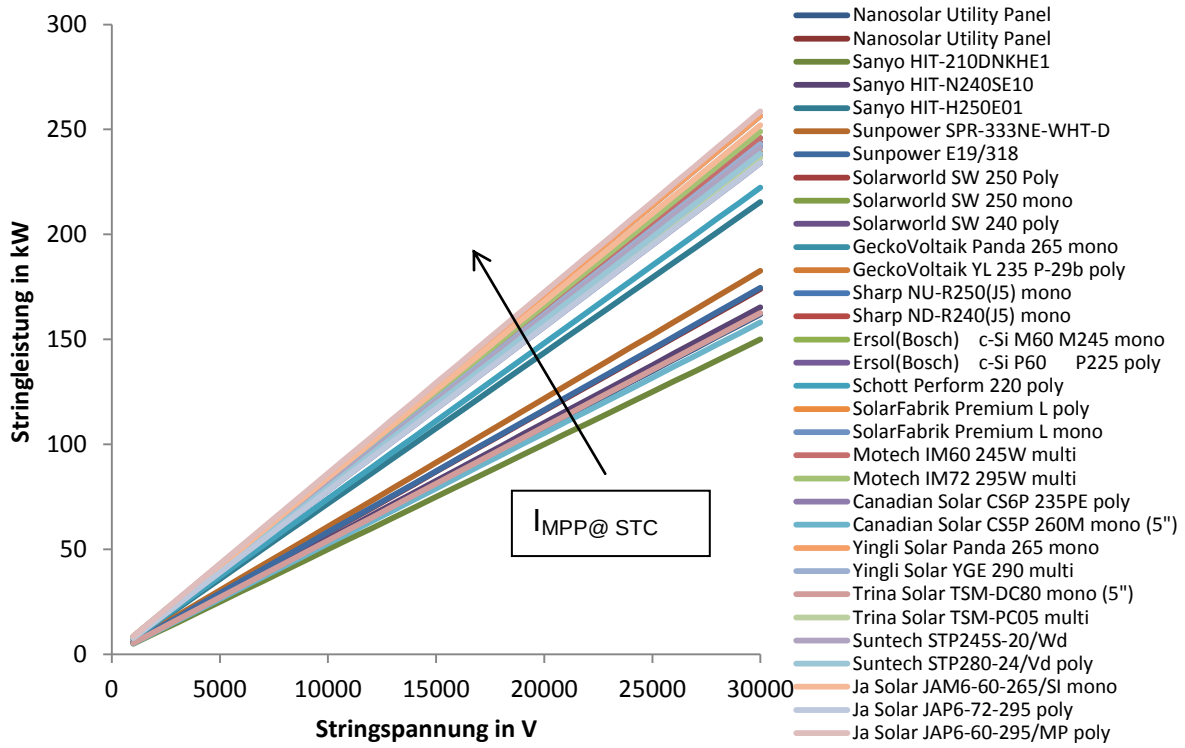


Abbildung 5: Stringleistung, die sich aus der Serienschaltung von Modulen ergibt.
Jede Linie symbolisiert einen Modultyp.

3.2 Aufbau heutiger PV Kraftwerke - Stand der Technik

In heutigen Kraftwerken werden je nach Eingangsspannung des Wechselrichters mehr oder weniger viele Photovoltaikmodule in Serie geschaltet, siehe **Abbildung 6**. Die maximale Spannung des Solargenerators beträgt nach der Norm für Niederspannung maximal 1500 V_{DC}. Der Zentralwechselrichter speist über einen Transformator meist in das Mittelspannungsnetz ein. Oft werden mehrere (z.B. 2 oder 3) Wechselrichter zu Gruppen von etwa einem Megawatt zusammengefasst, sie nutzen den Trafo gemeinsam.

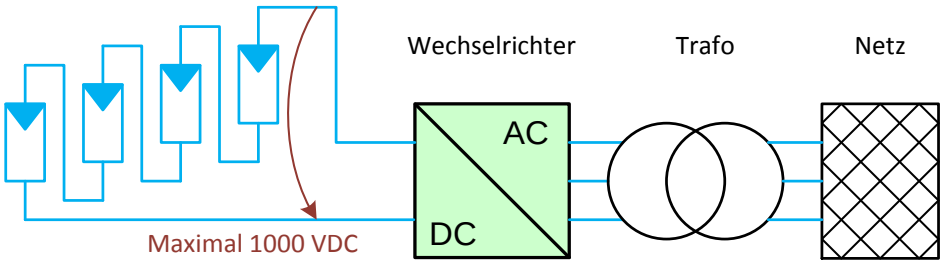


Abbildung 6: Aufbau heutiger PV Kraftwerke

3.3 Klassische Serienschaltung - Verlängerung der Strings

Um zu hohen Spannungen zu gelangen kann die Anzahl der in Serie geschalteten Module erhöht werden. Der Aufbau des Solargenerators in analog zu dem heutigen Konzept. Heute sind die Module meist bis zu einer Spannung von 1000 V_{DC} isoliert. Selten werden Module mit einer Isolationsspannung von 1500 V_{DC} eingesetzt. In diesem Konzept muss diese Isolationsspannung angepasst werden. Die in **Abbildung 7** gelb dargestellte Isolierung zwischen den Zellen (blau) und grau dargestellten Rahmen muss auf die maximale DC-Spannung ausgelegt sein. Die Erdungs- und Trennschalter werden während der Installation benötigt.

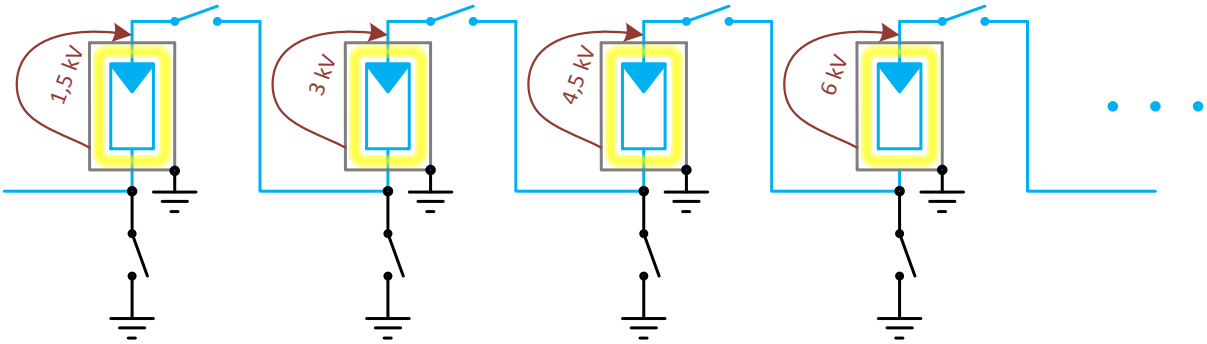


Abbildung 7: Spannungserhöhung durch Serienschaltung

Bei dem Aufbau eines Solargenerators nach diesem Konzept ist der Rahmen des Moduls geerdet. Dadurch ist der Park begehbar und es besteht kein Risiko bei Berührung der Module. Wartungen im Park und die Reinigung der Module sind möglich.

Die Sicherheit bei der Installation des Solargenerators ist gegeben. Um im Fehlerfall den Solargenerator vom Wechselrichter zu trennen ist ein Trennschalter nötig.

Das systemtechnische Konzept des Kraftwerks muss nach diesem Vorschlag „ab der Anschlussdose“ auf hohe Spannungen ausgelegt werden. Bei Bruch der Glasscheibe des Moduls sind spannungsführende Teile nicht mehr isoliert und es besteht Lebensgefahr.

3.4 Aufteilung des Solargenerators in isolierte Teilgeneratoren

Alternativ zu dem Konzept der Serienschaltung, bei dem die Isolierspannung der Module erhöht werden muss, kann der Solargenerator auch aus isolierten Teilgeneratoren aufgebaut werden (**Abbildung 8**). Dazu werden die Module in Teilgruppen (hier A bis D) mit einer Leerlaufspannung kleiner der Isolierspannung zusammengefasst und diese Teilgeneratoren isoliert aufgestellt. Die isolierte Aufständerung ist in Gelb, außerhalb des Modulrahmens (grau) angedeutet.

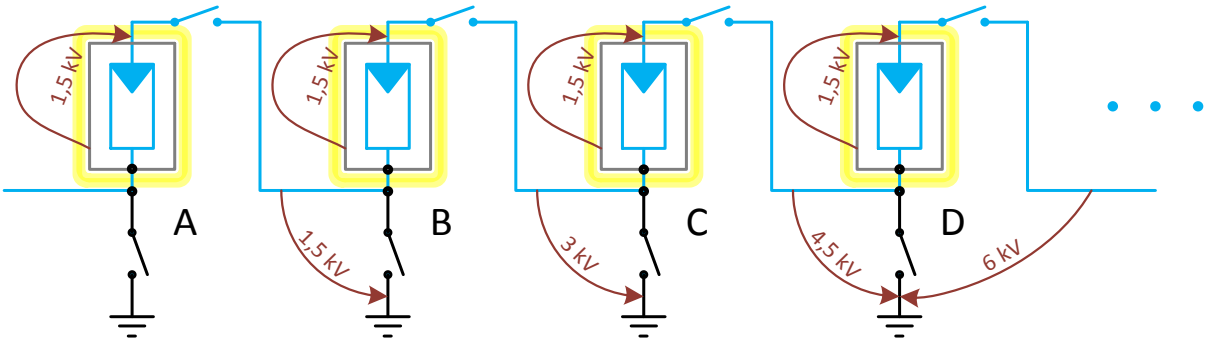


Abbildung 8: Spannungserhöhung mit isolierten Teilgeneratoren A bis D.

Da innerhalb eines isoliert stehenden Teilgenerators die Spannung immer kleiner der maximalen Isolierspannung der Module ist, kann hier auf bestehende Standardmodule zurückgegriffen werden. Die Rahmen der Module sind nicht mehr geerdet und stehen unter Spannung. In jedem Generatorabschnitt werden die Rahmen der Module mit einem Pol des Teilgenerators verbunden. Der Park darf während des Betriebs nicht betreten werden. Während der Installation und auch während Fehlern muss der Solargenerator mittels Trennschaltern elektrisch getrennt werden. Nach vollzogener Trennung der Teilgeneratoren kann dann jeder Teilgenerator geerdet werden. Erst wenn die Trennung sicher vollzogen ist, kann der Park betreten werden. Gleiches gilt für Wartungs- und Reinigungsarbeiten. Bei diesem Konzept ist die Aufständerung zusammen mit den Trenn- und Erdungsschaltern aufwändig. Im Gegenzug können Standardmodule verwendet werden. Es besteht kein durch hohe Spannungen hervorgerufenes Degradationsrisiko.

3.5 Konzepte für Wechselrichter mit hoher Ausgangspannung

In den vorigen Abschnitt wurden zwei Konzepte für einen Solargenerator mit höherer Spannung vorgestellt. Je nach Ausführung und der Verfügbarkeit geeigneter Photovoltaikmodule kann ein, an den Solargenerator angepasster, Wechselrichter entworfen werden. Es kann ein Wechselrichter mit sehr hoher (mehrere kV) oder alternativ einer vergleichsweise kleinen Eingangsspannung von z.B. 3 kV dimensioniert werden. Die hohe Ausgangsspannung kann entweder durch Serienschaltung im Solargenerator oder durch Leistungselektronik im Wechselrichter erzeugt werden. Zielwert für die AC-Spannung ist ein Wert im Bereich der 20 kV-Mittelspannungsebene. Einen Wechselrichter zu entwerfen, der direkt in diese Spannungsebene einspeist, ist derzeit in der angestrebten Leistungsklasse schwer möglich bzw. möglicherweise nicht die ökonomisch sinnvollste Variante. Wahrscheinlich wird die AC-Ausgangsspannung des Wechselrichters (z.B. 3…6 kV) über einen Transformator an die 20 kV Ebene angepasst. Je höher nun die AC-Ausgangsspannung gewählt wird, desto geringer sind das Übersetzungsverhältnis des Transformators und auch seine Baugröße. Der Bedarf an Rohstoffen wie Kupfer und Eisen sinkt. Alternativ könnte der Transformator bei gleicher Baugröße eine höhere Leistung übertragen.

3.5.1 Konzept mit niedriger Eingangsspannung (<3 kV)

Dieses leistungselektronische Konzept basiert auf einer relativ kleinen Eingangsspannung. Sie kann beispielsweise die aktuelle Modulnorm mit 1500 V_{DC} ausschöpfen oder der Solargenerator besteht aus für die neue Spannungsebene angepassten Modulen. In diesem Ansatz wird die Leistungselektronik aus einem Mittelspannungssteller (MS-Steller) und einem Mittelspannungswechselrichter (MS-WR) aufgebaut. Je nach AC-Ausgangsspannung des Wechselrichters kann auf einen Mittelspannungseinspeisetransformator (MS-Trafo) verzichtet werden. **Abbildung 9** zeigt schematisch einen solchen Aufbau.

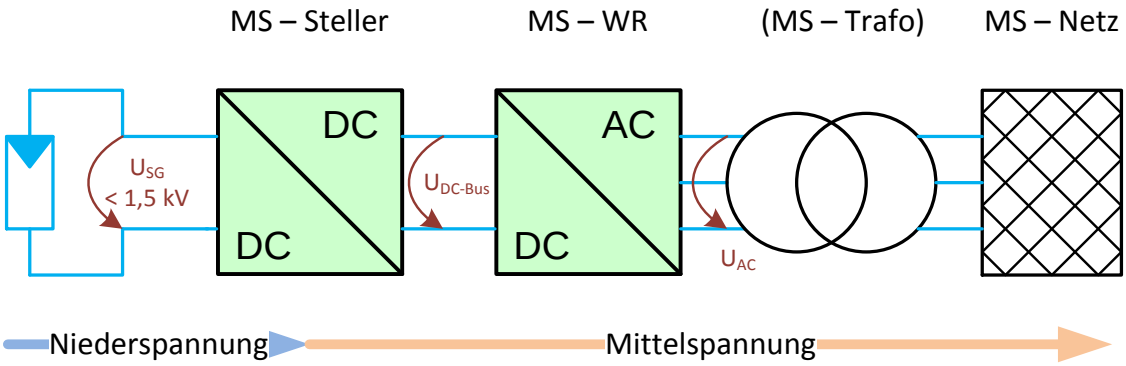


Abbildung 9: Zweistufiges leistungselektronisches Konzept mit niedriger Eingangsspannung.

In diesem Konzept wird die hohe Spannung in einem leistungselektronischen Steller erzeugt. Dieser Steller muss als zusätzliche Baugruppe eingefügt werden und wird als zusätzliche Wandlerstufe betrachtet. In der Energieerzeugung wird versucht die Anzahl der Wandlerstufen gering zu halten, da bei jeder Wandlung der Energie Verluste entstehen. Dieser Steller hat die Solargeneratorspannung als Eingangsspannung und speist einen Mittelspannungszwischenkreis. Vorteilhaft an diesem Konzept ist, dass Module mit einer geringen Isolationsspannung eingesetzt werden können.

3.5.2 Konzept mit hoher Eingangsspannung (>3 kV)

Alternativ zu dem oben beschriebenen Ansatz kann der leistungselektronische Teil eines solaren Kraftwerks auch aus einem einstufigen Wechselrichter bestehen. In diesem Konzept wird die benötigte Wechselrichtereingangspannung durch eine Serienschaltung von vielen Photovoltaikmodulen hergestellt. Der Wechselrichter kommt ohne Steller aus. Er hat einen Mittelspannungseingang und einen Mittelspannungsausgang. Je nach Spannungsebene benötigt dieser Ansatz einen Mittelspannungstransformator. Das Konzept ist in **Abbildung 10** dargestellt.

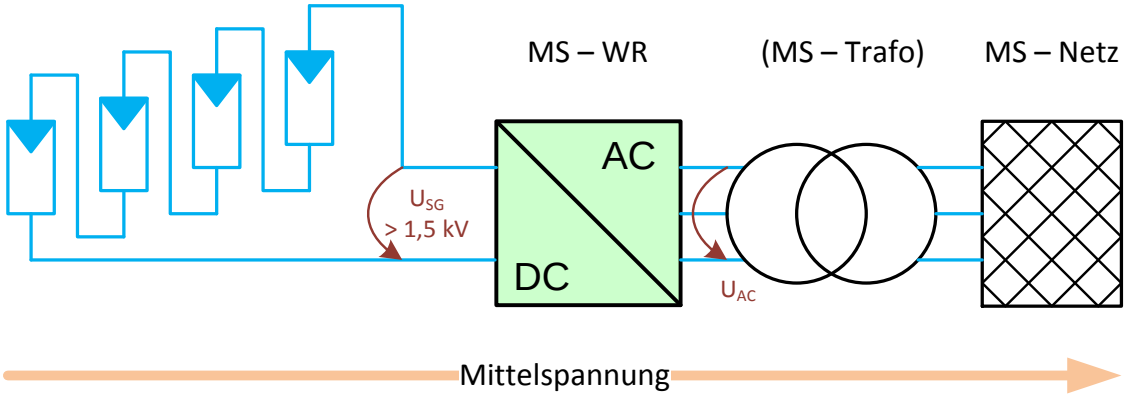


Abbildung 10: Einstufiges Wechselrichterkonzept mit hoher Eingangsspannung.

3.6 Anforderungen an die Systemtechnik

Die Anforderungen an die Systemtechnik betreffen zum einen technische Details, zum anderen sicherheitsrelevante Details. Die Sicherheit des im Kraftwerk arbeitenden Personals muss während Installation, Wartungs- und Reinigungsarbeiten und auch bei Fehlern gewährleistet sein. Der Aufbau kann entweder, wie bisher üblich, berührsicher oder abgeschrankt aufgebaut werden. Bei einem berührsicheren Aufbau kann das Kraftwerk betreten werden. Wenn die Berührsicherheit nicht garantiert werden kann, muss eine geeignete Sicherheitstechnik entworfen werden, die bei Gefahr für Personen eine Abschaltung herbeiführt.

4 Zusammenfassung

Als Ergebnisse sind unter anderem festzuhalten, dass Spannungen über 6 kV zu direkter Schädigung des Moduls und zu Wirkungsgradverlust führen können. Hohe Spannungen erfordern also Änderungen am Moduldesign. Es werden langfristige Änderungen durch PID Effekte auftreten.

Aus Sicht der Systemtechnik werden Strategien zur Spannungserhöhung des Solargenerators und Möglichkeiten zur Erhöhung der Systemspannung des Wechselrichters vorgestellt.