



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 04.02.2016

Prüfstand für Multistring Solarwechselrichter

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Photovoltaik
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Jlcoweg 1
CH-3400 Burgdorf
www.pvtest.ch

Autoren:

Urs Muntwyler, BFH-TI, urs.muntwyler@bfh.ch
Daniel Gfeller, BFH-TI, daniel.gfeller@bfh.ch
Luciano Borgna, BFH-TI, luciano.borgna@bfh.ch

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Stefan Oberholzer
BFE-Programmleiter:	Dr. Stefan Nowak
BFE-Vertragsnummer:	SI/500900-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren sind Multistring-Solarwechselrichter zum Marktstandard geworden. Diese Wechselrichter verfügen über mehrere voneinander unabhängige MPP-Tracker. Dadurch können Verluste durch inhomogene Bestrahlung, Teilbeschattung und Mismatch des Solargenerators minimiert werden. Die Prüfung von solchen Wechselrichtern stellt Prüfinstitute vor neue Herausforderungen, denn für die notwendigen Messungen muss jeder MPP-Tracker an einen eigenen Solargenerator-Simulator angeschlossen werden. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein dafür geeigneter Prüfstand aufgebaut. Herz dieses Prüfstandes ist ein Solargenerator-Simulator, welche drei voneinander unabhängige Teilsolargeneratoren simulieren kann. Da kommerziell erhältliche Solargenerator-Simulatoren nicht die gewünschten Eigenschaften (Spannungsbereich und Geschwindigkeit) aufwiesen, wurde der benötigte Simulator im Eigenbau gefertigt. Dabei ist ein Gerät entstanden, welches sowohl über eine sehr gute thermische Stabilität als auch über herausragende dynamische Eigenschaften verfügt. Der Prüfstand eignet sich nicht nur für realitätsnahe, reproduzierbare Messungen von Solarwechselrichtern, sondern auch als Forschungsplattform. So zum Beispiel für die Entwicklung von neuen Solarwechselrichtern und Laderegler, dem Auffinden von Schwachstellen in bestehenden Geräten, aber auch für die Erarbeitung von derzeit noch fehlenden Testprozeduren für Multistring-Solarwechselrichter.

Résumé

Ces dernières années, les onduleurs solaires multistring sont devenus un standard sur le marché. Ces onduleurs sont équipés de plusieurs régulateurs MPP indépendants les uns des autres, ce qui permet de minimiser les pertes du générateur solaire par radiation non-homogène, ombrage partiel et mismatch. La vérification de tels onduleurs place les instituts de contrôle face à de nouveaux défis, car les mesures nécessaires exigent que chaque régulateur MPP soit relié à son propre simulateur de générateur solaire. Dans ce projet, un banc d'essai approprié a été construit. Un simulateur de générateur solaire, capable de simuler trois générateurs solaires partiels indépendants constitue le cœur de ce banc d'essai. Comme les simulateurs de générateurs solaires disponibles sur le marché ne présentent pas les caractéristiques souhaitées (tension et vitesse), nous avons nous-mêmes fabriqué le simulateur indispensable. Un appareil disposant d'une très bonne stabilité thermique et d'excellentes caractéristiques dynamiques en est le résultat. Le banc d'essai ne convient pas seulement pour les mesurages reproductibles proches de la réalité, mais aussi comme plateforme de recherche, par exemple pour développer de nouveaux onduleurs solaires et régulateurs de charge, pour détecter les points faibles des appareils existants et même pour élaborer des procédures de test pour onduleurs multistring, actuellement inexistantes.

Abstract

In the past few years, multistring solar inverters have become a standard on the market. These inverters have multiple mutually independent MPP trackers. By this, losses caused by inhomogeneous irradiation, partial shading and mismatch of the PV array can be minimized. Testing of such devices is a new challenge for testing institutes, because for the required measurements each MPP tracker must be connected to its own PV array simulator. In this project, a test stand suited for this purpose has been built. The core of this test stand is a multistring PV array simulator, which is able to simulate three mutually independent sub arrays. As commercially available PV array simulators did not have the desired qualities (voltage range and speed), the required simulator has been self-constructed. The outcome is a device with both very good thermal stability and outstanding dynamic characteristics. The test stand is not only adequate for realistic and reproducible measurements of PV inverters, but also as a research platform. As an example for the development of new PV inverters and charge controllers, locating of flaws in existing devices and the preparation of at this time non-existent test procedures for multistring PV inverters.

1. Zu diesem Bericht

In diesem Bericht werden die Entwicklung, der Aufbau und die Inbetriebnahme eines Prüfstands für Multistring-Solarwechselrichter im Rahmen eines Projektes mit dem Bundesamt für Energie (BFE) beschrieben. Ebenso werden die Resultate einer ersten Testmessung an einem Multistring-Solarwechselrichter präsentiert. Der Bericht setzt voraus, dass die Leserin oder der Leser mit den Grundlagen der Photovoltaik und der Elektrotechnik vertraut ist. Der Bericht geht teilweise stark ins Detail, etwa bei der Beschreibung der einzelnen Komponenten des realisierten Solargenerator-Simulators. Dabei ist es unumgänglich, dass zahlreiche Fachbegriffe und Abkürzungen verwendet werden, welche einigen Leserinnen und Lesern unbekannt sein dürften. Als Hilfe befindet sich am Ende dieses Berichts ein Glossar, in dem viele Begriffe kurz erklärt werden.

2. Ausgangslage

2.1. Multistring-Solarwechselrichter

Etwa seit 2010 gibt es auf dem Markt sogenannte Multistring-Solarwechselrichter. Im Leistungsbe-
reich ab ein paar Kilowatt bis ungefähr zwanzig Kilowatt sind solche Geräte mittlerweile Standard. Multistring-Solarwechselrichter zeichnen sich dadurch aus, dass sie über mehrere (meistens zwei oder drei) MPP-Tracker verfügen. Der Solargenerator wird dadurch in mehrere Teilgeneratoren aufgeteilt, von denen jeder separat getrackt wird. Auf diesem Weg können Verluste, wie sie durch inhomogene Bestrahlung des Solargenerators entstehen, deutlich minimiert werden. Dies kann etwa bei Photovoltaikanlagen mit Ost-West-Ausrichtung oder bei architektonisch anspruchsvollen Anlagen mit Teilbeschattungen den Energieertrag deutlich steigern und das Anlagendesign stark vereinfachen. Da aber grundsätzlich jede reale Photovoltaikanlage im Betrieb Temperaturunterschiede, Verschmutzungen und einen gewissen Mismatch aufweist, bringen Multistring-Solarwechselrichter prinzipiell immer einen Mehrertrag, sofern sich die Geräte diesen Vorteil nicht durch einen tiefen Wirkungsgrad zunichtemachen.

2.2. Prüfung von Solarwechselrichtern

An Wechselrichter für Photovoltaikanlagen werden viele technische Anforderungen gestellt. Dazu gehören solche, welche alle elektrischen Geräte betreffen (etwa die elektromagnetische Verträglichkeit EMV). Als selbständige Energieerzeugungsanlage am Elektrizitätsnetz muss ein Solarwechselrichter aber zusätzlich über Funktionen verfügen, welche laufend das Netz überwachen und bei einer Abweichung von gewissen Rahmenbedingungen (z.B. Netzfrequenz) das Gerät vom Netz trennen. Zu guter Letzt soll ein Wechselrichter über einen hohen Wirkungsgrad verfügen.

Lange Zeit gab es gerade für diesen letzten Punkt keine einheitlichen Prüfverfahren. Stattdessen war der Kunde auf oftmals mangelhaft spezifizierte Herstellerangaben angewiesen, was den Herstellern einen gewissen Spielraum gab, die technischen Daten ihrer Geräte zu beschönigen. So wurde beispielsweise oftmals nur der Spitzenwirkungsgrad eines Wechselrichters unter optimalen Betriebsbedingungen angegeben. Jedoch fanden sich in den Spezifikationen keine Angaben über die (oftmals starke) Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Leistung und der Arbeitsspannung. Die Güte des MPP-Trackings wurde lange Zeit überhaupt nicht spezifiziert und wurde oftmals als ideal angenommen. Das ist gerade bei älteren Geräten eine viel zu optimistische Einschätzung.

Dies änderte sich erst 2010, als mit der EN 50530 erstmals ein normativer Standard für die Messung des totalen Wirkungsgrads von Solarwechselrichtern veröffentlicht wurde [1]. Diese Europäische Norm gilt mit geringfügigen Anpassungen und Ergänzungen bis heute. Eine darauf basierende internationale Norm ist in Arbeit.

Die EN 50530 beschreibt Messprozeduren sowohl für den Umwandlungs- als auch für den Tracking-wirkungsgrad. Beide Größen werden zum totalen Wirkungsgrad zusammengefasst [2]. Ferner unterscheidet die Norm zwischen statischen und dynamischen Messungen. Bei statischen Messungen wird untersucht, wie sich der Wechselrichter an zeitinvarianten Kennlinien mit unterschiedlichen MPP-Leistungen verhält. Die Quintessenz davon ist der Europäische Wirkungsgrad (η_{EU}), ein gewichteter Mittelwert aus den einzelnen Wirkungsgradmessungen, welcher in guter Näherung dem durchschnittlichen Wirkungsgrad entspricht, welcher beim realen Betrieb des Gerätes in Mitteleuropa zu erwarten ist. Als Pendant dazu gibt es noch den Kalifornischen Wirkungsgrad (η_{CEC}), welcher für unsere Klimaregion jedoch nicht repräsentativ ist. Bei den dynamischen Messungen wird untersucht, wie gut der MPP-Tracker dem MPP folgen kann, wenn sich die Kennlinie infolge von Änderungen der Einstrahlung zeitlich ändert.

Für die Testprozeduren gibt die EN 50530 ein Kennlinienmodell vor, welches den Eigenschaften einer Silizium-Solarzelle mit einem Füllfaktor von 72% (bei STC) nachempfunden ist. Die MPP-Spannung beträgt dabei 80% von der Leerlaufspannung und der MPP-Strom 90% vom Kurzschlussstrom. Diese Werte sind verglichen mit den Werten von modernen Solarmodulen etwas zu tief. Auf die Testergebnisse wird dies aber in den meisten Fällen keinen nennenswerten Einfluss haben [3].

2.3. Einsatz von Simulatoren und mögliche Probleme

Da die Betriebsbedingungen beim Testen von Solarwechselrichtern genau vorgegeben sind und die Tests reproduzierbar sein müssen, ist die Prüfung an einem realen Solargenerator nicht möglich. Stattdessen müssen Simulatoren eingesetzt werden, welche die elektrischen Eigenschaften eines Solargenerators nachbilden und sich frei programmieren lassen – sogenannte Solargenerator-Simulatoren.

Der Bau von solchen Solargenerator-Simulatoren ist nicht ganz trivial. Zwar ist es mit heutigen programmierbaren Speisegeräten sehr einfach, die DC-Eigenschaften (d.h. die Kennlinie) eines Solargenerators nachzubilden. Dabei wird aber oft vergessen, dass für eine realitätsnahe Prüfumgebung auch die dynamischen Eigenschaften berücksichtigt werden müssen. Und genau an diesem Punkt scheitern viele kommerziell erhältliche Lösungen. Diese basieren normalerweise auf getakteten Speisegeräten, welche vom Prinzip her Einschwingzeiten von mehreren Millisekunden haben. Ein so träge reagierender Solargenerator-Simulator kann schnelle Änderungen des Arbeitspunkts nicht nachregeln. Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn auf der DC-Seite des Wechselrichters eine Komponente der Netzfrequenz auftritt, was bei vielen einphasigen Geräten der Fall ist [3]. Ein langsamer Simulator kann in diesem Fall den Oszillationen des Arbeitspunkts nicht folgen. Dies führt dazu, dass sich der Arbeitspunkt nicht mehr auf der eigentlichen DC-Kennlinie bewegt, sondern eine Ellipse um seinen Mittelwert beschreibt. Da die simulierte Kennlinie nichtlinear ist, entstehen so Intermodulationseffekte, welche bei der Messung des Trackingwirkungsgrads einen systematischen Messfehler verursachen. Dieser wird im schlimmsten Fall nicht einmal bemerkt. Abbildung 1 zeigt die Messung einer solchen Ellipse, welche im Betrieb mit einem langsamen, getakteten Solargenerator-Simulator entstanden ist.

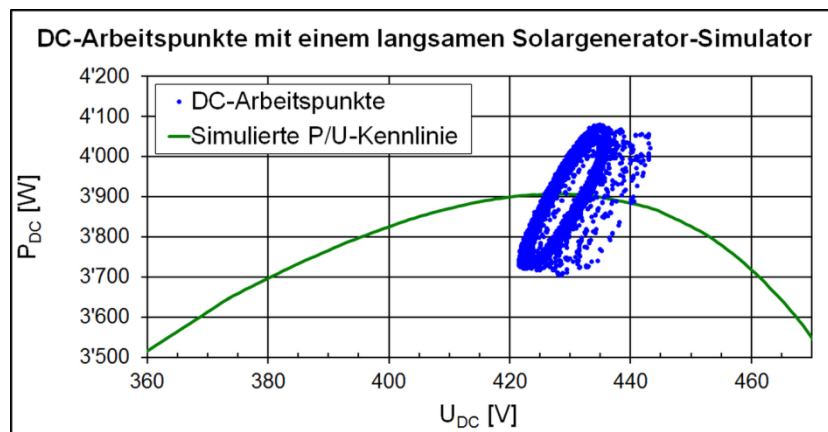


Abbildung 1: Ellipsenförmig verteilte Arbeitspunkte bei Einsatz eines langsamen Solargenerator-Simulators

Die Verwendung von getakteten Speisegeräten als Solargenerator-Simulatoren bringt aber auch andere Probleme mit sich. So erzeugt jedes dieser Geräte elektromagnetische Störungen. Dies ist insbesondere dann unerwünscht, wenn der Solargenerator-Simulator bei Messungen des EMV-Verhaltens des Prüflings eingesetzt werden soll. In solchen Fällen kann es vorkommen, dass der durch die Prüfgeräte verursachte Grundrauschpegel in derselben Größenordnung liegt wie die Störaussendungen des Prüflings oder diese sogar übertrifft. Dadurch können die Störaussendungen des Prüflings nicht mehr gemessen werden. Es ist natürlich möglich, die EMV-Störungen durch geeignete Filterschaltungen zu reduzieren. Da aber typischerweise ein grosser Teil dieser Störspannungen Gleichtaktstörungen sind, benötigt ein solches Filter Erdkapazitäten von üblicherweise mehreren Mikrofarad. Dies ist einerseits wieder ein unrealistisches Verhalten, denn ein realer Solargenerator hat eine viel kleinere Erdkapazität (typischerweise 1...10 nF/kWp). Andererseits können durch diese Erdkapazitäten Ableitströme entstehen, welche die Fehlerstrom-Schutzschaltung des Prüflings auslösen (eine solche ist bei traflosen Solarwechselrichtern Pflicht).

Die aufgeführten Probleme können vermieden werden, wenn anstelle eines getakteten Speisegeräts eine lineare Schaltung verwendet wird. Zwar haben auch solche Geräte deutlich höhere Einschwingzeiten als ein realer Solargenerator. Sie sind jedoch in der Regel schnell genug um den Arbeitspunktswankungen eines Wechselrichters zu folgen. Selbstverständlich haben auch solche Geräte ihre Nachteile, allen voran die hohe Verlustleistung, welche einen erheblichen Kühlaufwand mit sich bringt. Diese Probleme tangieren aber nicht die für die Prüfung von Solarwechselrichtern massgeblichen Anforderungen.

Nebst einer schnellen Regelgeschwindigkeit und einem guten EMV-Verhalten ist eine hohe Stabilität der simulierten Solarkennlinie die dritte wichtige Anforderung an einen Solargenerator-Simulator. Dies ist insbesondere bei der Messung des MPP-Trackingwirkungsgrads elementar. Bei dieser Messung wird untersucht, wieviel von einer angebotenen DC-Leistung vom Prüfling bezogen wurde oder anders ausgedrückt, wie gut der Prüfling den MPP findet. Dafür muss aber der Wert der angebotenen DC-

Leistung während der Messperiode ganz genau bekannt sein. Das ist nur möglich, wenn der Simulator, welcher ebendiese Leistung anbietet, absolut stabil ist. Da moderne Solarwechselrichter Trackingwirkungsgrade von über 99% erreichen, würde schon eine Drift der MPP-Leistung von einem Prozent einen inakzeptablen Messfehler nach sich ziehen. Ein guter Solargenerator-Simulator sollte eine Drift von weniger als einem Promille aufweisen.

2.4. Test von Multistring-Solarwechselrichtern

Das Testen von Multistring-Solarwechselrichtern stellt Prüfinstitute vor neue Herausforderungen, denn die vorhandene Infrastruktur reicht dafür oftmals nicht aus. Um einen Multistring-Solarwechselrichter korrekt zu messen, muss an jeden MPP-Tracker ein eigener Solargenerator-Simulator angeschlossen werden. Die einzelnen Simulatoren müssen gegenseitig und gegen Erde elektrisch isoliert sein. Für Messungen des Wirkungsgrads muss gleichzeitig die Leistung an jedem MPP-Tracker sowie an den AC-Anschlüssen gemessen werden. So werden beispielsweise für die Messung eines dreiphasigen Wechselrichters mit drei MPP-Trackern sechs Wattmeter-Kanäle benötigt. Handelsübliche Präzisionswattmeter haben oft nur zwei bis vier Kanäle. Somit müssen zwei bis drei Wattmeter gleichzeitig verwendet werden. Die Messintervalle dieser Geräte müssen exakt synchronisiert werden, da ansonsten ein systematischer Messfehler entsteht.

Ein weiteres Problem, dem sich Prüfinstitute für Multistring-Solarwechselrichter stellen müssen, sind mangelnde normative Grundlagen für diese Messungen. Auch wenn es nicht explizit erwähnt ist, so geht doch aus dem Kontext der EN 50530 klar hervor, dass diese Norm ausschliesslich für Wechselrichter mit nur einem MPP-Tracker gedacht ist. Dies ist auch plausibel, denn bei der Erscheinung der Norm waren Multistring-Solarwechselrichter noch eine Ausnahmeerscheinung. Es stellt sich nun die Frage, welche Testprofile sinnvollerweise bei Multistring-Solarwechselrichtern verwendet werden, insbesondere bei dynamischen Messungen. Im einfachsten Fall werden die Testprofile aus der EN 50530 sinngemäss übernommen und an allen MPP-Trackern gleichzeitig angewendet. Dies widerspiegelt aber nicht den eigentlichen Sinn eines Multistring-Solarwechselrichters. Dieser soll ja gerade bei heterogenen Eingangsbedingungen einen Gewinn bringen. Deshalb ist es sinnvoll, auch solche Fälle durch die Tests abzudecken. Denkbar wären beispielsweise Rampentests wie sie in der EN 50530 beschrieben sind, jedoch mit zeitlich versetzten Rampen an jedem MPP-Tracker. Damit das möglich ist, müssen die Testprofile der einzelnen Solargenerator-Simulatoren individuell festgelegt, untereinander jedoch zeitlich genau synchronisiert werden können.

2.5. Wechselrichtertests an der BFH-TI

Das Photovoltaiklabor der Berner Fachhochschule (im Folgenden „PV-Labor“ genannt) führt seit 1989 Messungen an Solarwechselrichtern durch. 1994 konnte das Gebäude "Tergarten" in Burgdorf bezogen werden. Dieses verfügt über eine eigene 60 kWp Test-Photovoltaikanlage auf dem Dach, deren Module mit wenig Aufwand weitgehend frei verschaltet werden können. Dadurch hat diese Testanlage die zum Test von Solarwechselrichtern notwendige Flexibilität. Da sich aber reale Solargeneratoren aus bereits genannten Gründen nur eingeschränkt für Wechselrichtertests eignen, wurde gegen Ende der Neunzigerjahre einer der ersten kommerziell erhältlichen Solargenerator-Simulatoren beschafft. Dieser war aber aufgrund seiner schlechten elektrischen Eigenschaften für Wechselrichtertests unbrauchbar. Da auf dem Markt keine vernünftigen Alternativprodukte gefunden wurden, entschied man sich, selber einen linearen Solargenerator-Simulator mit einer Nennleistung von 25 kW zu entwickeln und zu bauen. Ein Grossteil der dafür benötigten Arbeiten konnte im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten von Studenten ausgeführt werden. Dieser erste Solargenerator-Simulator Marke Eigenbau wurde 1999 in Betrieb genommen. Aufgrund der guten Erfahrungen mit dem Gerät entschied man sich, einen zweiten linearen Simulator von 20 kW Leistung und verbesserten Eigenschaften (höherer Spannungsbereich, kleinere Ausgangskapazität) zu bauen. Dieser zweite Simulator wurde 2001 in Betrieb genommen. Mit diesen zwei Geräten wurden zahlreiche Wechselrichtertests durchgeführt. Dazu gehören Messkampagnen im Rahmen von Forschungsprojekten mit dem BFE, aber auch viele Auftragsmessungen für die Industrie.

Da die Solarwechselrichter immer leistungsfähiger wurden, stieg auch der Bedarf an einem leistungsfähigeren Simulator. So wurde 2009 der dritte Solargenerator-Simulator mit einer Leistung von 100 kW in Betrieb genommen. Dieser wurde wiederum im Eigenbau gefertigt und basiert auf der Technologie des 20 kW Gerätes. Abbildung 2 zeigt den 100 kW Solargenerator-Simulator im Testbetrieb. Rechts daneben befindet sich ein Solarwechselrichter mit einer Nennleistung von ebenfalls 100 kW, welcher in diesem Test als Prüfling diente. Man erhoffte sich, mit dem 100 kW Solargenerator-Simulator zahlreiche Messungen an kleinen bis mittleren Zentralwechselrichtern durchführen zu können, wie dies mit den vorhergehenden Simulatoren bei Stringwechselrichtern der Fall war. Der Markt entwickelte sich jedoch anders.



Abbildung 2: 100 kW Solargenerator-Simulator mit Prüfling

Die Grosszahl der heutigen Solarwechselrichter lässt sich grob in drei Leistungskategorien unterteilen: die Mikrowechselrichter mit einer Leistung von ein paar Hundert Watt, die Kleinwechselrichter, welche bis zu etwa 30 kW erhältlich sind und die Zentralwechselrichter, welche heute ab etwa 200 kW verfügbar sind. Das Marktsegment zwischen 30 kW und 200 kW existiert praktisch nicht mehr. Anlagen dieser Grösse werden heute vornehmlich mit einer Vielzahl von Kleinwechselrichtern realisiert. Aufgrund dessen konnte der 100 kW Solargenerator-Simulator nur selten für Prüfungen eingesetzt werden, welche seinen Leistungsbereich auch wirklich ausgeschöpft haben. Dazu kam die Markteinführung der Multistring-Solarwechselrichter, welche mit der bestehenden Testinfrastruktur nicht oder nur unter grossem Aufwand geprüft werden konnten. Aus diesen Gründen ist das Wechselrichter-Testgeschäft am Photovoltaiklabor der BFH seit 2009 stark eingebrochen. Dieses wird nun durch die laufende Akkreditierung der bestehenden Testplätze sowie den Aufbau des Multistring-Prüfstandes, welcher in diesem Bericht beschrieben wird, wieder neu belebt werden.

Nebst dem Testen von Solarwechselrichtern wurden und werden die Solargenerator-Simulatoren der BFH für eine Vielzahl von anderen Aufgaben eingesetzt. So wurden beispielsweise auch verschiedene Solarladeregler und weitere Komponenten von Photovoltaikanlagen getestet. Die Geräte haben sich aber auch bei Forschungs- und Entwicklungsprojekten bewährt. Dies sowohl im Rahmen des Bachelorstudiums in Elektro- und Kommunikationstechnik als auch in mehreren Projekten zusammen mit der Industrie (u.a. via KTI). So zum Beispiel für die Entwicklung von Lichtbogendetektoren oder von Komponenten zur elektromagnetischen Verträglichkeit von Photovoltaikanlagen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse haben nicht nur Einzug in kommerzielle Produkte, sondern auch in Normen für Solarwechselrichter erhalten (vor allem EN 50530, VDE-AR-N 4105). Nicht zuletzt basieren viele wissenschaftliche Publikationen (über 100 seit 2001) des Photovoltaiklabors der BFH-TI auf Versuchen und Messungen, für welche die Solargenerator-Simulatoren mehr oder weniger direkt eingesetzt wurden.

2.6. Evaluation eines geeigneten Multistring-Simulators

Da auf dem Markt mittlerweile einige Produkte für die Simulation von Solargeneratoren angeboten werden, wurde im Vorfeld dieses Projekts evaluiert, ob es ein Gerät gibt, welches unsere hohen Qualitäts- und Leistungsanforderungen erfüllt. Damit hätte auf einen Eigenbau des Multistring-Simulators verzichtet werden können, was das Projekt stark vereinfacht hätte. Dazu wurden die technischen Daten der verfügbaren Geräte verglichen. In zwei interessanten Fällen konnten Testgeräte ausgeliehen und gemessen werden. Die Evaluation ergab jedoch, dass die gesetzten Anforderungen punkto Spannungsbereich, Regelgeschwindigkeit und EMV-Verhalten von keinem der verglichenen Produkte erreicht werden. Somit wurde entschieden, den Multistring-Simulator im Eigenbau zu fertigen. Dazu wurde auf die Erfahrung der früheren Simulatoren der BFH zurückgegriffen. Der Multistring-Simulator enthält jedoch auch viele Neuerungen, welche ihn gegenüber den früher an der BFH entwickelten Simulatoren abheben.

3. Ziel der Arbeit

3.1. Beschreibung der Projektziele

Die Ziele dieses Projekts sind Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme eines Prüfstands für Multistring-Solarwechselrichter. Das Herzstück dieses Prüfstandes ist ein leistungsfähiger, linearer Solargenerator-Simulator, welcher drei voneinander unabhängige Teilgeneratoren simulieren kann. Ferner gehören zum Prüfstand ein AC-Anschluss zur Einspeisung der durch den Wechselrichter erzeugten AC-Leistung, ein Steuercomputer mit der Steuersoftware für die Simulatoren sowie die für die Wirkungsgradmessungen benötigten Präzisionswattmeter. Für den Simulator wird ausserdem ein leistungsfähiges Kühlsystem benötigt. Der eingesetzte Solargenerator-Simulator ist vollumfänglich im Rahmen dieses Projekts entstanden.

3.2. Angestrebte technische Daten

Technische Daten der Teilsimulatoren

Leerlaufspannung U_{OC}	0...1000 V
Kurzschlussstrom I_{SC}	0...16 A
MPP-Leistung P_{MPP}	0...11.52 kW @ FF = 72% (gem. EN 50530)
	0...13.6 kW @ FF = 85% (nicht normiert)
Drift der MPP-Leistung	≤ 1 ‰ nach Warmlauf
Ausregelzeit nach Lastsprung	≤ 100 μ s
Erdkapazität	≤ 100 nF
Anzahl programmierter Kennlinien	65'536 pro Speichermodul (austauschbar)

Technische Daten des Prüfstands

Anzahl Teilsimulatoren	3 erweiterbar auf 8
AC-Anschlussleistung	≥ 69 kVA
Kühlleistung	12 kW Dauerbetrieb
	48 kW während 10 Sekunden

3.3. Verwendung des Multistring-Prüfstands

Der Prüfstand für Multistring-Solarwechselrichter soll primär als Testplattform für bestehende und neue Multistring-Solarwechselrichter zur Verfügung stehen. Die Prüfung von Singlestring-Solarwechselrichtern im Leistungsbereich bis etwa 10 kW an nur einem der drei Teilsimulatoren ist natürlich auch möglich. Aufgrund des höheren Spannungsbereichs und der schnelleren Regelgeschwindigkeit wird der Multistring-Simulator den bestehenden Solargenerator-Simulatoren der BFH in diesem Bereich teilweise sogar überlegen sein. Das Testen von Solarwechselrichtern soll einerseits als Dienstleistung für die Industrie erfolgen. Andererseits ist geplant, wie in der Vergangenheit im Rahmen von Forschungsprojekten Messkampagnen an marktüblichen Geräten durchzuführen.

Derzeit läuft am Photovoltaiklabor der BFH-TI die Akkreditierung des 100 kW Solarwechselrichter-Testplatzes. Sobald diese abgeschlossen ist, soll die Akkreditierung auf den Prüfstand für Multistring-Solarwechselrichter ausgeweitet werden. Das Photovoltaiklabor der BFH-TI wird dadurch zum einzigen akkreditierten und unabhängigen Prüfinstitut sowohl für Single- als auch für Multistring-Solarwechselrichter in der Schweiz und einem von höchstens einer Handvoll solcher Institute in Europa.

Im Bereich der Forschung und Entwicklung stellt der Multistring-Prüfstand eine flexible und qualitativ hochstehende Plattform mit einer Vielzahl von Verwendungsmöglichkeiten dar. So ist der Prüfstand im Entwicklungsprozess von neuen Solarwechselrichtern und weiteren Komponenten eine grosse Hilfe. Das Photovoltaiklabor der BFH-TI beteiligt sich an solchen Prozessen beispielsweise im Rahmen von KTI-Projekten. Damit kann die Schweizer Industrie direkt von dieser Infrastruktur profitieren. Und natürlich werden auch die Arbeiten mit dem Multistring-Prüfstand, wie schon die Arbeiten mit den bestehenden Simulatoren, neue Erkenntnisse liefern, welche in Form von wissenschaftlichen Publikationen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Nicht zuletzt aufgrund der einzigartigen Infrastruktur des Photovoltaiklabors der BFH-TI haben in der Vergangenheit verschiedene namhafte Prüfinstitute (z.B. TÜV Rheinland, Fraunhofer ISE) die Zusammenarbeit mit uns gesucht. Durch den Multistring-Prüfstand befindet sich diese Infrastruktur wieder auf dem neusten Stand der Technik. Infolgedessen sollen diese Zusammenarbeiten, national und international, wiederaufgenommen, weitergeführt und vertieft werden.

4. Vorgehen / Methode

Die Hauptkomponente des Multistring-Prüfstands ist der Solargenerator-Simulator, welcher im Rahmen dieses Projekts komplett entwickelt und gebaut wurde. Dieser besteht aus drei Teilsimulatoren wovon jeder wiederum aus drei Schlüsselkomponenten besteht:

- Einer linearen, steuerbaren Stromquelle (1'000V / 16A)
- Einer digitalen Kennlinienerzeugung (DKE) und Regelung
- Einer Steuerschaltung

Daneben bestehen die Teilsimulatoren aus zahlreichen Nebenkomponten, beispielsweise für Schutzfunktionen. Die Stromquelle und die DKE sind äusserst kritische Komponenten, welche die Eigenschaften des Simulators direkt beeinflussen. Um die angestrebten technischen Daten zu erreichen mussten für diese Komponenten Bauelemente der neusten Generation verwendet werden. Die Entwicklung dieser Schaltungsteile umfasste mehrere hundert Arbeitsstunden. Sie befinden nahe an der Grenze des technisch Machbaren. Bei der Steuerschaltung handelt es sich um eine Mikrocontrollerschaltung, welche sämtliche Steuerfunktionen sowie die Kommunikation mit dem Steuer-PC übernimmt. Abbildung 3 zeigt das vereinfachte Prinzip-Schema eines Teilsimulators. In Abbildung 4 ist der erste der drei Teilsimulatoren in der Bauphase zu sehen.

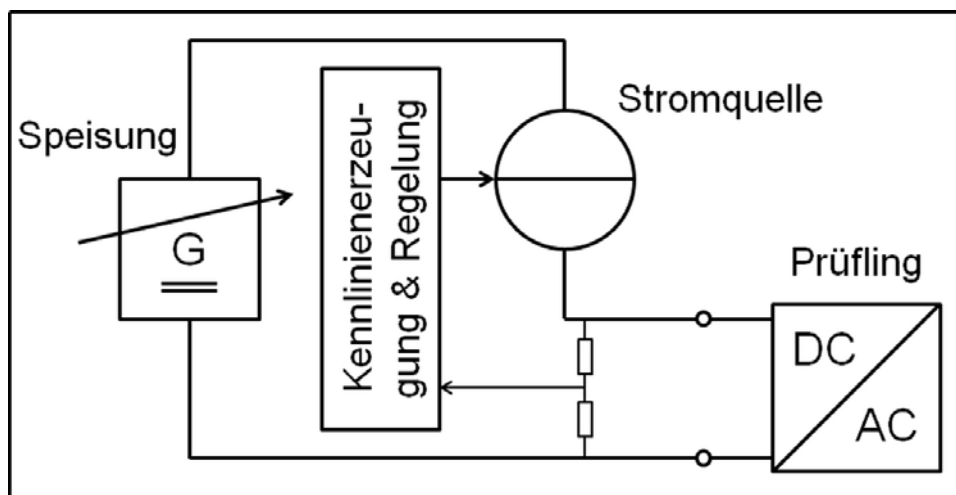


Abbildung 3: Prinzip-Schema eines Teilsimulators



Abbildung 4: Prototyp eines Teilsimulators im Bau

Nebst dem Solargenerator-Simulator benötigt der Prüfstand einen leistungsfähigen AC-Anschluss, welcher sowohl für die Speisung der Simulatoren als auch als Einspeisepunkt für die von den Prüflingen erzeugte AC-Leistung dient. Ausserdem musste ein Kühlsystem aufgebaut werden, welches die Flüssigkeitskühlkörper der Stromquellen mit ausreichend Kühlflüssigkeit versorgt.

4.1. Entwicklung der linearen Stromquelle

Die lineare, steuerbare Stromquelle ist das Herzstück eines Teilsimulators. Sie muss in der Lage sein, bei hohem Spannungsabfall einen Strom von 16A zu liefern. Dies bewirkt eine grosse Verlustleistung und damit einhergehend eine grosse Wärmeenerzeugung. Dabei soll der programmierte Strom möglichst konstant und schnell regelbar sein. Diese extremen Anforderungen können nach unserem Wissensstand nur durch die Verwendung von Linear-MOSFET erreicht werden. Diese Bauelemente, deren Angebot bei den geforderten Parametern auf dem Markt äusserst begrenzt ist, haben seit dem Bau des ersten Solargenerator-Simulators an der BFH-TI eine grosse Entwicklung durchgemacht, insbesondere was die Spannungsfestigkeit betrifft. So war der Spannungsbereich unseres ersten Solargenerator-Simulators von 25 kW noch auf 750 V begrenzt. Die drauf folgenden Simulatoren von 20 kW und 100 kW erreichten dank neuer Halbleiter bereits 810 V. Für den Multistring-Simulator war schliesslich ein Linear-MOSFET verfügbar, der einen Spannungsbereich von bis zu 1000 V erlaubt. Ein wichtiges Kriterium für einen Linear-MOSFET ist die Safe Operating Area (SOA). Diese gibt den Strom-Spannungs-Bereich wieder, in dem das Bauteil bei einer gegebenen Gehäusetemperatur ohne Beschädigung betrieben werden kann. Abbildung 5 zeigt die SOA der Linear-MOSFET (1000 V / 18 A), welche in den Solargeneratoren von 20 kW und 100 kW eingesetzt wurden sowie die SOA der Linear-MOSFET (1500 V / 7.5 A), welche im Multistring-Simulator zum Einsatz kommen. Das Diagramm zeigt, dass die Nennspannung trügerisch sein kann, denn das Bauteil kann bei dieser nur noch einen kleinen Bruchteil seines Nennstromes leiten. So kommt es auch, dass der 1500 V MOSFET ab einer Drain-Source-Spannung von etwa 70 V mehr Strom leiten kann als der 1000 V MOSFET, obschon letzterer einen mehr als doppelt so hohen Nennstrom hat. Bei den Simulatoren von 20 kW und 100 kW wurden die Stromquellen so dimensioniert, dass die Linear-MOSFET mit einem Strom von maximal 1 A betrieben wurden. Damit wäre theoretisch ein Spannungsabfall etwa 360V tolerierbar. Im Betrieb ist dieser Wert aufgrund der höheren Gehäusetemperatur deutlich kleiner. Damit die Halbleiter auch bei hohen Spannungen nicht zerstört werden, sind diese Simulatoren mit einer Schaltung ausgestattet, welche den maximalen Strom pro MOSFET ab einer gewissen Spannung reduziert haben (Current-Fold-Back-Methode). Dies hat jedoch den Nachteil, dass die simulierte Kennlinie bei hohen Spannungsabfällen über der Stromquelle abgeschnitten wird. Dies ist dann der Fall, wenn der Arbeitspunkt auf der Kennlinie in die Nähe des Kurzschlusses kommt. Da ein Wechselrichter üblicherweise im Bereich des MPP arbeitet, hat dies auf die Messungen in der Regel keinen Einfluss.

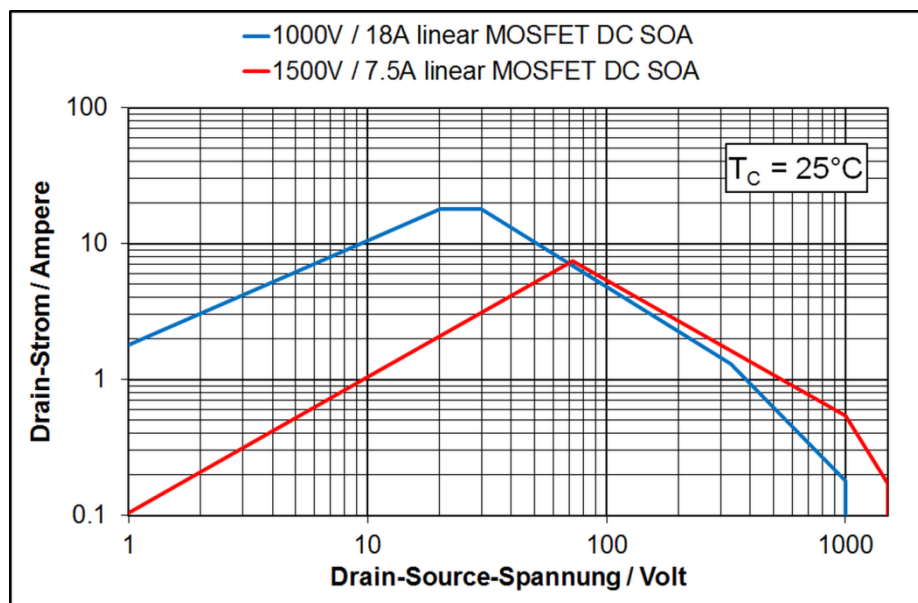


Abbildung 5: SOA von zwei Linear-MOSFET

Beim Multistring-Simulator wurde ein anderer Weg gewählt. Der Maximalstrom pro MOSFET wurde auf 250mA festgelegt. Für den gleichen Strom werden also viermal mehr Transistoren benötigt. Dieser Strom kann aber, sofern die Kühlung ausreichend ist, auch beim vollen Spannungsabfall von 1000 V noch bezogen werden. Die bei älteren Simulatoren vorhandene Strombegrenzung wird dadurch unnötig. Es ist jedoch zu beachten, dass dadurch pro MOSFET eine Verlustleistung von bis zu 250 W auftreten kann. Bezogen auf die für die Wärmeabfuhr verwendete Bodenplatte des Bauteils ergibt das eine Leistungsdichte von über 26 W/cm². Das ist etwa das sechs- bis siebenfache der Leistungsdichte einer Herdplatte. Aufgrund dieser hohen, räumlich stark konzentrierten Verlustleistung wurde beschlossen, die Abwärme der Stromquelle mit einer Flüssigkeitskühlung abzuführen. Zunächst wurde recherchiert, ob auf dem Markt ein geeigneter Flüssigkeitskühlkörper erhältlich ist. Die wenigen gefundenen Produkte waren aber entweder aufgrund der Abmessungen oder der Kühlleistung ungeeignet.

net oder waren nur zu horrenden Preisen erhältlich. Deshalb wurde beschlossen, den benötigten Kühlkörper selbst zu konstruieren und zu fertigen. Die Fertigung war dank der gut ausgerüsteten Werkstatt (CNC-Fräsen) der Abteilung für Maschinentechnik der BFH erfreulich einfach und kostengünstig. Abbildung 6 zeigt einen der so gefertigten Flüssigkeitskühlkörper. Auf jeden dieser Kühlkörper werden acht Linear-MOSFET montiert. Die Stromquelle eines Teilsimulators enthält acht solche Kühlkörper mit insgesamt 64 MOSFET.



Abbildung 6: Flüssigkeitskühlkörper (zerlegt)

Der Strom von jedem Linear-MOSFET wird durch einen eigenen Präzisions-Operationsverstärker geregelt. Das Problem dabei ist aber, dass die MOSFET eine verhältnismässig grosse Eingangskapazität haben, welche obendrein einem starken Miller-Effekt unterliegt. Da die Operationsverstärker eine solche Last nicht genügend schnell treiben können, wird als Treiber zusätzlich ein Kleinspannungs-MOSFET mit sehr kleiner Eingangskapazität eingesetzt. Der Strom von jedem MOSFET wird mit einem Shuntwiderstand von $1\ \Omega$ gemessen. Dieses Signal dient als Istwert für die Stromregelung. Die Temperaturdrift dieser Shuntwiderstände wirkt sich direkt auf die thermische Stabilität der Stromquelle und damit auf die Stabilität und Genauigkeit der simulierten Solarkennlinie aus. Deshalb wurden diese Widerstände sorgfältig ausgewählt. Die eingesetzten Shuntwiderstände haben einen Temperaturkoeffizienten von unter $50\ \text{ppm/K}$. Zudem werden die Widerstände mit maximal 5% ihrer Nennleistung betrieben, wodurch die Eigenerwärmung minimiert wird. Ferner wurde beim Design darauf geachtet, dass die Shunts thermisch gut von den Leistungshalbleitern entkoppelt sind, so dass sie auch nicht fremderwärmt werden.

Ein Problem der eingesetzten Linear-MOSFET ist ihre hohe Verstärkung in einem weiten Frequenzbereich. Aus Erfahrungen mit den früheren Simulatoren war klar, dass die Stromquelle durch ein RC-Glied gedämpft werden muss. Wird dies unterlassen, können die MOSFET durch Resonanzeffekte aufgrund der Induktivität der Anschlussleitungen zum Schwingen angeregt werden (es bildet sich ein parasitärer Colpitts-Oszillator). Bei einem ersten Prototyp wurde daher pro acht MOSFET ein RC-Glied auf der Printplatte vorgesehen. Es zeigte sich jedoch, dass schon die Induktivitäten der Leiterbahnen zwischen den MOSFET und dem RC-Glied gross genug waren, um die Stromquelle zum Schwingen zu bringen. Deshalb wurde in der Nachfolgeversion zusätzlich direkt bei jedem MOSFET ein kleines RC-Glied angebracht. Dies hat die Entwicklung der Stromquelle verzögert. Die entstandene Schaltung erfüllt die extremen Anforderungen jedoch voll und ganz.

4.2. Entwicklung der digitalen Kennlinienerzeugung und Regelung

Die zweite Schlüsselkomponente der Teilsimulatoren ist die digitale Kennlinienerzeugung (DKE). Diese Schaltung hat die Aufgabe, den Sollwert der Stromquelle in Abhängigkeit der Ausgangsspannung des Simulators zu steuern, so dass die gewünschte Kennlinie entsteht. Abbildung 7 zeigt schematisch die Funktionsweise der DKE.

Die Kennlinien werden offline berechnet und im Kennlinienspeicher abgelegt. Es handelt sich dabei um ein austauschbares Speichermodul, welches Platz für $65'536$ Kennlinien bietet. Pro Kennlinie werden 1024 Stützstellen mit einer Auflösung von 16 Bit abgespeichert. Werte zwischen den Stützstellen werden linear interpoliert. Die Kennlinien sind auf den Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung normiert und werden je nach Bedarf skaliert.

Für die Berechnung wird zunächst die Ausgangsspannung des Simulators mit einem Spannungsteiler ($1/500$) gemessen und mit einem AD-Wandler (16 Bit / 3 MSPS) digitalisiert. Dieser Wert wird mit dem Kehrwert der gewünschten Leerlaufspannung multipliziert. Dadurch wird die gemessene Spannung normiert. Durch einen Table-Look-Up im Kennlinienspeicher wird der zur Spannung passende, normierte Stromwert bestimmt und interpoliert. Dieser Wert wird durch Multiplikation mit dem gewünschten Kurzschlussstrom denormiert. Das Resultat der Multiplikation wird mit einem DA-Wandler (16 Bit / 3 MSPS) zu einem Spannungssignal gewandelt, welches als Sollwert für die Stromquelle dient. Diese Beschreibung ist stark vereinfacht. In der realen Schaltung müssen bei den Faktoren für die Span-

nungs- und Stromskalierung die Verstärkungen der einzelnen Schaltungsteile mit einberechnet werden. Ausserdem erfolgen die Berechnungen mit Fractional-Arithmetik. Deshalb müssen die Skalierungsfaktoren auf die richtigen Fractional-Formate gebracht werden. Die Berechnungen erfolgen in einem FPGA innerhalb von einem Abtastzyklus (333 ns).

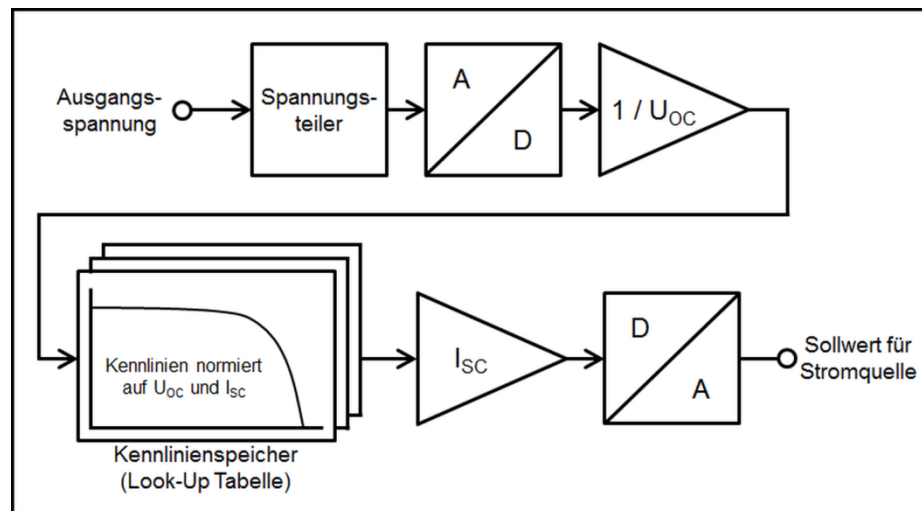


Abbildung 7: Blockschaltbild der digitalen Kennlinienerzeugung (ohne Regler)

Für den Betrieb wird die DKE mit den Skalierungsfaktoren für Spannung und Strom sowie der gewünschten Kennliniennummer konfiguriert. Bei dynamischen Testmustern ist es aber notwendig, dass sich die Kennlinie in Funktion der Zeit ändert. Um dies zu erreichen, werden der DKE im Betrieb laufend neue Kennliniennummern übermittelt. Es wird also von Kennlinie zu Kennlinie gesprungen. Da die Anzahl der speicherbaren Kennlinien sehr gross ist, können die Kennlinien dicht gestaffelt werden. Dadurch werden die Sprünge sehr klein. Wenn im Speichermodul beispielsweise Kennlinien bei einer simulierten Einstrahlung von 0...1000 W/m² abgelegt sind, so entspricht der Sprung zweier aufeinanderfolgenden Kennlinien einer Einstrahlungsänderung von nur rund 15.3 mW/m² oder relativ ausgedrückt 15.3 ppm vom Maximalwert. Wird mit diesem Speichermodul nun eine sich zeitlich ändernde Einstrahlung simuliert, kann dies messtechnisch nicht von einem kontinuierlichen Verlauf unterschieden werden.

DKE, Stromquelle und angeschlossene Last bilden einen Regelkreis. Der regeltechnisch kritischste Fall (d.h. die höchste Kreisverstärkung) liegt dann vor, wenn keine Last angeschlossen ist, sich der Simulator also im Leerlauf befindet. Die Kreisverstärkung ist dann nebst konstanten Faktoren linear abhängig von der Steilheit der Kennlinie bei der Leerlaufspannung, dem Kurzschlussstrom sowie dem Kehrwert der Leerlaufspannung. Diese Werte sind variabel. Bei tiefer Leerlaufspannung und hohem Kurzschlussstrom kann es vorkommen, dass die Kreisverstärkung zu hoch ist und der Regelkreis ins Schwingen kommt. Deshalb enthält die FPGA-Schaltung nebst den bereits genannten Komponenten einen konfigurierbaren Regler, welcher durch ein IIR-Filter erster Ordnung realisiert ist. Dieser hat bei tiefen Frequenzen die Verstärkung eins und bei hohen Frequenzen eine einstellbare Dämpfung. Um ein optimales Regelverhalten zu erreichen, müssen die Parameter dieses Reglers der jeweiligen Konfiguration angepasst werden. Bei optimalen Regelparametern ist die Regelung stabil und die Transitfrequenz beträgt ungefähr 60 kHz. Dieser sehr gute Wert ist nur deshalb möglich, weil die DKE eine sehr kleine Totzeit in den Regelkreis einbaut. Dies wiederum wird durch die hohe Abtastrate und die sehr schnellen Berechnungen erreicht.

Wie schon bei der Stromquelle gab es bei der DKE einige kritische Komponenten, welche einen grossen Entwicklungsaufwand nach sich zogen. So war schon die Dimensionierung des Spannungsteilers äusserst anspruchsvoll. Ähnlich wie die Messshunts der Stromquelle beeinflusst dieser direkt die Stabilität der generierten Kennlinie. Deshalb musste auch beim Spannungsteiler auf eine möglichst kleine thermische Drift geachtet werden. Das Problem hier ist vor allem die Eigenerwärmung bei hohen Spannungen. Diese kann reduziert werden, indem der Spannungsteiler hochohmig ausgelegt wird. Ist der Spannungsteiler aber hochohmig, so sind parasitäre Kapazitäten nicht mehr vernachlässigbar und beeinflussen den Frequenzgang massiv. Ausserdem können sich kapazitiv gekoppelte Störungen einkoppeln, welche ein grosses Messrauschen zur Folge haben. Um dies zu verhindern, wurde ein abgeschirmter Spannungsteiler entwickelt, welcher aus einer Serie- und Parallelschaltung von 64 Einzelwiderständen mit hoher thermischer Stabilität (< 25 ppm/K) besteht. Um den Einfluss parasitärer Kapazitäten zu minimieren, wird der Spannungsteiler mit Parallelkondensatoren kompensiert. Der Spannungsteiler hat einen Gesamtwiderstand von 1 MΩ. Bei 1'000 V ergibt das eine Verlustleistung von einem Watt. Die Eigenerwärmung der Widerstände wird mit einem Kühlkörper minimiert, welcher gegenüber den Widerständen für den Betrieb mit 1'000 V isoliert ist.

4.3. Funktionen der Steuerschaltung

Die Steuerschaltung muss diverse Funktionen erfüllen, von denen die wichtigsten im Folgenden aufgelistet sind:

- Kommunikation mit dem Steuer-PC (über RS-485)
- Konfiguration der DKE (Programmieren von U_{OC} und I_{SC})
- Abarbeitung von programmierten Testprofilen (richtige Kennliniennummer an die DKE senden), zeitlich synchron mit den anderen Teilsimulatoren.
- Überwachung der Kühlkörpertemperatur der Stromquelle (Abfrage von Thermostaten)
- Überwachung des Not-Aus-Kreises
- Überwachung der elektrischen Grenzwerte der Stromquelle
- Anzeige von Spannung und Strom des Teilsimulators.

Die Steuerschaltung basiert auf einem leistungsfähigen 32-Bit Mikrocontroller. Dieser wird durch die aktuell verwendete Software nur teilweise ausgelastet, so dass genug Rechenleistung für zukünftige Erweiterungen vorhanden ist.

4.4. Aufbau des Kühlsystems

Wie unter den technischen Daten aufgeführt, soll das Kühlsystem, welches die Flüssigkeitskühlkörper der Stromquellen mit Kühlflüssigkeit versorgt, im Dauerbetrieb eine Verlustleistung von 12 kW abführen können. Während zehn Sekunden soll die maximal mögliche Verlustleistung von 48 kW abgeführt werden können. Das ist dann der Fall, wenn alle drei Teilsimulatoren bei der maximalen Eingangsspannung von 1000 V und dem maximalen Kurzschlussstrom von 16 A kurzgeschlossen werden. Es ist zu beachten, dass 48 kW ungefähr der Heizleistung eines Gebäudes mit sechs bis acht Wohnungen entsprechen.

Unter Nennlast kann sich die Sperrschicht der eingesetzten Linear-MOSFET gegenüber der Oberfläche des Kühlkörpers auf dem sie montiert sind um 75 °C erwärmen. Bei einer von uns festgelegten maximalen Sperrschichttemperatur von 120 °C (der Grenzwert beträgt 150 °C) darf die Oberfläche des Kühlkörpers somit höchstens 45 °C erreichen. Dies gilt bei optimaler Montage der MOSFET auf dem Kühlkörper mit Wärmeleitpaste. Um diese Temperatur zu garantieren, muss die Vorlauftemperatur der Kühlflüssigkeit noch einmal deutlich tiefer sein. Damit ist die Temperaturdifferenz zwischen der Kühlflüssigkeit und der Umgebung so gering, dass eine passive Kühlung nicht mehr möglich ist. Deshalb muss die Kühlflüssigkeit mit einer Kältemaschine aktiv heruntergekühlt werden. Dabei entsteht die Gefahr, dass die Temperatur so tief ist, dass sich an den Leitungen und den Kühlkörpern Kondenswasser bildet. Dies wäre in einem Gerät das mit 1000 V Spannung arbeitet äusserst gefährlich. Je nach Raumklima beträgt die optimale Temperatur der Kühlflüssigkeit daher etwa 17 °C.

Es wäre wenig sinnvoll, die Kältemaschine für die Spitzenleistung zu dimensionieren. Stattdessen wurde das Kühlsystem des Multistring-Prüfstands so ausgelegt, dass die Kältemaschine etwas mehr Kühlleistung hat, als dies für den Dauerbetrieb notwendig ist. Um die Lastspitzen abfangen zu können, befindet sich zwischen der Kältemaschine und den Teilsimulatoren ein Pufferspeicher. Da der Kompressor der Kältemaschine nicht beliebig oft geschaltet werden darf und die Temperatur der Kühlflüssigkeit möglichst konstant sein soll, muss dieser Pufferspeicher eine erhebliche Grösse haben, im vorliegenden Fall 1 m³. Eine Besonderheit des Pufferspeichers ist, dass sein Inhalt möglichst homogen durchmischt sein muss. In den meisten Fällen will man in einem Speicher eine gute Wärmeschichtung erreichen. Dies wäre in unserem Fall ungünstig, da die Flüssigkeitstemperatur im Vorlauf der Teilsimulatoren möglichst konstant sein soll, was bei Erreichen der Schichtgrenze nicht der Fall wäre. Die homogene Durchmischung wird erreicht, indem die Flüssigkeitsströme radial in den Pufferspeicher geleitet werden, wodurch eine Zirkulation entsteht. Zudem wird entgegen der Thermik gearbeitet; das Kaltwasser wird oben, das Warmwasser unten in den Speicher geleitet. Während der Entwicklung wurde auch in Betracht gezogen, den Pufferspeicher unter die gewünschte Temperatur abzukühlen und die richtige Vorlauftemperatur mit einem Dreiwege-Mischventil einzustellen. Dies hätte aber Probleme gegeben, denn eine solche Regelung hätte eine Reaktions- und Stellzeit von mehreren Sekunden. Bei schnellen Lastspitzen kann der Rücklauf von den Teilsimulatoren einen Temperaturgradienten von mehreren Grad pro Sekunde erreichen. Ein Mischventil könnte dies nicht schnell genug ausregeln. Das schlussendlich realisierte Kühlsystem wird in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Da die Auslegung von hydraulischen Kreisen spezifische Fachkenntnisse voraussetzt, wurden Teile der Entwicklung des Kühlsystems als Unterauftrag an ein Ingenieurbüro für Gebäudetechnik vergeben.

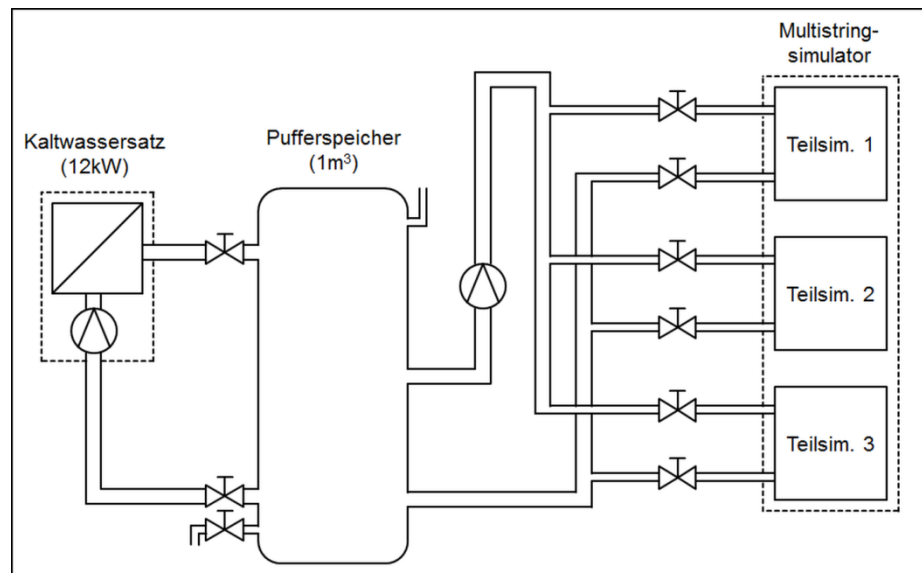


Abbildung 8: Kühlsystem des Multistring-Prüfstands

Die Flüssigkeitskühlkörper der Teilsimulatoren sind aus Aluminium gefertigt. Deshalb war bei der Auswahl der Kühlflüssigkeit Vorsicht geboten. Normales Leitungswasser kommt aufgrund von Kalkablagerungen, Bakterien- und Algenwachstum nicht in Frage. Vollentsalztes Wasser (destilliert oder demineralisiert) wird beim Kontakt mit Luft schnell sauer und würde dann das Aluminium angreifen. Aus diesem Grund wird im Kühlsystem des Multistring-Simulators ein Gemisch von 70 % entsalztem Wasser und 30 % Glykol-Lösung (Antifrogen N) eingesetzt. Dieses Glykol dient grundsätzlich als Frostschutzmittel, was in unserem Fall nicht von Bedeutung ist. Es enthält jedoch auch Inhibitoren, welche das Bakterien- und Algenwachstum unterdrücken und einen Korrosionsschutz für Metalle bieten. Durch die Beimischung von Glykol wird die spezifische Wärmekapazität der Kühlflüssigkeit reduziert, was jedoch durch einen höheren Volumenstrom wieder ausgeglichen wird.

Beim Test zeigte das Kühlsystem zunächst sehr gute Eigenschaften. Die Durchmischung des Pufferspeichers (welche einen Unsicherheitsfaktor darstellte) funktionierte sehr gut und die Vorlauftemperatur war sehr konstant. Bei hohen Leistungen zeigte sich jedoch, dass sich die Flüssigkeitskühlkörper der Teilsimulatoren gegenüber der Kühlflüssigkeit stärker erwärmen, als dies erwartet wurde. Dies konnte auch durch einen grösseren Volumenstrom der Kühlflüssigkeit nicht merklich verbessert werden. Das Problem ist also, dass der Wärmewiderstand der Kontaktfläche zwischen Kühlflüssigkeit und Aluminium höher ist, als dies geplant war. Das war überraschend, denn bei der Konstruktion des Kühlkörpers wurde explizit darauf geachtet, dass ebendiese Kontaktfläche möglichst gross ist (siehe Mäanderstruktur in Abbildung 6). Sie ist viel grösser als in den meisten kommerziellen Produkten, welche während der Entwicklung zum Vergleich herbeigezogen wurden.

Trotz der etwas höheren Erwärmung der Kühlkörper müsste die angestrebte Spitzen-Verlustleistung von 16 kW pro Teilsimulator während 10 Sekunden rein rechnerisch erreicht werden können. Dennoch ist es beim Test der Stromquellen dreimal zu einem Ausfall eines Linear-MOSFET gekommen. Diese Defekte entstanden bei einer Verlustleistung von etwa 13 kW bis 15 kW also bei etwa 80 % bis 90 % der angestrebten Leistung. Die Sperrschicht der Halbleiter hätte bei diesem Wert konservativ gerechnet etwa 120 °C erreicht. Damit wären noch 30 °C Reserve bis zum Grenzwert vorhanden gewesen, was eigentlich eine gute Sicherheitsmarge sein sollte. Dafür, dass die MOSFET dennoch ausgefallen sind, gibt es aus unserer Sicht drei plausible Erklärungen:

- Die Linear-MOSFET waren nicht optimal auf dem Kühlkörper montiert und wurden dadurch wärmer als geplant. Dem widerspricht, dass die Bauteile während der kontinuierlichen Erhöhung der Leistung laufend von der Oberseite her thermografisch untersucht wurden. Dabei wurde keine Auffälligkeit der später defekten MOSFET gegenüber ihren Nachbarn festgestellt. In dem Fall hätten also alle 64 Transistoren der Stromquelle gleich schlecht montiert sein müssen, was doch sehr unwahrscheinlich ist.
- Die Oberfläche des Kühlkörpers wird direkt unterhalb der MOSFET deutlich (mehrere 10 °C) wärmer als am Rand, wo die Temperatur während des Tests überprüft wurde. Dies ist schwer vorstellbar, da die Kühlkörper aus massivem Aluminium bestehen welches ein sehr guter Wärmeleiter ist. Um das genau zu eruieren, müsste die Oberflächentemperatur der Kühlkörper direkt an der Kontaktfläche zu den MOSFET-Gehäusen gemessen werden. Dies ist nicht möglich, da diese Kontaktfläche nicht frei zugänglich ist und jede Veränderung am Aufbau auch eine Veränderung der thermischen Eigenschaften nach sich zieht.

- Die MOSFET halten nicht, was ihr Datenblatt verspricht. Falls dies der Fall ist, muss das nicht zwangsläufig auf alle Exemplare zutreffen. Es ist denkbar, dass es sich bei den defekten Transistoren um Frühausfälle handelt. Dies wäre durch die recht hohe Anzahl an MOSFET (64 pro Teilsimulator, 192 insgesamt) durchaus denkbar.

Da ein Defekt eines Linear-MOSFET jeweils eine zeitaufwendige Reparatur nach sich zieht, wurde das Problem nicht näher untersucht. Stattdessen wurde die Spitzen-Verlustleistung pro Teilsimulator von 16 kW auf 12 kW reduziert. Die angestrebten technischen Daten werden in diesem Fall daher nicht erreicht. Es wäre somit nicht möglich, den Simulator bei maximalem Strom und maximaler Spannung kurzzuschliessen. Dieser ohnehin sehr unübliche Betriebszustand könnte jedoch erreicht werden, wenn die Speisespannung bei hohen Spannungsabfällen über der Stromquelle reduziert wird. Dies ist mit den eingesetzten programmierbaren Speisegeräten sehr einfach möglich. Bei Kennlinien unter 750 V Leerlaufspannung oder 12 A Kurzschlussstrom besteht das Problem ohnehin nicht. Bei den meisten Messungen werden diese Werte nicht überschritten, denn das würde eine Leistung von über 12 kW pro MPP-Tracker bedeuten, was schon ein sehr hoher Wert ist.

4.5. Aufbau des Prüfstands

Die drei Teilsimulatoren wurden zusammen mit ihren Speisegeräten in ein stabiles Rack eingebaut. Abbildung 9 zeigt ein Bild dieses Aufbaus. Links befinden sich die Speisegeräte und in der Mitte die drei Teilsimulatoren. Auf der rechten Seite befinden sich zwei Einschuböffnungen für Messgeräte, darunter ist eine Raumreserve für zukünftige Erweiterungen vorgesehen. Bei diesem Testbetrieb war nur der oberste Teilsimulator aktiv. Für den Netzanschluss des Simulators wurde an der dahinterliegenden Wand ein AC-Anschluss von 400 V / 125 A eingerichtet. Auf der anderen Seite des Prüffelds (im Bild nicht sichtbar) befindet sich ein Abzweiger desselben Anschlusses, welcher dazu dient, die AC-Seite der Prüflinge anzuschliessen.

Das Kühlsystem wurde direkt neben dem Multistring-Simulator platziert. Dieses wird in Abbildung 10 gezeigt. Gut zu erkennen ist der Pufferspeicher, welcher durch einen umgebauten Normcontainer (IBC) realisiert wurde. Auf der Vorderseite befindet sich die Pumpe für den Vorlauf der Teilsimulatoren. Auf der rechten Seite sind die Abzweigungen für die drei Teilsimulatoren mit ihren Absperrventilen zu sehen. Die Teilsimulatoren werden über Stahlflex-Leitungen angeschlossen. Links am Container (im Bild nicht zu sehen) sind die Leitungen zur Kältemaschine angeschlossen, welche sich in einem Maschinenraum eine Etage tiefer befindet. Für die Leitungen mussten zwischen den Etagen Kernbohrungen vorgenommen werden. Der Container steht auf einer Auffangwanne, welche bei einem Leck das Austreten des Kühlmittels verhindert.



Abbildung 9: Multistring-Simulator im Testbetrieb

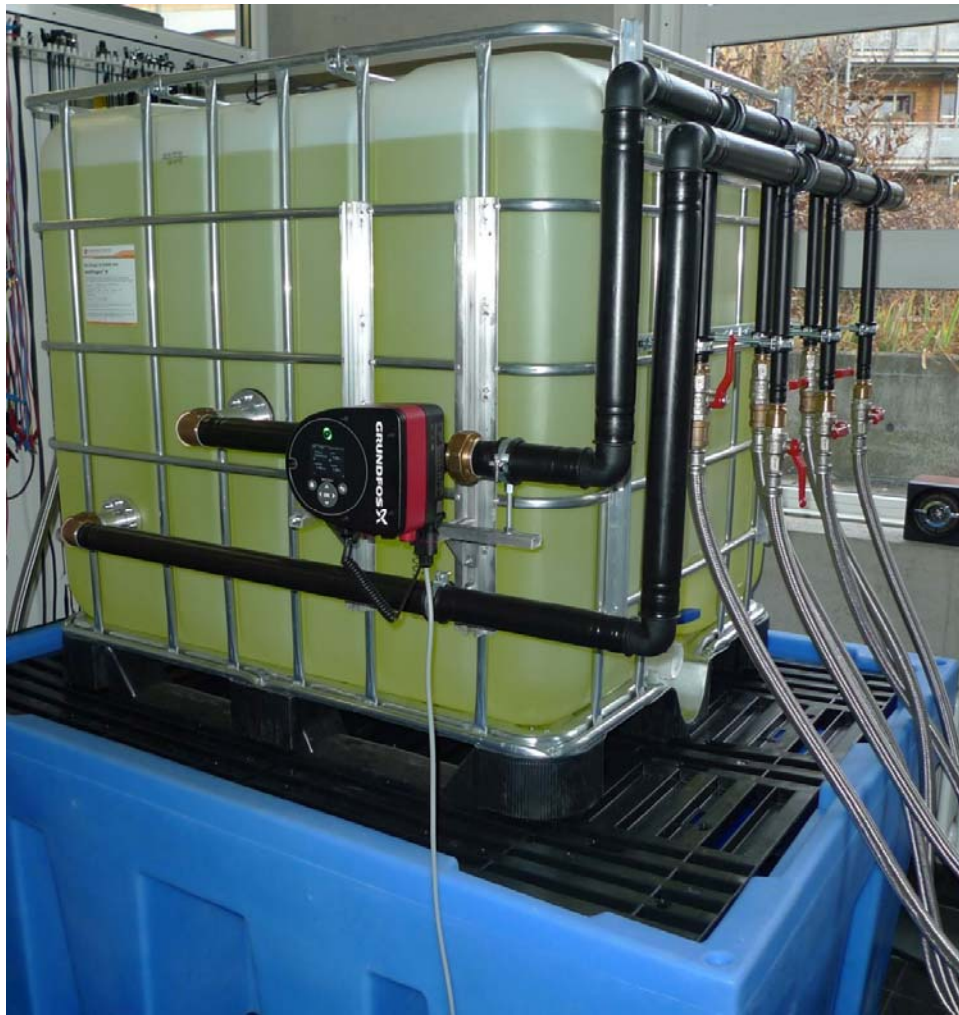


Abbildung 10: Kühlsystem des Multistring-Simulators

4.6. Kommunikation, Synchronisation und Steuersoftware

Die bestehenden Solargenerator-Simulatoren der BFH wurden über ein DAQ-System mit einer dazu gehörenden PC-Software gesteuert. Die eigentlichen Steueraufgaben liefen dabei auf dem Steuercomputer. Dies kann Probleme verursachen, denn ein PC ist grundsätzlich nicht für echtzeitkritische Anwendungen geeignet. So kam es in Vergangenheit etwa vor, dass während einer laufenden Messprozedur ein automatisches Betriebssystem-Update installiert wurde. Dabei wurde die Messprozedur gestört und musste von neuem begonnen werden. Dies war besonders bei langen Testprofilen sehr ärgerlich und zeitraubend.

Beim Multistring-Simulator laufen alle echtzeitrelevanten Prozesse auf der Steuerschaltung oder der DKE. Die Konfiguration der Simulatoren sowie das Abfragen des aktuellen Betriebszustandes erfolgen über Terminalbefehle. Somit lassen sich die Simulatoren prinzipiell über ein herkömmliches Terminalprogramm steuern. Dies wäre allerdings sehr umständlich. Bedeutend mehr Bedienkomfort bietet die Steuersoftware, welche im Rahmen des Projekts für den Multistring-Simulator geschrieben wurde. Mit dieser ist es möglich, die gewünschte Konfiguration der Simulatoren, welche aus dem Testprofil, den Skalierungsfaktoren für Spannung und Strom, sowie den Regelparametern besteht, aus einer Konfigurationsdatei einzulesen und an die Simulatoren zu übermitteln. Zur Kontrolle werden die Daten nach der Konfiguration jeweils zurückgelesen und mit den Sollwerten verglichen. Im Betrieb fragt die Steuersoftware laufend die Ein- und Ausgangsspannung sowie den Ausgangsstrom der aktiven Teilsimulatoren ab und stellt diese auf dem Bildschirm dar. Somit zeigt der Steuercomputer die Betriebszustände der Teilsimulatoren in Quasi-Echtzeit an.

Als Bindeglied zwischen dem Steuercomputer und den Teilsimulatoren dient eine Steuerbox, welche nebst der Kommunikation auch für die Synchronisation der Testprofile sowie dem Abfragen des Fehlersignals der Teilsimulatoren zuständig ist. Die Topologie des Systems wird in Abbildung 11 gezeigt.

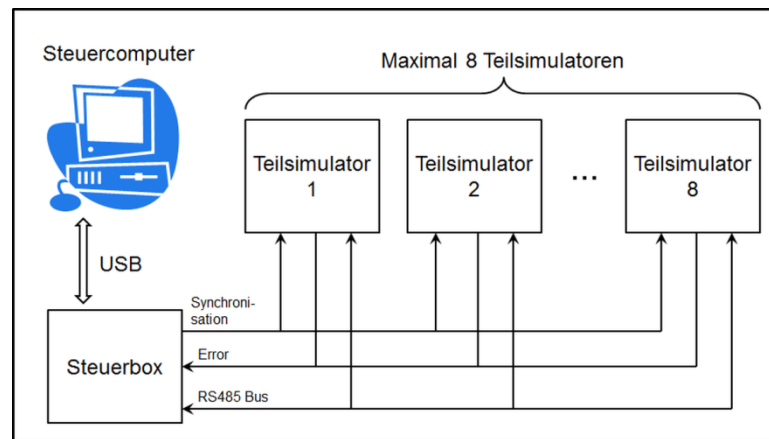


Abbildung 11: Topologie des Kommunikationssystems

Die Kommunikation zwischen Steuercomputer und Steuerbox erfolgt über eine USB-Verbindung, welche einen virtuellen COM-Port simuliert. Der Datenaustausch zwischen der Steuerbox und den Teilsimulatoren erfolgt über einen RS485-Bus im Halbduplexbetrieb, d.h. Senden und Empfangen laufen über dasselbe Leitungspaar. Damit es auf dem Bus nicht zu Kollisionen kommt, untersteht die Kommunikation einem strikten Master/Slave Protokoll. Dabei gehen die Slaves (Teilsimulatoren) nur auf Anfrage vom Master (Steuercomputer bzw. Steuerbox) in den Sendebetrieb.

Das Synchronisationssignal der Steuerbox besteht aus einem Taktsignal (1 kHz) sowie einem Reset-Signal. Jeder Teilsimulator enthält einen 32-Bit Zähler, welcher durch diese Signale inkrementiert bzw. zurückgesetzt wird. Der Zählerstand dient dem jeweiligen Teilsimulator als Zeitbasis sein Testprofil. Es ist damit möglich, Testprofile mit einem Zeitschritt von einer Millisekunde und einer maximalen Dauer von 2^{32} Millisekunden (49 Tage, 17 Stunden, zwei Minuten und 47,296 Sekunden) zu erzeugen. Da die Zähler alle dasselbe Taktsignal haben, laufen die Profile exakt synchron.

Das Error-Signal dient der schnellen Statusrückmeldung durch die Teilsimulatoren. Wenn bei einem der Teilsimulatoren ein Fehler auftritt, so bringt er sich selber in einen sicheren Zustand und aktiviert seinen Error-Ausgang. Der Steuercomputer fragt die Steuerbox in regelmässigen Intervallen ab, ob das Error-Signal aktiv ist. Wenn dies der Fall ist, weiss der Steuercomputer zwar, dass ein Fehler vorliegt, er weiss aber nicht, welche Teilsimulatoren betroffen sind. Die Fehlerquelle (Teilsimulator) sowie die Fehlerursache (z.B. Überhitzung) werden dann durch Abfrage der einzelnen Teilsimulatoren ermittelt. Auf diese Weise wird ermöglicht, dass der Steuercomputer nicht dauernd sondern nur im Fehlerfall die Teilsimulatoren nach dem Fehlerzustand abfragen muss. Im Normalfall wird nur die Steuerbox abgefragt. Dadurch wird die Kommunikation entlastet.

5. Ergebnisse / Erkenntnisse

5.1. Messung der Kennwerte des Prüfstandes

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Resultate der Messungen vorgestellt, mit denen verifiziert wurde, ob der Prüfstand bzw. die Teilsimulatoren die gesetzten Anforderungen gemäss Zielspezifikation erreichen.

5.1.1. Genauigkeit und Stabilität der MPP-Leistung

Die Messung dieses für den Simulator äusserst wichtigen Kriteriums ist sehr schwierig. Das Problem ist, dass der Simulator während dieser Messung theoretisch immer perfekt im MPP betrieben werden müsste. Da es keinen perfekten MPP-Tracker gibt, ist das grundsätzlich nicht möglich. Stattdessen wurde der Simulator bei einer konstanten Spannung nahe dem MPP belastet. Dieser Spannung wurde eine kleine Dreiecksspannung mit einer Periodendauer von 300 s überlagert. Somit wird der MPP pro Dreiecksperiode zweimal durchlaufen. Da die Dreiecksspannung aber eine kleine Amplitude hat, befindet sich der Arbeitspunkt immer sehr nahe am MPP, wodurch die thermische Belastung der Komponenten realistisch ist. Der Leistungsverlauf wurde dann mit einem hochpräzisen Wattmeter aufgezeichnet. Die Zeitpunkte, in denen der MPP durchlaufen wurde, zeigen sich in diesem Leistungsverlauf als lokale Maxima. Diese Maxima wurden dann zu einer Kurve verbunden, welche die MPP-Leistung in Funktion der Zeit darstellen. Dieser Verlauf wird in Abbildung 12 dargestellt.

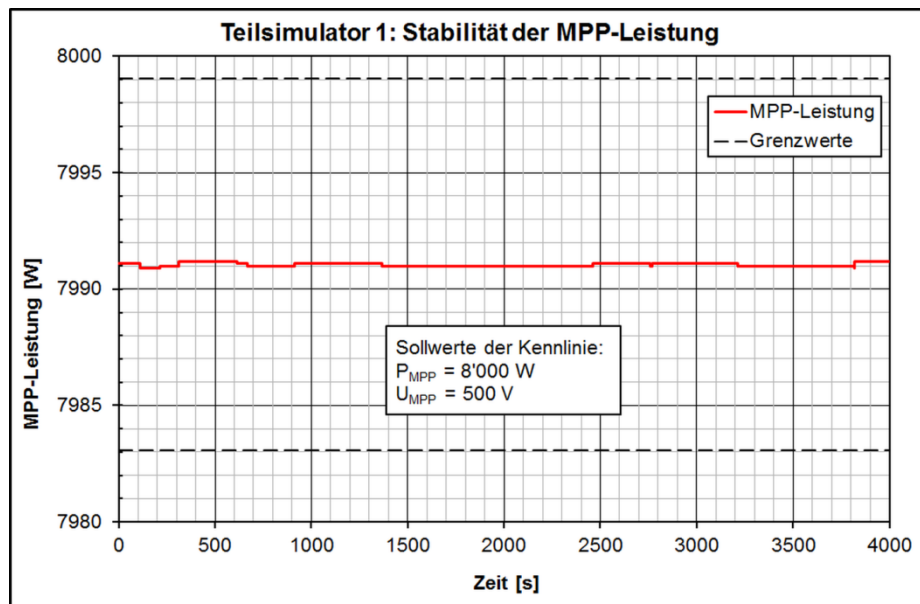


Abbildung 12: Stabilität der MPP-Leistung

Für die Stabilitätsmessung wurde eine Kennlinie mit einer Soll-MPP-Leistung von 8'000 W bei einer Soll-MPP-Spannung von 500 V verwendet. Es wurde das Kennlinienmodell gemäss EN 50530 mit einem Soll-Füllfaktor von 72 % verwendet. Das Modell liefert jedoch nicht exakte Werte für den Füllfaktor. Dadurch liegt die MPP-Leistung gemäss Modell rund 0.82 ‰ unter dem Sollwert. Im vorliegenden Fall wurde der Teilsimulator daher auf eine effektive MPP-Leistung von 7'993,4 W programmiert. Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, beträgt die gemessene MPP-Leistung über die gesamte Messdauer ziemlich genau 7991 W. Die Abweichung vom programmierten Sollwert beträgt somit nur rund 0.3 ‰. Dies ist für ein Prüfgerät ein hervorragender Wert. Wichtiger als die Abweichung vom Sollwert - diese kann mit einer Referenzmessung korrigiert werden - ist aber die Stabilität der MPP-Leistung. In Abbildung 12 ist gut zu sehen, dass die MPP-Leistung fast gar nicht driftet. Alle Messwerte befinden sich in einem Band von 0,3 W, was weniger als 38 ppm vom Mittelwert ist. Die Genauigkeit dieses Werts ist jedoch fragwürdig, denn die Abstufungen in der Kurve sind nicht etwa Sprünge der MPP-Leistung, sondern die Quantisierungsschritte des Messgeräts. Obschon für die Messung eines der präzisesten Wattmeter auf dem Markt verwendet wurde (WT3000 von Yokogawa), kann die Drift somit nicht genau gemessen werden. Klar ist jedoch, dass die Stabilität der MPP-Leistung absolut herausragend ist und sowohl die Zielspezifikation (gestrichelte Linien in Abbildung 12) als auch die optimistischsten Abschätzungen bei weitem übertrifft.

5.1.2. Lastsprungverhalten

Um die dynamischen Eigenschaften der Teilsimulatoren zu bestimmen, wurden diese einem Lastsprungtest unterzogen. Dabei wurde untersucht, wie lange es nach einer schlagartigen Änderung der Belastung der Simulatoren dauert, bis sich die Ausgangswerte wieder stabilisiert haben (die sogenannte Ausregelzeit). Es wurden vier Fälle untersucht:

- Sprung aus dem MPP Richtung Leerlauf (Abbildung 14)
- Sprung aus dem MPP Richtung Kurzschluss (Abbildung 15)
- Sprung in den MPP aus Richtung Leerlauf (Abbildung 16)
- Sprung in den MPP aus Richtung Kurzschluss (Abbildung 17)

Die Sprungweite betrug jeweils etwa 10% der MPP-Spannung, welche im vorliegenden Fall knapp 90 V betrug. So grosse Sprünge sind im realen Betrieb mit einem Wechselrichter nicht zu erwarten. Es handelt sich daher um einen sehr strengen Test. Die Messschaltung wird in Abbildung 13 gezeigt.

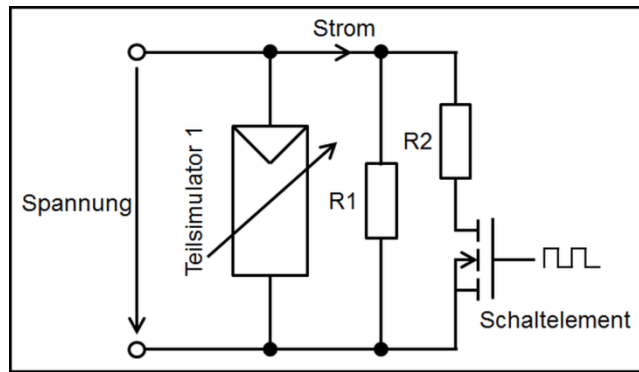


Abbildung 13: Messschaltung für die Lastsprungtests

Die Widerstände R1 und R2 wurden so eingestellt, dass der Teilsimulator vor und nach dem Schalten des Schaltelements bei den gewünschten Betriebspunkten arbeitete. Je nach Sprungrichtung wurden die Messungen mit der positiven oder der negativen Schaltflanke des Schaltelements getriggert. Es ist zu beachten, dass bei so schnellen Sprungantworten, wie sie die Teilsimulatoren haben, schon die parasitären Induktivitäten der Verkabelung und vor allem der eingesetzten Lastwiderstände die Messresultate verfälschen können. Deshalb wurde beim Testaufbau auf eine möglichst kompakte Verkabelung geachtet und es wurden niederinduktive Widerstände eingesetzt.

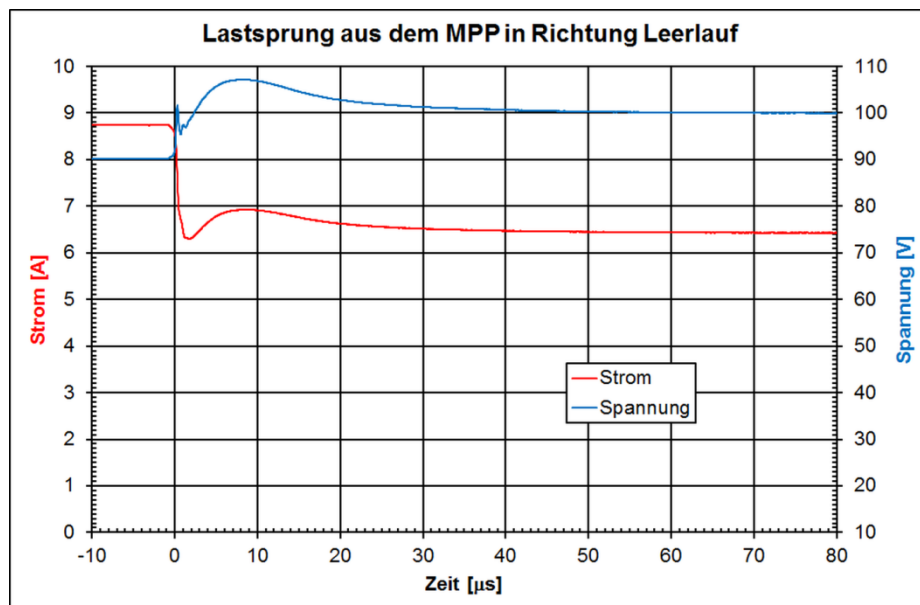


Abbildung 14: Lastsprung aus dem MPP Richtung Leerlauf

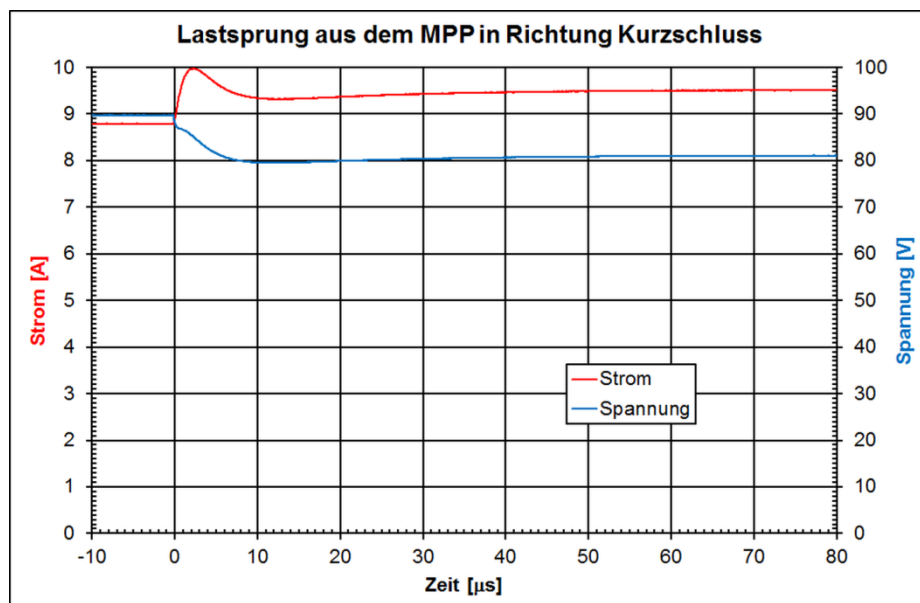


Abbildung 15: Lastsprung aus dem MPP Richtung Kurzschluss

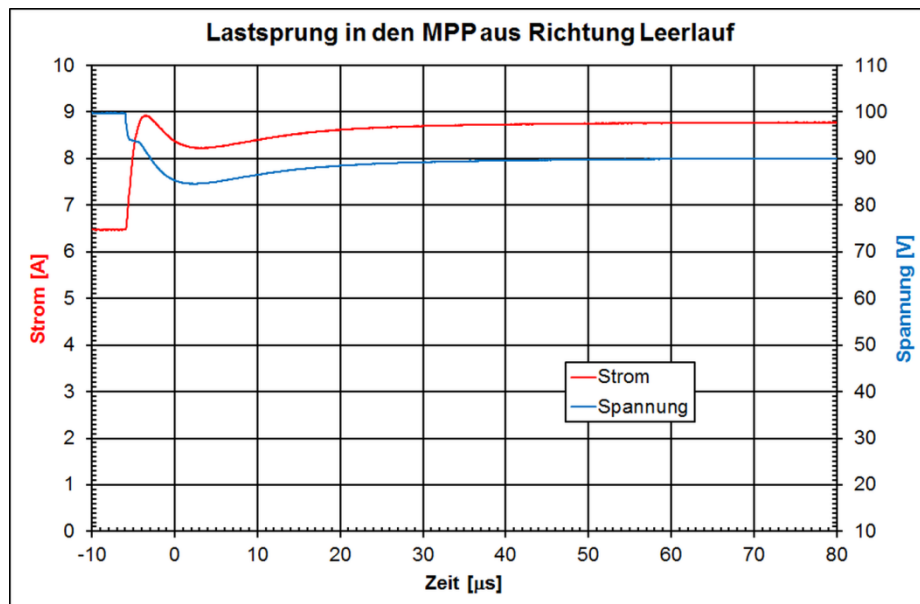


Abbildung 16: Lastsprung in den MPP aus Richtung Leerlauf

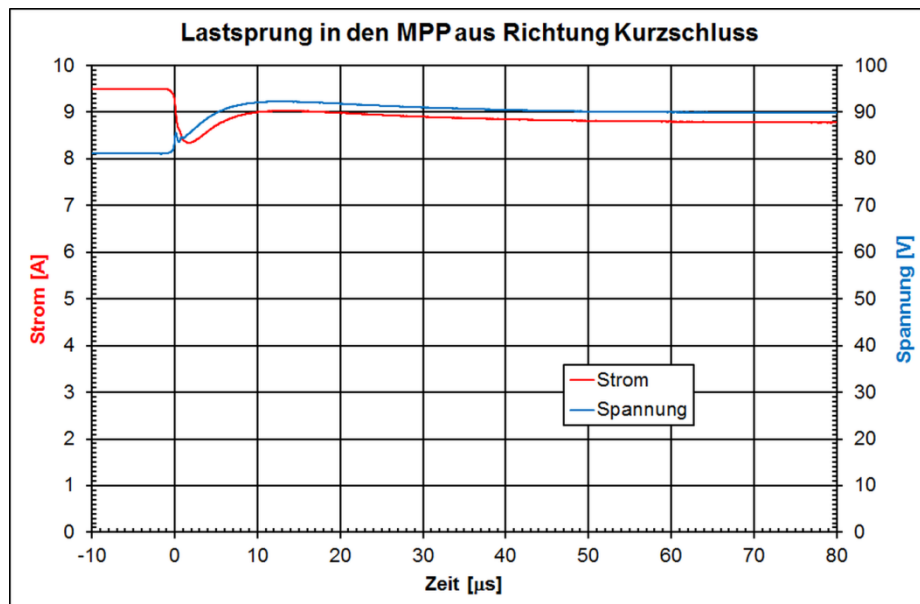


Abbildung 17: Lastsprung in den MPP aus Richtung Kurzschluss

Die Abbildungen 14 bis 17 zeigen, dass Spannung und Strom der Teilsimulatoren rund 50 μs nach dem Lastsprung ihre stationären Werte erreicht haben. Die Zielspezifikation von 100 μs wird damit um Faktor zwei unterboten. Dabei muss hervorgehoben werden, dass dies die Zeit ist, in der sich die Werte praktisch vollständig stabilisiert haben, also in einem Toleranzband von weniger als 5 % der Sprunghöhe zu liegen kommen. Das Lastsprungsverhalten der Teilsimulatoren ist damit sehr gut.

5.1.3. Messung der Erdkapazität

Die Erdkapazität der drei Teilsimulatoren wurde mit der Kapazitätsmessfunktion eines Multimeters (MetraHit 18S) bestimmt. Dafür wurden die Ausgänge der Teilsimulatoren kurzgeschlossen und es wurde die Kapazität der Ausgänge gegenüber dem geerdeten Gehäuse gemessen. Jeder der drei Teilsimulatoren hat eine Erdkapazität von rund 32 nF. Damit wird die Zielspezifikation von 100 nF um Faktor drei unterboten. Es ist zu beachten, dass diese Erdkapazität vor allem durch die Speisegeräte der Teilsimulatoren verursacht wird. Ohne angeschlossene Speisegeräte beträgt die Erdkapazität weniger als 3 nF pro Teilsimulator.

5.1.4. Bestimmung der Kühlleistung

Die Leistungsfähigkeit des Kühlsystems wurde indirekt bestimmt. Dazu wurde der Pufferspeicher mit der Kältemaschine heruntergekühlt und die Temperatur der Kühlflüssigkeit im Minutenintervall abgelesen. Die Teilsimulatoren gaben während dieser Messung keine Verlustleistung ab, die Kühlflüssigkeit wurde also nicht erwärmt. Die Pumpe, welche die Simulatoren mit Kühlflüssigkeit versorgt, war jedoch in Betrieb, so dass im Pufferspeicher die gewünschte Zirkulation entstanden ist. Abbildung 18 zeigt den so gemessenen Temperaturverlauf.

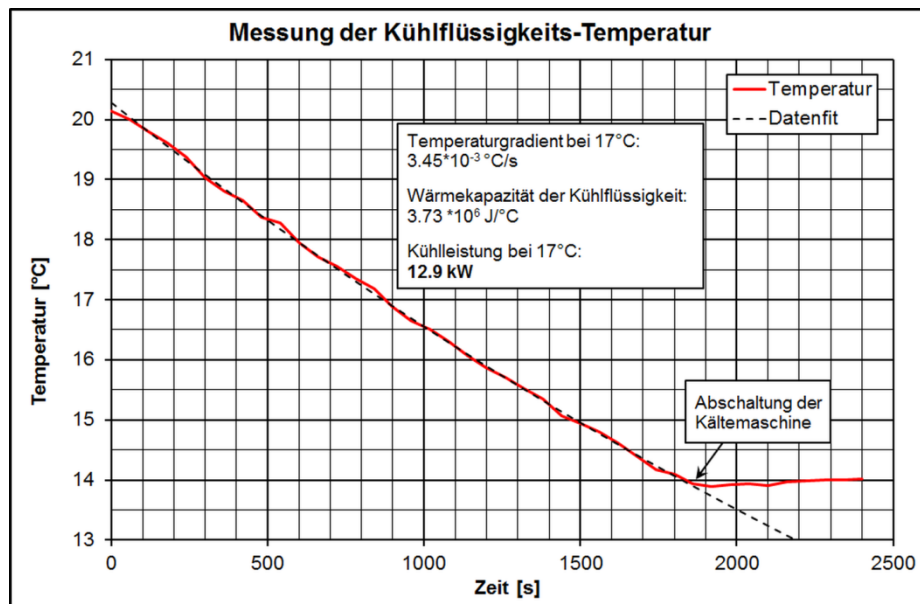


Abbildung 18: Messung zur Bestimmung der Kühlleistung

Die Kühlleistung ist proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur und zur Wärmekapazität der Kühlflüssigkeit. Die Wärmekapazität der Kühlflüssigkeit ergibt sich aus deren Zusammensetzung und Menge und beträgt im vorliegenden Fall $3.73 \cdot 10^6 \text{ J/}^\circ\text{C}$. Die Bestimmung der Änderungsgeschwindigkeit, d.h. des Temperaturgradienten der Kühlflüssigkeit ist etwas schwieriger, weil die Messdaten von Rauschen überlagert sind. Deshalb wurde ein exponentieller Datenfit durch die Messpunkte gelegt (gestrichelte Linie in Abbildung 18). Mittels Differentialrechnung kann nun die Steilheit dieser Kurve zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. einer bestimmten Temperatur berechnet werden. Ein optimales Kühlverhalten ohne Kondenswasserbildung wird bei einer Kühlflüssigkeitstemperatur von 17°C erreicht. Bei dieser Temperatur beträgt der Temperaturgradient etwa $3.45 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/s}$. Die Kühlleistung beträgt somit rund 12.9 kW. Wenn nun durch die Teilsimulatoren der Kühlflüssigkeit eine gleich grosse Verlustleistung zugeführt wird, dann halten sich Erwärmung und Kühlung genau in der Waage und die Temperatur der Kühlflüssigkeit bleibt konstant. Die geforderte Dauer-Kühlleistung von 12 kW wird damit gut erreicht. Es ist zu beachten, dass im Normalbetrieb, wenn keine grossen Leistungsspitzen auftreten, auch eine Kühlflüssigkeitstemperatur von 20°C (oder mehr) noch vollkommen ausreichend ist. In diesem Fall würde die Kühlleistung bereits über 15.1 kW betragen, womit die Zielspezifikation um mehr als 25% übertroffen wird. Bei vielen kurzzeitigen Messungen wird die Wärmekapazität der Kühlflüssigkeit bereits ausreichen, um die Abwärme aufzunehmen. Die Kältemaschine muss in diesen Fällen gar nicht eingeschaltet werden.

Wie bereits im Kapitel "4.4. Aufbau des Kühlsystems" erwähnt wurde, wird die geforderte Spitzen-Verlustleistung von 16 kW pro Teilsimulator bzw. 48 kW für den ganzen Prüfstand nicht erreicht. Das Problem ist nicht das Kühlsystem an sich, denn der Pufferspeicher könnte die geforderte Spitzenleistung auch beim gleichzeitigen Betrieb von allen drei Teilsimulatoren problemlos aufnehmen (selbst bei einer Minute Vollast würde seine mittlere Temperatur um weniger als ein Grad steigen). Das Problem liegt vielmehr bei den Flüssigkeitskühlkörpern, welche offenbar einen etwas zu hohen Wärmewiderstand haben. Dadurch sind im Testbetrieb dreimal Defekte an den Linear-MOSFET aufgetreten. Wie aber an früherer Stelle in diesem Bericht bereits dargestellt wurde, kann dieses Problem, welches ohnehin nur in sehr unüblichen Betriebszuständen auftritt, durch ein Zurückregeln der Speisespannungen der Teilsimulatoren umgangen werden. Dies muss im Augenblick noch manuell getan werden, könnte aber in Zukunft auch automatisiert geschehen.

5.1.5. Spannungs-, Strom- und MPP-Bereich

Die Teilsimulatoren wurden in der Testphase sowohl mit 1'000 V Leerlaufspannung als auch mit 16 A Kurzschlussstrom betrieben. Die Anforderungen gemäss Zielspezifikation werden in diesen Punkten erreicht. Als Folge davon wird auch die Spezifikation des MPP-Bereichs erfüllt. Ein Problem stellen Messungen mit kleinen Spannungen dar. Der momentan in der Regelung eingesetzte Spannungsteiler ist für die maximale Betriebsspannung ausgelegt. Bei kleinen Spannungen nimmt daher die relative Genauigkeit der Kennlinie ab. Dies ist ab einer Leerlaufspannung von etwa 50 V kein Problem mehr. Da es kaum einen Multistring-Solarwechselrichter mit so kleiner Eingangsspannung gibt, ist das für den Betrieb des Prüfstands völlig ausreichend. Falls wider Erwarten kleinere Spannungen benötigt werden, kann dies durch Austausch des Spannungsteilers erreicht werden. Dies ist sehr einfach möglich, denn der Spannungsteiler ist eine eigenständige, leicht zugängliche Baugruppe. Prinzipiell ist aber hier bereits die Zielspezifikation unrealistisch, denn beliebig kleine Werte der Leerlaufspannung sind bei einem Gerät mit einem so hohen Spannungsbereich gar nicht möglich.

5.1.6. Anzahl programmierbarer Kennlinien

Wie in der Spezifikation festgehalten wurde, bietet jedes Speichermodul Platz für 65'536 Kennlinien. Da jede Kennlinie einen Speicherbedarf von 16 kBit (1'024 Stützstellen x 16 Bit = 16'384 Bit) hat, benötigt das Speichermodul einen Chip mit einer Kapazität von 1 GBit (1'073'741'824 Bit). Für die Programmierung der Kennlinien in die Speichermodule wurde eigens ein Programmieradapter, basierend auf einer Mikroprozessorschaltung, entwickelt. Dieser wird im Moment mit einer Software im Beta-Stadium betrieben, welche nur die untere Hälfte des Speichermoduls (32'768 Kennlinien) programmieren kann. Dieser Mangel wird in der Nachprojektphase behoben werden. Für den Test des Prüfstands sowie für die meisten Betriebsfälle ist die jetzt verfügbare Anzahl an Kennlinien vollkommen ausreichend.

5.1.7. AC-Anschlussleistung

Am Prüfstand wurde ein AC-Anschluss mit einer Nennleistung von 86,25 kVA (400 V / 125 A) installiert. Dieser übertrifft die geforderte Leistung um 25%.

5.2. Messungen an einem Multistring Solarwechselrichter

Um die Funktion des Solargenerator-Simulators im realen Betrieb zu testen und zu demonstrieren, wurde eine Testmessung an einem Multistring Solarwechselrichter durchgeführt.

Technische Daten des Wechselrichters:

Hersteller:	Sputnik Engineering AG
Typ:	SolarMax 15MT3
Anzahl MPP-Tracker:	3
Nennleistung AC:	15 kW
Maximale Eingangsspannung:	900 V _{DC}
MPP-Spannungsbereich:	250 V _{DC} ...750 V _{DC}
Maximaler Eingangsstrom	3 x 16 A
Nennspannung AC:	400 V _{AC}
Europäischer Wirkungsgrad:	97.5 % (Herstellerangabe)

Die Schaltung für die Messungen am Solarwechselrichter wird in Abbildung 19 gezeigt. Die Spannungen und Ströme wurden mit zwei hochpräzisen Wattmetern vom Typ Yokogawa WT3000 gemessen. Eines der Wattmeter wurde für die DC-Seite, das andere für die AC-Seite verwendet.

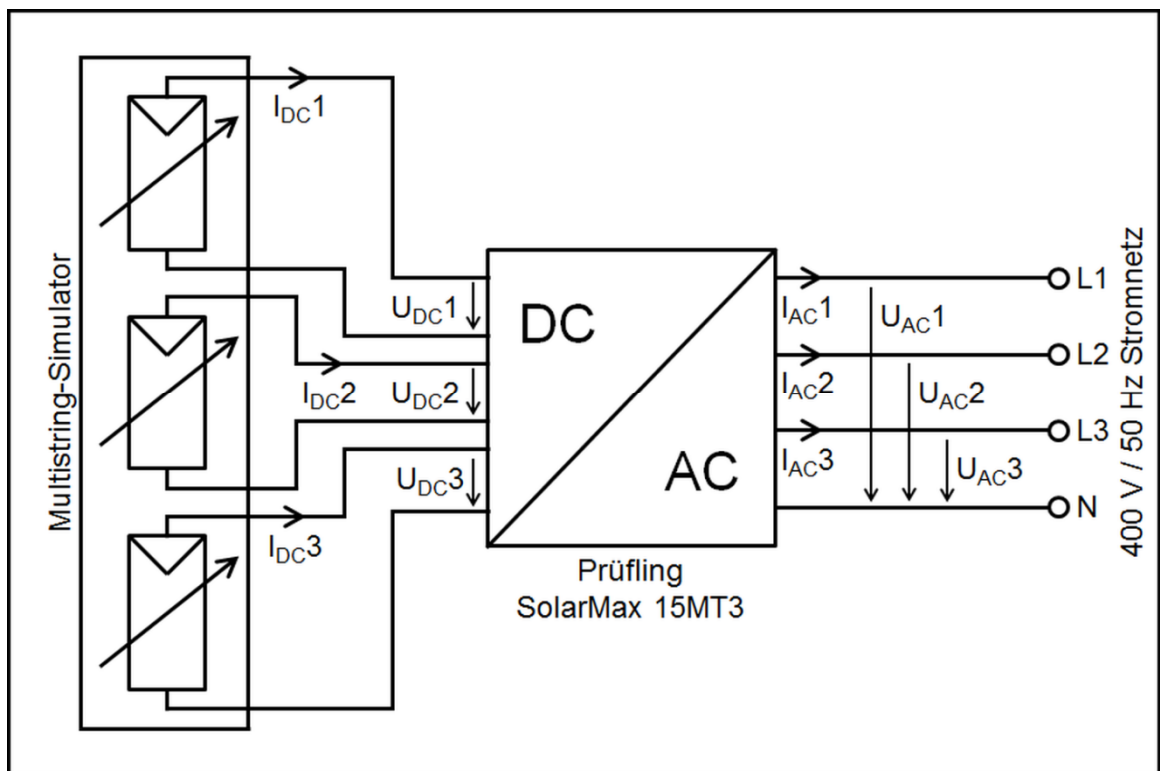


Abbildung 19: Messschaltung für die Tests des Multistring-Solarwechselrichters.

5.2.1. Statische Stufenmessung gemäss EN 50530

Bei dieser Messung wird untersucht, wie der Wechselrichter bei einer zeitlich invarianten Kennlinie arbeitet. Die Messungen erfolgen auf acht verschiedenen Leistungsstufen, welche in nachfolgender Tabelle aufgelistet sind.

Stufe	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{MPP} / P_{MPP\ max}$	5%	10%	20%	25%	30%	50%	75%	100%
a_{EU}	3%	6%	13%	0%	10%	48%	0%	20%
a_{CEC}	0%	4%	5%	0%	12%	21%	53%	5%

Die spezifische Leistung ($P_{MPP} / P_{MPP\ max}$) gibt die Leistung der aktuellen Stufe in Prozent der maximalen DC-Leistung des verwendeten Prüflings wieder. Sofern diese wie in unserem Fall nicht vom Hersteller spezifiziert ist, wird die maximale DC-Leistung als Division der AC-Nennleistung durch den europäischen Wirkungsgrad bestimmt. Beim SolarMax 15MT3 ergibt das eine Leistung von 15'385 W insgesamt oder 5'128 W pro MPP-Tracker. Die MPP-Spannung der Teilsimulatoren beträgt bei jeder Stufe 580 V. Bei den Werten a_{EU} und a_{CEC} handelt es sich um die Gewichtungsfaktoren für die Bestimmung des Europäischen bzw. des Kalifornischen Wirkungsgrads. Die gemessenen Wirkungsgrade sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

Stufe	ΣP_{MPP} [W]	η_{MPPT}	η_{conv}	η_{tot}
0	768.60	99.76%	93.51%	93.29%
1	1538.65	99.95%	96.06%	96.02%
2	3077.96	99.96%	97.13%	97.10%
3	3848.50	99.98%	97.37%	97.34%
4	4617.78	99.99%	97.47%	97.46%
5	7697.08	99.99%	97.55%	97.55%
6	11544.87	99.99%	97.49%	97.48%
7	15384.62	98.79%	97.36%	96.19%

Die Abbildungen 20, 21 und 22 zeigen die Resultate dieser Stufenmessungen in graphischer Form.

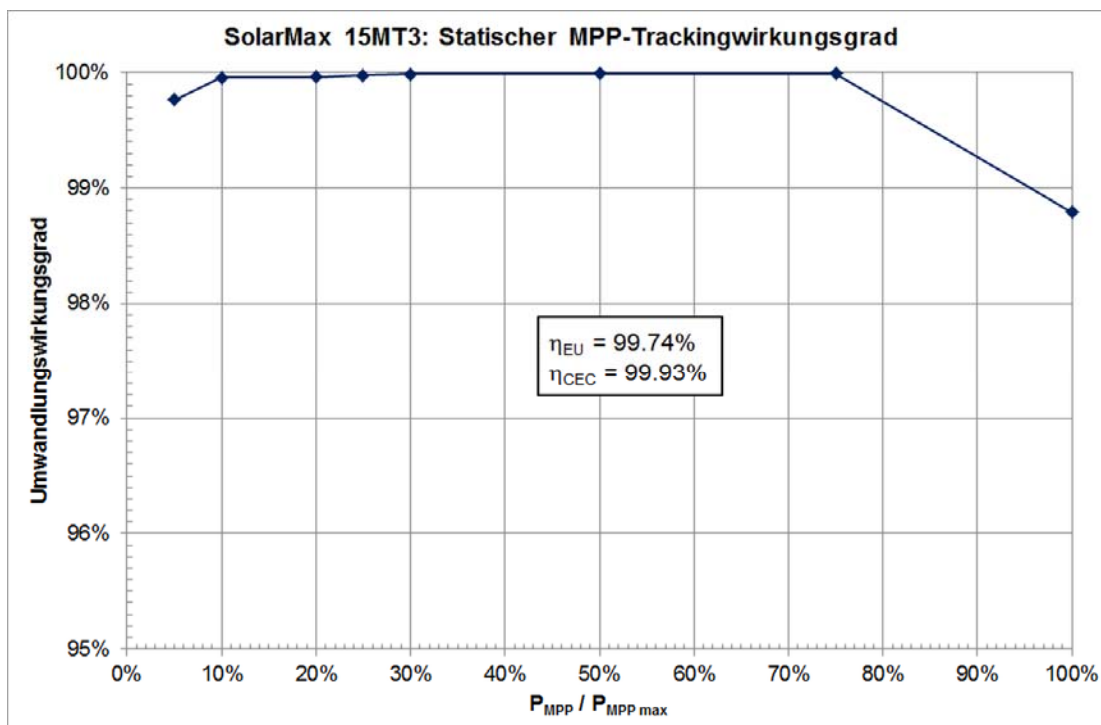


Abbildung 20: Trackingwirkungsgrad in Funktion der Leistung

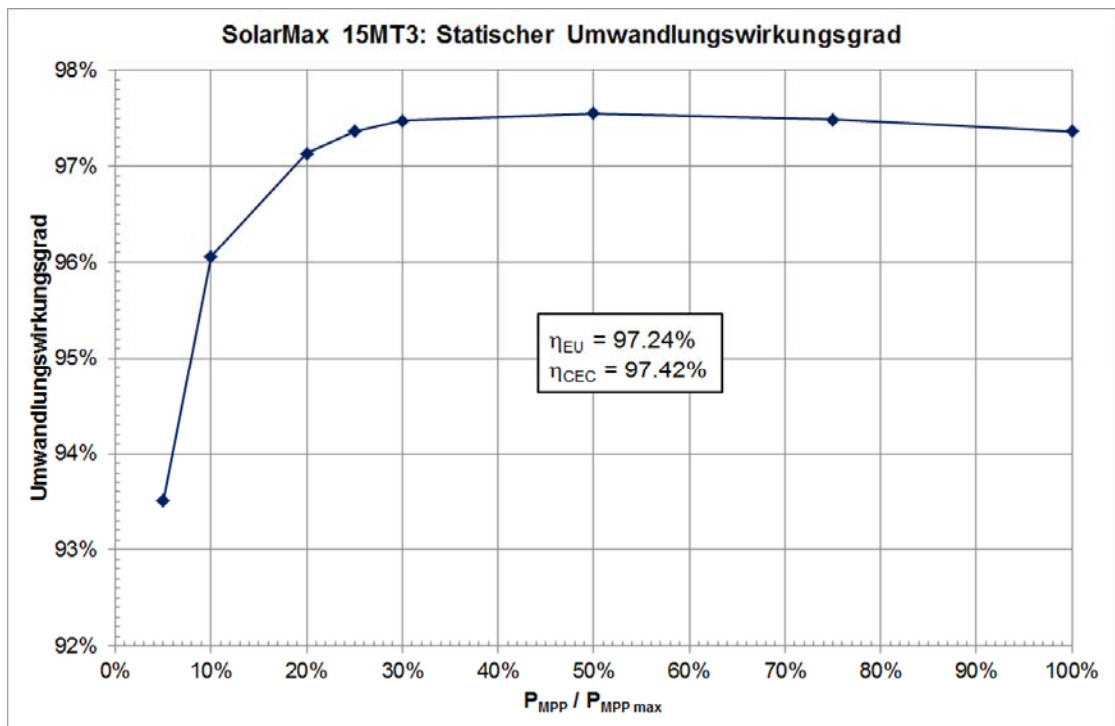


Abbildung 21: Umwandlungswirkungsgrad in Funktion der Leistung

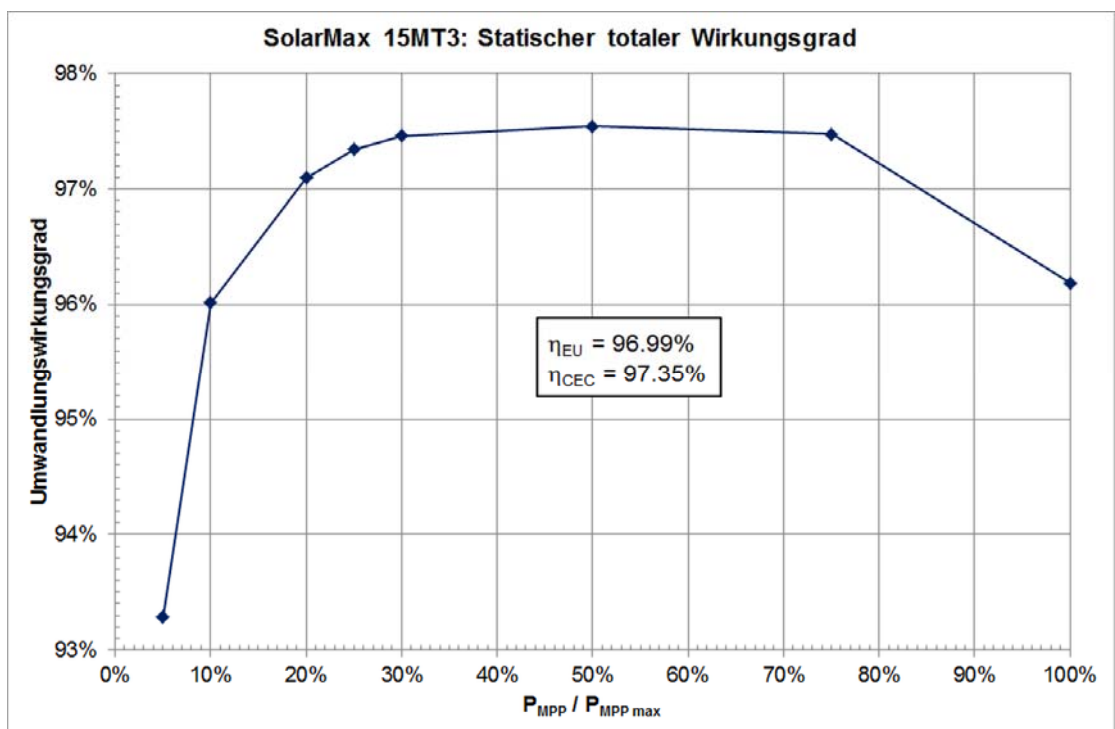


Abbildung 22: Totaler Wirkungsgrad in Funktion der Leistung

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass der SolarMax 15MT3 über weite Leistungsbereiche ein sehr gutes Trackingverhalten hat. Von 30% bis 75% der Nennleistung beträgt der Trackingwirkungsgrad praktisch 100%. Bemerkenswert ist der Abfall der Trackinggenauigkeit bei Nennleistung. Alle drei MPP-Tracker arbeiten bei dieser DC-Leistung etwa 20 V oberhalb der MPP-Spannung. Dies ist höchstwahrscheinlich auf eine absichtliche Leistungsreduktion des Wechselrichters im Bereich der Nennleistung zurückzuführen. Allerdings beträgt die AC-Leistung in diesem Betriebspunkt nur etwa 14,8 kW und somit etwa 200 W weniger als die spezifizierte Nennleistung. Diese Leistungsreduzierung scheint also etwas zu früh bzw. etwas zu stark einzugreifen. Der Prüfling verspielt sich dadurch etwa 0,23% des totalen europäischen Wirkungsgrads.

Der Umwandlungswirkungsgrad befindet sich mit Werten um 97,5% über einen weiten Leistungsbe-
reich in einem guten, jedoch nicht herausragenden Rahmen. Dasselbe gilt auch für den totalen Wirk-
ungsgrad, welcher jedoch stark unter der bereits beschriebenen Zurückregelung leidet. Der somit
erhaltene europäische Wirkungsgrad beträgt rund 97%, was immer noch ein guter Wert ist. Die Ab-

weichung vom Herstellerwert von einem halben Prozent ist für einen Solarwechselrichter nicht unüblich. Es ist davon auszugehen, dass der Hersteller den Wechselrichter bei einer geringfügig kleineren Spitzenleistung getestet hat, so dass die Leistungsreduktion auf der höchsten Stufe nicht auftritt. Weiter wird nicht spezifiziert, ob es sich beim angegebenen Wirkungsgrad wirklich um den totalen Wirkungsgrad handelt. Es ist auch denkbar, dass der Hersteller nur den Umwandlungswirkungsgrad spezifiziert. Zudem neigen die Hersteller dazu, beim angegebenen Wirkungsgrad grosszügig aufzurunden (etwa 0,2% sind üblich).

5.2.2. Test mit langsamer Rampe gemäss EN 50530

Mit diesem dynamischen Test soll gezeigt werden, wie sich der Wechselrichter bei einem sehr kleinen und sich langsam ändernden Leistungsangebot verhält. Dafür wird eine Solaranlage simuliert, deren Nennleistung bei STC der Nennleistung des Prüflings entspricht. Die simulierte Einstrahlung beträgt aber nur 10 bis 100 W/m². Zunächst beträgt die simulierte Einstrahlung während einer Vorhaltezeit von 300 s konstant 10 W/m². Danach steigt sie linear inner 980 s auf 100 W/m². Dort bleibt sie während 30 s konstant und sinkt anschliessend wieder innerhalb von 980 s auf 10 W/m² zurück. Die MPP-Leistung beträgt in diesem Test zeitweise weniger als ein Prozent der Nennleistung des Prüflings. Viele Geräte schalten sich bei einem so kleinen Leistungsangebot entweder überhaupt nicht ein oder inner kurzer Zeit wieder aus. Zudem fallen die Leerlaufverluste des Wechselrichters bei diesem Test überdurchschnittlich stark ins Gewicht. Die Messung soll zeigen, wie gut der Prüfling mit diesen schwierigen Voraussetzungen zurechtkommt und wie gross der dadurch entstehende Ertragsverlust ist. Die Resultate dieses Tests lassen erahnen, wie gut sich ein Wechselrichter in der Zeit um Sonnenaufgang und –Untergang verhält. Das Resultat dieser Messung wird in Abbildung 23 gezeigt.

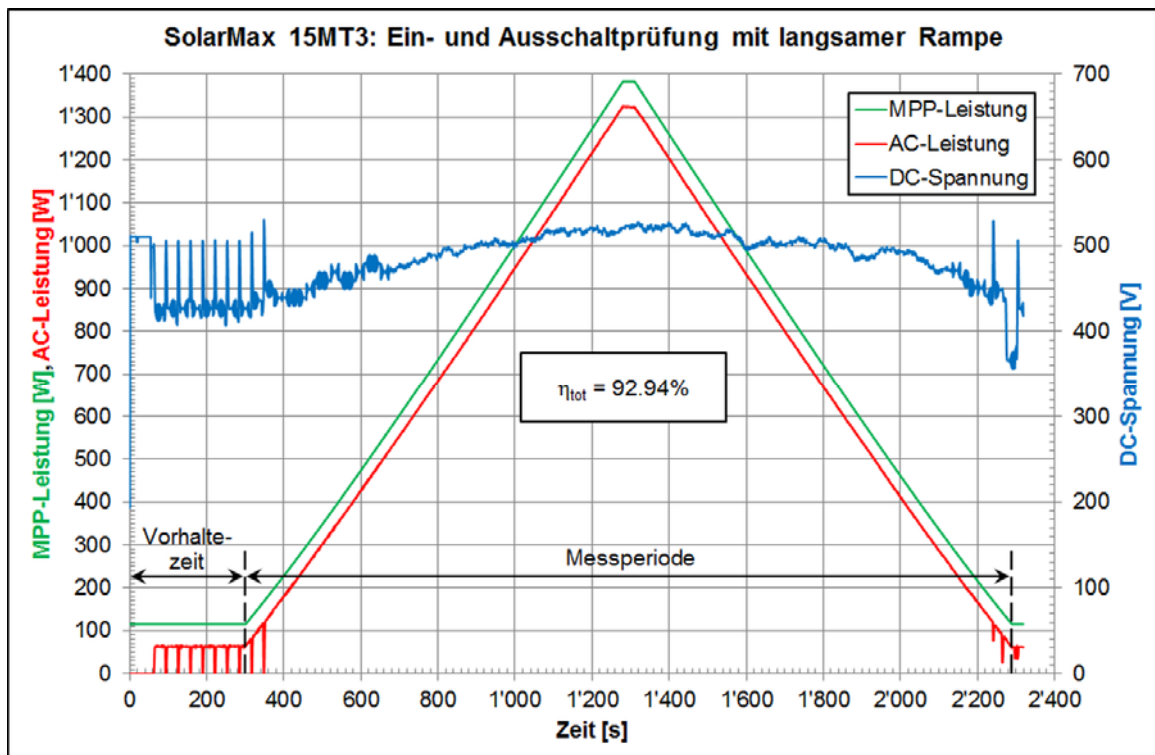


Abbildung 23: Test mit langsamer Rampe gemäss EN 50530

Bei einem idealen Wechselrichter würden die rote und die grüne Kurve zusammenfallen. Es ist jedoch gut zu sehen, dass der Prüfling in der Vorhaltezeit zunächst hochfahren muss und anschliessend mehrfach kurzzeitig wieder in den Leerlaufbetrieb springt. Während der Messperiode arbeitet der Wechselrichter ab einer Einstrahlung von etwa 15 W/m² stabil. Aufgrund seiner Tracking- und Umwandlungsverluste, insbesondere aber aufgrund der Leerlaufverluste, ist immer eine Differenz von etwa 50 W zwischen MPP- und AC-Leistung vorhanden. Das klingt nach viel, ist aber nur ein Drittel Prozent der Nennleistung des Geräts. Erst wenn die simulierte Einstrahlung wieder in den Bereich des Startwerts kommt, gibt es wieder kurzzeitige Trackingprobleme. Der totale Wirkungsgrad berechnet sich hier anschaulich als Quotient der Flächen unterhalb der roten und grünen Kurve während der Messperiode und beträgt in diesem Fall 92.94%. Das ist für diese schwierige Prüfung ein guter Wert.

6. Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Der realisierte Prüfstand für Multistring Solarwechselrichter erfüllt die meisten der gesetzten Anforderungen oder übertrifft diese teilweise deutlich. Ausnahmen bilden die Spitzen-Verlustleistung sowie die untere Grenze der Leerlaufspannung. Diese Ausnahmen werden sich beim Betrieb des Prüfstands nicht oder nur in ganz besonderen Betriebszuständen bemerkbar machen und können mit relativ einfachen Gegenmassnahmen umgangen werden. Nebst diesen unbedeutenden Mängeln erreicht der Prüfstand im Allgemeinen und der realisierte Solargenerator-Simulator im Speziellen Leistungswerte, welche weltweit einzigartig sein dürften. So ist etwa die Ausregelzeit des Simulators nach einem Lastsprung mit rund 50 μ s etwa doppelt so schnell wie bei den besten kommerziell erhältlichen Produkten. Die Drift der MPP-Leistung ist so klein, dass sie selbst mit einem hochpräzisen Messgerät nicht genau erfasst werden kann.

6.2. Soll / Ist Vergleich

In der nachfolgenden Tabelle werden die geforderten und die erreichten technischen Daten des Prüfstands einander gegenübergestellt.

Kennwert	Sollwert	Istwert	Bewertung	Kommentar, Begründung
Anzahl Teilsimulatoren	3	3	erfüllt	Das Kommunikationssystem erlaubt einen Ausbau auf maximal 8 Teilsimulatoren.
AC-Anschlussleistung	≥ 69 kVA	86.25 kVA	übertritten	-
Dauer-Kühlleistung	12 kW	12,9 kW	gut erfüllt	Bei Vorlauftemperatur 17 °C. Bei höherer Temperatur besser.
Spitzen-Kühlleistung	48 kW (für 10 s)	36 kW (für mind. 100 s)	nicht erfüllt	Im normalen Betrieb unbedeutend. Lässt sich durch Zurückregeln der Speisespannung umgehen.
Leerlaufspannung	0 - 1'000 V	50 - 1'000 V	knapp nicht erfüllt	Im normalen Betrieb unbedeutend. Untere Grenze lässt sich durch Austausch des Spannungsteilers verringern.
Kurzschlussstrom	0 - 16 A	0 - 16 A	erfüllt	Bei kleiner Spannung wäre die Stromquelle auch in der Lage, 32 A zu führen. Es müssten aber leistungsfähigere Speisegeräte eingesetzt werden.
MPP-Leistung	11.52 kW	11.52 kW	erfüllt	Abgeleiteter Wert.
Drift der MPP-Leistung	≤ 1 ‰	ca. 38 ppm	deutlich übertritten	Sehr guter Wert. Aufgrund der geringen Grösse kaum messbar.
Ausregelzeit nach Lastsprung	≤ 100 μ s	< 50 μ s	deutlich übertritten	Sehr guter Wert
Erdkapazität	≤ 100 nF	ca. 32 nF	deutlich übertritten	-
Anzahl programmierbarer Kennlinien	65'536	65'536	erfüllt	Aufgrund eines Softwareproblems beim Programmieradapter derzeit nur zur Hälfte nutzbar.

6.3. Vergleich mit dem Marktstandard

Die auf dem Markt verfügbaren Solargenerator-Simulatoren lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilen: getaktete und lineare Geräte. In Hinblick auf die Qualität der elektrischen Eigenschaften des Simulators (statisch und dynamisch) stellt die Gruppe der getakteten Simulatoren keine ernsthafte Konkurrenz zum in diesem Projekt realisieren Multistring-Simulator dar. Solche Geräte sind mindestens um eine Dekade langsamer als der hier entwickelte lineare Simulator. Ausserdem haben sie

vom Prinzip her immer einen gewissen Restripping auf dem Ausgangssignal. Getaktete Geräte mögen Vorteile bezüglich Preis, Energieeffizienz, Grösse und Gewicht haben. Für Präzisionsmessungen, namentlich für die Messung des Trackingwirkungsgrads, sind sie jedoch ungeeignet. Deutlich Interessanter ist der Vergleich mit anderen linearen Geräten. Solche Simulatoren sind auf dem Markt äusserst selten, insbesondere in dem geforderten Spannungsbereich. Die einzigen uns bekannten und wirklich vergleichbaren Geräte stammen vom deutschen Hersteller Spitzenberger & Spiess. Dieser spezifiziert für seine Simulatoren eine Ausregelzeit von typischerweise 100 μ s. Dieser Wert wird von unserem Simulator um Faktor 2 unterboten. Ein zweiter Nachteil der Geräte von Spitzenberger und Spiess sind die Einschränkungen des Ausgangsstroms in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 24 gezeigt, welche dem Datenblatt der Simulatoren der Baureihe PVS von Spitzenberger & Spiess entnommen wurde.

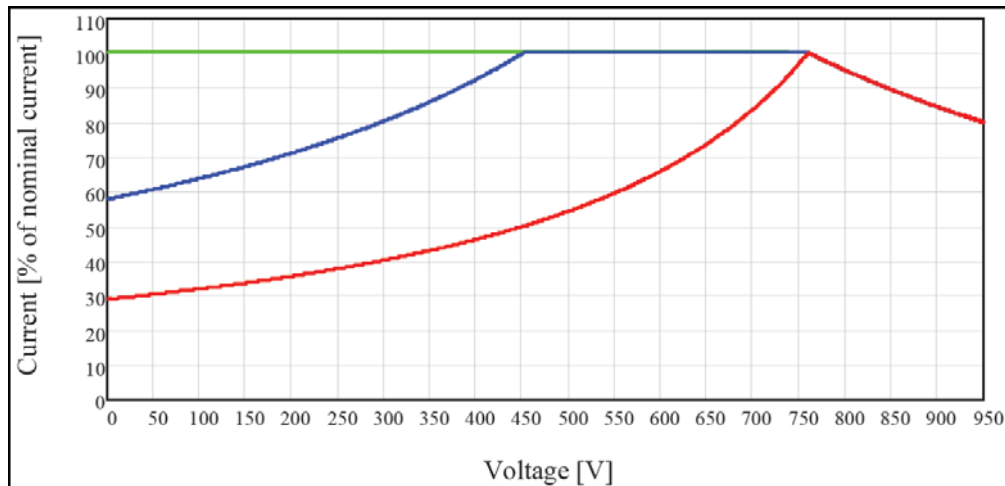


Abbildung 24: Stromcharakteristik PVS im 950 V Bereich (Quelle: Spitzenberger & Spiess)

Die rote Kurve entspricht dem Dauerbetrieb, die blaue Kurve dem Kurzzeitbetrieb bis zu zwei Minuten und die grüne Kurve dem Spitzenbetrieb bis zu 50 ms. Der spezifizierte Ausgangsstrom kann nur in einem einzigen Betriebspunkt bei etwa 760 V dauernd bezogen werden. Wird der Simulator kurzgeschlossen, so reduziert sich der Strom im Dauerbetrieb auf 30 % des Nennstroms. Um die Stromreduktion bei tiefen Spannungen zu umgehen, verfügt das Gerät über fünf Spannungsbereiche, welche jedoch nur umgeschaltet werden können, wenn das Gerät nicht in Betrieb ist. Abbildung 24 zeigt die Eigenschaften im höchsten Spannungsbereich. Die maximale Leerlaufspannung beträgt 950 V. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 25 die Stromcharakteristik eines in diesem Projekt aufgebauten Teilsimulators.

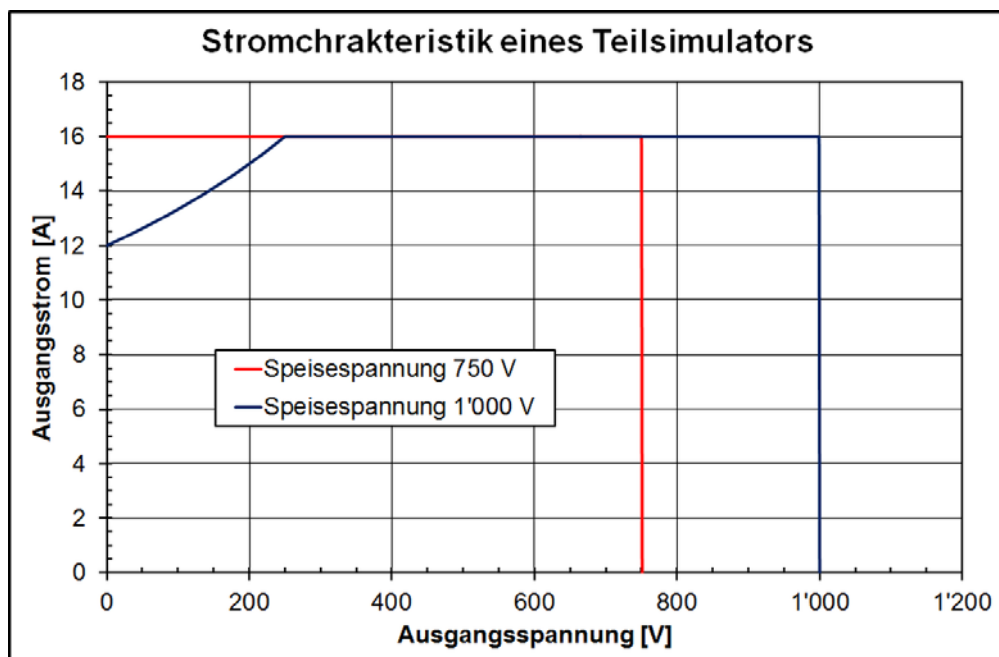


Abbildung 25: Stromcharakteristik eines Teilsimulators der BFH-T1

Wenn die Speisespannung 750 V oder weniger beträgt, kann dank der leistungsfähigen Flüssigkeitskühlung der volle Strom unabhängig von der Ausgangsspannung bezogen werden. Im schlimmsten Fall, wenn die Speisespannung 1'000 V beträgt, können immer noch 75 % des Maximalstroms bezogen werden. Einzige Einschränkung ist, dass die Abwärme aller drei Teilsimulatoren im Dauerbetrieb die Leistung der Kühlanlage von 12,9 kW nicht überschreiten darf. Dank des grossen Pufferspeichers ist aber auch im Überlastbereich ein Betrieb von mehreren Minuten möglich. Ein grosser Vorteil des Multistring-Simulators sind die Speisegeräte, deren Spannung im Betrieb praktisch stufenlos eingestellt werden kann. Somit kann die Speisespannung laufend dem aktuellen Arbeitspunkt nachgeführt werden, womit immer der volle Ausgangsstrom zur Verfügung steht (sofern die Nachregelung schnell genug erfolgt). Zudem ist die maximale Ausgangsspannung dieses Simulators 50 V höher als die des Vergleichsgeräts, was den möglichen Einsatzbereich vergrössert.

Die beschriebenen Vorteile des Multistring-Simulators gegenüber den kommerziellen Produkten haben ihren Preis. Und das ist in diesem Fall wörtlich zu nehmen. So werden die herausragenden Leistungswerte nebst der langen Entwicklungs- und Bauzeit auch durch einen hohen Hardwareaufwand erkauft. Damit ist diese Eigenentwicklung teurer als ein kommerzielles Produkt, was bei einem Einzelstück nicht anders zu erwarten ist. Allerdings sind auch die Geräte von Spitzenberger & Spiess alles andere als günstig.

7. Schlussfolgerungen, Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

7.1. Schlussfolgerung und Bewertung des Projekts

In diesem Projekt wurde ein qualitativ hochwertiger Prüfstand für Multistring-Solarwechselrichter entwickelt, aufgebaut und getestet. Dieser steht mit gewissen Einschränkungen (siehe 7.2) ab sofort zur Verfügung und kann für Arbeiten innerhalb des Photovoltaiklabors der BFH, als auch für Messungen von Industriepartnern eingesetzt werden. Die Eigenschaften des Prüfstands im Allgemeinen und des realisierten Solargenerator-Simulators im Speziellen erfüllen in den wesentlichen Punkten die geplante Spezifikation oder übertreffen diese zum Teil deutlich. Das Projekt ist damit als grosser Erfolg zu werten.

7.2. Bevorstehende Arbeiten

Obschon die in den Projektzielen vereinbarten Arbeiten am Multistring-Prüfstand abgeschlossen sind, gibt es in den nächsten Wochen und Monaten noch einige Erweiterungen und Verbesserungen vorzunehmen. Diese werden in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert.

7.2.1. Automatisches Messsystem für das MPP-Tracking

Für die Bestimmung des Trackingwirkungsgrads muss die MPP-Leistung der jeweils verwendeten Kennlinie bzw. der zeitliche Verlauf der MPP-Leistung bei dynamischen Testprofilen genau bekannt sein. Derzeit muss der MPP noch durch eine manuelle Messung bestimmt werden, was äusserst umständlich ist. Deshalb ist geplant, den Prüfstand um ein automatisches Messsystem für das MPP-Tracking zu erweitern. Dieses soll einerseits in der Lage sein, den MPP von einer gegebenen Kennlinie mit hoher Genauigkeit zu messen.

Dazu muss eine steuerbare Last aufgebaut werden, welche den zu messenden Teilsimulator so belastet, dass sich der Arbeitspunkt im oder in der Region um den MPP herum bewegt (im Prinzip gleich wie bei der Stabilitätsmessung im Kapitel 5.1.4.). Dabei werden Spannung und Leistung mit einem hochpräzisen Wattmeter abgetastet. Diese Abtastwerte lassen sich in einem P/U-Diagramm als Messpunktewolke darstellen. Anschliessend kann der MPP mit Hilfe eines Datenfits durch diese Wolke genau bestimmt werden. Im anschliessenden Betrieb mit einem Prüfling wird die vom Simulator abgegebene Leistung mit demselben Wattmeter gemessen wie bei der MPP-Messung. Dadurch kompensiert sich ein allfälliger Offsetfehler des Messgeräts, womit eine sehr hohe Messgenauigkeit erreicht wird.

Bei statischen Messungen müssen so die MPP-Leistungen von allen zu messenden Stufen bestimmt werden, was sehr einfach ist. Etwas komplizierter wird die Sache bei dynamischen Messungen. Je nach Testprofil werden dabei mehrere Tausend Kennlinien durchlaufen. Es wäre sehr zeitaufwendig, den MPP von jeder einzelnen Kennlinie messtechnisch zu bestimmen. Da aber der qualitative Verlauf der MPP-Leistung in Funktion der Zeit bereits anhand des Testprofils bzw. der Kennliniendaten bestimmt werden kann, ist das auch gar nicht notwendig. Stattdessen ist es ausreichend, den MPP von einer noch nicht definierten Anzahl Kennlinien zu bestimmen, und die Zwischenwerte anhand dieser Kalibrationspunkte zu interpolieren.

Eine weitere Funktion des Messsystems für das MPP-Tracking ist die Abtastung des Arbeitspunkts im Betrieb mit einem Prüfling. Dies dient vor allem der Visualisierung der Funktionsweise des MPP-Trackings. Damit diese Visualisierung jedoch aussagekräftig ist, muss die Abtastfrequenz hoch genug

sein, dass auch schnelle Änderungen des Arbeitspunkts erfasst werden. Dies betrifft insbesondere den Rippel auf der DC-Seite von einphasigen Solarwechselrichtern. Eine hochfrequente Abtastung ist mit einem Wattmeter nicht möglich, denn dieses bildet jeweils den Mittelwert über ein einstellbares, für diese Anwendung zu hohes, Zeitintervall. Der Einsatz eines Präzisions-Messgeräts ist auch nicht notwendig, da für diese Visualisierung keine hohe Genauigkeit gefordert wird (1 % reicht völlig aus).

7.2.2. Ausbau der Steuer- und Messsoftware

Mit der aktuellen Steuer- und Messsoftware ist es möglich, die Simulatoren zu konfigurieren und vollautomatische Testprofile laufen zu lassen. Die Messgeräte werden jedoch im Moment über eigene Programme angesteuert. Somit müssen für eine Messung immer mindestens zwei Programme bedient werden. Dadurch ist es momentan auch nicht möglich, die Messintervalle der Messgeräte mit den Testprofilen zu synchronisieren. Stattdessen müssen die Start- und Endpunkte manuell aus den Messdaten bestimmt werden.

Da dies äusserst umständlich ist, soll die Steuer- und Messsoftware so erweitert werden, dass nicht nur die Simulatoren, sondern auch die Messgeräte (inklusive dem geplanten Messsystem für das MPP-Tracking) vollautomatisch angesteuert werden. Die Messsoftware soll ausserdem über Funktionen verfügen, mit denen die Messresultate aufgearbeitet und visualisiert werden können.

7.2.3. Nachregelung der Speisespannung

Um die Verlustleistung der Teilsimulatoren gering zu halten, soll ihre Speisespannung dem jeweiligen Arbeitspunkt nachgeführt werden. Eine sinnvolle Nachführung wäre beispielsweise, dass die Speisespannung maximal 100 V über der Ausgangsspannung liegt. So könnte die Verlustleistung pro Teilsimulator im Dauerbetrieb auf maximal 1,6 kW reduziert werden. Damit könnten die Simulatoren geschont werden und die Messungen würden viel weniger Energie verbrauchen. Diese Nachführung erfolgt im Moment noch manuell.

Die eingesetzten Speisegeräte enthalten bereits die notwendigen Programmiergänge, mit denen die Speisespannung automatisch gesteuert werden kann. Es muss jedoch noch eine Steuerung entwickelt werden, welche die Sollwerte für die Speisegeräte erzeugt. Mit dieser soll es möglich sein, die Speisespannung von der Steuer- und Messsoftware des Prüfstands entweder auf einen festen Wert zu programmieren, oder aber wie beschrieben diesen Wert automatisch der Ausgangsspannung der Simulatoren nachzuführen.

7.2.4. Entstörung der Speisegeräte

Bei den eingesetzten Speisegeräten handelt es sich um primärgetaktete Netzgeräte, welche erhebliche EMV-Störungen erzeugen. Damit der Prüfstand für EMV-Messungen eingesetzt werden kann, müssen diese Störungen gefiltert werden. Dafür können keine herkömmlichen Entstörfilter eingesetzt werden, denn diese haben viel zu grosse Erdkapazitäten. Damit die angestrebte maximale Erdkapazität von 100 nF pro Teilsimulator nicht überschritten wird, müssen deshalb Filter nach dem Prinzip „Grosse Spule, kleiner Kondensator“ gebaut werden. Ein Prototyp eines solchen Filters wurde im Vorfeld des Projekts bereits erfolgreich getestet. Diese Filterschaltung soll nun optimiert und in die Teilsimulatoren eingebaut werden.

7.2.5. Erarbeiten sinnvoller Testprozeduren

Die existierenden Testprozeduren gemäss EN 50530 sind für Solarwechselrichter mit nur einem MPP-Tracker entwickelt worden. Sie sind daher nicht geeignet, die Eigenschaften eines Multistring-Solarwechselrichters vollumfänglich zu erfassen. So erlauben die bestehenden Tests beispielsweise keine Aussage darüber, wie hoch der Wirkungsgrad eines Prüflings ist, wenn die einzelnen MPP-Tracker stark unterschiedliche Eingangsleistungen haben. Dies ist jedoch für einen Multistring-Solarwechselrichter ein üblicher Betriebszustand.

Um allfällige Mängel der Prüflinge in solchen Fällen aufzudecken, sollen entsprechende Testprozeduren erarbeitet werden. Diese Arbeiten liefern einerseits Erkenntnisse für wissenschaftliche Publikationen. Andererseits werden die so entstehenden Ideen durch die Mitarbeit des Photovoltaiklabors der BFH-TI im entsprechenden Normengremium (TK82) eingebracht. Dadurch ist es denkbar, dass durch den in diesem Projekt entwickelten Prüfstand gewonnene Erkenntnisse mittelfristig den Weg in internationale Normen finden.

7.2.6. Vereinigung und Akkreditierung der Wechselrichterprüfstände

Derzeit läuft an der BFH-TI die Akkreditierung des 100 kW Wechselrichterprüfstands. Im Zuge davon wird der 100 kW Solargenerator-Simulator in dasselbe Labor gezügelt, in dem sich auch der Multistring-Prüfstand befindet. Zwischen den Simulatoren wird der Boden grossflächig mit geerdeten Aluminiumplatten ausgelegt, so dass eine gute Referenzmasse für EMV-Messungen zur Verfügung steht. Dieses Labor soll dann ausschliesslich für diese zwei Prüfstände zur Verfügung stehen und es wird einer restriktiven Zutrittsregelung unterliegen.

Wenn die Akkreditierung des 100 kW Prüfstands abgeschlossen ist, soll diese auf den Multistring-Prüfstand ausgeweitet werden. Es entsteht damit das einzige unabhängige Prüflabor für Solarwechselrichter in der Schweiz, welches zertifizierte Tests sowohl an Single- wie auch an Multistring Solarwechselrichtern anbieten kann.

7.2.7. Verbesserung des Programmieradapters

Wie bereits erwähnt wurde, erlaubt der entwickelte Adapter zur Programmierung der Kennlinien-Speichermodule derzeit nur die Programmierung der Hälfte der Kennlinien. Damit wie geplant 65'636 Kennlinien pro Modul programmiert werden können, muss die Software angepasst werden.

7.3. Geplante Arbeiten mit dem Multistring-Prüfstand

Zunächst soll der Prüfstand für Multistring Solarwechselrichter für Arbeiten innerhalb des PV-Labors der BFH-TI verwendet werden. Zunächst sollen mit dem Prüfstand zwei bis drei unterschiedliche Prüflinge untersucht werden. Diese Messungen können zum Teil sofort, zum Teil erst nach den beschriebenen Erweiterungen durchgeführt werden. Die Messresultate sollen in Form von wissenschaftlichen Publikationen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Daneben sollen diese Messungen auch dazu dienen, mögliche Kinderkrankheiten des Prüfstands zu erkennen und zu beheben.

Spätestens nach Abschluss der Akkreditierung der Wechselrichter-Prüfstände wird das PV-Labor der BFH-TI beginnen, aktiv auf die Wechselrichterhersteller zuzugehen und die Prüfstände entsprechend zu bewerben. Dadurch sollen einerseits Messaufträge in Form einer Dienstleistung beschafft werden. Andererseits wird aktiv die Zusammenarbeit mit der Industrie für Entwicklungsprojekte von neuen Wechselrichtertypen oder anderen Komponenten für PV-Anlagen gesucht (z.B. als KTI-Projekt). So kann die Industrie von der langjährigen Erfahrung des PV-Labors im Bereich des Wechselrichter-Testens profitieren. Im Gegenzug ermöglichen solche Projekte, dass das Know-How des Labors in diesem Bereich stets auf dem neusten Stand gehalten wird.

Eine Schwierigkeit von Messungen für die Industrie besteht darin, dass die so erlangten Resultate und Erkenntnisse nicht oder nur in gefilterter Form an die Öffentlichkeit gelangen – insbesondere dann, wenn die Messungen Schwächen aufzeigen. Dies steht im Widerspruch sowohl zum Forschungsauftrag der Fachhochschule als auch zur Philosophie der Qualitätssicherung des PV-Labors. Um sicherzustellen, dass die Öffentlichkeit von der Infrastruktur und der Erfahrung des PV-Labors profitieren kann, wird versucht werden, eine Messkampagne in Form eines öffentlich finanzierten Forschungsprojekts durchzuführen. Im Rahmen dieser Kampagne soll eine noch zu definierende Zahl von marktüblichen Solarwechselrichtern auf den Prüfständen untersucht werden. Die Resultate dieser Messungen sollen der Öffentlichkeit frei zugänglich gemacht werden. Einerseits werden die Testberichte auf der Website des PV-Labors aufgeschaltet, so dass sich Interessenten in der gesamten Kette vom Handel bis zum Endkunden über die Geräte informieren können. Andererseits sollen die Erkenntnisse dieser Messungen in Form von wissenschaftlichen Publikationen der Wissenschaftsgemeinde präsentiert werden. Dies hat zum Ziel, Schwachstellen in bestehenden Wechselrichter-Konzepten zu lokalisieren und die notwendigen Lehren für die Zukunft zu ziehen.

8. Referenzen

- [1] R. Bruendlinger, N. Henze, H. Haeberlin, B. Burger, A. Bergmann, F. Baumgartner:
"prEN 50530 – The new European Standard for Performance Characterisation of PV Inverters"
24th EU PVSEC, Hamburg, 2009.
- [2] H. Haeberlin, L. Borgna, M. Kämpfer, U. Zwahlen:
"Total Efficiency η_{TOT} – A new Quantity for better Characterisation
of Grid connected PV Inverters"
20th EU PVSEC, Barcelona, 2005
- [3] D. Gfeller, U. Muntwyler:
"Influence of a Solar Module's Fill Factor on
the static MPP tracking Performance of single Phase PV Inverters"
31st EU PVSEC, Hamburg, 14. – 18. September 2015.

9. Rechtshinweis

Die Inhalte dieses Berichts wurden von den Mitarbeitern des Photovoltaiklabors der Berner Fachhochschule nach bestem Wissen und Gewissen und unter Einsatz von zeitgemässen Hilfsmitteln erarbeitet. Da aber auch bei aller Sorgfalt Fehler nie ganz ausgeschlossen werden können, kann für die Richtigkeit dieses Berichtes keine Garantie übernommen werden. Infolgedessen lehnen die Autoren jede Haftung für die Verwendung der Inhalte dieses Berichtes oder daraus entstehenden Schäden ab.

10. Glossar

AC	Wechselstrom (engl. <i>alternating current</i>).
BFE	Bundesamt für Energie.
BFH-TI	Berner Fachhochschule, Technik und Informatik.
DC	Gleichstrom (engl. <i>direct current</i>).
DKE	Digitale Kennlinienerzeugung. Komponente des Solargenerator-Simulators welche mittels <i>Table-Look-Up</i> die Kennlinie generiert und für eine schnelle und stabile Regelung des Simulators sorgt.
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit. Oberbegriff für jede Art von elektromagnetischen Störungen, welche ein die Funktionsweise eines Gerätes beeinträchtigen können (Immunität) oder von diesem Verursacht werden und benachbarte Geräte stören könnten (Emission). Es gibt normative Mindestanforderungen an die Immunität sowie Obergrenzen für die Emission.
FF_I	Verhältnis zwischen MPP- und Leerlaufstrom. $FF_I = I_{MPP} / I_{SC}$.
FF_U	Verhältnis zwischen MPP- und Leerlaufspannung. $FF_U = U_{MPP} / U_{OC}$.
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> . Ein programmierbarer Logikbaustein. Mit diesem können Digitalschaltungen mit vielen Tausend Gattern und Flip-Flops realisiert werden.
Füllfaktor (FF)	Mass für die Güte einer Solarzelle. $FF = P_{MPP} / (U_{OC} * I_{SC}) = FF_U * FF_I$. Typische Füllfaktoren von Silizium-Solarzellen betragen etwa 70%...85%. Für normative Messungen gemäss EN50530 ist ein Füllfaktor von 72% vorgeschrieben.
IBC	<i>Intermediate Bulk Container</i> . Normierte Transport- und Aufbewahrungsbehälter für Flüssigkeiten mit einem Fassungsvermögen von 500 bis 1000 Litern.
IIR-Filter	<i>Infinite Impulse Response Filter</i> . Digitale, rekursive Filterschaltung. Je nach Struktur und Parameter können IIR-Filter eine Vielzahl von Filterfunktionen erfüllen.
I_{MPP}	Strom beim MPP.
I_{SC}	Kurzschlussstrom (von engl. <i>short circuit</i>). Dieser Strom fliesst aus einer Quelle (z.B. Solarmodul) wenn diese kurzgeschlossen wird.
KTI	Kommission für Technologie und Innovation. Förderagentur für Innovation des Bundes.
Look-Up Tabelle	Weil die Berechnung eines Kennlinienpunkts zu aufwendig ist, um in Echtzeit zu erfolgen, werden bei der DKE des Multistring-Simulators alle Kennlinien offline berechnet und in einem Speicher abgelegt. Ein solcher Speicher wird als Look-Up Tabelle bezeichnet. Die Werte müssen damit nur noch nachgeschlagen und skaliert werden.
Miller-Effekt	Oftmals unerwünschter Effekt, bei dem die Eingangskapazität eines Verstärker-Bauelements (z.B. MOSFET) durch die eigene Verstärkung ebenfalls verstärkt wird.
Mismatch	Produktionsbedingte Unterschiede der elektrischen Daten einzelner Solarzellen bzw. Solarmodule in der gleichen Verschaltung werden als Mismatch bezeichnet. Dies betrifft insbesondere Streuungen von Spannung und Strom beim MPP. Aufgrund von Mismatch können nie alle Solarzellen innerhalb eines Solargenerators in ihrem MPP betrieben werden. Dadurch entstehen Mismatch-Verluste.
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> . Ein Transistortyp mit den Anschlüssen Gate, Drain und Source. Der Strom von Drain zu Source wird über die Gate-Source-Spannung gesteuert. Das Gate ist sehr hochohmig isoliert, hat jedoch eine gewisse Kapazität.

MPP	<i>Maximum Power Point</i> . Der Punkt auf der Kennlinie einer Solarzelle, einem Solarmodul oder einer Verschaltung von Solarmodulen, an dem die maximale elektrische Leistung bezogen wird. Um einen optimalen Energieertrag zu erreichen, müssen Solaranlagen im MPP betrieben werden.
MPP-Tracker	Auch MPPT. Bestandteil von Solarwechselrichtern und Solarladeregeln. Elektronische Schaltung bzw. Regelung die dafür sorgt, dass das Gerät beim MPP arbeitet.
Operationsverstärker	Auch <i>OpAmp</i> , OPV. Integrierte Verstärkerschaltung, welche in der Regel nicht zur Leistungsverstärkung sondern zur Signalkonditionierung verwendet wird. Je nach Beschaltung lassen sich mit Operationsverstärkern viele Aufgaben der Analogtechnik (z.B. Verstärkung, Filterung, Regelung, Arithmetik) lösen.
P_{MPP}	Leistung beim MPP. Es gilt $P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}$.
SOA	<i>Safe Operating Area</i> . Betriebsbereich, in welchem ein Leistungshalbleiter zerstörungsfrei betrieben werden kann.
Solargenerator	Verschaltung von Solarmodulen. Der Solargenerator umfasst die DC-Seite einer Solaranlage, jedoch nicht den Wechselrichter. Bei klassischen Photovoltaikanlagen werden mehrere Solarmodule in Serie zu einem Strang und mehrere Stränge parallel zum Solargenerator verkabelt. Bei Anlagen mit Multistring-Solarwechselrichtern wird üblicherweise jeder Strang an einen separaten MPP-Tracker angeschlossen. Ein solcher Strang kann als Teilgenerator betrachtet werden.
STC	<i>Standard Test Conditions</i> . International einheitliche Testbedingungen für die Leistungsspezifikation von Solarmodulen. Bei STC beträgt die Einstrahlung $1'000 \text{ W/m}^2$ und die Zellentemperatur 25°C . Das Lichtspektrum ist ebenfalls definiert und entspricht in etwa dem sommerlichen Sonnenlicht in Mitteleuropa (AM 1,5 Spektrum). Da Solarzellen bei einer Einstrahlung von $1'000 \text{ W/m}^2$ normalerweise wärmer als 25°C sind, werden diese Bedingungen im Betrieb kaum erreicht. Es handelt sich also um eine rechnerische Spitzenleistung, weshalb die Leistung von Solarmodulen bei STC üblicherweise mit der Einheit <i>Watt Peak</i> (Wp) angegeben wird.
Strang	Auch Modulstrang. Serienschaltung von mehreren Solarmodulen. Häufig wird das englische Wort <i>String</i> verwendet.
Totaler Wirkungsgrad	Das Verhältnis der vom Prüfling abgegebenen Energie zu der dem Prüfling angebotenen Energie. Der totale Wirkungsgrad fasst den Umwandlungswirkungsgrad und den Trackingwirkungsgrad zu einer einzigen Grösse zusammen und kann auch durch Multiplikation dieser beiden Werte bestimmt werden.
Trackingwirkungsgrad	Das Verhältnis zwischen der vom Prüfling aufgenommenen Energie zu der dem Prüfling angebotenen Energie. Der Trackingwirkungsgrad ist ein Mass für dafür, wie gut ein MPP-Tracker den MPP findet. Er beträgt bei modernen Wechselrichtern typischerweise $>99\%$. Die Messung des Trackingwirkungsgrads ist anspruchsvoll und bedingt den Einsatz von hochstabilen Solargenerator-Simulatoren.
U_{MPP}	Spannung beim MPP.
Umwandlungswirkungsgrad	Das Verhältnis zwischen abgegebener (AC) Energie zu aufgenommener (DC) Energie eines Prüflings. Bei modernen Wechselrichtern typischerweise $>96\%$.
U_{OC}	Leerlaufspannung (von engl. <i>open circuit</i>). Diese Spannung liegt an einer Quelle (z.B. Solarmodul) an, wenn diese unbelastet ist.
Wärmekapazität	Ein Mass dafür, wieviel Energie notwendig ist, um einen Körper oder ein Fluid um eine bestimmte Temperatur zu erwärmen.