



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

MASTERARBEIT

Wirkungsgrad und Funktionalität von Maximum-Power-Point-Tracking Photovoltaik-Ladereglern

Ausgeführt am
**Institut für Angewandte Physik
der Technischen Universität Wien**

unter der Anleitung von
Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Martin Gröschl

in Zusammenarbeit mit dem
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

unter Betreuung von
Dipl.-Ing. Norbert Pfanner

durch
Fabian Dold, B.Eng.
Wiedner Hauptstraße 125/5, 1050 Wien

Wien, August 2018

Fabian Dold

VORWORT

Diese Masterarbeit entstand im Rahmen meines Masterstudiums Physikalische Energie- und Messtechnik an der TU Wien. Durchgeführt wurde die Arbeit am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE) in Freiburg von März 2016 bis Februar 2017.

Für diese Aufgabenstellung habe ich mich entschieden, da sie meine Interessen für Off-Grid-PV und Messtechnik miteinander verbindet. Während der Arbeit galt es für mich unterschiedliche Herausforderungen zu meistern, wobei ich mir jedoch immer vielseitigster Unterstützung sicher sein konnte. Besonders bereichernd war für mich das offene Arbeitsumfeld am Fraunhofer ISE. Die Bearbeitung der Masterarbeit war für mich sehr lehrreich und hat mir Freude bereitet.

Zuerst möchte ich Prof. Martin Gröschl für die Betreuung von Seiten der TU Wien danken. Die Unterstützung von Prof. Martin Gröschl hat diese Masterarbeit überhaupt erst möglich gemacht und entscheidend zum Gelingen beigetragen.

Besonders danken möchte ich Norbert Pfanner für die Betreuung der Arbeit am Fraunhofer ISE. Norbert Pfanner hat mich nicht nur in jeder Situation mit seinem umfassenden Fachwissen unterstützt, sondern mir auch immer viel Verständnis und Geduld entgegengebracht.

Speziell danken möchte ich meiner Schwester Sabrina Dold die mich in Freiburg gut aufgenommen hat und derer Unterstützung ich mir in jedweder Hinsicht sicher sein konnte. Weiterer Dank ergeht an meinen Freund Steffen Wassler, welcher mir in vielen Diskussionen ideell und fachlich beistand und immer ein offenes Ohr hatte.

Ganz besonders danke ich meiner Freundin Patricia Lalamu, dass sie mich immer ermutigt hat, sowohl in Momenten der Euphorie als auch der Verzagtheit.

Tiefsten Dank empfinde ich gegenüber meinen Eltern, da sie mir dieses Studium ermöglicht haben, mich immer mental und finanziell unterstützt haben und mir dadurch viele bereichernde Erfahrungen möglich waren.

KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wird eine Methode zur standardisierten Messung von Maximum-Power-Point-Tracking (MPPT) Photovoltaik-Laderegler-Wirkungsgraden untersucht und erfolgreich angewandt. Das entwickelte Verfahren wird als Vorlage für eine Norm vorgeschlagen. Die durchgeführten Wirkungsgradmessungen liefern einen Überblick über die bisher unbestätigte Effizienz aktueller MPPT-PV-Laderegler. Die Untersuchung der MPPT-Verfahren liefert neue Erkenntnisse darüber, welche Algorithmen in der Praxis eingesetzt werden.

Durch den technologischen Fortschritt und die Entwicklungen am Markt werden immer häufiger MPPT-Laderegler bei netzfernen Stromversorgungen eingesetzt. Im Vergleich zu herkömmlichen PV-Laderegler steht den Vorteilen in der Systemauslegung und den höheren Energieerträgen ein erhöhter Kaufpreis gegenüber. Bisher gibt es keine Norm für die Messung und Angabe der Effizienz von MPPT-Laderegler. Ebenso gibt es nur wenige wissenschaftliche Arbeiten, welche die Effizienz von MPPT-Laderegler in der Praxis untersuchen. Es sind keine Untersuchungen über Art und Performance von in der Praxis eingesetzten MPPT-Verfahren bei Laderegler bekannt.

Diese Arbeit untersucht wie der Wirkungsgrad von MPPT-Laderegler standardisiert gemessen werden kann, wie effizient aktuelle Geräte sind und welche MPPT-Verfahren in der Praxis eingesetzt werden. In der Arbeit werden die Wirkungsgrade von 5 MPPT-Laderegler unterschiedlicher Hersteller und Leistungsklassen gemessen. Der hierzu eingeführte Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler stellt reproduzierbare Ergebnisse sicher und ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Geräte. Für die Untersuchung der MPPT-Laderegler wurde am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ein Teststand entwickelt. In dieser Arbeit wird sowohl die Auswahl der Messmethoden als auch die Ausgestaltung von Simulations- und Messabläufen des Teststands beschrieben.

Mit Europäischen Gesamtwirkungsgraden von über 96 % und dynamischen MPPT-Wirkungsgraden von über 98 % wird die Effizienz von 3 der 5 getesteten MPPT-Laderegler als gut bewertet. Die Analyse der MPPT-Verfahren zeigt, dass alle Laderegler eine Kombination unterschiedlicher MPPT-Verfahren einsetzen.

ABSTRACT

This master thesis describes a new method for the measurement of maximum power point tracking (MPPT) photovoltaic (PV) charge controller efficiency. The method was successfully applied and is proposed as a draft for a new standard. The efficiency measurements presented in this thesis review the efficiency of modern MPPT PV charge controller. The analysis of MPPT methods provides new insights into which algorithms are used in practice.

MPPT charge controllers are increasingly used in off-grid power applications due to technological development and market trends. In comparison to conventional PV charge controllers, they make system design more flexible and allow higher energy yields, although investment costs are higher. Until now, no standard for the measurement and specification of MPPT charge controller efficiencies exists. Besides that, there are very few scientific papers analysing the efficiency of MPPT charge controllers and none are studying the type and performance of MPPT algorithms used in practice.

This thesis investigates how MPPT charge controller efficiency can be measured, how efficient current charge controllers are and which MPPT algorithms are used in practice. In the scope of this thesis, the efficiencies of 5 MPPT charge controllers from different manufacturers and of different capacity were measured. For these tests, the Fraunhofer ISE test standard for the measurement of MPPT charge controller efficiency was developed. It provided reproducible results and allowed the comparison of different devices. For the measurement of the MPPT charge controller efficiencies, a test rig was developed at the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. In this thesis the implemented measurement methods as well as simulation and measurement processes are described.

With European overall efficiencies above 96 % and dynamic MPPT efficiencies above 98 %, 3 out of the 5 tested MPPT charge controllers were found to be good. The analysis of the MPPT algorithms shows that all charge controllers utilize a combination of different MPPT methods.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Hintergrund und Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Methodik.....	2
2	PV-GENERATOR CHARAKTERISTIK	4
2.1	Veränderlichkeit des MPP	4
2.2	Anforderungen MPPT-Geschwindigkeit.....	6
3	MPPT-LADEREGLER	8
3.1	Technologie	8
3.2	MPPT-Verfahren.....	9
3.2.1	Indirekte MPPT-Verfahren	9
3.2.2	Direkte MPPT-Verfahren.....	10
4	FRAUNHOFER ISE TESTSTANDARD	14
4.1	Überblick Teststandard	14
4.2	Normen.....	16
4.3	Statischer Wirkungsgrad	17
4.4	Dynamischer Wirkungsgrad	20
4.5	Sonstige MPPT-Tests	22
5	MPPT-WIRKUNGSGRADTESTS IN DER LITERATUR	23
5.1	MPPT-Laderegler-Effizienz unter Real- und Laborbedingungen	23
5.2	MPPT-Laderegler-Wirkungsgrad in Anlehnung an DIN EN 50530	25
5.3	Netzgekoppelte Wechselrichter	28
5.4	Zusammenfassung Literatur.....	30

6	ANFORDERUNGEN MESSGERÄTE.....	31
6.1	Batteriesimulator.....	31
6.2	PV-Simulator	31
6.3	Messung Wirkungsgrad.....	32
7	FRAUNHOFER ISE PV-LADEREGLER-TESTSTAND	34
7.1	Aufbau Teststand.....	34
7.2	Messgeräte.....	35
7.3	Ablauf IEC 62509 Tests	36
8	MESSAUFBAU MPPT-WIRKUNGSGRADTESTS	37
8.1	Testablauf.....	37
8.2	Hardware.....	38
8.3	Software	44
8.3.1	SASControl.....	46
8.3.2	Arduino	51
8.3.3	Processing.....	52
8.4	Genauigkeit Wirkungsgradmessung.....	55
8.4.1	Fehlerabschätzung Umwandlungswirkungsgrad	55
8.4.2	Fehlerabschätzung MPPT-Wirkungsgrad	57
9	DURCHGEFÜHRTE MPPT-WIRKUNGSGRADTESTS	60
9.1	Überblick Wirkungsgradtests.....	60
9.2	Statischer Wirkungsgradtest.....	62
9.2.1	Statischer MPPT-Wirkungsgrad.....	62
9.2.2	Statischer Umwandlungswirkungsgrad.....	64
9.2.3	Statischer Gesamtwirkungsgrad	66
9.2.4	Gewichteter statischer Wirkungsgrad	67

9.2.5	Übersicht statische Wirkungsgradtests.....	69
9.3	Dynamischer Wirkungsgradtest.....	71
9.3.1	Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad.....	71
9.3.2	Übersicht dynamische Wirkungsgradtests.....	75
9.4	Sonstige MPPT-Tests	78
9.4.1	Einfluss Füllfaktoren	78
9.4.2	Analyse des Trackingverhaltens	80
9.4.3	Tracking von Mehrfachmaxima.....	90
9.4.4	Übersicht sonstige MPPT-Tests.....	94
9.5	Bewertung MPPT-Laderegler-Effizienz.....	97
10	DISKUSSION	99
11	AUSBLICK	102
	LITERATURVERZEICHNIS	VIII
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	X
	TABELLENVERZEICHNIS	XII
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIII
	ANHANG	XIV

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund und Motivation

Photovoltaik-Laderegler (PV-Laderegler) stellen die Überwachungs- und Schaltzentrale von PV-Batteriesystemen dar. Diese überwachen die Energieflüsse vom PV-Generator zur Batterie, zu DC-Verbrauchern und übernehmen Batterieschutz- und andere Sicherheitsfunktionen. Maximum-Power-Point-Tracking (MPPT) PV-Laderegler versuchen zusätzlich durch Anpassen des Arbeitspunkts des PV-Generators den Energieertrag zu maximieren. Die nicht konstante Leistungskennlinie von PV-Generatoren ändert sich in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen. Um dem PV-Generator in jeder Situation die maximale Leistung zu entnehmen, muss der Arbeitspunkt flexibel und permanent nachgeführt werden.

Bis vor wenigen Jahren waren MPPT-PV-Laderegler (MPPT-Laderegler) nur von wenigen Herstellern verfügbar und wurden aufgrund des hohen Preises nur für größere Anlagen und Spezialanwendungen eingesetzt. Mittlerweile sind MPPT-Laderegler im Leistungsbereich von 10 A und weniger von vielen Herstellern verfügbar und haben somit den Massenmarkt erreicht. Vermehrt werden MPPT-Laderegler von neuen Herstellern, oft asiatischer Herkunft, zu sehr günstigen Preisen angeboten. Hierbei liegen die Preise der Produkte dieser neuen Hersteller teilweise bei der Hälfte der Produkte etablierter Hersteller. Hieraus ergeben sich Fragen bezüglich derer Qualität und Effizienz.

MPPT-Laderegler Hersteller werben mit um bis zu 30% gesteigerten Energieerträgen durch MPPT und rechtfertigen damit die in der Regel deutlich höheren Preise von MPPT-Laderegler im Vergleich zu herkömmlichen Laderegler. Für den Käufer eines Laderegler sind die Wirksamkeit des MPPT und die gesteigerte Effizienz nicht ersichtlich oder überprüfbar. Aktuell existiert keine internationale Norm, welche die Messung und Angabe der Effizienz von MPPT-Laderegler standardisiert oder vorschreibt. Dadurch besteht für den Kunden bei der Kaufentscheidung auch nicht die Möglichkeit, die Effizienz unterschiedlicher Geräte auf Grundlage standardisierter Datenblattangaben zu vergleichen.

Es ist wenig über den Stand der Technik und die tatsächliche Effizienz von am Markt erhältlichen MPPT-Laderegler bekannt. Wenn überhaupt, geben Hersteller zumeist nur Spitzenwirkungsgrade für ihre Produkte an. Da Spitzenwirkungsgrade nur einen optimalen Arbeitspunkt beschreiben, lassen diese kaum Rückschlüsse auf die Effizienz des Laderegler unter realen Einsatzbedingungen zu. Daraus ergibt sich die

Notwendigkeit standardisierte Testverfahren für die Messung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler zu schaffen und zu etablieren. Dieser Test wird von internationalen Normen bisher nicht gefordert. Die Entwicklung am Markt und das Interesse von Laderegler Herstellern deuten jedoch daraufhin, dass das Thema MPPT-Tests in naher Zukunft stark an Bedeutung gewinnen wird.

1.2 Zielsetzung und Methodik

Im Rahmen dieser Masterarbeit sollen messtechnische Verfahren für die Überprüfung von MPPT-Laderegler entwickelt und implementiert werden. Dieser Masterarbeit vorausgehenden wurde vom Autor in einer Studienarbeit der Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler erarbeitet.[1] Dieser hausinterne Fraunhofer ISE Teststandard stützt sich auf die bestehende Norm DIN EN 50530, welche Messverfahren zur Bestimmung des Wirkungsgrads von netzgekoppelten MPPT-Wechselrichter beschreibt, und die Norm IEC 62509, welche Testbedingungen für herkömmliche PV-Laderegler formuliert. Dieser Fraunhofer ISE Teststandard wird den MPPT-Laderegler tests dieser Arbeit zugrunde gelegt. Am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE), an welchem diese Masterarbeit durchgeführt wird, existiert ein Teststand zum Testen herkömmlicher PV-Laderegler ohne MPPT. Dieser Teststand soll weiterentwickelt werden, um zukünftig MPPT-Laderegler standardisiert testen zu können.

Als Schwerpunkt der Arbeit soll die Effizienz moderner MPPT-Laderegler untersucht werden. Hierzu soll eine Auswahl von am Markt verfügbaren MPPT-Laderegler getestet und verglichen werden. Eine Studie aus dem Jahr 2013 attestiert MPPT-Laderegler geringe Wirkungsgrade im Vergleich zu netzgekoppelten Wechselrichter und stellt den Mehrertrag gegenüber herkömmlichen Laderegler in Frage.[2] Dieses Ergebnis soll als These dieser Arbeit auf Aktualität überprüft werden. Das Testen unterschiedlicher Laderegler soll ermöglichen den Entwicklungsstand einzuordnen und Minimalanforderungen bezüglich des Wirkungsgrads zu definieren.

Im Rahmen dieser Tests soll ebenso untersucht werden, welche MPPT-Verfahren in der Praxis eingesetzt werden. Für ein tieferes Verständnis der Funktionsweise von MPPT-Laderegler ist es unerlässlich die eingesetzten MPPT-Verfahren zu kennen. Dadurch sollen Schwachstellen der MPPT-Verfahren identifiziert und Verbesserungspotentiale aufgezeigt werden.

In Kapitel „2 PV-Generator Charakteristik“ und Kapitel „3 MPPT-Laderegler“ werden die technologischen Grundlagen von MPPT-Laderegler behandelt. Ebenso wird

untersucht, welche MPPT-Verfahren sich in der Literatur finden. In Kapitel „4 Fraunhofer ISE Teststandard“ wird der vorgeschlagene Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler diskutiert. In Kapitel „5 MPPT-Wirkungsgradtests“ erfolgt eine Analyse und Bewertung von Veröffentlichungen auf dem Gebiet von MPPT-Wirkungsgradtests. Hieraus werden unter anderem die in Kapitel „6 Anforderungen Messgeräte“ definierten Rahmenbedingungen für die Erweiterung des bestehenden Teststands abgeleitet, welcher in Kapitel „7 Fraunhofer ISE PV-Laderegler-Teststand“ beschrieben wird. Kapitel „8 Messaufbau MPPT-Wirkungsgrad“ behandelt die Durchführung der Erweiterung des Teststands sowie die Umsetzung der Laderegler MPPT-Tests. Um reproduzierbare Wirkungsgradtests zu gewährleisten, kommt sowohl den eingesetzten Messverfahren selbst, als auch den Prozessabläufen große Bedeutung zu. In Kapitel „9 Durchgeführte MPPT-Wirkungsgradtests“ werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten MPPT-Laderegler-Wirkungsgradtests skizziert und analysiert. Für MPPT-Laderegler typische sowie besonders auffällige Ergebnisse werden beispielhaft diskutiert. Ebenso erfolgen ein Vergleich und eine Bewertung aller Testergebnisse. In Kapitel „10 Diskussion“ werden die wichtigsten Ergebnisse in Bezug auf die Zielsetzung der Arbeit diskutiert bevor in „11 Ausblick“ die übergeordnete Bedeutung der Arbeit und zukünftige Aufgabenstellungen skizziert werden.

2 PV-GENERATOR CHARAKTERISTIK

2.1 Veränderlichkeit des MPP

Photovoltaik Solarzellen charakterisiert ein nicht konstanter Innenwiderstand, wodurch nur in einem bestimmten Betriebspunkt, dem sogenannten Maximum-Power-Point (MPP) maximale Leistung abgegeben wird. Um Leistungsanpassung zu erreichen, muss der Lastwiderstand gleich dem momentanen Innenwiderstand der Quelle entsprechen. Die Kennlinie der PV-Zelle und somit auch der MPP ändert sich mit den Umgebungsbedingungen. In Systemen mit

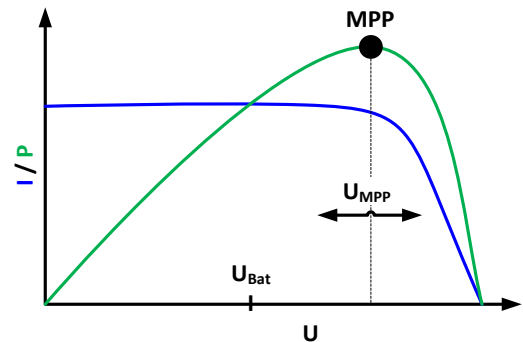


Abb. 1: U/I Kennlinie PV-Modul

Batteriespeicher ändert sich zusätzlich die Batteriespannung in Abhängigkeit von Ladestand, Last und Temperatur. Um Leistungsanpassung zu erreichen, muss die Last des PV-Generators flexibel den vorherrschenden Umgebungsbedingungen angepasst werden. MPPT-Laderegler haben zum Ziel, eingangsseitig mittels eines optimierten Gleichspannungswandlers die Spannung dieses optimalen Betriebspunktes einzustellen und nachzuführen, um maximale Leistungsabgabe bei beliebigen Umgebungsbedingungen zu erreichen. Gleichzeitig soll ausgangseitig eine von den Betriebsparametern des PV-Moduls unabhängige Spannung zur Batterieladung geliefert werden.

Die Lage des MPP eines PV-Systems ist nicht nur von Zelltechnologie, Modulaufbau und Auslegung abhängig, sondern wird auch stark von Umgebungsbedingungen beeinflusst. Den größten Einfluss auf den MPP zeigen Sonneneinstrahlung, Temperatur und Modulabschattung. Darüber hinaus können sich weitere Effekte durch Verschmutzung und Alterung zeigen. Teilabschattungen von Modulen durch Wolkenbildung können innerhalb einiger Sekunden zu einer deutlichen Veränderung des MPPs führen. Somit ist es nicht nur wichtig dass der MPP genau lokalisiert, sondern der Arbeitspunkt auch ausreichend schnell nachgeführt wird.

Sofern nicht abweichend vermerkt, werden im gesamten Verlauf der Arbeit alle Angaben zu Strom, Spannung und Leistung am PV-Generator bezogen auf Standard-Testbedingungen nach IEC 60904-3, auch STC – Standard Test Conditions genannt, angegeben. Angaben nach Standard-Testbedingungen liegen eine

Modultemperatur von 25 °C, eine Einstrahlung von 1000 W/m² in Modulebene sowie weitere definierte Umgebungsbedingungen zu Grunde.

Mit der Zelltemperatur ändert sich die MPP Spannung eines PV-Moduls. Temperaturkoeffizienten liegen je nach Technologie typischerweise zwischen -0,2 %/K und -0,55 %/K. [3, S. 3273 f.] Abb. 2 zeigt die Temperaturabhängigkeit der MPP Spannung beispielhaft für ein Si PV-Modul.

Die Sonneneinstrahlung bestimmt maßgeblich die Leistungsabgabe eines PV-Moduls und beeinflusst auch die MPP Spannung. Beispielsweise durch Wolkenbewegungen kann sich die Einstrahlung auf das Modul innerhalb weniger Sekunden halbieren oder verdoppeln. Abb. 3. zeigt die Abhängigkeit der MPP Spannung eines Si PV-Moduls von der Sonneneinstrahlung.

Teilabschattungen von PV-Modulen oder Strings können eine abgeknickte PV-Generatorkennlinie mit mehreren lokalen Leistungsmaxima zur Folge haben. Die Simulation eines teilabgeschatteten Strings ist in Abb. 4 zu sehen.

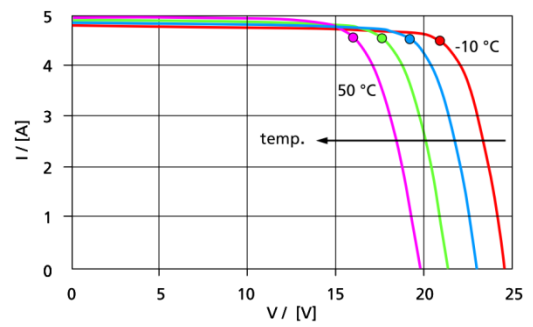


Abb. 2: U/I Kennlinie Si PV-Modul, Einfluss Temperatur auf MPP [3, S. 3273]

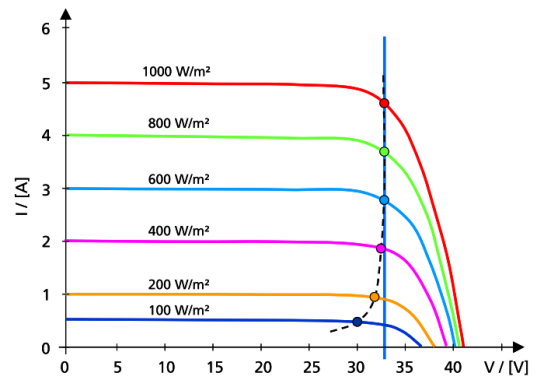


Abb. 3: U/I Kennlinie Si PV-Modul, Einfluss Sonneneinstrahlung auf MPP [3, S. 3274]

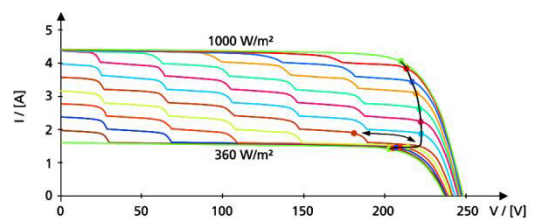


Abb. 4: U/I Kennlinie Si PV-String, Simulation Teilabschattung [3, S. 3275]

2.2 Anforderungen MPPT-Geschwindigkeit

Um einen hohen MPPT-Wirkungsgrad sicherzustellen, muss ein Laderegler einerseits den MPP zuverlässig auffinden und den Arbeitspunkt möglichst gleich diesem einstellen. Andererseits muss der Arbeitspunkt ausreichend schnell einem veränderten MPP nachgeführt werden.

Trotz des hohen Temperaturkoeffizienten von PV-Zellen führt die thermische Masse von PV-Modulen in der Realität zu vergleichsweise langsamen Änderung der MPP Spannung von $< 0,033 \text{ } \%/s$. [3, S. 3273 f.] Somit erfordern durch Temperaturänderungen hervorgerufene Schwankungen der MPP Spannung keine besondere Schnelligkeit des MPPTs.

Wie in Abb. 3 zu sehen ist die MPP Spannung von PV-Modulen zwischen $300 \text{ } \text{W}/\text{m}^2$ und $1000 \text{ } \text{W}/\text{m}^2$ nahezu konstant. Schnell vorüberziehende Wolken, an Tagen mit hoher Einstrahlung, ergeben typischerweise Einstrahlungsschwankungen in diesem Bereich. Untersuchungen legen ebenso nahe, dass solche sprunghaften Einstrahlungsänderungen in diesem Bereich durch das vergleichsweise seltene Auftreten nur einen geringen Einfluss auf die Ertragssituation haben. [3, S. 3274] Durch den Effekt der nahezu konstanten MPP Spannung zwischen $300 \text{ } \text{W}/\text{m}^2$ und $1000 \text{ } \text{W}/\text{m}^2$ ergeben sich selbst aus sprunghaften Änderungen der Sonneneinstrahlung durch vorüberziehende Wolken keine besonders hohen Anforderungen an die Geschwindigkeit des MPPT. Bei Einstrahlungswerten unter $300 \text{ } \text{W}/\text{m}^2$, welche typisch für sonnenarme und bewölkte Tage sind, zeigen sich deutlich größere Abhängigkeiten der MPP Spannung von der Einstrahlung. An sonnenarmen Tagen kommt es jedoch in der Regel nicht zu sprunghaften Einstrahlungsänderungen, sondern die Einstrahlung ändert sich nur langsam mit zeitlich ausgedehnten Wetterveränderungen. Dadurch ist bei niedrigen Einstrahlungsbedingungen mehr die Genauigkeit, weniger die Geschwindigkeit des MPPTs wichtig.

Die Teilabschattung von Modulen kann eine schnelle und deutliche Veränderung der MPP Spannung verursachen. Vor allem bei größeren, flächenmäßig ausgedehnten PV-Anlagen können die Ränder schnell vorüberziehender Wolken zu abrupten Teilabschattungen führen. Simulationen legen jedoch nahe, dass der Einfluss der Teilabschattung durch Wolken auf den Jahresenergieertrag vergleichsweise gering ist. Dessen Zusage könnten MPPTs mit einer Geschwindigkeit von $0,1 \text{ } \%/s$ selbst an Tagen starker Einstrahlungsschwankungen theoretisch Wirkungsgrade von $> 99,9 \text{ } \%$ erreichen. Eine Erhöhung der Trackinggeschwindigkeit über diesen Wert hinaus lasse laut Simulationen keine signifikanten Wirkungsgradverbesserungen mehr erwarten. Die Trackinggeschwindigkeit von Wechselrichtern liege üblicherweise

zwischen $0,1 \text{ %/s}$ und 1 %/s und werde in der Regel als ausreichend schnell angesehen. [3, S. 3276] Bei kleineren PV-Anlagen von $< 5 \text{ kW}$, welche vorwiegend Gegenstand dieser Arbeit sind, lassen sich aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung weniger Teilabschattungen durch Wolken erwarten. Umso mehr hingegen Teilabschattungen durch umliegenden Bewuchs, Bebauung oder Verschmutzung, welche sehr wohl einen signifikanten Einfluss auf den Energieertrag haben können. Beispielsweise durch umliegende Bäume oder Nachbargebäude, welche im Tagesverlauf zu einer unterschiedlich starten Teilabschattung führen. Hierbei ist jedoch auch die Trackinggeschwindigkeit weniger von Bedeutung als dass der MPPT zuverlässig das globale Leistungsmaximum der abgeknickten Modulkennlinie mit mehreren lokalen Leistungsmaxima findet.

Zusammenfassend lassen sich keine besonders hohen Anforderungen an die Geschwindigkeit des MPPTs erwarten. Aufgrund des Einflusses auf den Energieertrag lässt vermuten, dass die Genauigkeit des MPPTs eine größere Auswirkung auf die Effizienz des Ladereglers hat als dessen Geschwindigkeit.

3 MPPT-LADEREGLER

3.1 Technologie

PV-Laderegler werden in DC gekoppelten PV-Anlagen mit Batteriespeicher eingesetzt. Hierbei überwacht und regelt der Laderegler die Energieflüsse im System und schützt in erster Linie die Batterie vor Tiefentladung und Überladung. Ebenso sind in der Regel mehrstufige Ladealgorithmen zur Erhöhung von Kapazität und Lebensdauer der Batterie implementiert. Laderegler besitzen zumeist ebenso ein Display oder LED Anzeigen zur Nutzerinformation. Viele Laderegler verfügen über zusätzliche Anschlüsse für das direkte versorgen von DC-Lasten, Kommunikationsschnittstellen und sind fähig externe Lasten zu steuern. Abb. 5 zeigt ein PV-Heimsystem als typisches Anwendungsbeispiel.

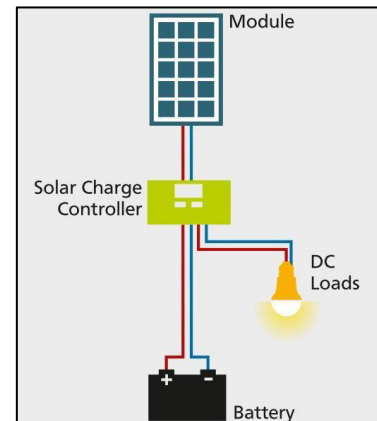


Abb. 5: PV-Heimsystem
[4, S. 7]

MPPT ist Stand der Technik bei netzgekoppelten PV-Wechselrichtern und wird auch bei einer steigenden Anzahl an PV-Laderegler eingesetzt. Noch bis vor wenigen Jahren wurde MPPT zumeist nur für PV-Anlagen im kW Bereich eingesetzt. Durch die technologische Entwicklung stehen mittlerweile auch PV-Laderegler mit MPPT für Leistungen von 250 W und weniger zur Verfügung und beginnen sich am Markt zu etablieren. Für netzgekoppelte PV-Wechselrichter können durch standardisierte und seit mehreren Jahren etablierte Testverfahren hohe MPPT-Wirkungsgrade bestätigt werden. Durch den relativ neuartigen Einsatz von MPPT bei PV-Laderegler und das Fehlen von Testnormen können hohe MPPT-Wirkungsgrade für MPPT-Laderegler nicht bestätigt werden.

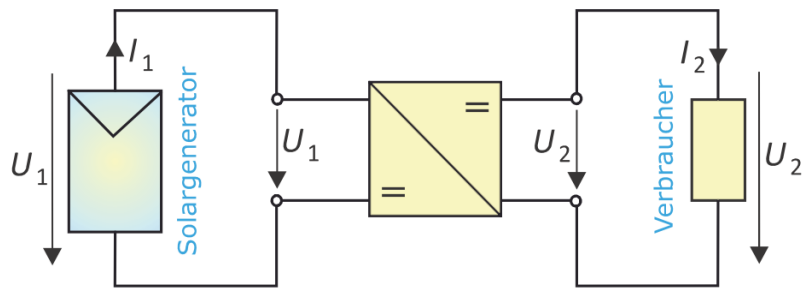


Abb. 6: Solargenerator mit Gleichspannungswandler und Verbraucher [5, S. 204]

Technologisch gesehen kann bei MPPT-Laderegler die dieselbe MPPT-Technologie wie bei netzgekoppelten Wechselrichter zum Einsatz kommen. Das Arbeitsprinzip besteht darin, die PV-Spannung oder alternativ den PV-Strom so zu regeln, dass die PV-Leistung maximiert wird. Auf diese Weise soll ein Arbeitspunkt möglichst nahe am tatsächlichen MPP erreicht werden. Hierzu wird ein Gleichspannungswandler zwischen PV-Generator und Batterie geschaltet, der am PV-Generator eine andere Spannung als am Verbraucher einstellt. Auslegungstechnisch ist es für ein PV-System in der Regel günstiger die PV-Spannung größer als die Batteriespannung zu wählen, weshalb zumeist Hochsetzsteller eingesetzt werden. Zu sehen ist der prinzipielle Aufbau in Abb. 6.

3.2 MPPT-Verfahren

3.2.1 Indirekte MPPT-Verfahren

Indirekte MPP Suchverfahren verzichten auf eine Rückkopplungsschleife mit Strom- und Spannungsmessung und schätzen die Lage des MPPs indirekt aus anderen Kenngrößen. Hierbei kann der Sollwert entweder aus zuvor in einer Datenbank abgespeicherten Betriebsparametern bestimmt oder mittels eines mathematischen Modells des PV-Generators, wie zum Beispiel des 2-Dioden Modells, berechnet werden.

Zum Schätzen des MPPTs können beispielsweise Zelltemperatur und Einstrahlung gemessen werden, um daraus die theoretische Lage des MPPs zu berechnen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Leerlaufspannung oder Kurzschlussstrom des PV-Generators zu messen und hieraus Rückschlüsse auf den MPP zu treffen. Zum Messen von Leerlaufspannung oder Kurzschlussstrom muss jedoch der normale Betrieb, mit der Folge von Energieverlusten, unterbrochen werden. Unter der Annahme eines näherungsweise konstanten Verhältnisses von Leerlaufspannung und MPP Spannung kann daraus der MPP berechnet und die MPP Spannung

eingestellt werden. Beim Verhältnis von Leerlaufspannung zu MPP Spannung handelt es sich um eine zellspezifische Eigenschaft, welche üblicherweise zwischen 0,73 und 0,80 liegt.[6, S. 1563] Um Energieverluste während des Messvorgangs zu vermeiden, können die Messungen an einer Referenzzelle durchgeführt werden.

Die Schwierigkeit der indirekten MPPT-Verfahren besteht darin, die Gesamtheit der möglichen Betriebszustände in ausreichender Genauigkeit abzubilden. So ist es herausfordernd alle möglichen Klimabedingungen zu berücksichtigen. Das genaue Schätzen des MPPs erfordert detailliertes Vorwissen über das Betriebsverhalten des PV-Generators, welches eine modulspezifische Implementierung erfordert. Trotz der Einfachheit dieser Verfahren können detailliertere Schätzverfahren einen nicht zu vernachlässigenden Rechen- beziehungsweise Speicheraufwand bedeuten. Allen indirekten MPP Verfahren ist gemein, dass es sich um keine echten MPPT-Verfahren handelt. Daher im englischen auch „quasi-seeK“ Verfahren genannt. Der MPP wird lediglich auf Grundlage von Vorwissen abgeschätzt und der tatsächliche MPPT bleibt unbekannt. Hieraus ergibt sich auch der Nachteil, dass indirekte Verfahren nur ideale Betriebszustände abbilden. Bei nicht idealen Betriebszuständen beispielsweise durch Verschmutzung, Abschattung oder auch Alterung ist ein Suchen des MPPs nicht mehr möglich. Die Effizienz von indirekten MPPT-Verfahren hängt in erster Linie davon ab, wie exakt die verwendeten Rechenmodelle, Datenbanken und Annahmen das reale Verhalten des PV-Generators abbilden.

Es sind keine am Markt befindlichen Laderegler oder auch Wechselrichter bekannt, welche die Temperatur am Modul oder die Einstrahlung zur MPP Bestimmung messen. Ebenso ist der Einsatz von Referenzzellen nicht bekannt. Daraus wird gefolgert, dass indirekte MPPT-Verfahren, welche auf externe Temperatur und Einstrahlungsmessungen zurückgreifen, beziehungsweise eine Referenzzelle benötigen, in der Praxis nicht eingesetzt werden. Der Einsatz von Verfahren, welche den MPP aus Kurzschlussstrom beziehungsweise Leerlaufspannung ableiten, ist nicht dokumentiert.

3.2.2 Direkte MPPT-Verfahren

Direkte MPP Suchverfahren nutzen eingangs- oder ausgangsseitige Strom- und Spannungsmessungen im Arbeitspunkt, um den MPP zu ermitteln. In Abhängigkeit von den Messungen wird die Spannung am PV-Generator so korrigiert, dass die Leistung des PV-Generators zunimmt, beziehungsweise maximal wird. Das Such- und Korrekturverfahren kann sowohl kontinuierlich als auch periodisch ablaufen. Die meisten direkten Suchverfahren beruhen auf Sampling Methoden, wobei die zeitliche Veränderung der Leistung ausgewertet wird. Hierzu wird aus der aktuellen und

vorhergehenden Messung die Änderung der Leistung berechnet und in Abhängigkeit davon der Arbeitspunkt korrigiert.

Beim sogenannten „I/V Tracing“ wird zur Lokalisierung des MPPs die Spannung am PV-Generator kontinuierlich verändert und die resultierende Leistung gemessen. Wird die Spannung, von der Leerlaufspannung ausgehend, kontinuierlich erniedrigt, steigt die Leistung bis zum Erreichen des MPP. Nach Überschreiten des MPP sinkt die Leistung wieder, welches als Abbruchkriterium benutzt werden kann. Dieses Verfahren kann auch eingesetzt werden, um die Leistungskennlinie des PV-Generators über den gesamten Spannungsbereich abzutasten. Dies ermöglicht das globale Leistungsmaximum neben mehreren lokalen Leistungsmaxima zu identifizieren.

Dieses Verfahren ist vergleichsweise langsam und das Durchfahren des gesamten Spannungsbereichs, während dessen der Arbeitspunkt nicht im MPP liegt, führt zu Energieverlusten. Unabhängig davon ist es eines von wenigen Verfahren, welche bei einer Leistungskennlinie mit mehreren Maxima, beispielsweise durch Teilabschattung der Module, zuverlässig den tatsächlichen MPP finden können.

Bei der Methode der Lastsprünge, im Englischen auch „Perturb and Observe“ (P&O) genannt, handelt es sich um das meist eingesetzte Verfahren.[6, S. 1565] Hierbei wird die Belastung des PV-Generators periodisch verändert und die sich ergebende, veränderte Leistung gemessen. Hierzu wird beispielsweise die Spannung je nach Suchrichtung periodisch wenige Volt erhöht oder erniedrigt. Ist die gemessene Leistung größer als in der vorhergehenden Messperiode, wird die Suchrichtung beibehalten, ist die Leistung kleiner als in der letzten Messperiode, wird die Suchrichtung geändert. Es handelt sich um eine Anwendung des sogenannten Bergsteigeralgorithmus. Aus dem periodischen Ändern der Spannung ergibt sich eine Oszillation um den MPP, wobei der MPP selbst nie erreicht wird. Bei sich schnell ändernder Einstrahlung kann sich bei der Methode der Lastsprünge ein fehlerhaftes Suchverhalten ergeben. Wird beispielsweise aufgrund der schnell zunehmenden Einstrahlung eine zunehmende Leistung gemessen, kann die Leistungszunahme vom Regler fälschlicherweise als Folge der vorhergehenden Spannungsänderung interpretiert werden. Wurde beim vorhergehenden Auslenkungsschritt die Spannung negativ verändert, wird nun im folgenden Schritt, aufgrund der Leistungszunahme, die Spannung weiter negativ verändert. Tatsächlich hat sich die MPP Spannung jedoch leicht erhöht. Solange die schnelle Zunahme der Einstrahlung anhält, wird sich der Arbeitspunkt immer weiter vom MPP wegbewegen mit der Folge von Energieeinbußen.

Die Methode der steigenden Konduktanz, im Englischen auch als „Incremental Conductance“ (IC) bezeichnet, verwendet den differentiellen sowie konkreten

Leitwert des PV-Generators zum Auffinden des MPP. Als Kriterium wird benutzt, dass die Änderung der abgegebenen Leistung in Relation zur Änderung der Spannung im MPP null wird, mathematisch die Ableitung der Leistung nach der Spannung. Dabei ist links des MPPs die Ableitung positiv und rechts des MPPs negativ. In Abhängigkeit vom Wert der Ableitung der Leistung nach der Spannung ändert der Regler die Spannung am PV-Generator. Dies wird Schrittweise solange wiederholt, bis die Ableitung null wird und der MPP erreicht ist. Ändert sich die Leistung aufgrund veränderter Umgebungsbedingungen, wird die Suche nach dem MPP wieder aufgenommen.

Im Vergleich zur Methode der Lastsprünge wird die Methode der steigenden Konduktanz als schneller und besser geeignet für den Einsatz unter sich schnell ändernden Einstrahlungsbedingungen beschrieben. Aufgrund des besseren Konvergenzverhaltens der Methode ergeben sich theoretisch keine Oszillationen um den MPP.[6, S. 1565 ff.]

Entgegen diesen theoretischen Annahmen sind Simulationen zu dem Ergebnis gekommen, dass ein optimierter Algorithmus nach der Methode der Lastsprünge über einen weiten Bereich ein leicht besseres dynamisches und statisches Verhalten liefern kann als ein Algorithmus nach der Methode der steigenden Konduktanz.[7, S. 66 ff.] Die unterschiedlichen Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Verhalten der beiden Methoden der Lastsprünge und der steigenden Konduktanz offensichtlich stark von der konkreten Implementierung und Parametrisierung abhängig ist. Es können keine generellen Aussagen über Vor- und Nachteile bezüglich deren Effizienz getroffen werden. Aufgrund der größeren Anzahl benötigter Mess- und Rechenschritte zeigt sich für die Methode der steigenden Konduktanz jedoch ein größerer Realisierungsaufwand. Sowohl für die Methode der Lastsprünge als auch der steigenden Konduktanz stellt das Suchen des MPPs bei niedriger Einstrahlung eine Herausforderung dar, da hierbei sehr kleine Leistungsänderungen gemessen und ausgewertet werden müssen. In solchen Fällen können indirekte MPPT-Verfahren vorteilhaft sein.

Weitere MPP Suchverfahren benutzen Modulationsverfahren zum Suchen des MPPs. Bei der Methode der erzwungenen Schwingungen wird der PV-Spannung eine Schwingung kleiner Amplitude mit beispielsweise 100 Hz überlagert.[6, S. 1573] Dies führt ebenso zu einer Welligkeit der Leistung, deren Phase und Amplitude wiederum von der Lage des momentanen Arbeitspunkt abhängt. Liegt der Arbeitspunkt links des MPPs sind die Frequenzen von Leistung und Spannung in Phase, liegt der Arbeitspunkt rechts des MPPs sind die Frequenzen von Spannung und Leistung um 180° phasenversetzt. Liegt der Arbeitspunkt hingegen genau im MPP verdoppelt sich die Frequenz der Leistung gegenüber der Frequenz der Spannung. Vorteile dieser Methode sind, dass Amplitude und Phasenverschiebung

Informationen über die Lage des MPPs liefern und die Stellgröße langsam gegen null konvergiert. Somit kommt es, abgesehen von der erzwungenen Modulation, zu keinen Oszillationen um den MPP. Als Nachteil lässt sich jedoch der deutlich größere Aufwand für die Messung und Auswertung der sehr kleinen Amplituden nennen.

Direkte MPP Verfahren benötigen weder große Datenbanken noch großen Speicher und kommen ohne A-Priori Wissen aus. Weder detaillierte Kenntnis der Eigenschaften des PV-Generators noch Kenntnisse der klimatologischen Bedingungen sind notwendig. Dadurch sind diese flexibel und unabhängig einsetzbar. Daher werden diese im englischen auch als „true-seeking“ Methoden bezeichnet. Die Effizienz der direkten MPPT-Verfahren wird von der technischen Umsetzung und Wahl der Betriebsparameter stark mit beeinflusst. So muss beispielsweise durch eine geeignete Wahl der Reglerparameter Schrittweite und Periodendauer ein guter Kompromiss aus Schnelligkeit, Einschwingverhalten und Realisierungsaufwand gefunden werden.

In der Literatur existieren eine Vielzahl von Abwandlungen, Weiterentwicklungen und Kombinationen der vorhergehend diskutierten Grundtypen der MPPT-Verfahren. Beispielsweise werden Verfahren beschrieben, welche die parasitäre Kapazität der Solarzelle zusätzlich berücksichtigen oder durch entsprechende Methodik nur das Messen der Spannung als einzigen Parameter erfordern. [8][9] Zahlreiche Autoren schlagen ebenso die Verwendung von Methoden neuronaler Netze oder den Einsatz von Fuzzy Logic Reglern vor.[10] Da an dieser Stelle eine Beschränkung auf die grundlegenden Verfahren stattfinden soll, wird auf diese nicht näher eingegangen.

Eine Vielzahl von Veröffentlichungen beschäftigt sich mit der Evaluation und dem Vergleich unterschiedlicher MPPT-Algorithmen. Ebenso werden oft verbesserte Algorithmen mit gesteigerter Effizienz vorgeschlagen. Leider werden hierzu zumeist nur vereinfachte Simulationsmodelle verwendet und es wird auf Messungen an hardwaretechnisch realisierten MPPTs verzichtet. Wird berücksichtigt, dass moderne MPPT-Wechselrichter MPPT-Wirkungsgrade von über 99% erreichen, muss angezweifelt werden ob diese vereinfachten Simulationen reale Betriebsbedingungen ausreichend genau abbilden können.[11][12] In der Literatur finden sich keine Arbeiten, welche in Laderegler oder Wechselrichter eingesetzte MPPT-Algorithmen durch Messungen untersuchen. Daher ist nicht bekannt welche MPPT-Verfahren tatsächlich eingesetzt werden, wie diese genau implementiert sind und wie sich unterschiedliche MPPT-Verfahren unter Realbedingungen verhalten.

4 FRAUNHOFER ISE TESTSTANDARD

4.1 Überblick Teststandard

Der Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler kombiniert die in der Norm DIN EN 50530 beschriebenen Messverfahren zur Bestimmung des Wirkungsgrads von netzgekoppelten MPPT-PV-Wechselrichten mit den in der Norm IEC 62509 beschriebenen Testbedingungen für herkömmliche PV-Laderegler. Durch das Zurückgreifen auf diese etablierten Normen wird das standardisierte Testen von MPPT-Laderegler mit guter Vergleichbarkeit möglich. Der hausinterne Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler wurde vom Autor in einer, dieser Masterarbeit vorausgehenden Studienarbeit, entwickelt.[1] Dabei wurden die Normen IEC 62509 und DIN EN 50530 ausgiebig diskutiert, erforderliche Anpassungen herausgearbeitet und Ergänzungen vorgenommen. Daher wird nachfolgend der Teststandard nur, so weit wie für das Verständnis notwendig, überblicksartig behandelt. Hierzu werden in kurzer Form die einzelnen Tests und wichtige Kenngrößen beschrieben. Des Weiteren finden sich Beschreibungen der Testabläufe in Kapitel 8.

Tab. 1 zeigt welche Anpassungen und Ergänzungen im Vergleich zu DIN EN 50530 vorgenommen wurden. Diese Tabelle auf DIN EN 50530 angewendet liefert eine vollständige Beschreibung der Testabläufe und ermöglicht es die Ergebnisse im Detail nachzuvollziehen.

Für weitergehende Informationen bezüglich des Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler wird auf die zugrunde liegende Arbeit mit dem Titel „Maximum Power Point Tracking for Solar Charge Controllers“ verwiesen.[1]

Tab. 1: Anpassungen und Ergänzungen zu DIN EN 50530

Bereich	Anpassungen und Erweiterungen
Messaufbau	Verwendung eines Batteriesimulators gemäß IEC 62509
	Konstante Batteriespannung von 2,2 V/Zelle gemäß IEC 62509
Statischer MPPT-Wirkungsgrad	Nur Simulation von c-Si PV-Zellen
	Reduktion der Messdauer von 10 min auf 5 min pro U/I Kurve
	Warte- und Stabilisierungszeit auf 2,5 min und 1min festgelegt
Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad	Wartezeit auf 2,5 min festgelegt
	Halbierung der Anzahl der Wiederholungen der Testsequenzen B.2 und B.3
	Testsequenz B.4 entfällt
Umwandlungswirkungsgrad	Berechnung mittels Energie am Batterieausgang
	Nur Simulation von c-Si PV-Zellen
Gesamtwirkungsgrad	Berechnung mittels Energie am Batterieausgang
Spitzenwirkungsgrad	<i>Zusätzliche Angabe des Spitzenwirkungsgrads</i>
	Angabe des Maximal- und Minimalwerts jedes Wirkungsgrads
MPP Tracking	<i>Zusätzliche qualitative MPPT-Tests</i>
	Untersuchung des Trackingverfahrens nach Art und Implementierung
	Überprüfung der Fähigkeit den globalen MPP neben mehreren lokalen MPP zu finden

4.2 Normen

Aktuell existiert keine Norm, welche standardisierte Testverfahren für das Bestimmen des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler beschreibt.

Die Norm IEC 62509 mit dem Titel „Battery charge controllers for photovoltaic systems – Performance and functioning“ stellt den internationalen Standard für das Testen herkömmlicher PV-Laderegler ohne MPPT dar. Obwohl ein Fokus der Norm auf Batterie- und Sicherheitsschutzfunktionen liegt, findet ebenso die Energieeffizienz Berücksichtigung. Es werden sowohl Testverfahren beschrieben, als auch Minimalanforderungen für Laderegler definiert. Dabei beziehen sich diese nur auf herkömmliche Laderegler und erlauben keine Beurteilung der Effizienz von MPPT-Laderegler.[13]

Die Norm DIN EN 50530 mit dem Titel „Gesamtwirkungsgrad von Photovoltaik-Wechselrichtern“ gibt Messverfahren zur Bestimmung des Wirkungsgrads von netzgekoppelten PV-Wechselrichtern. Es wird nur Bezug genommen auf Wechselrichter, welche eine Wechselspannung in das Niederspannungsnetz einspeisen. Demgegenüber speisen Laderegler in der Regel eine Batterie mit Gleichstrom. Werden die Randbedingungen und einige Parameter der in DIN EN 50530 beschriebenen Tests den Eigenschaften von Laderegler angepasst, können diese weitestgehend auch auf MPPT-Laderegler angewandt werden. Obwohl Laderegler in Inselsystemen deutlich anderen Betriebsbedingungen unterworfen sind und somit eine Bestimmung des Wirkungsgrads nach DIN EN 50530 die Ertragssituation nicht ganz genau abbildet, bringt die Adaption dieser etablierten Norm den Vorteil einer einfachen, internationalen und Kategorie übergreifenden Vergleichbarkeit.[14]

Aus den Normen DIN EN 50530 und IEC 62509 wurde der Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler abgeleitet. Der Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler wurde in einer, dieser Arbeit vorausgehenden Arbeit entwickelt. Dabei wurden sowohl die Normen IEC 62509 und DIN EN 50530 ausgiebig diskutiert, weshalb an dieser Stelle auf eine tiefergehende Behandlung verzichtet wird und auf die zu Grunde liegende Arbeit mit dem Titel „Maximum Power Point Tracking for Solar Charge Controllers“ verwiesen wird.[1]

4.3 Statischer Wirkungsgrad

Für das Messen des statischen Wirkungsgrads des Ladereglers werden 24 unterschiedliche Spannungs-Strom Kennlinien gemäß DIN EN 50530 mittels des PV-Simulators simuliert. Die Anzahl der zu simulierenden Kennlinien ergibt sich aus der Anzahl der geforderten Spannungs- und Leistungspegel. Der Laderegler wird bei maximaler, Nenn- und minimaler MPP Spannung getestet. Ebenso werden für jeden Spannungspegel 8 unterschiedliche Leistungspegel getestet. Die Leistungspegel ergeben sich aus den in Tab. 3 und Tab. 4 zu sehenden Definitionen der gewichteten Wirkungsgrade. Für jede PV-Kurve wird zuerst abgewartet bis der Laderegler sich stabilisiert hat und anschließend werden die Energieströme für 5 min gemessen. Aus diesen Energiemessungen wird dann für jede der 24 PV-Kurven ein Wirkungsgrad berechnet. Der Ablauf des statischen Tests ist in Abb. 7 skizziert.

24 x U-I Kennlinien
Gesamtdauer: 2,5 h

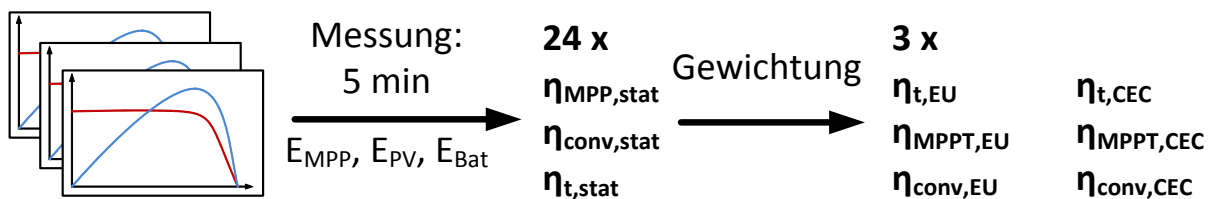


Abb. 7: Ablauf statischer Wirkungsgradtest

Der statische MPPT-Wirkungsgrad misst die Genauigkeit des MPPTs und zeigt wie gut der Laderegler diesen unter gleichbleibenden Bedingungen auffindet. Der statische MPPT-Wirkungsgrad berechnet sich aus der vom Laderegler aufgenommenen Energie geteilt durch die im MPP theoretisch zur Verfügung stehende Energie.

Der Umwandlungswirkungsgrad misst die Effizienz der Umwandlung der höheren PV-Eingangsspannung in die niedrigere Ausgangsspannung zur Batterieladung. Der Umwandlungswirkungsgrad berechnet sich aus der an die Batterie abgegebenen Energie geteilt durch die vom PV-Generator aufgenommene Energie.

Der Gesamtwirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von an die Batterie abgegebener Energie zu am PV-Generator theoretisch zur Verfügung stehender Energie. Der Gesamtwirkungsgrad berechnet sich als Produkt aus MPPT-Wirkungsgrad und Umwandlungswirkungsgrad.

Tab. 2: Statische Wirkungsgrade
vgl. [14, S. 7 ff.]

Art	Definition	Berechnung
MPPT- Wirkungsgrad	$\eta_{MPPT,stat} = \frac{\int_0^{T_M} p_{PV}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$	$\eta_{MPPT,stat} = \frac{E_{PV}}{E_{MPP}}$
Umwandlungs- wirkungsgrad	$\eta_{conv,stat} = \frac{\int_0^{T_M} p_{bat}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{PV}(t) \cdot dt}$	$\eta_{conv,stat} = \frac{E_{bat}}{E_{PV}}$
Gesamt- wirkungsgrad	$\eta_{t,stat} = \frac{\int_0^{T_M} p_{bat}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$	$\eta_{t,stat} = \eta_{conv,stat} \cdot \eta_{MPPT,stat}$

Die Definition der statischen Wirkungsgrade sowie deren Berechnung aus Messwerten zeigt in Tab. 2. Der gewichtete Europäische (EU) und California Energy Commission (CEC) Wirkungsgrad berechnen sich aus den statischen MPPT-Wirkungsgraden gemäß den Formeln (4.1) und (4.2). Zur Berechnung der gewichteten Wirkungsgrade werden die Messungen bei unterschiedlichen Leistungspegeln, welche unterschiedliche Einstrahlungsbedingungen simulieren, mit Gewichtungsfaktoren versehen und aufsummiert. Die Gewichtungsfaktoren sollen den Beitrag der entsprechenden Einstrahlungsbedingungen zum jährlichen Energieertrag in Zentraleuropa beziehungsweise Kalifornien widerspiegeln. Der Leistungsfaktor aus Formel (4.3) stellt das Verhältnis von MPP Leistung der simulierten PV-Kurve zur Nennleistung des Ladereglers dar. Die Leistungsfaktoren und Gewichtungen sind in Tab. 3 und Tab. 4 zu sehen.

$$\eta_{MPPTstat,EU} = \alpha_{EU_1} \cdot \eta_{MPPT1} + \alpha_{EU_2} \cdot \eta_{MPPT2} + \alpha_{EU_3} \cdot \eta_{MPPT3} + \alpha_{EU_4} \cdot \eta_{MPPT4} + \alpha_{EU_5} \cdot \eta_{MPPT5} + \alpha_{EU_6} \cdot \eta_{MPPT6} \quad (4.1)$$

$$\eta_{MPPTstat,CEC} = \alpha_{CEC_1} \cdot \eta_{MPPT1} + \alpha_{CEC_2} \cdot \eta_{MPPT2} + \alpha_{CEC_3} \cdot \eta_{MPPT3} + \alpha_{CEC_4} \cdot \eta_{MPPT4} + \alpha_{CEC_5} \cdot \eta_{MPPT5} + \alpha_{CEC_6} \cdot \eta_{MPPT6} \quad (4.2)$$

$$k = P_{MPP,PVS}/P_{DC,r} \quad (4.3)$$

Tab. 3: Berechnung gewichteter Europäischer Wirkungsgrad
vgl. [14, S. 27]

Gewichtungsfaktor

α_{EU_1}	α_{EU_2}	α_{EU_3}	α_{EU_4}	α_{EU_5}	α_{EU_6}
0.03	0.06	0.13	0.1	0.48	0.2

Leistungsfaktor k

MPP_1	MPP_2	MPP_3	MPP_4	MPP_5	MPP_6
0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1

Tab. 4: Berechnung gewichteter California Energy Commission Wirkungsgrad
vgl. [14, S. 27]

Gewichtungsfaktor

α_{CEC_1}	α_{CEC_2}	α_{CEC_3}	α_{CEC_4}	α_{CEC_5}	α_{CEC_6}
0.04	0.05	0.12	0.21	0.53	0.05

Leistungsfaktor k

MPP_1	MPP_2	MPP_3	MPP_4	MPP_5	MPP_6
0.1	0.2	0.3	0.5	0.75	1

4.4 Dynamischer Wirkungsgrad

Der dynamische MPPT-Wirkungsgrad misst die Schnelligkeit des MPPTs und somit wie schnell sich der Laderegler an sich ändernde Umgebungsbedingungen anpassen kann. Der dynamische Wirkungsgrad berechnet sich aus der vom Laderegler aufgenommenen Energie geteilt durch die im MPP theoretisch zur Verfügung stehenden Energie. Die Definition der dynamischen Wirkungsgrade sowie deren praktische Berechnung aus Messwerten ist in Tab. 5 zu sehen.

Tab. 5: Dynamische Wirkungsgrade
vgl. [14, S. 9 ff.]

Art	Definition	Berechnung
Einzelner MPPT-Wirkungsgrad	$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} p_{DC}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$	$\eta_{MPPTdyn,i} = \frac{E_{PV}}{E_{MPP}}$
Gesamter MPPT-Wirkungsgrad		$\eta_{MPPTdyn,t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{MPPTdyn,i}$

Für den dynamischen MPPT-Test werden definierte Abfolgen von an- und absteigenden Rampen unterschiedlicher Einstrahlungsstärke simuliert. Die Testsequenzen sind in DIN EN 50530 definiert, wobei die in Tab. 1 dokumentierten Anpassungen für MPPT-Laderegler Anwendung finden. Es findet sich eine Testsequenz, welche Änderungen mittlerer Einstrahlungswerte zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 simuliert, eine Testsequenz, welche Änderungen hoher Einstrahlungswerte zwischen 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 simuliert und eine Testsequenz, welche den Einschaltvorgang bei niedrigen Einstrahlungswerten zwischen 10 W/m^2 und 100 W/m^2 simuliert. Die Testsequenz für Änderungen bei hohen Einstrahlungswerten ist beispielhaft in Abb. 8 zu sehen. Die anderen Testsequenzen sind in der Art gleich, diese definieren lediglich andere Einstrahlungswerte, Steigungen und Anzahl an Wiederholungen. Der Ablauf des dynamischen Tests ist in Abb. 9 skizziert.

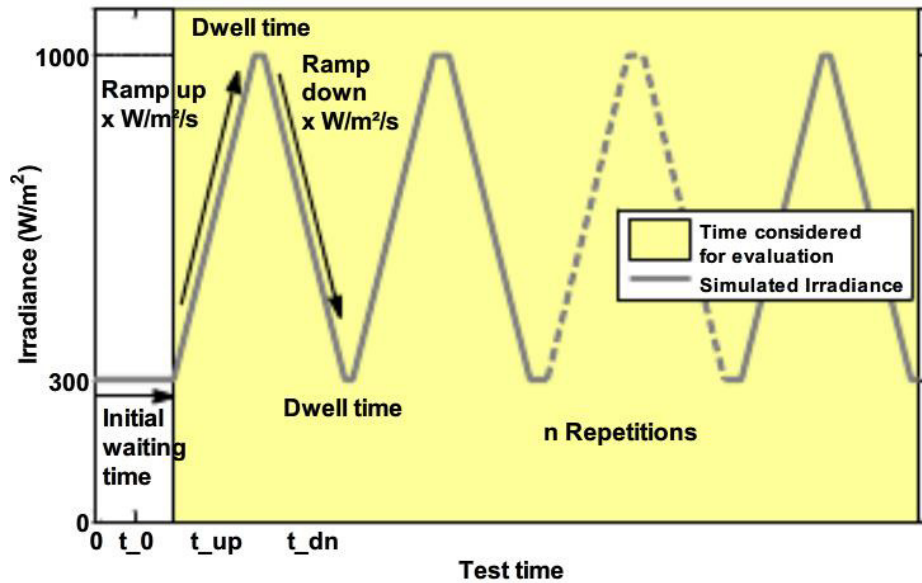


Abb. 8: Dynamische Testsequenz, hohe Einstrahlung [14, S. 17]

Der dynamische MPPT-Test wird bei mittlerer PV-Eingangsspannung beziehungsweise PV-Nennspannung durchgeführt. Bevor jeder Testsequenz wird die Stabilisierung des MPPTs abgewartet bevor die jeweilige Testsequenz durchlaufen wird. Während des Tests werden die Energieflüsse gemessen woraus für jede Testsequenz ein einzelner dynamischer MPPT-Wirkungsgrad berechnet wird. Der dynamische MPPT-Gesamtwirkungsgrad berechnet sich als Mittelwert der einzelnen MPPT-Wirkungsgrade der Sequenzen für mittlere und hohe Einstrahlungen.

- 1 x U-I Kennlinie
- 3 x Testsequenzen
- Gesamtdauer: 4 h

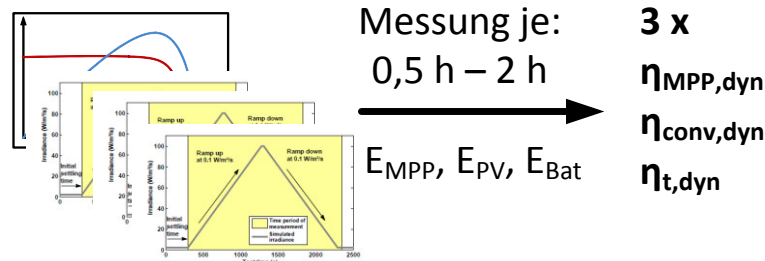


Abb. 9: Ablauf dynamischer Wirkungsgradtest

4.5 Sonstige MPPT-Tests

Vor allem zu Forschungszwecken wurden weitere, nicht in DIN EN 50530 enthaltene, MPPT-Tests definiert. Ziel ist eine qualitative Untersuchung des Trackingverhaltens und eine weitere Charakterisierung der eingesetzten Trackingverfahren.

Um zu überprüfen, ob es sich um ein echtes Trackingverfahren handelt, werden mehrere U/I Kennlinien mit unterschiedlichen Füllfaktoren getestet. Zeigt der Laderegler selbst bei stark von DIN EN 50530 abweichenden Füllfaktoren ein sicheres Trackingverhalten, kann auf einen echten MPPT-Algorithmus geschlossen werden.

Mit Hilfe von U/I Kennlinien mit mehreren Leistungsmaxima, welche einem teilabgeschatteten String nachempfunden sind, soll überprüft werden, ob der Laderegler in der Lage ist das globale Leistungsmaximum neben mehreren lokalen Leistungsmaxima sicher zu identifizieren. Hierzu wird eine Auswahl an Kurven simuliert und qualitativ bewertet, ob der Laderegler zuverlässig den tatsächlichen MPP auffindet.

In einem weiteren Test wird das Verhalten des Ladereglers in der höchstmöglichen Auflösung von 10 Messwerten pro Sekunde geloggt, um eine anschließende grafische Analyse des Trackingverhaltens zu ermöglichen. Es wird eine gemischte Abfolge von konstanter Einstrahlung und sich unterschiedlich schnell und stark ändernder Einstrahlung simuliert. Bei der grafischen Analyse kann beispielsweise beurteilt werden, wie stark der Arbeitspunkt unter gleichbleibenden Bedingungen um den MPP oszilliert oder wie schnell und genau der Laderegler Einstrahlungsänderungen folgt. Ebenso ermöglicht es Rückschlüsse auf die eingesetzten Trackingverfahren zu ziehen und Parameter abzuleiten. Beispielsweise in welchen Zeitabständen und mit welcher Intensität die Spannung zur Suche nach dem MPP variiert wird.

5 MPPT-WIRKUNGSGRADTESTS IN DER LITERATUR

5.1 MPPT-Laderegler-Effizienz unter Real- und Laborbedingungen

Die Veröffentlichung mit dem Titel „Test procedures for maximum power point tracking charge controllers characterization“ beschreibt den Test von drei kommerziell erhältlichen PV-Laderegler unter Real- und Laborbedingungen.[15] Der Betrieb der Laderegler in Kombination mit einem realen PV-Generator und Batterie wurde im Feld unter Umgebungsbedingungen über ein Jahr überwacht und mit Labormessungen mit einem PV-Simulator verglichen. Ziel der Arbeit war es aus den Messungen im Feldversuch Richtlinien abzuleiten, die diese realen Betriebsbedingungen bei Labormessungen widerspiegeln und somit Mindestanforderungen bezüglich der Energieeffizienz definierbar machen.

Für die Messungen im Feldversuch wurden minütlich Strom und Spannung an PV-Generator und Batterie gemessen. MPP Strom und Spannung wurden aus, an kalibrierten Referenzzellen gemessenem, Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung berechnet. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit des Verfahrens wurden nur Einstrahlungen größer 200 W/m^2 ausgewertet. Für die Labormessungen kam anstatt des realen PV-Generators ein PV-Simulator zum Einsatz. Hierbei wurden die bei den Messungen im Feldversuch erfassten U/I Kennlinien zur Simulation genutzt. Die sich im Tagesverlauf verändernden Umgebungsbedingungen wurden durch Veränderung der U/I Kennlinien in 5 s Intervallen dargestellt.

Zur Beurteilung der Effizienz der Laderegler werden mehrere Wirkungsgrade eingeführt, welche in ähnlicher Form in DIN EN 50530 zu finden sind. Einer davon ist der Wirkungsgrad des MPPT-Algorithmus, welcher das Verhältnis von im MPP theoretisch zur Verfügung stehender Leistung zu vom Laderegler tatsächlich abgerufener Leistung beschreibt. Ein anderer ist der Laderegler-Wirkungsgrad, welcher die vom Laderegler aufgenommene Leistung im Verhältnis zur vom Laderegler abgegebenen Leistung beschreibt. Darüber hinaus werden die Wirkungsgrade sowohl unter statischen als auch dynamischen Bedingungen ermittelt. Die statischen Wirkungsgrade dienen als Maß für die Genauigkeit des MPPTs und werden aus Messungen bei konstanter U/I Kennlinie ermittelt. Zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens wurden Tageskennwerte definiert, welche die Effizienz bezüglich des täglichen Energieertrags beschreiben. Somit findet hier ebenso die Schnelligkeit des MPPTs Berücksichtigung.

Für die Tageswerte der MPPT-Wirkungsgrade der drei untersuchten Laderegler, welche ungefähr mit den dynamischen MPPT-Wirkungsgraden nach DIN EN 50530 verglichen werden können, ermitteln die Autoren einen Durchschnittswert von knapp über 98%. Zur standardisierten Ermittlung des MPPT-Wirkungsgrads von Laderegler wird von den Autoren eine Simulation von realen Tages-Einstrahlungsprofilen vorgeschlagen. Hierbei sollen drei unterschiedliche Tages-Einstrahlungsprofile zum Einsatz kommen, welche je einen sonnigen Tag, einen teilweise bewölkten Tag und einen sonnenarmen Tag repräsentieren. Als Mindestanforderung wird ein MPPT-Wirkungsgrad größer 98% für alle drei Einstrahlungsprofile definiert.

Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass mit zunehmender Spannungsdifferenz zwischen PV-Generator und Batterie sowie mit abnehmender Einstrahlung die Wirkungsgrade abnehmen. Aufgrund dieser Abhängigkeit wird empfohlen den Laderegler-Wirkungsgrad, dem statischen Gesamtwirkungsgrad nach DIN EN 50530 entsprechend, bei allen möglichen nominellen Batteriespannungen durchzuführen und den gesamten PV-Eingangsspannungsbereich durch eine gleichmäßige Unterteilung in 10 Messpunkte zu testen. Als Mindestanforderung wird vorgeschlagen, dass Laderegler bei 10% nomineller Last für alle Messpunkte einen Wirkungsgrad von mindestens 90% erreichen müssen.

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Ermittlung von MPPT-Laderegler-Wirkungsgraden aus Messungen im Feldversuch. Die aus diesen Messungen abgeleiteten Labortests stellen nur ein grobes Konzept dar und unterscheiden sich deutlich von an DIN EN 50530 angelehnte Wirkungsgradtests, wodurch nur eine begrenzte Vergleichbarkeit gegeben ist. Darüber hinaus lässt sich eine begrenzte Genauigkeit der Ergebnisse vermuten, da einerseits für die Ermittlung der Wirkungsgrade nur Einstrahlungswerte größer 200 W/m^2 herangezogen wurden. Andererseits sind die Messintervalle für Strom und Spannung mit einem Messwert pro Minute groß gewählt. Aus diesen Messungen abgeleitete Tagesenergiewerte können schnelle Einstrahlungsschwankungen nur begrenzt abbilden.

Nichtsdestotrotz geben die Autoren einen sehr guten Überblick über die Performance von MPPT-Laderegler unter Realbedingungen, wobei das Verständnis des Verhaltens bei Realbedingungen essentiell ist zum Durchführen von Labortests. Ebenso finden sich mehrere der von den Autoren vorgeschlagenen Testmethoden in abgewandelter Form in DIN EN 50530 wieder.

5.2 MPPT-Laderegler-Wirkungsgrad in Anlehnung an DIN EN 50530

Bereits in der Vergangenheit untersuchte das Austrian Institute of Technology den MPPT-Wirkungsgrad von Laderegler in Anlehnung an Wirkungsgradtests für netzgekoppelte Wechselrichter nach DIN EN 50530. Die Vorgehensweise und Ergebnisse der Tests wurden unter dem Titel „Performance of MPPT charge controllers – a state of the art analysis“ veröffentlicht.[2]

Hierbei wurden die DIN EN 50530 Wirkungsgradtests den Besonderheiten von MPPT-Batterieladeregler angepasst und 9 handelsübliche Laderegler im Labor getestet. Um den Wirkungsgrad bei allen möglichen Kombinationen von PV-Spannung und Batteriespannung zu untersuchen, sind alle Tests bei 30 V, 60 V, 90 V, 120 V und 150 V PV-Spannung sowie 12 V, 24 V und 48 V Batteriespannung durchgeführt worden. Zur Ermittlung des gewichteten EU-Wirkungsgrads nach DIN EN 50530 sind für jede Spannungscombination 6 unterschiedliche Leistungspegel gemessen worden. Hieraus ergibt sich für den statischen Test eine Gesamtheit von 90 Messpunkten pro Laderegler, wobei jeder Messpunkt für 10 s gemessen wurde. Aus diesen Messungen ergeben sich dann die einzelnen statischen MPPT-Wirkungsgrade und Umwandlungsgrade des Wechselrichters. Die Autoren definieren einen gleichgewichteten Gesamtwirkungsgrad, welcher sich nicht in DIN EN 50530 findet. Dieser berechnet sich als Mittelwert der gewichteten Wirkungsgrade der einzelnen Spannungscombinationen. Dass wie beschrieben für alle Laderegler alle angegebenen Spannungscombinationen getestet worden sind, kann angezweifelt werden, da nur eine Minderheit der am Markt verfügbaren Laderegler PV-Eingangsspannungen von bis zu 150 V erlaubt. Ebenso sind fast alle am Markt verfügbaren MPPT-Laderegler als Abwärtswandler ausgeführt und es ist für deren Betrieb erforderlich, dass die PV-Spannung über der Batteriespannung liegt. Des Weiteren erscheint eine Testdauer von 10 s pro Messpunkt zum Ermitteln des Wirkungsgrads in ausreichender Genauigkeit sehr kurz. Durch das Regelverhalten charakterisiert viele MPPT-Verfahren ein Oszillieren des Arbeitspunkts um den MPP in Intervallen von 30 s – 60 s. Diese können mit einer Testdauer von 10 s nicht zuverlässig erfasst werden. Im Vergleich hierzu legt die DIN EN 50530 eine Testdauer pro Messpunkt von 10 min fest. Ebenso stellt sich die Frage warum der gewichtete Californian Energy Commission Wirkungsgrad nach DIN EN 50530 keine Anwendung findet. Dieser spiegelt die Ertragssituation sonnenreicher südlicher Länder, dem vorwiegenden Einsatzgebiet von MPPT-Laderegler, deutlich besser wider als der gewichtete EU-Wirkungsgrad.

Die Autoren berichten für die Bestimmungen des dynamischen MPPT-Wirkungsgrads seien für jede Spannungscombination Messungen nach DIN EN 50530 mit

Variationen der Leistung zwischen 0% und 100% erfolgt und ebenso nach DIN EN 50530 gewichtet worden. Die Exaktheit der Angaben zum Ablauf des dynamischen Tests muss jedoch hinterfragt werden. DIN EN 50530 sieht drei unterschiedliche Prüffolgen für den dynamischen Wirkungsgradtest vor, wobei Einstrahlungsänderungen zwischen 10 W/m^2 und 1000 W/m^2 simuliert werden. Weitere Zweifel ergeben sich aus der unverhältnismäßigen Testdauer, welche sich aus beschriebem Vorgehen ergeben würde. Der einmalige Durchlauf der drei Testsequenzen nach DIN EN 50530 dauert rund 8 Stunden. Werden wie beschrieben 15 unterschiedliche Spannungskombinationen getestet, ergibt sich eine Gesamtdauer von 120 Stunden für den dynamischen Test eines Laderegler.

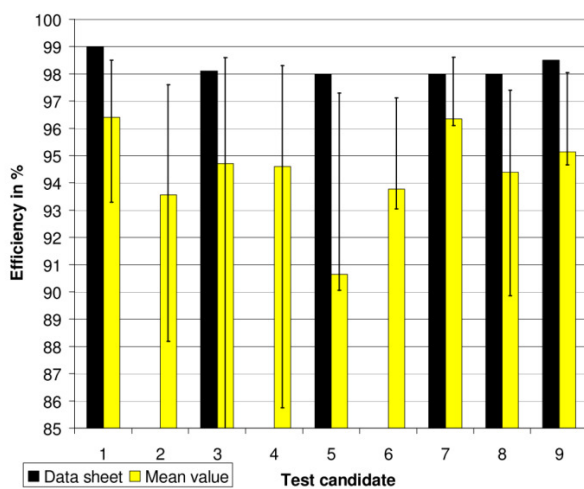


Abb. 10: Statische Umwandlungswirkungsgrade [2, S. 2923]

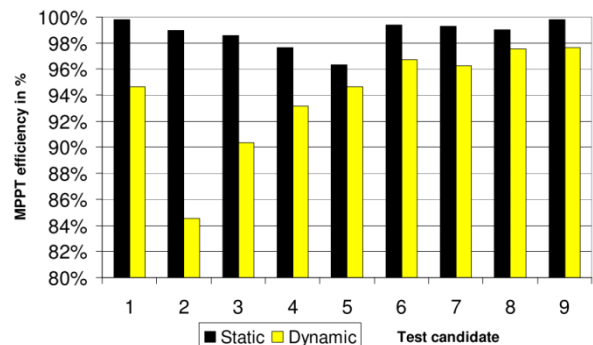


Abb. 11: MPPT-Wirkungsgrade [2, S. 2924]

Die von den Autoren ermittelten statischen Umwandlungswirkungsgrade für die getesteten MPPT-Laderegler sind in Abb. 10 zu sehen. Es zeigt sich, dass die gemessenen Umwandlungswirkungsgrade aller Laderegler deutlich niedriger liegen als nach Herstellerangaben. Die durchschnittlichen Umwandlungswirkungsgrade der einzelnen Laderegler unterscheiden sich deutlich und liegen zwischen rund 90% und 96%, wobei ein Mittel von knapp 95% abgeschätzt werden kann. Die mit Fehlerbalken dargestellten Umwandlungswirkungsgrade der Einzelmessungen zeigen sowohl für einzelne Laderegler als auch in der Gesamtheit eine starke Streuung. Die Streuung der einzelnen Umwandlungswirkungsgrade reicht von unter 85% bis zu 99%.

Die gleichgewichteten statischen als auch dynamischen MPPT-Wirkungsgrade sind in Abb. 11 zu sehen. Für den statischen MPPT-Wirkungsgrad wurden Werte zwischen 96% bis über 100%, bei einem Mittel von rund 99% gemessen. Für den dynamischen Wirkungsgrad werden Ergebnisse zwischen 85% und 98% bei einem

Mittel von rund 94% erreicht. Vor allem die dynamischen MPPT-Wirkungsgrade der einzelnen Laderegler unterscheiden sich sehr stark und fallen teilweise sehr niedrig aus. Wird berücksichtigt, dass sich der Gesamtwirkungsgrad als Produkt aus Umwandlungswirkungsgrad und MPPT-Wirkungsgrad berechnet, ergibt sich für viele der getesteten Laderegler ein sehr niedriger Gesamtwirkungsgrad von unter 90% unter dynamischen Betriebsbedingungen.

Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass sich ein klarer Unterschied zwischen guten und schlechten MPPT-Ladereglern zeige. Im Vergleich zu Wechselrichtern zeigten alle getesteten Laderegler nicht zufriedenstellende Ergebnisse. Im speziellen werden die geringen Umwandlungswirkungsgrade und dynamischen MPPT-Wirkungsgrade bemängelt. Die Performance von lediglich 5 der 9 getesteten Laderegler wird als akzeptabel bewertet. Für die restlichen 4 getesteten Laderegler, in den vorhergehenden Schaubildern mit den Nummern 2 – 5 benannt, wird angezweifelt, dass diese einen Mehrertrag gegenüber herkömmlichen Ladereglern ohne MPPT erzeugen können. Ebenso wird bemängelt, dass keiner der Laderegler die Herstellerangaben erfüllen konnte.

In der Konsequenz der Ergebnisse werden von den Autoren nicht nur standardisierte MPPT-Ladereglertests sondern auch standardisierte Datenblattangaben für Laderegler gefordert, wie es für netzgekoppelte Wechselrichter bereits der Fall ist. Es wird die Angabe des Umwandlungswirkungsgrads als detailliertes Kennfeld, anstelle der momentan üblichen Angabe wenig aussagekräftiger Spitzenwirkungsgrade, gefordert. Ebenso sollten statischer und dynamischer Wirkungsgrad nach DIN EN 50530 angegeben werden.

Die von den Autoren benutzte Herangehensweise gleicht sehr stark dem Fraunhofer ISE Teststandard und wurde auch bei dessen Ausarbeitung berücksichtigt. Leider finden sich in dieser Arbeit nur ungenaue und teils widersprüchliche Angaben zu den genauen Testabläufen. Dadurch ist nur eine begrenzte Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit gegeben und es ist nicht möglich Tests auf gleicher Grundlage durchzuführen. Trotz der Widersprüche wird angenommen, dass die ermittelten Wirkungsgrade weitestgehend Messungen nach DIN EN 50530 entsprechen und werden als vergleichsweise zuverlässig eingestuft. Somit können die Ergebnisse der gemessenen Wirkungsgrade als Benchmark dienen und ebenso zur Bewertung der technologischen Entwicklung über die letzten Jahre herangezogen werden.

5.3 Netzgekoppelte Wechselrichter

Netzgekoppelte Wechselrichter nutzen prinzipiell die gleiche MPPT-Technologie wie Laderegler. Aber in der AC-Ausgangsspannung und den zumeist deutlich höheren PV-Eingangsspannungen von 1000 V und mehr zeigt sich ein deutlicher Unterschied von MPPT-Laderegler zu Wechselrichtern. Der Markt für Wechselrichter ist in einem deutlich weiter fortgeschrittenen Entwicklungsstadium als für Laderegler, welches sich technisch auch in deutlich höheren Wirkungsgraden zeigt. Ebenso existieren für netzgekoppelte Wechselrichter mit der DIN EN 50530 bereits seit mehreren Jahren standardisierte Effizienztests. Darauf aufbauend werden von vielen Herstellern nachvollziehbare und vergleichbare Wirkungsgradangaben zur Verfügung gestellt und es werden auch regelmäßig Tests von unabhängigen Instituten durchgeführt.

Zu den etabliertesten und meist beachteten Wechselrichter Wirkungsgradtests gehören die seit 2007 regelmäßig im PHOTON Magazin veröffentlichten Labortests des PHOTON-Labors. Hierbei findet der PHOTON-Wirkungsgrad Anwendung, welcher als erweiterter statischer Gesamtwirkungsgrad nach DIN EN 50530 angesehen werden kann. Um den gesamten Spannungs- und Leistungsbereich des Wechselrichters besser abzubilden, werden für den PHOTON-Wirkungsgrad deutlich mehr Messungen, als von der DIN EN 50530 gefordert, durchgeführt. Es werden Messungen bei 20 unterschiedlichen, über den gesamten Eingangsspannungsbereich verteilten, Spannungen durchgeführt. Ebenso werden bei jeder Spannung 24 unterschiedliche Leistungspegel gemessen. Mit einer dem EU- beziehungsweise CEC-Wirkungsgrad entsprechenden Gewichtung werden aus diesen Messungen der Umwandlungswirkungsgrad und der statische MPPT-Wirkungsgrad berechnet und ergeben zusammen im Produkt den PHOTON-Wirkungsgrad als Gesamtwirkungsgrad. Es wird berichtet, dass der PHOTON-Wirkungsgrad durch den erweiterten untersuchten Spannungsbereich leicht niedrigere Werte liefert als der EU-Wirkungsgrad nach DIN EN 50530. Wird dies berücksichtigt, können die PHOTON Wirkungsgradtests als gute Referenz für MPPT-Laderegler herangezogen werden und zum Aufzeigen des Verbesserungspotenzials nach dem aktuellen Stand der Technik dienen. [16]

Tab. 6 zeigt einen Vergleich der Wechselrichter mit den höchsten Wirkungsgraden im PHOTON-Wechselrichtertest von 2013, als jüngste, frei zugängliche Veröffentlichung. Es zeigt sich, dass das beste Gerät im Test einen PHOTON-Wirkungsgrad von 98,5% erreichte, der Unterschied zu den nachfolgenden Geräten ist nicht allzu groß und alle in der Bestenliste vertretenen Geräte haben Wirkungsgrade größer 96,5% erzielt.

Tab. 6: Wechselrichter Bestenliste 2013, PHOTON-Wirkungsgrad [17, S. 40]

Wechselrichter mit PHOTON-Testnote »sehr gut +« oder »sehr gut«					
Platz	Hersteller (Position in den »Top Ten« der Hersteller)	Typ	DC-Nennleistung (kW)	PHOTON-Wirkungsgrad (%)	Note
1	SMA Solar Technology (1)	Sunny Tripower STP 20000TLHE-10	20,3	98,5	sehr gut +
2	Refusol (2)	Refusol 020K-SCI	20,3	98,2	sehr gut +
3	Diehl AKO (3)	Platinum 16000 R3	15,3	98,0	sehr gut +
4	Donauer Solartechnik	High Efficiency 3.6 ¹⁾	3,7	97,8	sehr gut
5	Steca Elektronik (4)	Stecagrid 3600	3,7	97,7	sehr gut
6	Siemens	Sinvert PVM20 ²⁾	19,6	97,5	sehr gut
6	Steca Elektronik (4)	Stecagrid 3000	3,1	97,5	sehr gut
6	Sungrow Power Supply (5)	SG30KTL	32,0	97,5	sehr gut
9	Refusol (2)	Refusol 017K	16,8	97,4	sehr gut
9	Siemens	Sinvert PVM17 ²⁾	16,8	97,4	sehr gut
11	Refusol (2)	Refusol 013K	12,7	97,3	sehr gut
11	Refusol (2)	Refusol 020K	19,6	97,3	sehr gut
11	Siemens	Sinvert PVM13 ²⁾	12,6	97,3	sehr gut
11	SMA Solar Technology (1)	Sunny Tripower STP 17000TL-10	17,4	97,3	sehr gut
15	Chint Power Systems (6)	CPS SC20KTL-O	20,8	97,1	sehr gut
15	SMA Solar Technology (1)	Sunny Tripower STP 10000TL-10	10,2	97,1	sehr gut
17	Delta Energy Systems (7)	Solvix 20 EU G3 TL	20,4	97,0	sehr gut
17	Siemens	Sinvert PVM10 ²⁾	10,2	97,0	sehr gut
19	Goodwe Power Supply Technology (8)	GW4000-SS	4,2	96,9	sehr gut
19	Mastervolt Solar (8)	Sunmaster CS20TL	20,4	96,9	sehr gut
19	Power-One (8)	Trio-27.6-TL-OUTD-S2-400	28,2	96,9	sehr gut
19	Refusol (2)	Refusol 011K ⁴⁾	11,0	96,9	sehr gut
19	SMA Solar Technology (1)	Sunny Mini Central SMC 11000TL-10	11,4	96,9	sehr gut
19	SMA Solar Technology (1)	Sunny Mini Central SMC 8000TL	8,3	96,9	sehr gut
19	Zeversolar New Energy ³⁾ (8)	Eversol-TLC 17K	17,4	96,9	sehr gut
26	Diehl AKO (3)	Platinum 6300 TL	5,7	96,8	sehr gut
26	Growatt New Energy	Growatt 5000MTL (2. Version)	5,2	96,8	sehr gut
26	Sputnik Engineering	Solarmax 13MT ⁵⁾	13,2	96,8	sehr gut
29	Danfoss Solar Inverters	TLX 15k	15,5	96,7	sehr gut
29	Power-One (8)	Trio-20.0-TL-OUTD-S2-400	20,5	96,7	sehr gut
29	Samit Power	Solarlake 15000TL	15,6	96,7	sehr gut
29	Sunways	NT 4200	4,4	96,7	sehr gut
29	Sunways	PT 33k	34,5	96,7	sehr gut
29	Zeversolar New Energy ³⁾ (8)	Eversol-TL 4600	4,1	96,7	sehr gut
35	Conergy / Voltwerk Electronics	IPG 15 T	15,0	96,6	sehr gut
35	Kinglong New Energy Technology (KLNE)	Solartec D 15000	15,6	96,6	sehr gut
35	Kinglong New Energy Technology (KLNE)	Sunteams 5000	5,0	96,6	sehr gut
35	SMA Solar Technology (1)	Sunny Mini Central SMC 7000TL	7,2	96,6	sehr gut
35	Sungrow Power Supply (5)	SG15KTL	15,3	96,6	sehr gut
35	Sunways	NT 11000	11,3	96,6	sehr gut
41	Danfoss Solar Inverters	TLX 10k	10,3	96,5	sehr gut
41	Eltak	Theia 4.4HE-t	4,6	96,5	sehr gut
41	Samit Power	Solarriver SR4K4TLA1	4,2	96,5	sehr gut

Angaben zum PHOTON-Wirkungsgrad für mittlere Einstrahlung (zum Beispiel Mitteleuropa), der Wert für hohe Einstrahlung liegt in der Regel noch etwas höher, ¹⁾ OEM-Produkt, Original: Steca Electronic / Stecagrid 3600, ²⁾ Siemens Sinvert PVM10 / 13 / 17 / 20 sind baugleich mit Refusol 010K / 013K / 017K / 020K, ³⁾ früher Eversolar New Energy (fusioniert mit Zof New Energy zur Zeversolar New Energy), ⁴⁾ wird nicht mehr hergestellt, ⁵⁾ jetzt Solarmax 13MT3

Eine Übersicht aller bisherigen Testresultate finden Sie ab Seite 78; sie enthält weitere wichtige Informationen zum Beispiel zum Spannungsbereich oder zu der Frage, ob ein Gerät der sogenannten »Niederspannungsrichtlinie« entspricht.

5.4 Zusammenfassung Literatur

Durch die noch nicht existenten Standards für Wirkungsgradtests von MPPT-Ladereglern stehen nur wenige Daten zur Verfügung, welche zu einem Vergleich herangezogen werden könnten. Mehrere Arbeiten beschäftigen sich mit der theoretischen Ausgestaltung möglicher Tests, wobei nur wenige tatsächlich gemessene Ergebnisse präsentieren.

Zwei Arbeiten, für welche sich Ähnlichkeiten mit dem Fraunhofer ISE Teststandard ergeben, wurden in vorhergehenden Kapiteln diskutiert. Die erste untersucht die Effizienz von MPPT-Ladereglern unter Realbedingungen und liefert so wichtige Kenntnisse für die Durchführung von Labortests. Die zweite beschreibt Effizienztests von MPPT-Laderegler in Anlehnung an DIN EN 50530. Die benutzte Herangehensweise ist dem Fraunhofer ISE Standard sehr ähnlich und die Ergebnisse sollten in gewissen Grenzen gut vergleichbar sein.

Als zusätzliche Referenz wurden die Wirkungsgrade von netzgekoppelten Wechselrichtern betrachtet, welchen MPPT-Laderegler technologisch ähnlich sind. Für Wechselrichter ist eine größere Anzahl zuverlässiger Wirkungsgradmessungen verfügbar, wobei vermutet wird, dass die Wirkungsgrade von MPPT-Ladereglern hinter den Wirkungsgraden von Wechselrichtern zurückbleiben.

Auf Grundlage dieser Arbeiten kann grob abgeschätzt werden welche Wirkungsgrade die Tests nach dem Fraunhofer ISE Teststandard für gute MPPT-Laderegler erwarten lassen. So sollten für gute Geräte die gewichteten statischen MPPT-Wirkungsgrade bei rund 99% liegen und die dynamischen MPPT-Wirkungsgrade bei deutlich über 96%. Effiziente MPPT-Laderegler sollten ebenso einen Umwandlungswirkungsgrad von mindestens 95% erreichen. Geräte der Spitzenklasse sollten darüber hinaus einen gewichteten EU-Gesamtwirkungsgrad von 95% bis 98% erreichen. Sowohl statische als auch dynamische Gesamtwirkungsgrade von unter 90% sollten klar als mangelhaft eingeordnet werden.

6 ANFORDERUNGEN MESSGERÄTE

6.1 Batteriesimulator

In Anlehnung an die Norm IEC 62509 wurde für die MPPT-Wirkungsgradtests eine konstante Batteriespannung von 2,2 V/Zelle festgelegt. IEC 62509 definiert keine Anforderungen wie genau diese Spannung gehalten werden muss. Der Wert von 2,2 V/Zelle leitet sich aus den Ladephasen für Bleibatterien ab. Andere Batterietypen finden keine Berücksichtigung. Es soll sichergestellt sein, dass sich der Laderegler während des kompletten Tests in der Hauptladephase befindet, in welcher die Batterie mit maximal verfügbarem Strom geladen wird. Der Übergang zur Absorptionsladephase erfolgt in der Regel bei rund 2,4 V/Zelle und muss unbedingt vermieden werden, da in der Absorptionsladephase eine Strombegrenzung stattfindet.

Da in erster Linie nur sichergestellt werden muss, dass sich der Laderegler in der Hauptladephase befindet, wird die genaue Haltung der Batteriespannung als unkritisch angesehen. Schwankungen der Batteriespannung von $\pm 5\%$ können problemlos akzeptiert werden.

6.2 PV-Simulator

DIN EN 50530 formuliert mehrere PV-Simulator Genauigkeitsanforderungen. Es wird die maximale Abweichung der simulierten U/I Kennlinie von dem in der Norm beschriebenen PV-Generatormodell in einzelnen Punkten beschrieben. Eine maximale Abweichung von 1% von den Vorgabewerten gilt für Strom, Spannung und Leistung im MPP. Ebenso darf in dem Bereich von 90% bis 110% der MPP Nennspannung der Ausgangswert der Leistung um nicht mehr als 1% von der vorgegebenen Leistungskennlinie abweichen. Die Füllfaktoren von Strom und Spannung dürfen ebenso um nicht mehr als 1% von den Vorgabewerten abweichen. Die Ausgangsgrößen müssen zeitstabil sein, sodass die MPP Leistung der simulierten U/I Kennlinie während einer Messung um nicht mehr als 0,1% schwankt. Zur Bestimmung des statischen Wirkungsgrads ist die Messdauer von 5 min zugrunde zu legen. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass eventuell auftretende Sprünge der Ausgangsgrößen im Rahmen des dynamischen Tests kleiner 1% des Ausgangswerts sind.

Der Fraunhofer ISE Teststand soll das Testen von MPPT-Ladereglern unterschiedlicher Leistungsklassen erlauben. Gleichzeitig sollen die Laderegler bei Leistungspegeln von 5% bis 100% der Nennleistung getestet werden. Daraus ergibt sich ein Leistungsbereich des PV-Simulators von ungefähr 10 W bis 2500 W, welcher abgedeckt werden muss. Um beliebige PV-Kurven simulieren zu können, müssen die DIN EN 50530 Genauigkeitsanforderungen im gesamten Leistungsbereich eingehalten werden und nicht nur in einzelnen Punkten. Zusammenfassend lässt sich für den PV-Simulator die Anforderung formulieren, dass über den gesamten Simulationsbereich die Abweichung der Ausgangsgrößen kleiner 1% bleiben muss. Die zeitliche Stabilität über 5 min muss 0,1% betragen.

6.3 Messung Wirkungsgrad

DIN EN 50530 formuliert keine Anforderungen in welcher Genauigkeit Wirkungsgrade gemessen werden müssen. Daher soll durch einen Blick auf die zu erwartenden MPPT-Laderegler-Wirkungsgrade abgeschätzt werden, welche Genauigkeiten erreicht werden müssen, um aussagekräftige Ergebnisse sicherzustellen.

Für den statischen MPPT-Wirkungsgrad der besten Geräte werden Werte von über 99%, mit nur geringen Unterschieden zwischen unterschiedlichen Geräten, erwartet. Dieser hohe Wirkungsgrad stellt ebenso hohe Anforderungen an die Genauigkeit des MPPT-Wirkungsgrads. Daher wird ein Maximalfehler des MPPT-Wirkungsgrads von $\pm 0,1\%$ empfohlen. Wird darüber hinaus betrachtet, dass sich der MPPT-Wirkungsgrad als Quotient aus der aufgenommenen Energie des Ladereglers und der im MPP theoretisch zur Verfügung stehenden Energie berechnet wird, ergeben sich entsprechend höhere Genauigkeitsanforderungen für die Energiemessung.

Für den statischen Gesamtwirkungsgrad werden Spitzenwerte von 95% bis 98% erwartet. Hieraus ergeben sich geringfügig geringere Genauigkeitsanforderungen und es wird ein Maximalfehler des Gesamtwirkungsgrad von $\pm 0,2\%$ empfohlen. Der Gesamtwirkungsgrad berechnet sich als Produkt aus MPPT-Wirkungsgrad und Umwandlungswirkungsgrad. Daraus ergibt sich für den Umwandlungswirkungsgrad ebenso die Anforderung eines Maximalfehlers von $\pm 0,1\%$.

Diese Maximalfehler wurden von den zu erwartenden statischen MPPT und Gesamtwirkungsgrade abgeleitet, da diese die höchsten Genauigkeitsanforderungen stellen. Da zur Ermittlung des, etwas niedriger erwarteten, dynamischen MPPT-Wirkungsgrads der gleiche Messaufbau zum Einsatz kommt, ergeben sich die gleichen Fehlergrenzen für den dynamischen Wirkungsgrad.

Aus messtechnischer Sicht stellen diese Fehlergrenzen hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Energiemessungen. Vor allem unter Betrachtung des großen Spannungsbereichs von 15 V bis 150 V und des großen Strombereichs von 1 A bis 80 A, welche abgedeckt werden sollen. Sollte es nicht gelingen Genauigkeiten dieser Größenordnung zu erreichen, muss entweder eine Eingrenzung des Messbereichs vorgenommen werden oder die Wirkungsgrade müssen mit entsprechend größerem Fehler ausgewiesen werden.

7 FRAUNHOFER ISE PV-LADEREGLER-TESTSTAND

7.1 Aufbau Teststand

Der Fraunhofer ISE Laderegler-Teststand ist wie in Abb. 12 zu sehen nach IEC 62509 aufgebaut. Zum Einsatz kommen ein PV-Simulator, ein Batteriesimulator und ein Lastwiderstand als Verbraucher. Mittels Schaltkontakte können diese Komponenten vom Laderegler getrennt werden. Zusätzlich ist der Laderegler in einer Klimakammer untergebracht, um unterschiedliche Umgebungsbedingungen simulieren zu können. An den PV, Batterie und Lastanschlüssen des Ladereglers wird jeweils Strom und Spannung mittels externer Messgeräte gemessen. Darüber hinaus werden die Temperatur am Laderegler selbst sowie die Umgebungstemperatur gemessen.

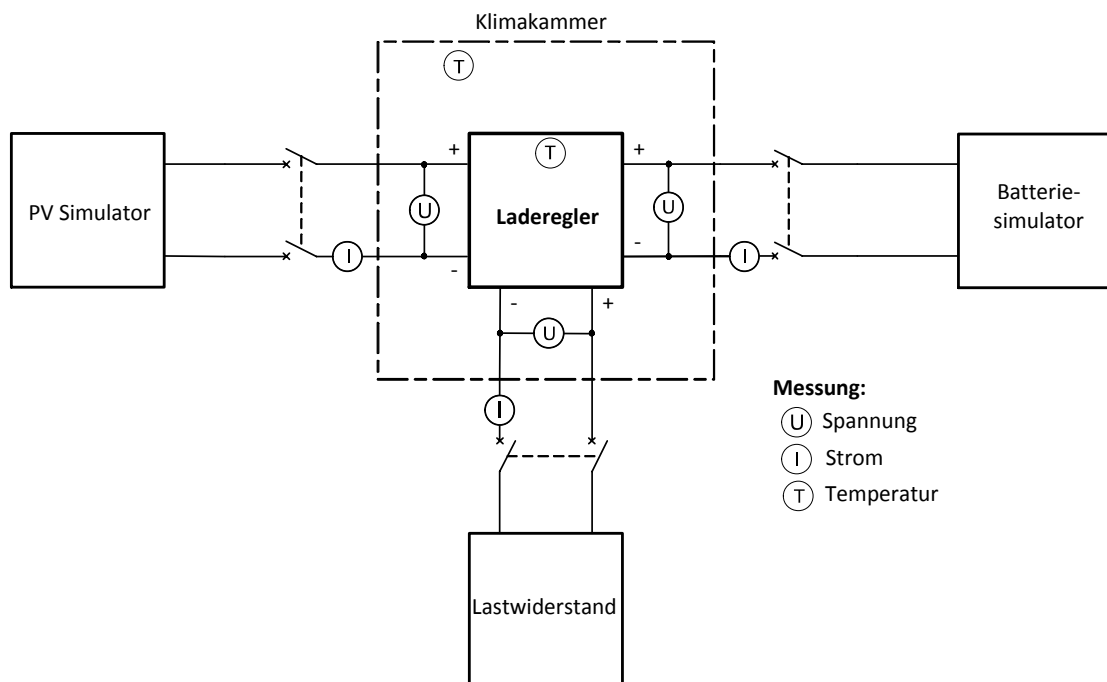


Abb. 12: Laderegler-Teststand nach IEC 62509
Vgl.[13, S. 15]

Der Teststand wurde für das Testen herkömmlicher Laderegler ohne MPPT konzipiert und in der Vergangenheit auch benutzt. Für das Testen der Effizienz von MPPT-Laderegler nach Fraunhofer ISE Teststandard sind einige Anpassungen und Erweiterungen notwendig.

7.2 Messgeräte

Als PV-Simulator kommt ein programmierbares und volldigital geführtes DC-Netzgerät des Typs Regatron TopCon Quadro zum Einsatz. Durch die funktionale Verknüpfung beliebiger Eingangs- und Ausgangsgrößen über Funktionskurven ist es möglich beliebige U/I PV-Kennlinien zu simulieren. Simulationen mit Ausgangsgrößen von bis zu 500 V, 80 A und 32 kW mit einer Auflösung im Zeitbereich von 50 μ s können durchgeführt werden.

Als Batteriesimulator kommt eine elektronische Last in 4-Quadrantenausführung des Typs Höcherl & Hackl NL Source & Sink im Konstant-Spannungsbetrieb zum Einsatz. Sowohl im Betrieb als Quelle als auch Senke sind Werte von bis zu 80 V und 40 A möglich.

Zum Testen von Laderegler deren Batterieladeströme 40 A übersteigen, wird ein einstellbarer Belastungswiderstand des Typs Frizlen BW 80 für Leistungen von bis zu 4,2 kW parallel zur elektronischen Last geschaltet. Somit entsteht eine Senke, welche Ströme deutlich größer als 40 A aufnehmen kann, bei gleichzeitigem Erhalt des Konstant-Spannungsbetriebs.

Zur Simulation der Last kommt ein einstellbarer Belastungswiderstand des Typs Frizlen BW 80 für Leistungen von bis zu 4,2 kW zum Einsatz. Dies ermöglicht die Simulation ohmscher Verbraucher unterschiedlicher Leistungsklassen.

Als Klimakammer wird ein Wärmeschrank des Typs Memmert UFE400 eingesetzt. Er dient zur Erhöhung der Umgebungstemperaturen, um einen Einsatz des Laderegler in wärmeren Regionen simulieren zu können.

Zur Messung von Spannung und Strom an den PV, Batterie und Last Anschlüssen des Laderegler kommen drei ZES Zimmer LMG95 Präzisions-Leistungsmessgeräte zum Einsatz. Die Präzisions-Leistungsmessgeräte verfügen über eine Grundgenauigkeit von 0,025% und bis zu 600 V und 20 A können dauerhaft gemessen werden. Die Spannung wird direkt an den Laderegler Anschlüssen abgegriffen.

Da die ZES Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräte intern nur Ströme von bis zu 20 A messen können, aber Laderegler für Ströme von bis zu 100 A getestet werden sollen, werden für die Strommessungen externe Nebenwiderstände eingesetzt. Es kommen Nebenwiderstände, auch Messshunts genannt, der Firma Weigel in der Genauigkeitsklasse 0,5 mit einem Nennstrom von 100 A und einem Nennspannungsabfall von 150 mV zum Einsatz.

Die Leistungsmessgeräte verfügen über RS232 Schnittstellen, über welche mittels SCPI Befehlen mit den Messgeräten kommuniziert werden kann. Über diese Schnittstellen sind die Leistungsmessgeräte mittels RS232-TTL Wandlern an einen Arduino Mega Mikrokontroller angebunden, womit die Messwerte von diesem abgefragt werden können.

Zur Messung der Temperaturen von Laderegler und Umgebung kommen Sensoren des Typs DS18S20 der Firma Maxim Integrated mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ °C im Bereich von -10 °C bis +125 °C zum Einsatz. Die Temperatursensoren werden an einem sogenannten 1-Wire-Bus betrieben und von dem Arduino Mega Mikrokontroller ausgelesen.

7.3 Ablauf IEC 62509 Tests

Laderegler tests nach IEC 62509, für welche der Teststand bisher benutzt wurde, beinhalten eine Vielzahl von Einzeltests. Die Mehrzahl dieser Einzeltests untersucht entweder das statische Betriebsverhalten des Ladereglers in einzelnen Betriebspunkten oder überprüft Schaltschwellen und Sollwertvorgaben. Hierfür werden die Messgeräte händisch für jeden Test eingestellt und die Ergebnisse werden manuell abgelesen und ins Messprotokoll übertragen. Messungen werden punktuell und nicht zeitlich ausgedehnt durchgeführt. Darüber hinaus wird von der Norm keine Synchronisation der einzelnen Messgeräte oder ein Loggen der Messwerte gefordert.

Beispielsweise zur Ermittlung des Ladewirkungsgrads des Ladereglers wird der PV-Simulator als Stromquelle betrieben und händisch in 10% Abstufung auf Werte zwischen 10% und 100% des Laderegler Nennstroms eingestellt. Für jede Einstellung werden Strom, Spannung und Leistung für PV und Batterie manuell von den Messgeräten abgelesen um daraus den Ladewirkungsgrad zu berechnen. Die von dem Mikrocontroller abgefragten Messwerte werden in 1 min Intervallen über die USB Schnittstelle an einen Computer gesendet und zur Benutzerinformation in einem Terminalprogramm ausgegeben.

Vor allem aufgrund der Vielfalt der Tests und den sehr unterschiedlichen Betriebsverhalten einzelner Laderegler fand bisher keine Automatisierung der Tests statt.

8 MESSAUFBAU MPPT-WIRKUNGSGRADTESTS

8.1 Testablauf

Die Durchführung von MPPT-Laderegler-Wirkungsgradtests nach Fraunhofer ISE Teststandard, angelehnt an die DIN EN 50530, erfordert eine Automatisierung des Teststands aus mehreren Gründen.

Für das Testen von MPPT-Laderegler ist es nicht ausreichend eine konstant eingestellte Stromquelle als PV-Simulator zu verwenden. Um den MPPT-Algorithmus zu testen, muss der PV-Simulator die U/I Kennlinie eines PV-Generators durch Strom- und Spannungsregelung möglichst exakt nachbilden. Darüber hinaus sieht der Testablauf für den dynamischen Wirkungsgradtest eine quasi-kontinuierliche Skalierung der U/I Kennlinie vor, sodass ein automatischer Ablauf der Simulation unerlässlich ist.

Um das Such- und Schwingverhalten von MPPT-Laderegler abbilden zu können und um die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen, sind alle zu ermittelnden Wirkungsgrade energetisch definiert. Das heißt es müssen zur Wirkungsgradberechnung Energieflüsse über Zeiträume von 5 min bis 30 min gemessen werden. Darüber hinaus sehen die Testabläufe eine Abfolge von Wartezeiten, welche nicht für die Wirkungsgradberechnung herangezogen werden dürfen, und Messzeiten, welche für die Wirkungsgradberechnung herangezogen werden, vor. Um eine klare Unterscheidung treffen zu können und zeitparallele Messungen der einzelnen Messgeräte sicherstellen zu können, ist eine Synchronisation aller Messgeräte auf die PV-Simulation unerlässlich.

Zudem fordert die DIN EN 50530 das Aufzeichnen der Betriebsparameter während des gesamten Tests in angemessener zeitlicher Auflösung. Daher sollen die Messwerte in 1 s Intervallen geloggt werden. Das Loggen der Messwerte eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit einer automatisierten Auswertung der Testergebnisse.

8.2 Hardware

MPPT-Laderegler-Effizienztests angelehnt an DIN EN 50530 erfordern einen leicht veränderten Messaufbau gegenüber den Laderegler tests nach IEC 62509. Für gemeinsame Messungen des MPPT-Wirkungsgrads und des Umwandlungswirkungsgrads gemäß DIN ISO 50530 ist eine zusätzliche Spannungsmessung am Ausgang des PV-Simulators notwendig. Spannungsmessungen sowohl am PV-Simulator Ausgang als auch am Laderegler PV-Eingang sollen Messfehler durch den Spannungsabfall zwischen PV-Simulator und Laderegler vermeiden. Daher werden für die Berechnung des MPPT-Wirkungsgrads die internen Messwerte des Regatron TopCon Quadro PV-Simulators verwendet. Für die Berechnung des Umwandlungswirkungsgrads hingegen die Messwerte der Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräte, welche die Spannung direkt an den Laderegler Anschlüssen messen. Für die Ermittlung von Wirkungsgraden nach der DIN EN 50530 wird keine DC-Last an den Laderegler angeschlossen. Daher werden in der weiteren Diskussion des Teststands, wenn es der Vereinfachung dient, der Lastwiderstand und das zugehörige Zimmer LMG95 Leistungsmessgerät zur Messung der Last vernachlässigt. In Abb. 13 ist der Messaufbau für die MPPT-Laderegler-Effizienztests schematisch dargestellt. Aus den MPP Vorgabewerten und den gemessenen Ist Werten des PV-Simulators wird der energetische MPPT-Wirkungsgrad berechnet. Aus den Energiemessungen der beiden Leistungsmessgeräte für PV und Batterie wird der Umwandlungswirkungsgrad berechnet. Als Produkt aus MPPT-Wirkungsgrad und Umwandlungswirkungsgrad ergibt sich der Gesamtwirkungsgrad. Darüber hinaus werden zur Überwachung der Tests die Temperaturen von Laderegler und Umgebung gemessen.

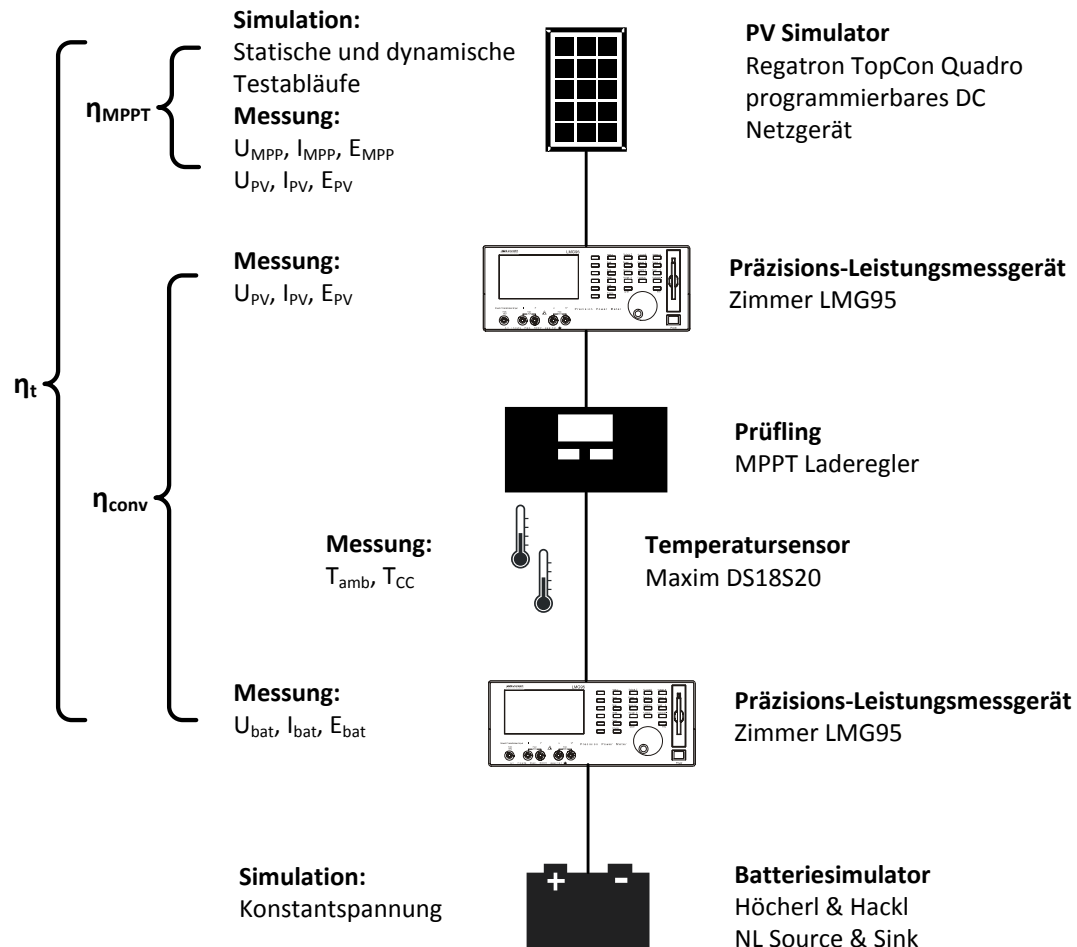


Abb. 13: Messaufbau MPPT-Ladereglertests

Bereits bei den ersten Versuchen die Messwerte der Zimmer LMG95 Präzisions-Leistungsmessgeräte mit dem Arduino Mega Mikrocontroller in 1 s Auflösung abzufragen und über USB an den Computer zu senden, zeigte sich eine instabile Datenverbindung zwischen Leistungsmessgeräten und Mikrocontroller. Oft brach die Verbindung zu einzelnen Leistungsmessgeräten bereits nach wenigen Minuten ab und konnte nur nach einem Neustart der Messgeräte wiederhergestellt werden. Da bei einem Neustart der Messgeräte auch der Fehlerspeicher gelöscht wird, war ein Auslesen dessen nicht mehr möglich. Ausgiebige Recherchen und Rücksprachen mit dem Hersteller förderten ein vom Hersteller nicht dokumentiertes „break“ Signal zur Reanimation der Messgeräte zu Tage. Für das Senden eines „break“ Signals wird die TX-Leitung der RS232 Schnittstelle für länger als einen Frame auf low gesetzt. Hierdurch wird die Kommunikationsschnittstelle des Gerätes zurückgesetzt und eine Kommunikation ist auch ohne Neustart wieder möglich. Automatisches Senden des „break“ Signals brachte dahingehend Verbesserung, dass die Verbindung nicht dauerhaft unterbrochen blieb. Dennoch war keine stabile Verbindung möglich und die Messwerte während des Reanimierens der Messgeräte, welches einige Sekunden

dauerte, gingen verloren. Durch die Reanimation der Messgeräte mittels „break“ Signal ohne Neustart wurde ein Auslesen des Fehlerspeichers möglich. Wurde der Fehlerspeicher nach einem Verbindungsabbruch ausgelesen, zeigte sich eine Vielzahl von Fehlermeldungen aufgrund vom Messgerät nicht interpretierbarer Befehle. Es ist klar zu erkennen, dass die vom Messgerät empfangenen Befehle fehlerhafte, teils kryptische Zeichen enthalten. Es zeigte sich, dass es durch den Empfang von nicht interpretierbaren Befehlen am Leistungsmessgerät zu einer Blockade der Schnittstelle kam. Da alle weiteren Versuche dieses Problem softwaretechnisch zu lösen scheiterten, folgte eine Analyse der Hardware.

Untersuchungen der RS232 Signale mit einem Oszilloskop zeigten leicht verzerrte Signale mit teils deutlich überhöhten Spannungsspitzen, welches ein Indiz für die fehlerhafte Übertragung einzelner Zeichen sein könnte. Somit galt es den Signalweg zu untersuchen, um die Einkopplung möglicher Störsignale auszuschließen. Der Arduino Mega Mikrocontroller arbeitet mit 0 V – 5 V TTL Pegeln, wohingegen die Schnittstellen der Leistungsmessgeräte nach RS232 spezifiziert sind. Daher ist ein Umsetzen der Signale zwischen Leistungsmessgerät und Mikrocontroller mittels ebenso verbautem RS232-TTL Wandler notwendig. Zwischen Mikrocontroller und Pegelumsetzer waren bisher nicht abgeschirmte Signalleitungen verbaut. Diese wurden durch geschirmte und verdrillte Signalleitungen ersetzt, um die Einkopplung von Störsignalen, beispielsweise verursacht durch ein Schaltnetzteil, auszuschließen. Die Maßnahme brachte keine Besserung. Weiter zeigte sich, dass die Ausgangssignale des Arduino nur knapp 4 V, gegenüber den spezifizierten 5 V, erreichen. Als Grund zeigte sich die bisherige 5 V Spannungsversorgung des Arduino. Aufgrund geräteinterner Spannungsabfälle ist laut Hersteller eine Versorgungsspannung von mindestens 7 V notwendig, um einen 5 V TTL Pegel an den Ausgängen sicherzustellen. Durch die Erhöhung der Versorgungsspannung auf 9 V konnten spezifizierte 5 V Ausgangssignale erreicht werden, wodurch zu niedrige Arduino Signalpegel als Störursache ausgeschlossen werden können.

Während der Tests wurden wiederholt deutliche Erwärmungen der in den RS232-TTL Pegelumsetzern zum Einsatz kommenden MAX232 Bausteine beobachtet. Weitere Überprüfungen der Signale mit dem Oszilloskop, der Beschaltung der Pegelumsetzer und der gesamten Verdrahtung der Messgeräte legten Erdschleifen als mögliche Ursache für die Verbindungsprobleme nahe. Die RS232 Schnittstellen aller drei Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräte sind auf Erdpotenzial verbunden, welches ebenso zu den drei RS232-TTL Wandlern durchgeführt wird. Alle drei RS232-TTL Wandler werden wiederum von einer 5 V Spannungsquelle mit gemeinsamer potentialfreier Masse versorgt. Somit besteht die Möglichkeit, dass an dieser Stelle Ausgleichsströme entstehen, welche in der Folge zu einer Signalstörung und Erwärmung der Pegelumsetzer führen.

Der Arduino Mega Mikrocontroller ist über USB mit dem Computer verbunden und verfügt hierüber ebenso über eine weitere Verbindung zum Erdpotenzial. Die Masse des Arduino und die Massen der Pegelumsetzer waren bisher nicht verbunden. Es ergibt sich die Gefahr von Potentialverschiebungen mit der möglichen Folge einer fehlerhaften Signalübertragung.

Es stellt sich heraus, dass die Verbindungsprobleme auf Masseschleifen und unterschiedliche Massepotenziale im bisherigen Aufbau zurückzuführen sind. Zur Behebung der Masseschleifen wurde beschlossen RS232 Isolatoren mit galvanischer Trennung zwischen die LMG95 Leistungsmessgeräte und die RS232-TTL Wandler zu schalten, um eine saubere Potentialtrennung zu erreichen. Ebenso sollten die Pegelwandler auf das Massepotenzial des Arduino gelegt werden, welcher über den USB Anschluss auf dem Erdpotenzial liegt.

Zuerst wurden passive RS232 Isolatoren der Marke Renkforce eingesetzt. Hierdurch konnte eine deutlich stabilere Messwertübertragung erreicht werden und eine Erwärmung der MAX232 ICs der Pegelwandler wurde nicht mehr festgestellt. Trotzdem kam es immer noch zu Verbindungsabbrüchen in unterschiedlichen Zeitabständen. Untersuchungen der Signale mit dem Oszilloskop zeigten, dass die Renkforce Isolatoren eine starke Verzerrung der Signale verursachen. Sowohl ein deutlicher Spannungsabfall, ein Offset als auch eine Entstellung der Signalform konnte beobachtet werden. Ohne Isolator wurden für die Leistungsmessgeräte als auch die Pegelwandler Spannungspegel von ungefähr ± 8 V gemessen. Mit Renkforce Isolator wurden hingegen Spannungspegel von ungefähr +4 V und -7 V gemessen. Der gemessene low Signalpegel von +4 V liegt vergleichsweise nahe am undefinierten Bereich der RS232 Schnittstelle von ± 3 V. In Kombination mit der beobachteten starken Abrundung des ursprünglichen Rechtecksignals scheint es wahrscheinlich, dass der gemessene niedrige Spannungspegel Verbindungsprobleme zur Folge hat. Bei allen drei im Einsatz befindlichen Renkforce RS232 Isolatoren wurde eine solche unbefriedigende Signalübertragung beobachtet, wobei sich zusätzlich eine starke Streuung zwischen den einzelnen Geräten zeigte. Da auch Rücksprachen mit dem Hersteller keine Lösung brachten, wurde beschlossen als Ersatz aktive RS232 Isolatoren nach industriellem Standard einzusetzen.

Als Ersatz wurden aktive 1kV RS232 Isolatoren der Firma W&T ausgewählt. Die externe 24 V Spannungsversorgung macht diese zu einer aktiven galvanisch getrennten RS232 Schnittstelle mit Signalauffrischung. Eine Kontrolle der Signale mit dem Oszilloskop zeigte, dass diese nahezu symmetrischen Spannungspegel von über 7 V bei schöner rechteckiger Signalform liefern. Mit dem Einbau der aktiven W&T RS232 Isolatoren konnten sodann alle Verbindungsprobleme behoben werden und in der Folge wurden keine Verbindungsabbrüche mehr beobachtet.

Zusammenfassend kann erwähnt werden, dass eine Mehrzahl von Maßnahmen notwendig war, um eine zuverlässige Erfassung der Messwerte der Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräte, in ausreichender zeitlicher Auflösung, mit dem Arduino Mikrocontroller zu realisieren. In einem ersten Schritt wurden geschirmte und verdrillte Signalleitungen eingesetzt und die Spannungsversorgung des Mikrocontrollers angepasst. Im Weiteren wurden RS232 Isolatoren mit galvanischer Trennung eingesetzt, um Masseschleifen zu vermeiden und Masseverbindungen angepasst, um Potenzialverschiebungen zu verhindern. Zuletzt mussten aufgrund schlechter Signalqualität passive RS232 Isolatoren gegen aktive RS232 Isolatoren mit Signalauffrischung ausgetauscht werden.

In Abb. 14 ist die endgültige Konfiguration der Messwernerfassung mittels Arduino Mega Mikrocontroller zu sehen. Neben der Erfassung der Messwerte der Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräte ist auf dem Schaltplan ebenso die Temperaturerfassung mittels zwei DS18S20 Temperatursensoren der Firma maxim integrated zu sehen. Diese werden an einem sogenannten 1-Wire-Bus betrieben. Auf die Darstellung von unerheblichen Komponenten des Teststands sowie für die Messwernerfassung nicht verwendeten Datenleitungen wurde mit dem Ziel der Übersichtlichkeit verzichtet. Abb. 15 zeigt ein Bild des Fraunhofer ISE Laderegler-Teststand. PV-Simulator und Batteriesimulator sind extern angeordnet und daher nicht auf dem Bild zu sehen.

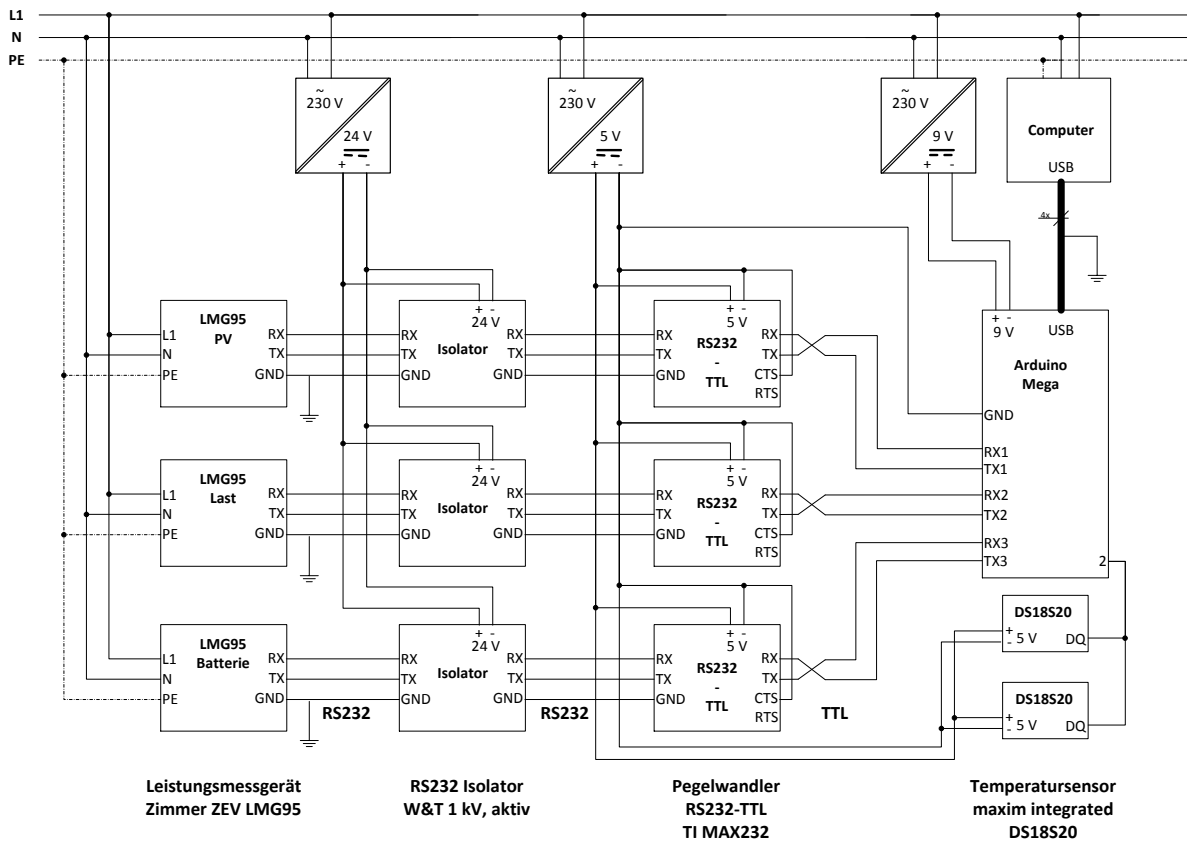


Abb. 14: Schaltplan Messwerterfassung

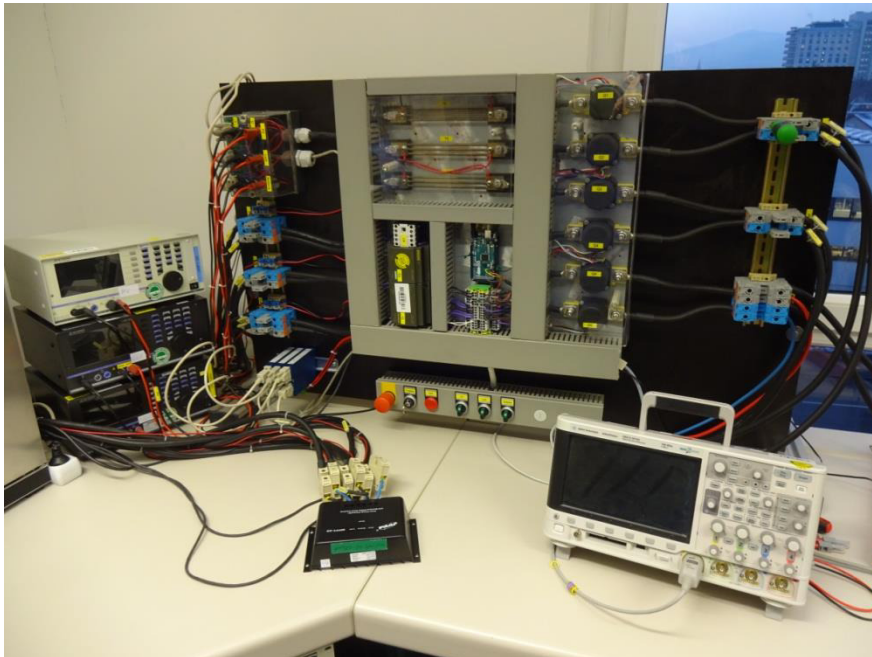


Abb. 15: Fraunhofer ISE Laderegler-Teststand

8.3 Software

Für die Simulation, Messwernerfassung und Auswertung der Wirkungsgradtests kommt eine Kombination unterschiedlicher Softwarelösungen zum Einsatz. Ein Ziel war es, die Komplexität der Softwarelösung möglichst gering zu halten um in Zukunft eine schnelle Einarbeitung in die Tests zu ermöglichen und eine einfache Anpassung an ähnliche Tests zu erlauben. Daher wurde vor allem die Messwernerfassung Modular aufgebaut und es wurden, sofern möglich, Programme eingesetzt, welche bereits in anderen Projekten Verwendung finden. Abb. 16 zeigt das Zusammenspiel der einzelnen Programme sowie den Informationsfluss zwischen diesen.

Zum Betreiben des Regatron TopCon Quadro PV-Simulators kommt die Software SASControl der Firma Regatron zum Einsatz. Mit SASControl werden sowohl Testabläufe simuliert als auch Messdaten zur Ermittlung des MPPT-Wirkungsgrads erfasst. Die Messdaten werden einerseits direkt auf dem Computerbildschirm ausgegeben und andererseits zur weiteren Auswertung in zwei CSV Dateien auf dem Computer gespeichert. In der „Log“ Datei werden über die gesamte Testdauer Messwerte in Zeitintervallen von 1 s geloggt. Die „Log“ Datei dient der Dokumentation des Testablaufs und soll spätere Detailanalysen ermöglichen. In der „Data“ Datei werden die Messwerte in aggregierter Form gespeichert, um eine vereinfachte Auswertung der Wirkungsgrade zu ermöglichen. Es wird ein Datensatz pro Messintervall, welches zwischen 5 min und 30 min dauern kann, geloggt, wobei Wartezeiten für die Stabilisierung des MPP-Trackers wie von der Norm gefordert unberücksichtigt bleiben.

Die Messwerte der Leistungsmessgeräte und der Temperatursensoren werden vom Arduino Mega Mikrocontroller in einer Schleife mit ungefähr 3 Messwerten pro Sekunde ausgelesen und an den Computer gesendet.

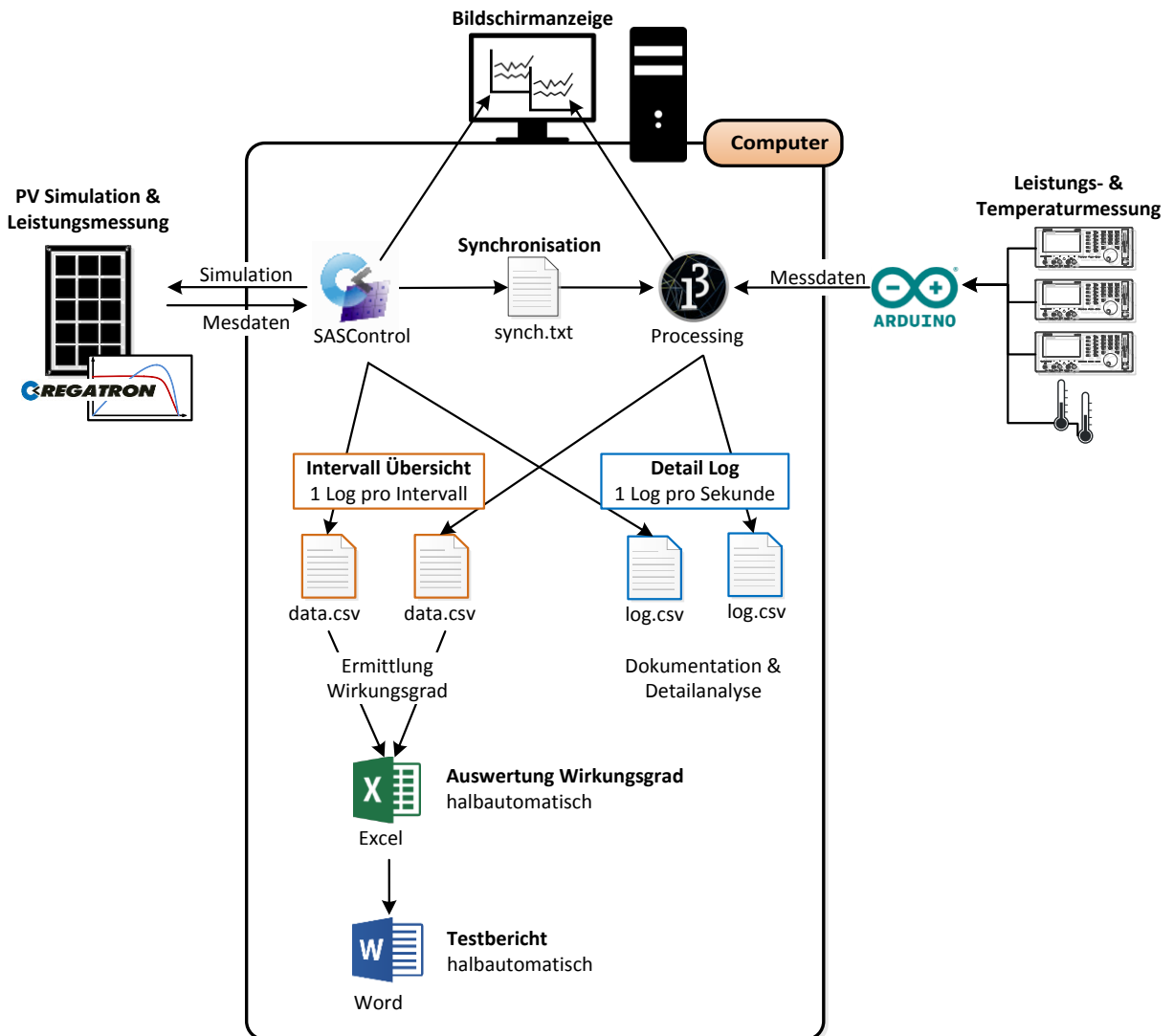


Abb. 16: Struktur Simulation, Messdatenerfassung und Auswertung

Auf dem Computer werden die vom Arduino gesendeten Daten von Processing eingelesen und aufbereitet. Einerseits werden die Messdaten direkt auf dem Bildschirm ausgegeben, andererseits in der gleichen Form wie von SASScript in CSV Dateien auf dem Computer abgespeichert. In der „Log“ Datei werden 1 s Werte gespeichert, in der „Data“ Datei ein Datensatz pro Messintervall. Da SASControl keinen direkten Datenaustausch erlaubt, wird Processing mittels einer einfachen Textdatei auf die SASControl Simulation synchronisiert. SASControl öffnet und sperrt diese Synchronisationsdatei während, für die Wirkungsgradberechnung zu verwendenden, Messungen. Durch die Überprüfung ob die Synchronisationsdatei geöffnet und gesperrt ist, erhält Processing die Information welche Messwerte für die Wirkungsgradberechnung heranzuziehen und somit in der „Data“ Datei in aggregierter Form zu speichern sind.

In den Headern der CSV Dateien werden zur Dokumentation der Testbedingungen zusätzlich Testdetails, Simulationsparameter und Messgeräteeinstellungen gespeichert.

Nach Abschluss der Messungen werden die „Data“ Dateien zur Auswertung der Wirkungsgrade in eine Excel Vorlage eingelesen. In der Excel Vorlage werden Wirkungsgrade ausgewertet und Ergebnisse grafisch aufbereitet. Aus den von SASControl geloggen Intervall Messwerte ergibt sich der MPPT-Wirkungsgrad, aus den von Processing geloggen Intervall Messwerte der Umwandlungswirkungsgrad und aus deren Kombination der Gesamtwirkungsgrad.

Der Testbericht wird mit einer auf die Excel Auswertung verknüpften Word Vorlage erstellt. Ergebnisse und Schaubilder werden automatisch in den Word Testbericht übernommen, sodass nur noch wenige manuelle Ergänzungen notwendig sind.

8.3.1 SASControl

SASControl ist eine Softwarelösung für Solar Array Simulationen mit programmierbaren Regatron DC-Netzgeräten. Über die grafische Benutzeroberfläche können Einstellungen vorgenommen und einzelne PV-Kurven manuell simuliert werden. Ebenso können Vorgabewerte und Messwerte des Netzgeräts ausgegeben und grafisch dargestellt werden. Darüber hinaus sind ein Kurvengenerator, mit welchem U/I Kennlinien nach DIN EN 50530 berechnet werden können, und ein Datenlogger, Datacollector genannt, implementiert.

Zusätzlich verfügt SASControl über eine Skriptumgebung zum automatisierten Durchführen von Tests. Die Regatron eigene, an JavaScript angelehnte, Programmiersprache SASScript erlaubt es Einstellungen am Netzgerät vorzunehmen, Testabläufe zu simulieren und Messwerte zu loggen. Da SASScript speziell auf PV-Simulationen abgestimmt ist, wird eine Auswahl praktischer Bibliotheksfunktionen zur Verfügung gestellt, mit welchen über einzelne Befehle beispielsweise Einstrahlung und Temperatur der Simulation verändern lassen oder Strom und Spannung skaliert werden können. Ein gleichzeitiger Nachteil dieser proprietären Programmiersprache sind leider auch sehr beschränkte Möglichkeiten in der Verarbeitung und Speicherung von Daten sowie im Datenaustausch.

Für den statischen Wirkungsgradtest werden drei unterschiedliche U/I Kennlinien simuliert mit dem MPP bei minimaler, mittlerer und maximaler PV-Spannung des Ladereglers. Bei jeder Spannung werden wiederum sieben unterschiedliche Leistungspegel von 5% bis 100% der Laderegler Nennleistung simuliert. Zum

Einstellen der einzelnen Leistungspegel wird gemäß DIN EN 50530 bei konstanter MPP Spannung nur der Strom skaliert.

Vor Beginn des Tests müssen über die grafische Benutzeroberfläche mit dem Kurvengenerator manuell die U/I Kennlinien erstellt sowie Ladereglerigenschaften und Testdetails in die Script Vorlage eingetragen werden. Nach dem Start des SASScript Programmablaufs werden zunächst Einstellungen am DC-Netzgerät vorgenommen und die beiden Logdateien angelegt. Für den Detail Log mit 1 s Messwerten wird der sogenannte Datacollector verwendet, welcher auf einer Bibliotheksfunktion beruht. Nach dem Startaufruf loggt der Datacollector kontinuierlich Messewerte bis ein Stoppaufruf folgt. Nach dem Einschalten des DC-Ausgangs des Netzgeräts folgt eine Wartezeit zur Stabilisierung des MPPTs. Auf das Laden einer neuen U/I Kennlinie folgt immer eine Wartezeit von 3 min, zur Stabilisierung bei der veränderten Spannung. Auf das Einstellen eines neuen Leistungspegels folgt immer eine Wartezeit von 2 min, zur Stabilisierung bei dem veränderten Strom. Messungen während der Wartezeiten dürfen nicht in die Ermittlung der Wirkungsgrade mit einfließen. Daher wird erst nach Ablauf der Wartezeiten die Messung von Energie und MPPT-Wirkungsgrad des PV-Simulators gestartet. Gleichzeitig wird die Synchronisationsdatei geöffnet, um den Start der Messungen an Processing zu kommunizieren. Während der folgenden Wartezeit von 5 min wird die Wirkungsgradmessung durchgeführt. Nach Abschluss der Messung wird die Synchronisationsdatei wieder geschlossen, um das Ende der Messung an Processing zu kommunizieren. Die Intervallmesswerte des PV-Simulators werden anschließend in der „Data“ Datei gespeichert. Somit ist die Messung des ersten Arbeitspunkts abgeschlossen und die Messungen werden bei dem nächsten Leistungspegel wiederholt. Wurden Messungen bei allen Leistungspegeln durchgeführt, wird die nächste U/I Kennlinie geladen, welche erneut bei allen Leistungspegeln gemessen wird. Nachdem alle U/I Kennlinien bei allen Leistungspegeln gemessen wurden, wird der Datacollector mit dem Stoppaufruf beendet und der DC-Ausgang des Netzgeräts abgeschaltet, bevor das Ende des Tests erreicht ist. Das Ablaufdiagramm Abb. 17 zeigt den beschriebenen Programmablauf des statischen Wirkungsgradtests.

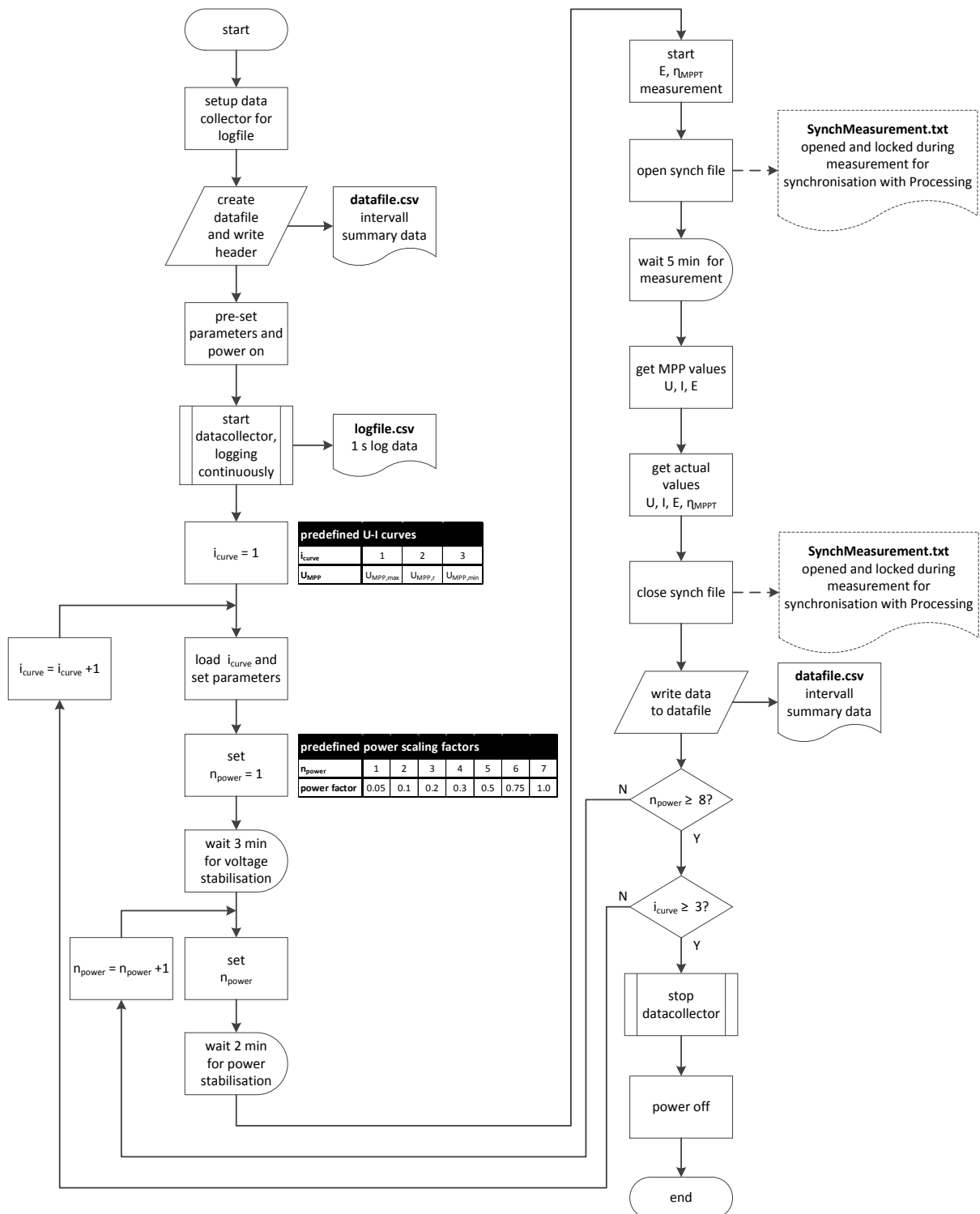


Abb. 17: Ablaufdiagramm SASScript, statischer Wirkungsgradtest

Für den dynamischen Wirkungsgradtest ergibt sich ein deutlich unterschiedlicher SASScript Programmablauf. Obwohl die Messwerterfassung nahezu identisch abläuft, unterscheidet sich der Simulationsablauf grundlegend. Der dynamische Wirkungsgradtest wird nur für die U/I Kennlinie der mittleren MPP Spannung durchgeführt. Zwei unterschiedliche Testsequenzen simulieren unterschiedlich schnelle, sowohl positive als auch negative, rampenförmige Einstrahlungsänderungen. In einer Testsequenz wird die Einstrahlung zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 variiert, in der anderen zwischen 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 . In jeder Testsequenz werden unterschiedliche Steigungen für die rampenförmige Änderung getestet. Diese Änderungen bei einer bestimmten Steigung werden wiederum in definierter Anzahl wiederholt. Ein Messintervall erstreckt sich über die Dauer des Tests bei einer einzelnen Steigung.

Vor Beginn des Tests müssen wieder die U/I Kennlinie manuell erstellt die Testdetails in die Script Vorlage eingetragen werden. Gleich wie beim statischen Wirkungsgradtest werden nach dem Start des SASScript Programmablaufs zwei Logdateien angelegt, Einstellungen vorgenommen, der DC-Ausgang des Netzgeräts angeschaltet und der Datacollector gestartet. Die geladene U/I Kennlinie wird zunächst auf den minimalen Einstrahlungswert der Testsequenz skaliert und es wird eine Stabilisierungszeit von 5 min abgewartet. Mit dem anschließenden Beginn der Wirkungsgradtests werden Energie- und Wirkungsgradmessungen gestartet und die Synchronisationsdatei geöffnet. Durch skalieren von Strom und Spannung gemäß des DIN EN 50530 PV-Generatormodells wird zunächst eine kontinuierliche Einstrahlungsänderung von minimalem Einstrahlungswert hin zu maximalem Einstrahlungswert der Testsequenz mit definierter Steigung simuliert. Nach dem Erreichen des Zielwerts der Einstrahlung wird eine Verweilzeit von 10 s abgewartet. Es folgt das Skalieren der Kennlinie in umgekehrter Richtung hin zu minimalem Einstrahlungswert der Testsequenz mit identischer Änderungsgeschwindigkeit mit anschließender Verweilzeit von 10 s. Diese Simulation von positiver und negativer Einstrahlungsänderung wird für jede Steigung in definierter Anzahl wiederholt. Sind alle Wiederholungen des Tests bei entsprechender Steigung durchlaufen, ist das Testintervall beendet. Die Intervallmesswerte des PV-Simulators werden in der „Data“ Datei gespeichert und die Synchronisationsdatei wird geschlossen. Es folgt das nächste Testintervall mit veränderter Steigung und veränderter Anzahl an Wiederholungen. Wurden alle Steigungen der Testsequenz durchlaufen, folgt die nächste Testsequenz. Das Ablaufdiagramm Abb. 18 zeigt den beschriebenen Programmablauf des dynamischen Wirkungsgradtests.

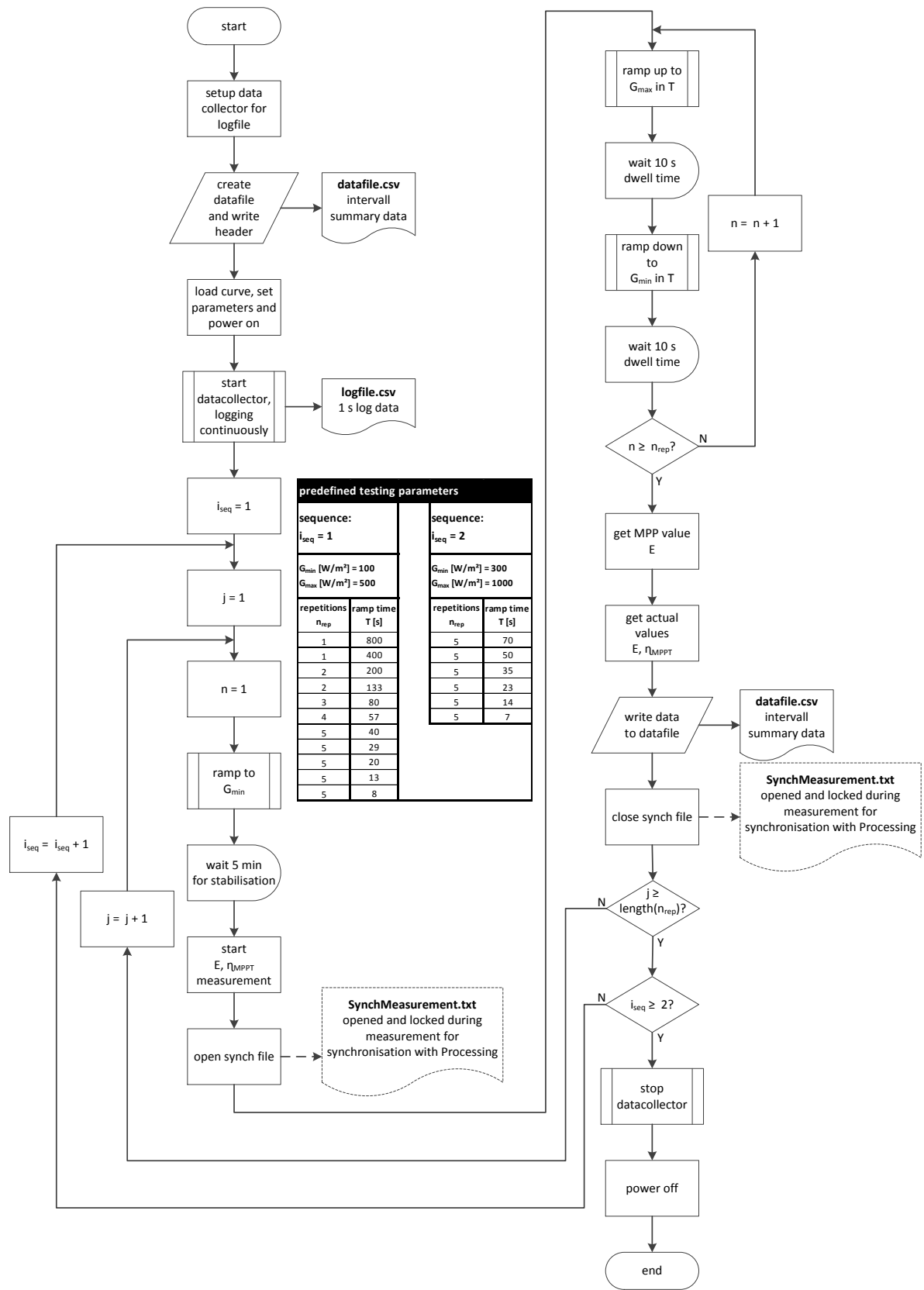


Abb. 18: Ablaufdiagramm SASScript, dynamischer Wirkungsgradtest

8.3.2 Arduino

Die Open Source Software Arduino IDE wird für das Auslesen der Messwerte der Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräte und der maxim integrated DS18S20 Temperatursensoren mit dem Arduino Mega Mikrocontroller verwendet. Die drei Leistungsmessgeräte sind an die Hardware UART Schnittstellen des Mikrocontrollers angeschlossen und werden seriell ausgelesen. Der gemeinsame 1-Wire-Bus der beiden Temperatursensoren ist an einer I/O Schnittstelle angeschlossen. Die vom Arduino ausgelesenen Messwerte werden über die USB-UART an den Computer gesendet.

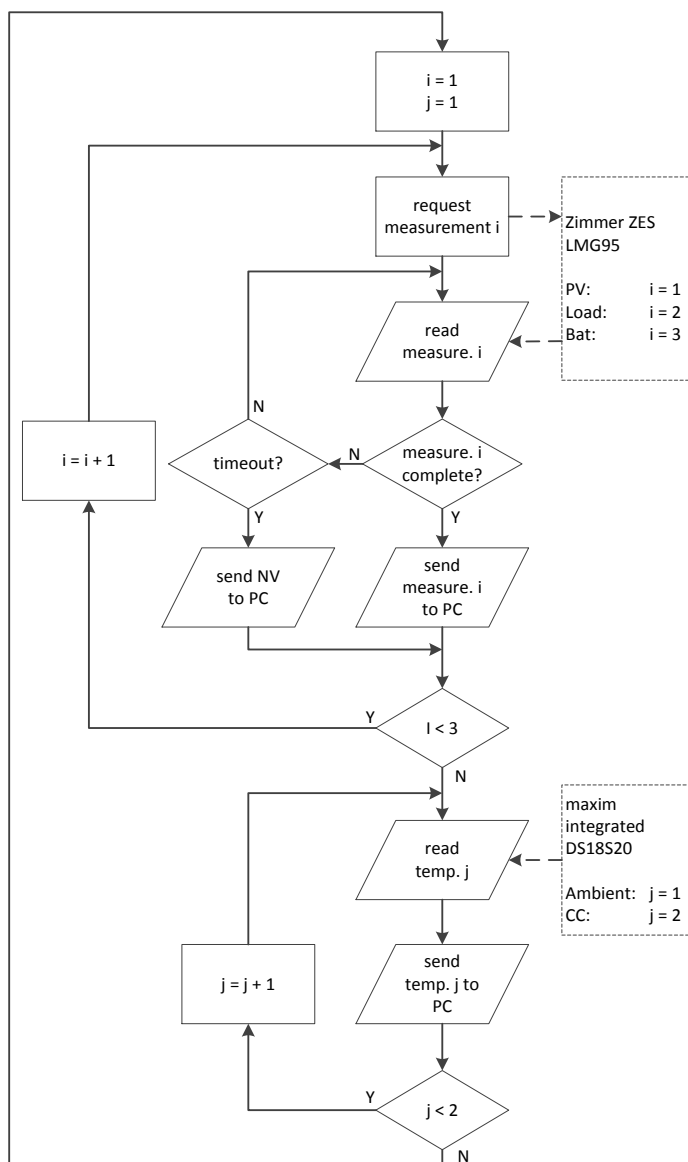


Abb. 19: Ablaufdiagramm Arduino

Die im Ablaufdiagramm Abb. 19 zu sehende Messwertabfrage des Arduino läuft in einer Schleife ab und es werden ungefähr drei Datensätze pro Sekunde an den Computer gesendet. Für das Auslesen der Leistungsmessgeräte werden zuerst die Messwerte durch das Senden entsprechender SCPI Befehle angefordert. Anschließend wartet der Mikrocontroller auf die Antwort des angefragten Leistungsmessgeräts und liest diese Zeichen für Zeichen ein. Wurde ein Zeilenumbruch empfangen, ist der Datensatz komplett und wird an den Computer gesendet. Um möglichen Verbindungsproblemen zu begegnen, ist zusätzlich ein Timeout implementiert. So werden der Reihe nach die Messwerte aller drei Leistungsmessgeräte ausgelesen und an den Computer gesendet. Anschließend werden die Messwerte der beiden Temperatursensoren seriell eingelesen und an den Computer gesendet. Die Vollständigkeit des Datensatzes bestehend aus Leistungs- und Temperaturmesswerten wird mit einem Zeilenumbruch markiert.

Es wurde ein weiteres Arduino Skript zum Einstellen der Messgeräte erstellt. Damit soll sichergestellt werden, dass die Leistungsmessgeräte richtig eingestellt sind und auch bei unterschiedlichen Wirkungsgradtests mit den gleichen Messgeräteeinstellungen gemessen wird. Beim Ausführen des Skripts werden die Messgeräte auf Standardeinstellungen zurückgesetzt. Zu den hinterlegten Standardeinstellungen gehören beispielsweise Zykluszeit und Leitwerte der externen Shunts. Das Programm erleichtert ebenso die Einstellung der Messbereiche der Leistungsmessgeräte, welche für jeden Laderegler individuell eingestellt werden müssen.

8.3.3 Processing

Zum Einlesen und weiterverarbeiten der vom Arduino Mikrocontroller an den Computer gesendeten Daten wurde die Programmiersprache Processing ausgewählt. Da Processing stark auf Visualisierungen spezialisiert ist, stehen eine Vielzahl von Bibliotheken zur grafischen Anzeige von Messwerten zur Verfügung. Dadurch können mit Processing Messdaten sehr einfach eingelesen, aufbereitet und auf dem Bildschirm grafisch ausgegeben werden. Processing liest die vom Mikrocontroller gesendeten Daten von der virtuellen seriellen Schnittstelle des Computers in einer Schleife ein. Diese werden dann aufbereitet und auf dem Bildschirm ausgegeben. Ebenso werden analog zur Speicherung der Messwerte durch SASControl die Messwerte in zwei CSV Dateien gespeichert.

Nach dem Start des Programms werden zunächst die beiden CSV Dateien angelegt, mit einem Header beschrieben und die Bildschirmausgabe formatiert. Die Messdaten vom Mikrocontroller werden als String eingelesen, formatiert, in Variablen gespeichert und in dieser Form ebenso auf dem Bildschirm ausgegeben. Processing empfängt vom Mikrocontroller ungefähr drei Datensätze pro Minute. Da die

Messwerte jedoch mit einem festen Zeitintervall von 1 s in der „Log“ Datei gespeichert werden sollen, wird eine Mittelwertbildung durchgeführt. Daher werden die Messwerte über das Zeitintervall aufsummiert und am Ende des Zeitintervalls durch die Anzahl der aufsummierten Messwerte dividiert. Die Intervallmessdaten zur Speicherung in der „Data“ Datei werden in ähnlicher Form aggregiert. Strom, Spannung und Temperatur Messwerte werden fortlaufend aufsummiert. Wird von SASControl die Synchronisationsdatei geöffnet, erkennt Processing den Intervallstart für eine Wirkungsgradmessung und setzt die Variablen für das Aufsummieren der Intervalldaten zurück. Wird die Synchronisationsdatei am Ende des Intervalls wieder geschlossen, werden Mittelwerte gebildet. Aus Gründen der Genauigkeit wird die Energie von den Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräten fortlaufend aufsummiert. Daher wird die während des Intervalls umgesetzte Energie als Differenz von am Anfang und am Ende des Messintervalls empfangener Gesamtenergie berechnet. Aus dem vom PV-Leistungsmessgerät und dem vom Batterie Leistungsmessgerät gemessenen Energieumsatz wird zuletzt noch der Umwandlungswirkungsgrad für das Messintervall berechnet, bevor die Intervallmessdaten in der „Data“ Datei gespeichert werden. Abb. 20 zeigt das Ablaufprogramm der Datenerfassung, Verarbeitung und Ausgabe durch Processing.

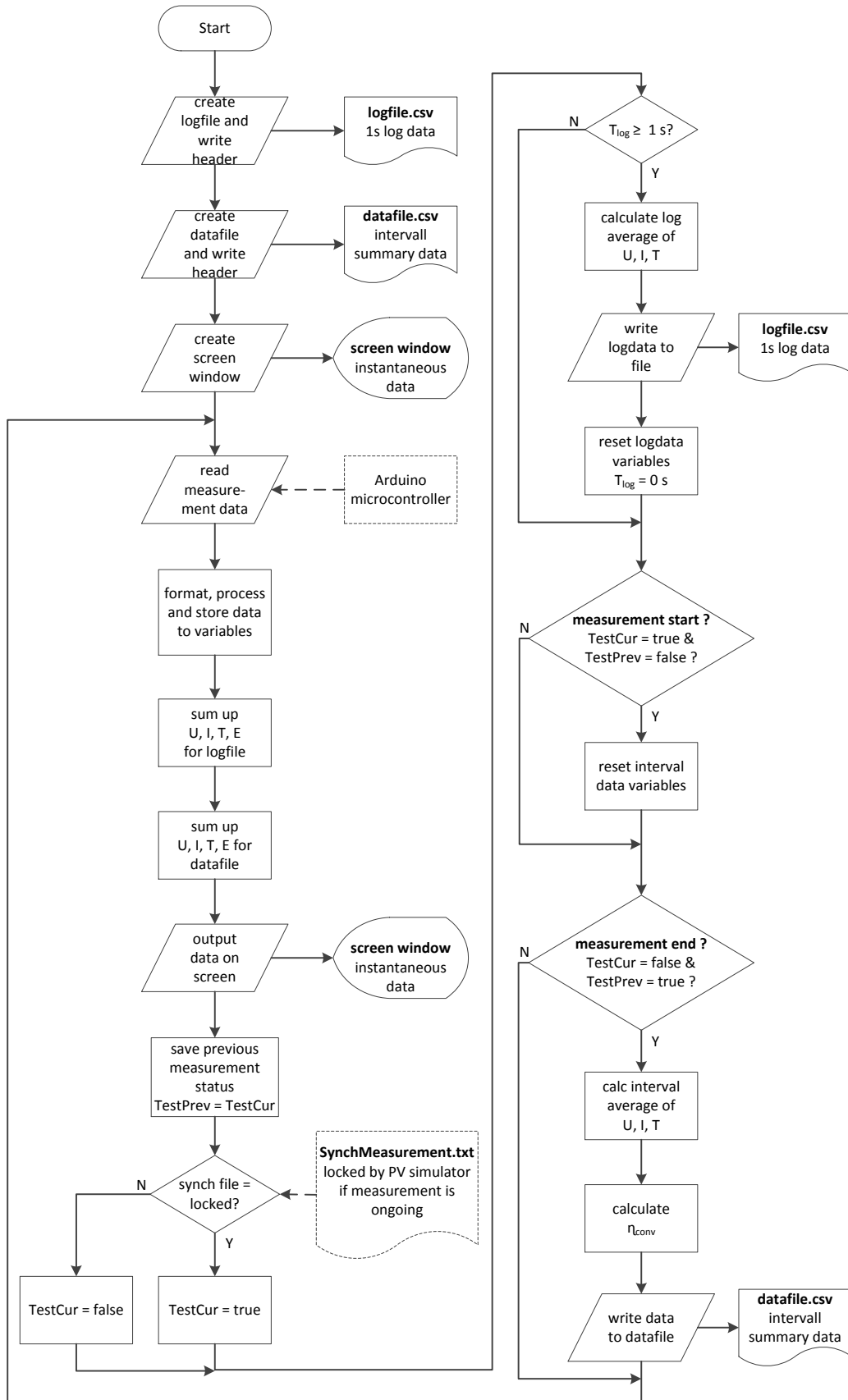


Abb. 20: Ablaufdiagramm Processing

8.4 Genauigkeit Wirkungsgradmessung

8.4.1 Fehlerabschätzung Umwandlungswirkungsgrad

Der Umwandlungswirkungsgrad der Laderegler wird aus den Energiemesswerten pro Messintervall, welche je nach Testsequenz zwischen 5 min und 60 min dauern, berechnet. Zur Energiemessung werden zwei Zimmer LMG95 Präzisions-Leistungsmessgeräte verwendet. Die Leistungsmessgeräte führen eine Leistungsmessung durch, bei welcher Strom und Spannung simultan mit einer Frequenz von 100 kHz abgetastet werden. Die Energie pro Messintervall wird durch eine geräteinterne Integration der DC-Leistung über die Dauer des Messintervalls berechnet. Die Genauigkeit der Strom- und Spannungsmessung sind maßgeblich für die Genauigkeit der Energiemessung. Die Zimmer LMG95 Präzisions-Leistungsmessgeräte sind nach ISO 9000 rückführbar kalibriert und vom Hersteller wird die Genauigkeit als Maximalfehler angegeben.

Da die ZES Zimmer LMG95 Leistungsmessgeräte intern nur Ströme von bis zu 20 A messen können, aber Laderegler für Ströme von bis zu 100 A getestet werden sollen, werden für die Strommessungen externe Nebenwiderstände eingesetzt. Es kommen Nebenwiderstände, auch Messshunts genannt, der Firma Weigel in der Genauigkeitsklasse 0,5 mit einem Nennstrom von 100 A und einem Nennspannungsabfall von 150 mV zum Einsatz. Diese externen Messshunts sind nicht rückführbar kalibriert und deren Messunsicherheit muss zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Genauigkeit der Spannungsmessung des LMG95 Präzisions-Leistungsmessgerät wird vom Hersteller angegeben mit:

$\pm (0,02 \% \text{ vom Messwert} + 0,06 \% \text{ vom Messbereich})$

Diese Genauigkeitsangabe bezieht sich sowohl auf die Messung der Spannung selbst sowie auf die Genauigkeit des Spannungseingangs für den externen Messshunt. Für Energiemessungen darf gemäß Hersteller keine automatische Messbereichsumstellung verwendet werden und der Messbereich muss fest eingestellt werden. Dadurch schwankt die Genauigkeit je nach gewähltem Messbereich und Messgröße. Bei dem Wirkungsgradtest eines einzelnen Ladereglers kann es beispielsweise notwendig sein PV-Spannungen zwischen 17 V und 75 V und PV-Ströme zwischen 2 A und 40 A zu messen. Dadurch werden die niedrigen Spannungen und Ströme mit einer deutlich geringeren relativen Genauigkeit gemessen als die hohen.

Für die Messung von PV- und Batteriespannung kommen je nach Laderegler 4 unterschiedliche Messbereiche mit Nennwerten zwischen 12,5 V und 130 V zum Einsatz. In Abhängigkeit vom Messbereich und dem Messwert errechnet sich aus den Herstellerangaben eine relative Genauigkeit der Spannungsmessung zwischen $\pm 0,1\%$ und $\pm 1,2\%$. Um eine vereinfachte Fehlerabschätzung zu ermöglichen, wird für die weiteren Genauigkeitsuntersuchungen angenommen, dass der Messbereich bestmöglich eingestellt ist und somit die Genauigkeit beim Nennwert des Messbereichs als repräsentativ angesehen werden kann. Für die 4 Messbereiche ergibt sich beim Nennwert eine mittlere relative Genauigkeit der Spannungsmessung von $\pm 0,13\%$.

Für die Messung der Spannung der externen Messshunts kommen je nach Laderegler 3 unterschiedliche Messbereiche mit Nennwerten zwischen 0,03 V und 0,12 V zum Einsatz. In Abhängigkeit vom Messbereich und dem Messwert errechnet sich aus den Herstellerangaben eine relative Genauigkeit zwischen $\pm 0,1\%$ und $\pm 2\%$. Zur vereinfachten Fehlerabschätzung wird wieder der mittlere Fehler beim Messbereichs Nennwert als repräsentativ angesehen. Für die 4 Messbereiche ergibt sich bei Nennwert eine mittlere relative Genauigkeit der Spannungsmessung der Shunteingänge von $\pm 0,22\%$.

Die verwendeten externen Messshunts sind mit einer Genauigkeitsklasse von 0,5 angegeben. Mit dem Nennstrom von 100 A ergibt sich daraus eine Genauigkeit von $\pm 0,5\text{ A}$ über den gesamten Messbereich. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, wurden die Messshunts zusammen mit den LMG95 Leistungsmessgeräten mit einem Fluke 5500A Multiproduktkalibrator kalibriert. Die Messabweichungen des Kalibrators können vernachlässigt werden, da dieser eine mehr als 10-mal höhere Genauigkeit als die Leistungsmessgeräte besitzt. Es wurde ein Bereich von 2 A bis 11 A kalibriert und der Leitwert der Shunts entsprechend der Messungen korrigiert. Der Bereich der Kalibrierung wird durch die Spezifikation der Messgeräte begrenzt. 2 A ist der minimale Strom, den das Leistungsmessgerät mit den externen Messshunts zuverlässig messen kann und 11 A ist der maximale Strom des Kalibrators. Die Messungen nach erfolgter Kalibrierung lieferten eine maximale absolute Abweichung von $\pm 7\text{ mA}$ und eine maximale relative Abweichung von $\pm 0,2\%$. Die maximale relative Abweichung zeigt sich bei einem Strom von 2 A und sinkt bei höheren Strömen deutlich. Obwohl nur über ein Teil des Messbereichs kalibriert wurde, wird die ermittelte relative Abweichung von $\pm 0,2\%$ als repräsentativ für den gesamten Messbereich angesehen. Im Ergebnis konnte durch die Kalibrierung eine deutlich höhere Messgenauigkeit der Messshunts als vom Hersteller angegeben erreicht werden. Die gemessene maximale relative Abweichung der Strommessung von $\pm 0,2\%$ liegt unter der berechneten mittleren Genauigkeit der Spannungseingänge für die externen Messshunts von $\pm 0,22\%$. Die für den Shunteingang des

Leistungsmessgeräts angegebenen Genauigkeiten bleiben somit auch beim Einsatz der externen Messshunts erhalten. Daher wird für die weitere Fehlerabschätzung die Genauigkeit des Shunteingangs als Maß für die Genauigkeit der Strommessung herangezogen und die Genauigkeit der Messshunts findet keine zusätzliche Berücksichtigung.

Vom Hersteller werden weder Angaben über die Natur der Messfehler gemacht, noch werden Konfidenzintervalle angegeben. Im Handbuch heißt es lediglich die typischen Unsicherheiten seien um den Faktor 2 – 5 geringer als die maximalen Unsicherheiten. Es muss davon ausgegangen werden, dass die gegebenen Genauigkeiten sowohl zufällige als auch systematische Abweichungen beinhalten. Daher kann nicht ohne Weiteres eine Normalverteilung der Abweichungen angenommen werden und es muss von einer linearen Fehlerfortpflanzung ausgegangen werden. Die Genauigkeit der Leistungsmessung ergibt sich als Summe der Genauigkeiten von Spannungs- und Strommessung zu $\pm 0,35\%$. Der Fehler der Zeitbasis des Messgeräts liegt bei ± 100 ppm und wird als vernachlässigbar klein angesehen. Auf Grund der Art der digitalen Messdatenerfassung wird ebenso kein Ablesefehler berücksichtigt. Somit ergibt sich auch für die Energiemessung eine Genauigkeit von $\pm 0,35\%$. Der Umwandlungswirkungsgrad berechnet sich als Quotient aus der in die Batterie gespeisten Energie und der vom PV-Generator bezogenen Energie. Somit ergibt sich für den Umwandlungswirkungsgrad eine mittlere Genauigkeit von $\pm 0,7\%$.

In Kapitel 6.3 wurde die Anforderung formuliert, dass der Umwandlungswirkungsgrad eine Genauigkeit von mindestens $\pm 0,1\%$ besitzen sollte. Die hier abgeschätzte Genauigkeit von $\pm 0,7\%$ ist deutlich schlechter. Daher sind für zukünftige zertifizierte Wirkungsgradmessungen Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit unerlässlich. Die Verteilung der Messfehler sollte weiter untersucht und die im Verlauf eines Tests variierende Genauigkeit berücksichtigt werden. Würden für die Messung Laderegler unterschiedlicher Leistung unterschiedliche Methoden der Strommessung verwendet, könnte die Genauigkeit deutlich erhöht werden. Beispielsweise könnte für kleine Laderegler bis 20 A Nennstrom die interne Strommessung der Leistungsmessgeräte verwendet werden. Ebenso könnten für Laderegler mittlerer Größe externe Messshunts mit höherem Widerstandswert eingesetzt werden, sodass die Shuntspannung mit höherer Genauigkeit gemessen werden kann. Ungeachtet dessen wird es unerlässlich sein die Leistungsmessgeräte gemeinsam mit den externen Messshunts rückführbar zu kalibrieren.

8.4.2 Fehlerabschätzung MPPT-Wirkungsgrad

Der MPPT-Wirkungsgrad wird vom Regatron TopCon Quadro PV-Simulator gemessen. Dieser wird geräteintern als Quotient der MPP Leistung der simulierten

I/V Kennlinie und der tatsächlich gemessenen DC-Ausgangsleistung berechnet. Der PV-Simulator ist nicht rückführbar kalibriert, weshalb Messungen durchgeführt wurden um dessen Genauigkeit zu überprüfen. Als Referenzmessgerät wurde ein rückführbar kalibriertes Zimmer LMG 640 Leistungsmessgerät mit einer Genauigkeit von $\pm(0,05 \%$ vom Messwert $+0,05 \%$ vom Messbereich) verwendet. Vor allem im niedrigen Leistungsbereich zeigte der PV-Simulator erhebliche Messabweichungen von mehreren Prozent. Diese wurden hauptsächlich verursacht durch die Messungenauigkeit der Strommessung, welche beispielsweise bei 2 A Nennstrom 7% betrug. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurden Strom- und Spannungsmessung einzeln nach Herstellerangaben auf den für die Wirkungsgradmessungen verwendeten Bereich kalibriert. Nach der Kalibrierung der Strommessung im Bereich von 1 A – 30 A wurde eine maximale Abweichung von $\pm 0,2 \%$ gemessen. Für die Spannung wurde nach der Kalibrierung im Bereich von 15 V – 80 V eine maximale Abweichung von $\pm 0,3 \%$ gemessen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese maximalen Abweichungen aus punktuellen Messungen einzelner, statischer Betriebszustände ermittelt wurden und somit die Genauigkeit des PV-Simulators nicht umfassend abbilden können, sondern nur eine Abschätzung liefern.

Die Genauigkeit des MPPT-Wirkungsgrads soll zusätzlich anhand der Herstellerangaben des PV-Simulators untersucht werden. Um eine Abschätzung zu ermöglichen, wird ein statischer Betriebszustand angenommen. Da der PV-Simulator eine Abtastrate von 20 kHz sowie eine Reaktionszeit < 2 ms besitzt und die Wirkungsgradmessungen über mehrere Minuten laufen, ist dies in guter Näherung möglich ist. Desweiteren werden konstante Umgebungsbedingungen angenommen, sodass Temperaturkoeffizienten und die Genauigkeit der Eingangsregelung (line regulation) vernachlässigt werden können.

Das Netzgerät löst sowohl die Spannung als Eingangsgröße als auch der Strom als Ausgangsgröße mit 4000 Schritten auf. Als Maximalfehler wird ± 1 Auflösungsschritt angesetzt. Somit ergibt sich aus der Maximalspannung von 500 V ein Digitalisierungsfehler von $\pm 0,125$ V und aus dem Maximalstrom von 80 A ein Digitalisierungsfehler von $\pm 0,02$ A. Die Genauigkeit der Ausgangsgrößenregelung (load regulation) wird mit $< \pm 0,1 \%$ des Maximalwerts angegeben. Hieraus ergibt sich für den Strom als Ausgangsgröße zusätzlich ein Maximalfehler von $\pm 0,08$ A.

Ein Proportionalfehler, wie bei Messgeräten üblich, wird für das Regatron DC-Netzgerät nicht angegeben und der Einfluss von Linearitätsfehler und Kalibriergenauigkeit kann nur abgeschätzt werden. Der für die Wirkungsgradberechnung verwendete PV-Leistung und MPP Leistung liegt dieselbe geräteinterne Messung zu Grunde. Wird angenommen, dass der Arbeitspunkt nahe des MPP liegt und der Messfehler gegenüber dem Messwert klein ist, ergibt sich für

die MPP Leistung und die PV-Leistung ein näherungsweise identischer Fehlerbeitrag. Unter dieser Annahme beeinflusst beispielsweise ein kleiner Nullpunkts- oder Linearitätsfehler die Genauigkeit der Wirkungsgradmessung nur geringfügig und wird daher bei der Fehlerabschätzung vernachlässigt. Da ebenso der Fehler der Zeitbasis vernachlässigt wird, kann die Genauigkeit der MPPT-Wirkungsgradmessung anhand der Leistung abgeschätzt werden.

Aus dem Digitalisierungsfehler und der Genauigkeit der Ausgangsgrößenregelung ergibt sich bei linearer Fehlerfortpflanzung sowohl für die MPPT-Leistung als auch für die PV-Leistung ein Maximalfehler von $\pm 0,0125$ W. Hieraus ergibt sich bei einer Leistung von 25 W ein Maximalfehler des MPPT-Wirkungsgrad von $\pm 0,10$ %. Bei einer Leistung von 300 W liegt dieser bereits unter $\pm 0,01$ %.

In Kapitel 6.3 wurde die Anforderung formuliert, dass der MPPT-Wirkungsgrad eine Genauigkeit von mindestens $\pm 0,1$ % besitzen sollte. Die Abschätzung des Maximalfehlers anhand der Herstellerangaben zeigt, dass diese Genauigkeit für Leistungen > 25 W erreicht werden kann. Die Referenzmessungen am PV-Simulator zeigten jedoch deutlich größere Abweichungen. Daher wird es unerlässlich sein für zukünftige zertifizierte Wirkungsgradmessungen den PV-Simulator rückführbar zu kalibrieren. Ebenso wird empfohlen die Genauigkeit des PV-Simulators erneut anhand energetischer Messungen zu überprüfen, um so auch das dynamische Verhalten erfassen zu können.

9 DURCHGEFÜHRTE MPPT-WIRKUNGSGRADTESTS

9.1 Überblick Wirkungsgradtests

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Auswahl von 7 Laderegler untersucht. Es wurden gezielt Laderegler unterschiedlicher Hersteller sowie unterschiedlicher Preis- und Leistungsklassen ausgewählt, um einen Marktüberblick zu erhalten. Ein Überblick der untersuchten Laderegler und deren Spezifikationen ist in Tab. 7 zu sehen.

Tab. 7: Übersicht getestete Laderegler

Nummer	Kaufpreis [€]	Preis [€/A]	$U_{OC,max}$ [V]	$U_{bat,max}$ [V]	$I_{bat,max}$ [A]	$U_{bat,test}$ [V]
1	50	5,0	50	24	10	12
2	550	8,5	150	48	65	24
3	300	6,0	100	24	50	24
4	65	6,5	150	24	10	24
5	60	3,0	70	24	20	24
6	35	3,5	48	24	10	24
7	250	5,6	55	24	45	24

Laderegler 1 – 5 sind am Markt erhältliche MPPT-Laderegler und wurden komplett nach dem Fraunhofer ISE Teststandard getestet. Laderegler 6 wird als MPPT-Laderegler verkauft und trägt das Kürzel „MPPT“ auch im Namen. Bereits erste vorab Untersuchungen und eine Betrachtung der Laderegler Hardware zeigten jedoch, dass dieser Laderegler über keinerlei MPPT-Funktionalität verfügt. Daher wurden weitere Tests unterlassen. Laderegler 7 ist ein herkömmlicher Laderegler ohne MPPT. An diesem wurde nur der statische Wirkungsgradtest durchgeführt, um die MPPT-Laderegler mit einem herkömmlichen Laderegler vergleichen zu können. Die wichtigsten technischen Kenndaten von Laderegler sind die maximale PV-Eingangsspannung $U_{OC,max}$, der maximale Batteriestrom $I_{bat,max}$ und die erlaubten Batterienennspannungen. Da Laderegler durch den technischen Aufbau strombegrenzt sind, wird der maximale Batteriestrom als Maß für das Leistungsvermögen verwendet. Es wurden Laderegler von 10 A bis 65 A maximalem

Batteriestrom getestet. Die maximale Leistung ergibt sich als Produkt aus maximalem Batteriestrom und Batteriespannung. Mit Ausnahme von Laderegler 4 unterstützen alle getesteten Laderegler Batterienennspannungen von 12 V und 24 V. Laderegler 4 unterstützt lediglich eine Batterienennspannung von 24 V. Laderegler 2 erlaubt zusätzlich eine Batteriespannung von 48 V. Die maximale PV-Eingangsspannung ist vor allem bei größeren Laderegler ein wichtiges Auslegungskriterium, da diese limitiert wie viele PV-Module in Reihe geschaltet werden können. Die maximalen PV-Eingangsspannungen der getesteten Laderegler reichen von 48 V bis 150 V. Als weiteres Vergleichskriterium wird in

Tab. 7 der Kaufpreis der Laderegler aufgeführt. Um einen Vergleich der Kaufpreise zu erleichtern, wurde neben dem absoluten Kaufpreis ein relativer Preis bezogen auf den maximalen Batteriestrom gebildet. Die relativen Preise der getesteten Laderegler unterscheiden sich stark und liegen zwischen 3 €/A und $8,5 \text{ €/A}$.

Die technischen Spezifikationen der Laderegler können nicht die großen Preisunterschiede erklären. Weder zeigt sich eine Abhängigkeit des relativen Preises von dem maximalen Batteriestrom, noch von der maximalen PV-Eingangsspannung. Die Laderegler 1 – 3 und 7 sind von etablierten europäischen Herstellern, die Laderegler 4 – 6 von unbekannteren asiatischen Herstellern. Tendenziell sind die Laderegler asiatischer Herkunft günstiger, wobei Laderegler 4, mit dem zweihöchsten relativen Preis im Test, ebenso asiatischer Herkunft ist. Erwähnenswert ist ebenso der vergleichsweise hohe Preis von Laderegler 7. Obwohl dieser über keinen MPPT verfügt, zeigt sich kein deutlicher Preisvorteil gegenüber den MPPT-Laderegler. Bei der hier stattfindenden Preisdiskussion muss jedoch bedacht werden, dass nur die wichtigsten technischen Spezifikationen Berücksichtigung finden. Der unterschiedliche, teils sehr umfangreiche, Funktionsumfang der Laderegler bleibt unberücksichtigt.

Für die Laderegler 1 – 5 wurden umfangreiche Wirkungsgradtests durchgeführt und ausführliche Testberichte erstellt, für die Laderegler 6 und 7 wurden wie zuvor beschrieben nur einzelne Tests durchgeführt. Eine Diskussion der Ergebnisse aller Wirkungsgradtests würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Daher werden nachfolgend nur die Tests einzelner Laderegler ausführlich diskutiert. Es werden bewusst Beispiele herausgegriffen, welche das typische MPPT-Verhalten gut veranschaulichen oder erwähnenswerte Besonderheiten zeigen. Am Ende eines jeden Kapitels werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Laderegler zusammengefasst und verglichen. Um einen kompletten MPPT-Laderegler-Effizienztest nach Fraunhofer ISE Teststandard nachvollziehen zu können, ist im Anhang der komplette Testbericht von Laderegler 1 als Beispiel beigefügt. Da die Testberichte in englischer Sprache erstellt wurden, finden sich in den nachfolgend diskutierten Schaubildern auch englische Beschriftungen.

9.2 Statischer Wirkungsgradtest

9.2.1 Statischer MPPT-Wirkungsgrad

Für die Ermittlung des statischen MPPT-Wirkungsgrads werden Messungen in 21 unterschiedlichen Arbeitspunkten durchgeführt. Es werden 7 unterschiedliche Leistungspegel, welche von 5 % bis 100 % der Nennleistung reichen, jeweils bei minimaler, mittlerer und maximaler MPP Spannung getestet. In jedem der Arbeitspunkte misst der PV-Simulator die vom Laderegler aufgenommene Energie über eine Testdauer von 5 min. Die über die Testdauer aufgenommene Energie wird durch die im MPP theoretisch zur Verfügung stehende Energie geteilt, um den MPP Wirkungsgrad zu erhalten. Es ergeben sich 21 einzelne MPPT-Wirkungsgrade, welche ein Wirkungsgradkennfeld bilden. Dieses gibt detailliert Auskunft über den Wirkungsgrad des MPPT in unterschiedlichen Arbeitspunkten.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messungen des statischen MPPT-Wirkungsgrads von Laderegler 2 dargestellt. Tab. 8 zeigt eine Auflistung der Messergebnisse, wobei die Ergebnisse in Abb. 21 grafisch als Wirkungsgradkennfeld dargestellt sind. Der minimale gemessene MPPT-Wirkungsgrad von Laderegler 2 liegt bei 98,8 %, der maximale bei 100,2 %. Aufgrund der Messungenauigkeit der Energiemessungen ergeben sich in einzelnen Arbeitspunkten Wirkungsgrade größer 100 %. Es gilt zu erwähnen, dass speziell diese fehlerbehaftet sind und bei der Interpretation aller Ergebnisse die Fehlergrenzen der Messungen zu berücksichtigen sind. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit lässt sich für Laderegler 2 kein klarer Einfluss von MPP Spannung und Leistung auf den Wirkungsgrad erkennen und dieser kann als, über den gesamten Arbeitsbereich, näherungsweise konstant angesehen werden.

Laderegler 1, 2 und 3 zeigten in allen Betriebspunkten hohe statische MPPT-Wirkungsgrade von über 98 %. Die MPPT-Wirkungsgrade von Laderegler 4 und 5 fallen bei 5 % Nennleistung teils deutlich unter 98 % ab. Ein Vergleich der MPPT-Wirkungsgrade der Laderegler erfolgt in Kapitel 9.2.5 anhand des gewichteten europäischen Wirkungsgrads.

Tab. 8: Statischer MPPT-Wirkungsgrad, Laderegler 2

k	U _{MPP}		
	35 V	75 V	115 V
0.05	98.8%	100.2%	98.8%
0.1	99.3%	99.5%	100.2%
0.2	99.3%	99.9%	99.7%
0.3	99.3%	99.8%	100.2%
0.5	99.3%	99.8%	100.0%
0.75	99.3%	99.9%	99.9%
1	99.4%	99.8%	99.9%

XX.X% max interval efficiency

XX.X% min interval efficiency

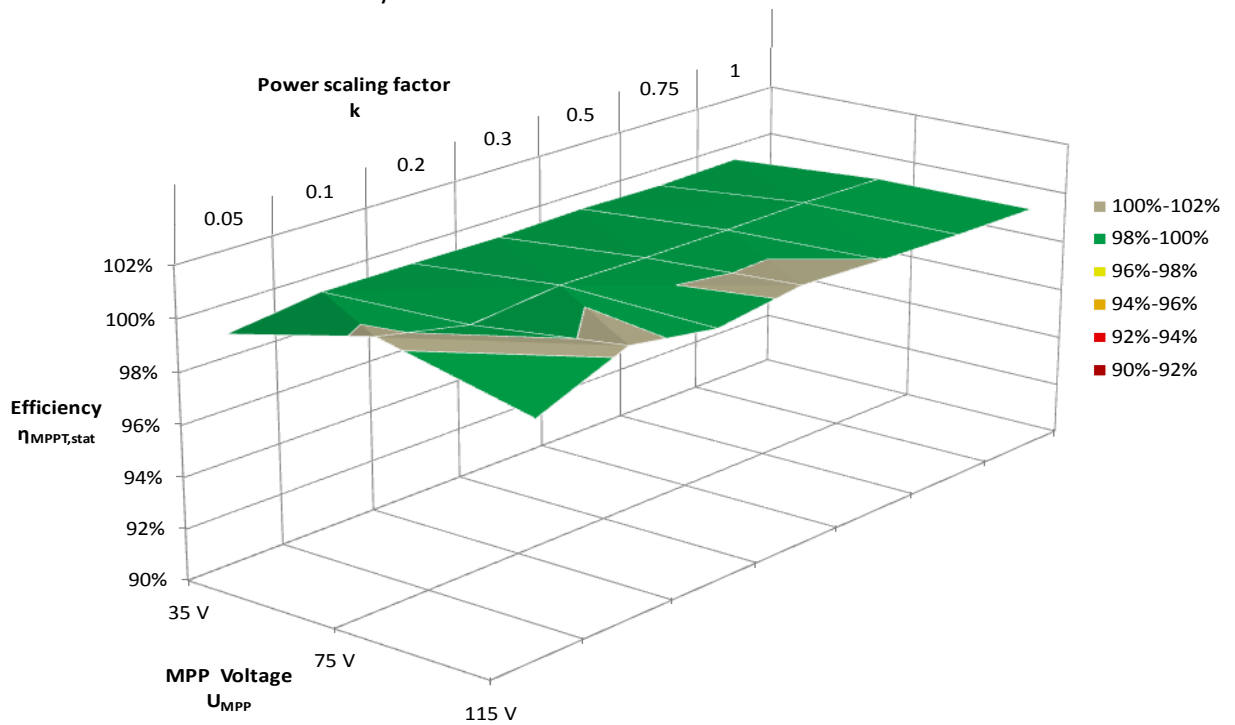


Abb. 21: Statischer MPPT-Wirkungsgrad, Laderegler 2

9.2.2 Statischer Umwandlungswirkungsgrad

Der statische Umwandlungswirkungsgrad wird in einem gemeinsamen Test mit dem MPPT-Wirkungsgrad ermittelt. Während der Testdauer von 5 min wird sowohl die vom Laderegler aufgenommene als auch die vom Laderegler an die Batterie abgegebene Energie gemessen, um daraus den statischen Umwandlungswirkungsgrad zu berechnen. Aus den 21 Einzelmessungen ergibt sich ein Wirkungsgradkennfeld.

Tab. 9: Statischer Umwandlungswirkungsgrad, Laderegler 2

k	U_{MPP}		
	35 V	75 V	115 V
0.05	95.4%	95.1%	95.2%
0.1	97.5%	96.5%	96.2%
0.2	98.1%	97.6%	97.0%
0.3	98.4%	97.8%	97.2%
0.5	98.1%	97.5%	96.9%
0.75	97.8%	97.4%	96.7%
1	97.6%	97.1%	96.4%

XX.X% max interval efficiency

XX.X% min interval efficiency

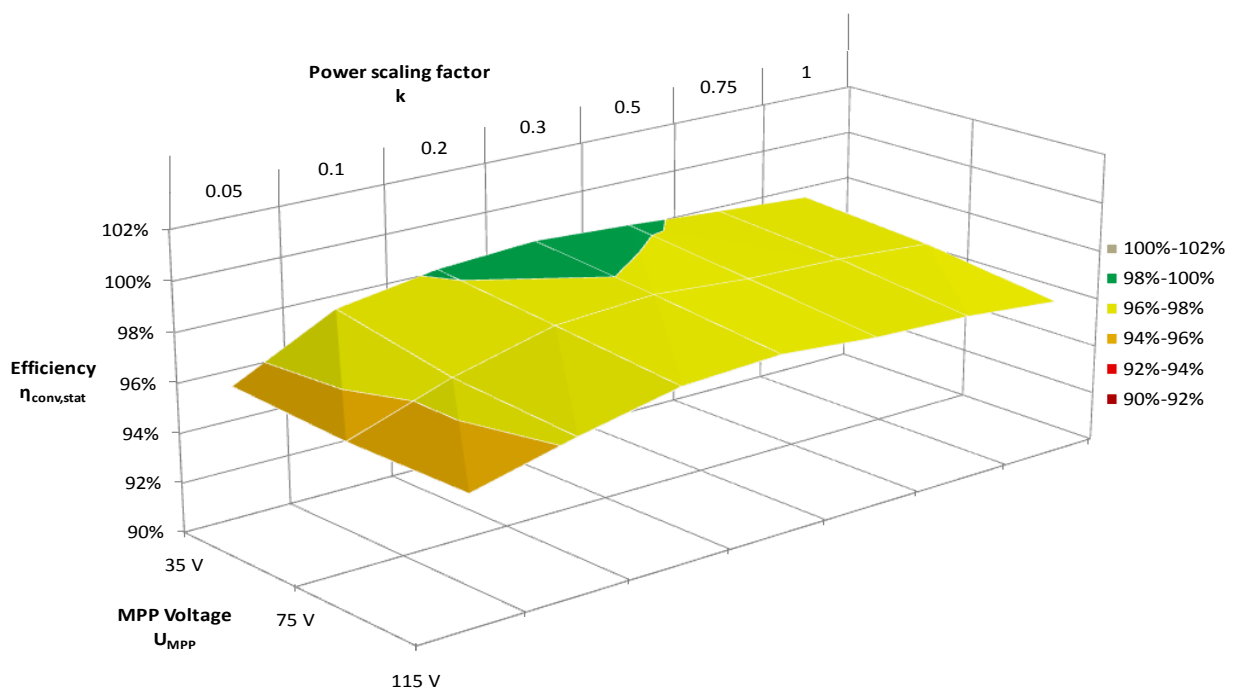


Abb. 22: Statischer Umwandlungswirkungsgrad, Laderegler 2

In gleicher Form wie für den MPPT-Wirkungsgrad, zeigen Tab. 9 und Abb. 22 die Testergebnisse für den statischen Umwandlungswirkungsgrad. Es zeigt sich deutlich, dass der statische Umwandlungswirkungsgrad des Ladereglers deutlich geringer ist als der statische MPPT-Wirkungsgrad. Es wurden ein minimaler statischer Umwandlungswirkungsgrad von 95,1 % und ein maximaler statischer Umwandlungswirkungsgrad von 98,4 % gemessen. Es zeigt sich ein Einfluss von MPP Spannung und Leistung auf den Umwandlungswirkungsgrad. Sowohl bei sehr niedrigen als auch hohen Leistungen nimmt der Umwandlungswirkungsgrad ab. Ebenso nimmt der Wirkungsgrad mit zunehmender MPP Spannung ab.

Die statischen Umwandlungswirkungsgrade aller getesteten Laderegler lagen deutlich unter den statischen MPPT-Wirkungsgraden. Beim Umwandlungswirkungsgrad zeigen sich größere Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen sowie den unterschiedlichen Laderegler. Die gemessenen einzelnen Umwandlungswirkungsgrade reichen von 81 % bis 99 %. Alle Laderegler zeigen die Charakteristik, dass bei niedrigen und hohen Leistungen, als auch mit zunehmender MPP Spannung der Wirkungsgrad abnimmt. Dies lässt sich durch den technischen Aufbau von Laderegler erklären. Bei kleinen Leistungen hat der Eigenverbrauch des Ladereglers einen prozentual höheren Anteil an der umgesetzten Energie, womit der Wirkungsgrad sinkt. Bei hohen Leistungen verursacht die zunehmende Erwärmung des Ladereglers, vor allem in den Halbleiterbauelementen, steigende Verluste. Mit zunehmender MPP Spannung steigt die Spannungsdifferenz zwischen PV-Spannung und Batteriespannung, mit der Folge höherer DC – DC Wandlungsverluste. Damit beeinflusst auch die Batteriespannung die Effizienz des Ladereglers. Der Einfluss der Batteriespannung wurde in diesen Tests jedoch nicht gesondert untersucht, da dies den Testaufwand vervielfachen würde. Ein Vergleich der Umwandlungswirkungsgrade der Laderegler erfolgt in Kapitel 9.2.5 anhand des gewichteten europäischen Wirkungsgrads.

9.2.3 Statischer Gesamtwirkungsgrad

Der statische Gesamtwirkungsgrad berechnet sich als Produkt aus statischem MPPT-Wirkungsgrad und statischem Umwandlungswirkungsgrad. Somit ergibt sich aus den 21 Einzelmessungen auch ein Wirkungsgradkennfeld für den statischen Gesamtwirkungsgrad.

Tab. 10: Statischer Gesamtwirkungsgrad, Laderegler 2

k	U_{MPP}		
	35 V	75 V	115 V
0.05	94.3%	95.3%	94.0%
0.1	96.8%	96.1%	96.4%
0.2	97.4%	97.4%	96.7%
0.3	97.6%	97.6%	97.4%
0.5	97.5%	97.3%	96.9%
0.75	97.1%	97.3%	96.7%
1	96.9%	96.9%	96.2%

XX.X% max interval efficiency

XX.X% min interval efficiency

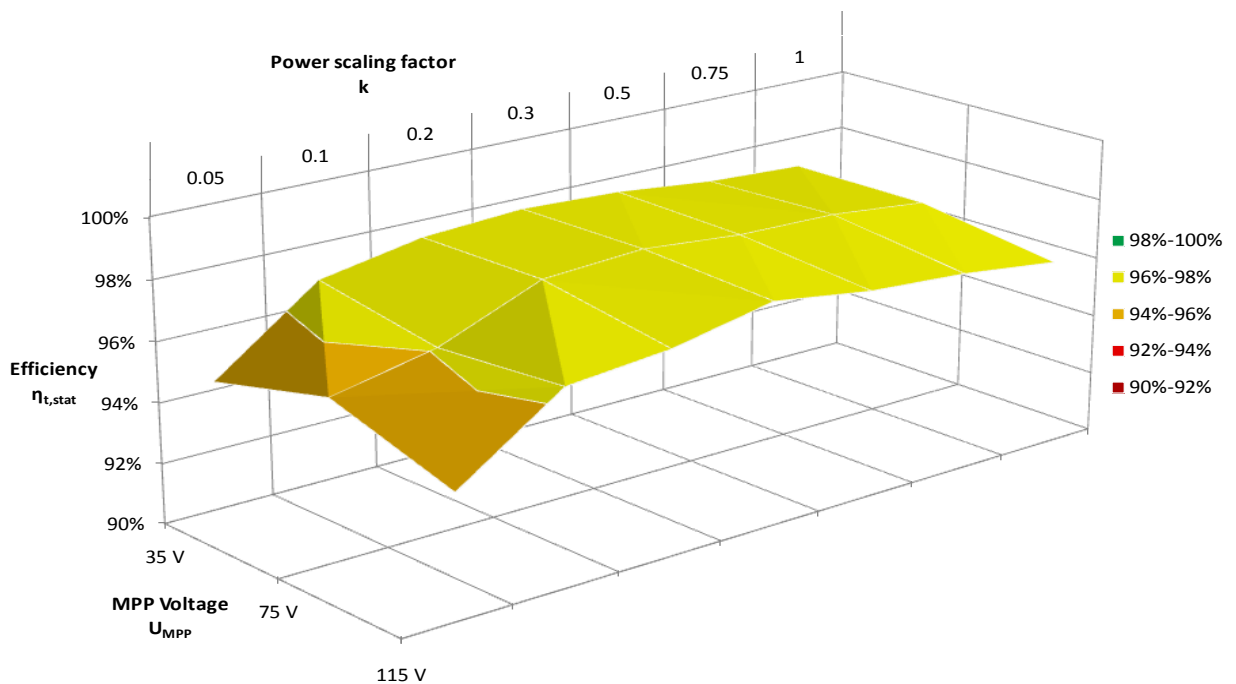


Abb. 23: Statischer Gesamtwirkungsgrad, Laderegler 2

Die Testergebnisse für den statischen Gesamtwirkungsgrad von Laderegler 2 sind in Tab. 10 und Abb. 23 zu sehen. Es zeigt sich, dass die Charakteristik des Gesamtwirkungsgrads nahezu der des Umwandlungswirkungsgrads gleicht. Sowohl bei niedrigen als auch hohen Leistungen fällt der Gesamtwirkungsgrad ab. Durch den Einfluss des MPPT-Wirkungsgrads, liegt der Gesamtwirkungsgrad deutlich unter dem Umwandlungswirkungsgrad. Die einzelnen statischen Gesamtwirkungsgrade von Laderegler 2 liegen zwischen 94,0 % und 97,6 %.

Der statische Gesamtwirkungsgrad bildet ab, wie effizient der Laderegler unter gleichbleibenden Umgebungsbedingungen in einem bestimmten Arbeitspunkt arbeitet.

9.2.4 Gewichteter statischer Wirkungsgrad

Die gewichteten statischen Wirkungsgrade werden für jede der 3 MPP Spannungen aus den einzelnen Wirkungsgradmessungen des statischen Wirkungsgradtests berechnet. Hierzu werden die Einzelwirkungsgrade mit Gewichtungsfaktoren multipliziert und aufsummiert. Die Gewichtungsfaktoren sind in der DIN EN 50530 definiert und wurden bereits in Kapitel 0 vorgestellt. Es werden sowohl der gewichtete EU-Wirkungsgrad als auch der gewichtete CEC-Wirkungsgrad berechnet. Die gewichteten Wirkungsgrade werden für den statischen MPPT-Wirkungsgrad, Umwandlungswirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad berechnet. Die statischen Wirkungsgradtests werden bei 3 unterschiedlichen MPP Spannungen durchgeführt. Dadurch ergeben sich für MPPT-Wirkungsgrad, Umwandlungswirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad jeweils 3 gewichtete EU-Wirkungsgrade und 3 gewichtete CEC-Wirkungsgrade.

In Abb. 25 sind die gewichteten EU-Wirkungsgrade von Laderegler 2 zu sehen. Der maximale gewichtete EU-MPPT-Wirkungsgrad von 99,9 % erreicht Laderegler 2 bei einer MPP Spannung von 115 V. Es zeigt sich die Tendenz eines leicht abnehmenden MPPT-Wirkungsgrads mit abnehmender MPP Spannung. Der maximale gewichtete Umwandlungswirkungsgrad von 97,9 % wird bei der minimalen MPP Spannung von 35 V erreicht. Hier zeigt sich die umgekehrte Tendenz, dass der Umwandlungswirkungsgrad mit zunehmender MPP Spannung sinkt. Der maximale gewichtete EU-Gesamtwirkungsgrad von 97,2 % wird sowohl bei 35 V als auch 75 V MPP Spannung erreicht. Insgesamt zeigt Laderegler 2 eine nur geringe Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der MPP Spannung.

In Abb. 25 sind die gewichteten CEC-Wirkungsgrade von Laderegler 2 zu sehen. Diese liegen leicht höher als die gewichteten EU-Wirkungsgrade. Mit maximal 0,1 % ist der Unterschied sehr gering. Es ist generell für alle Laderegler zu beobachten,

dass die CEC-Wirkungsgrade leicht über den EU-Wirkungsgraden liegen. Dies liegt darin begründet, dass der EU-Wirkungsgrad niedrige Leistungspegel, bei welchen Laderegler generell ineffizienter sind, stärker gewichtet. Alle Laderegler zeigten nur geringfügige Unterschiede zwischen EU- und CEC-Wirkungsgrad.

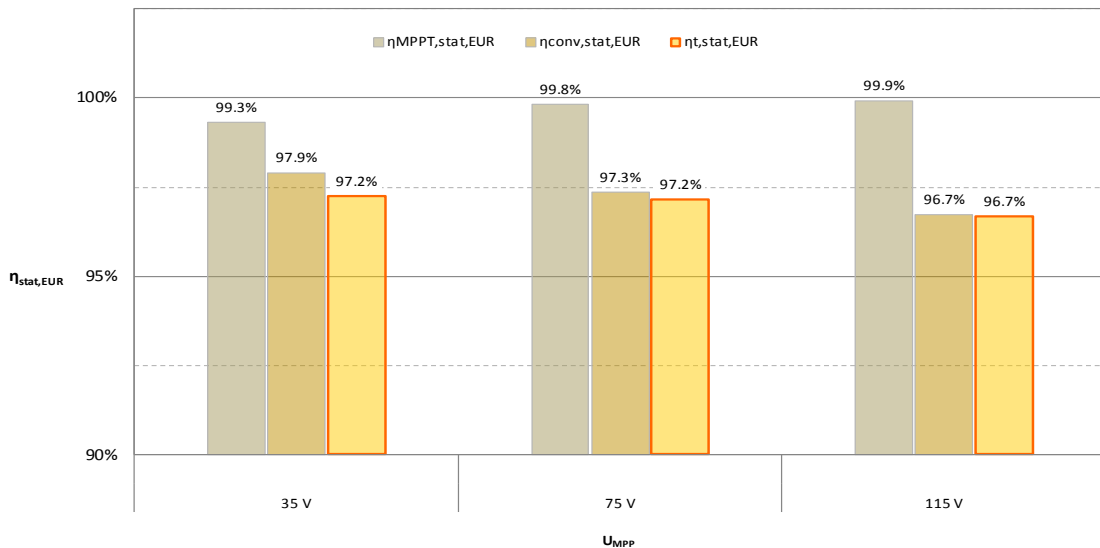


Abb. 24: Gewichteter Europäischer Wirkungsgrad, Laderegler 2

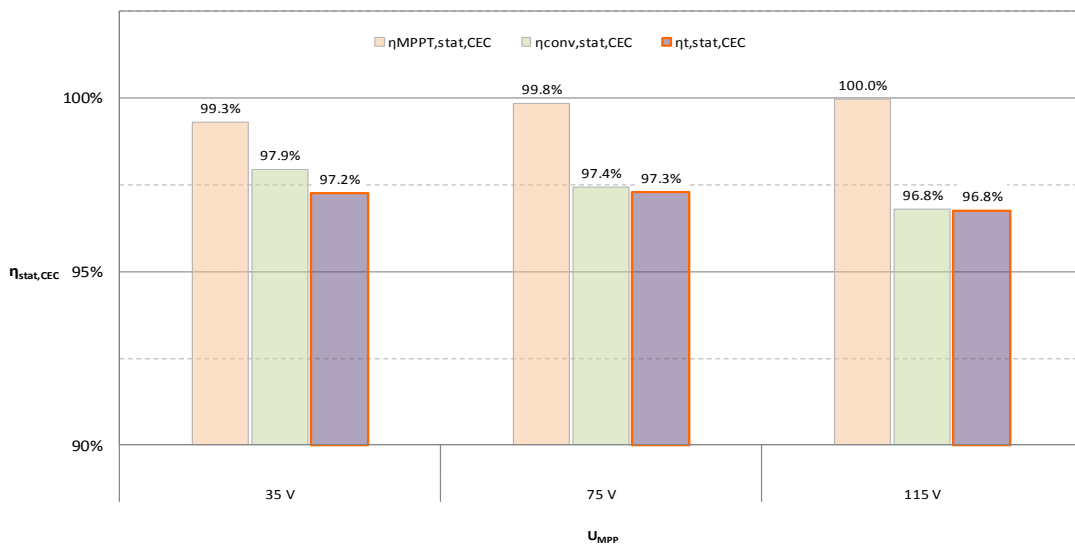


Abb. 25: Gewichteter California Energy Commission Wirkungsgrad, Laderegler 2

Die gewichteten Wirkungsgrade geben einen Überblick, wie effizient ein Laderegler unter statischen Bedingungen bei einer bestimmten MPP Spannung arbeitet. Aus den gewichteten Wirkungsgraden wird beispielsweise ersichtlich, ob der Wirkungsgrad eines Ladereglers bei höheren MPP Spannungen abfällt.

Die gewichteten Wirkungsgrade, in Kombination mit dem detaillierten Wirkungsgradkennfeld des statischen Gesamtwirkungsgrads, liefern dem Anlagenplaner wichtige Informationen für die effiziente Auslegung einer PV-Anlage. Ebenso wird der Vergleich unterschiedlicher Laderegler für den Nutzer ermöglicht.

9.2.5 Übersicht statische Wirkungsgradtests

In Abb. 26 ist eine Übersicht der gewichteten statischen EU-Wirkungsgrade der getesteten Laderegler dargestellt. Im Schaubild zu sehen sind die mittleren MPPT-Wirkungsgrade, Umwandlungswirkungsgrade sowie Gesamtwirkungsgrade. Mit dem Ziel einer übersichtlicheren Darstellung wurden die Mittelwerte aus den EU-Wirkungsgraden bei minimaler, mittlerer und maximaler MPP Spannung gebildet. Zusätzlich zeigen Fehlerbalken die minimal und maximal gemessenen, nicht gewichteten Einzelwirkungsgrade. Diese Darstellung ist in der Norm DIN EN 50530 nicht vorgesehen. EU-Wirkungsgrade und CEC-Wirkungsgrade unterscheiden sich im Test nur geringfügig, weshalb hier auf eine Darstellung beider verzichtet wird. Die in Kapitel 5 diskutierten Wirkungsgraduntersuchungen anderer Autoren verwenden lediglich den EU-Wirkungsgrad. Daher wird aus Gründen der Vergleichbarkeit an dieser Stelle ebenfalls der EU-Wirkungsgrad verwendet. Den höchsten mittleren EU-Gesamtwirkungsgrad im Test von 97,8 % erreicht Laderegler 5. Laderegler 4 ist der MPPT-Laderegler mit dem geringsten mittleren EU-Gesamtwirkungsgrad von nur 93,1 %. Der herkömmliche Laderegler 7 ohne MPPT erreicht hingegen lediglich einen mittleren EU-Gesamtwirkungsgrad von 78 %. Somit erreicht selbst der ineffizienteste MPPT-Laderegler im Test einen um 15 % höheren mittleren EU-Gesamtwirkungsgrad als der Laderegler ohne MPPT. Erwähnenswert ist ebenso, dass, mit Ausnahme von Laderegler 4, die MPPT-Laderegler, trotz der größeren Spannungsdifferenz zwischen PV- und Batteriespannung, einen höheren Umwandlungswirkungsgrad zeigen als Laderegler 7. Es muss jedoch bedacht werden, dass für den Test des herkömmlichen Ladereglers Nummer 7 Abweichungen vom Fraunhofer ISE Teststandard für MPPT-Laderegler notwendig waren. Für dessen Test wurde die MPP Spannung um ± 20 % variiert, um durch Einstrahlung, Temperatur und Batterieladestand hervorgerufene Spannungsschwankungen abzubilden. Insgesamt bestätigt das Ergebnis den MPPT-Laderegler eine deutlich höhere Effizienz als dem herkömmlichen Laderegler. Für Laderegler 6 wurde aufgrund des beworbenen und nicht vorhandenen MPPTs auf die Durchführung der statischen und dynamischen Wirkungsgradtests verzichtet.

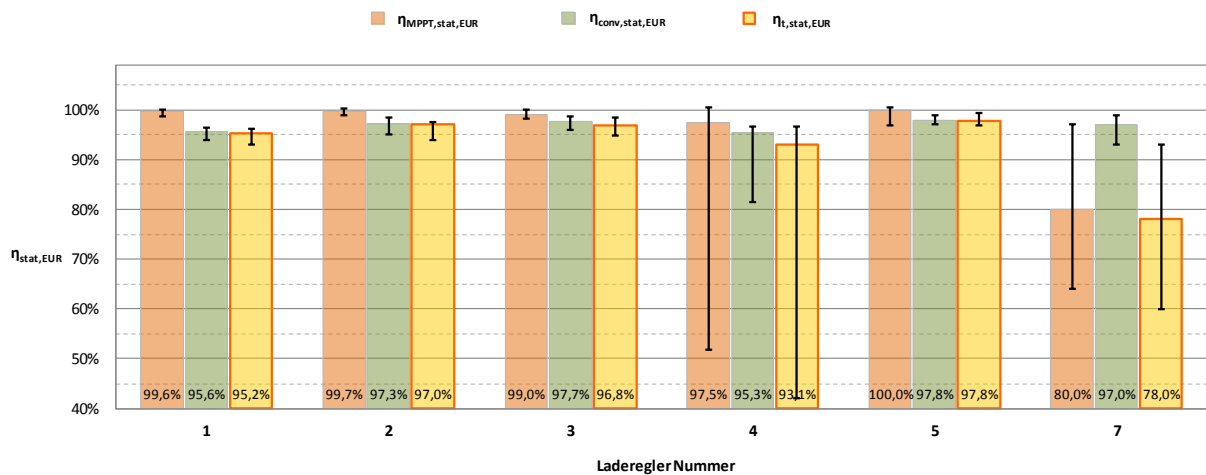


Abb. 26: Mittlerer Europäischer Wirkungsgrad der getesteten Laderegler

Für Laderegler 4 fällt die große Schwankungsbreite der einzelnen Wirkungsgradmessungen auf. Bei einzelnen Messungen fiel der Gesamtwirkungsgrad auf 42 % ab, zu erkennen an den Fehlerbalken. Dieser minimale Gesamtwirkungsgrad wurde bei einem Leistungspegel von 5 % gemessen. Die restlichen MPPT-Laderegler im Test zeigen deutlich geringere Schwankungen, mit über den gesamten Spannungs- und Leistungsbereich vergleichsweise konstanten Wirkungsgraden. Es kann kein Zusammenhang zwischen dem Kaufpreis der MPPT-Laderegler und den gemessenen Wirkungsgraden festgestellt werden. Laderegler 5 erreicht mit 97,8 % den höchsten mittleren EU-Gesamtwirkungsgrad und ist mit 3 €/A der günstigste Laderegler im Test. Hingegen ist Laderegler 4 mit 6,5 €/A mehr als doppelt so teuer und liefert mit einem mittleren EU-Gesamtwirkungsgrad von 93,1 % das schlechteste Ergebnis im Test.

Werden die gemessenen mittleren EU-Wirkungsgrade mit den in Kapitel 5.2 diskutierten MPPT-Laderegler tests anderer Autoren verglichen, ergeben sich, vor allem für den Umwandlungswirkungsgrad, deutliche Unterschiede. Die Autoren haben für die getesteten Laderegler mittlere EU-Umwandlungswirkungsgrade von rund 90% bis 96%, bei einem Mittel von knapp 95% gemessen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen zeigen jedoch mittlere EU-Umwandlungswirkungsgrade zwischen 95 % und 98 %, bei einem Mittel von 97 %. Somit liegen die hier gemessenen Umwandlungswirkungsgrade rund 2 % höher. Bei den statischen MPPT-Wirkungsgraden zeigen sich geringere Unterschiede. Die anderen Autoren haben mittlere EU-MPPT-Wirkungsgrade von rund 96% bis 100%, bei einem Mittel von knapp 99% gemessen. Die in dieser Arbeit ermittelten mittleren EU-MPPT-Wirkungsgrade liegen zwischen 98 % und 100 %, bei einem Mittel von 99 %, welche somit nur geringfügig höher sind. Es kann nicht beurteilt werden, ob die

höheren Wirkungsgrade auf die technologische Entwicklung, die Auswahl der Laderegler oder die verwendeten Testfahren zurückzuführen sind.

Vergleicht man die erreichten Wirkungsgrade mit den in Kapitel 5.3 diskutierten Wirkungsgraden von netzgekoppelten Wechselrichtern, ergeben sich erstaunlich geringe Unterschiede. Für den Vergleich werden der Photon-Wirkungsgrad und der mittlere statische EU-Gesamtwirkungsgrad als vergleichbar angenommen. Die in der Wechselrichter Bestenliste Tab. 6 gelisteten Wechselrichter zeigen Photon-Wirkungsgrade zwischen 96,5 % und 98,5 %. Die mittleren EU-Gesamtwirkungsgrade der hier getesteten Laderegler 2, 3 und 5 liegen ebenfalls in diesem Bereich und würden die Photon Testnote „sehr gut“ erhalten. Im Ergebnis wird die These widerlegt, dass MPPT-Laderegler generell geringere Wirkungsgrade aufweisen als netzgekoppelte Wechselrichter.

Im Allgemeinen ergibt sich eine gute Übereinstimmung der hier durchgeführten statischen Wirkungsgradtests mit den Arbeiten anderer Autoren, womit auch die Plausibilität der Ergebnisse bestätigt wird.

9.3 Dynamischer Wirkungsgradtest

9.3.1 Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad

Für die Ermittlung des dynamischen Wirkungsgrads nach Fraunhofer ISE Teststandard kommen zwei unterschiedliche, in der DIN EN 50530 definierte, Testsequenzen zum Einsatz. Diese simulieren Einstrahlungsänderungen zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 sowie 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 in unterschiedlicher Geschwindigkeit. Die dynamischen Tests werden bei mittlerer MPP Spannung durchgeführt. Während des dynamischen Tests werden fortlaufend die Energieströme gemessen, um in gleicher Weise wie beim statischen Test die Wirkungsgrade zu berechnen. Eine Testsequenz besteht aus mehreren Simulationsabfolgen, wobei für jede Simulationsabfolge ein einzelner Wirkungsgrad berechnet wird. Für jede Simulationsabfolge sind die Steigung der an- und absteigenden Einstrahlungsrampen und die Anzahl der Wiederholungen festgelegt. Es ergeben sich 17 einzelne dynamische Wirkungsgrade, jeweils für MPPT, Umwandlungs- und Gesamtwirkungsgrad. Diese bilden Einstrahlungsänderungen unterschiedlicher Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Einstrahlungsstärken ab. Der dynamische Wirkungsgrad gibt Auskunft wie gut und wie schnell der MPPT auf Einstrahlungsänderungen reagiert. Nachfolgend werden die detaillierten Messergebnisse beispielhaft diskutiert. Eine Analyse der zusammengefassten dynamischen MPPT-Wirkungsgrade folgt in Kapitel 9.3.2.

Abb. 27 zeigt beispielhaft die Ergebnisse des Wirkungsgradtests von Laderegler 2. Auf der linken Seite des Schaubildes sind die Ergebnisse der Testsequenz für Einstrahlungsänderungen zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 zu sehen, auf der rechten Seite der Testsequenz für Einstrahlungsänderungen zwischen 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 . Für beide Testsequenzen ist die Steigung der Einstrahlungsänderungen von links nach rechts zunehmend. Die einzelnen Wirkungsgrade bei einer bestimmten Steigung werden sowohl im Schaubild als Datenpunkte, als auch in der darunterliegenden Datentabelle dargestellt. Im Schaubild sind der dynamische MPPT, Umwandlungs- und Gesamtwirkungsgrad zu sehen.

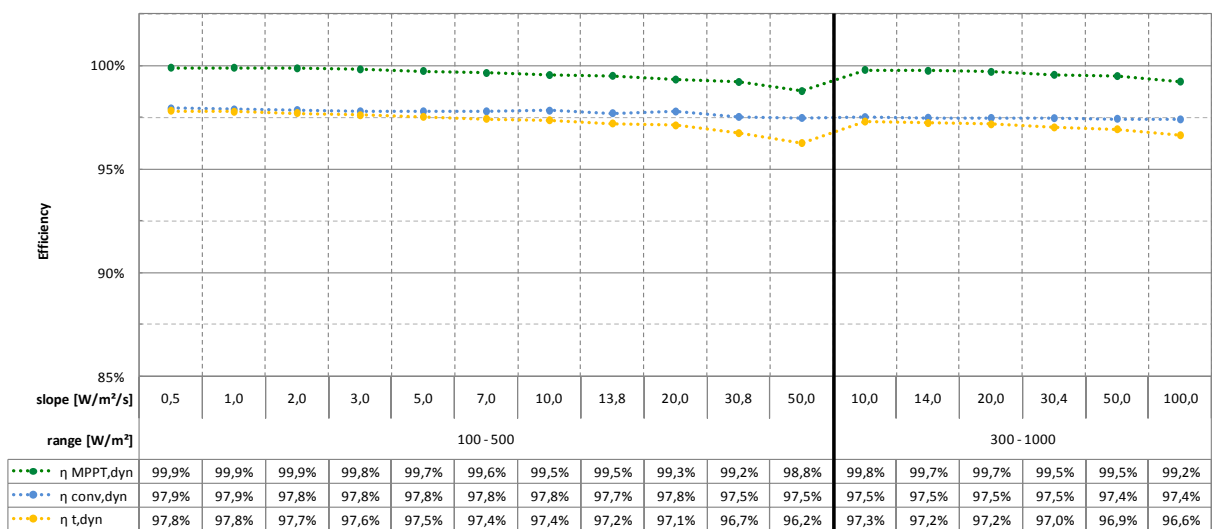


Abb. 27 Dynamischer Wirkungsgrad, Laderegler 2

Es ist zu erkennen, dass für schnelle Einstrahlungsänderungen der MPPT-Wirkungsgrad und in der Folge auch der Gesamtwirkungsgrad leicht abfallen. Der Umwandlungswirkungsgrad bleibt, unabhängig von der Einstrahlungsänderung, nahezu konstant. Insgesamt zeigt Laderegler 2 ein gutes dynamisches Verhalten und erreicht den höchsten dynamischen Wirkungsgrad im Test.

Die getesteten Laderegler liefern sehr unterschiedliche Ergebnisse im dynamischen Test, weshalb nachfolgend noch die Ergebnisse zwei weiterer Laderegler diskutiert werden.

In Abb. 28 sind die Ergebnisse des dynamischen Tests von Laderegler 4 zu sehen. Laderegler 4 zeigt bei Einstrahlungsänderungen zwischen 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 einen guten dynamischen Wirkungsgrad von über 99 %. Für Einstrahlungsänderungen zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 liegt der dynamische Wirkungsgrad hingegen nahezu konstant bei unter 75 %. Dies bedeutet, dass es

dem Laderegler praktisch nicht möglich ist, Änderungen bei niedriger Einstrahlung zu folgen. Wiederholmessungen konnten das Ergebnis bestätigen. Der Umwandlungswirkungsgrad ist wiederum für alle Messungen nahezu konstant. Die in Kapitel 9.4.2 folgende manuelle Analyse des Trackingverhaltens wird das mangelhafte dynamische Suchverhalten von Laderegler 4 bei niedriger Einstrahlung bestätigen.

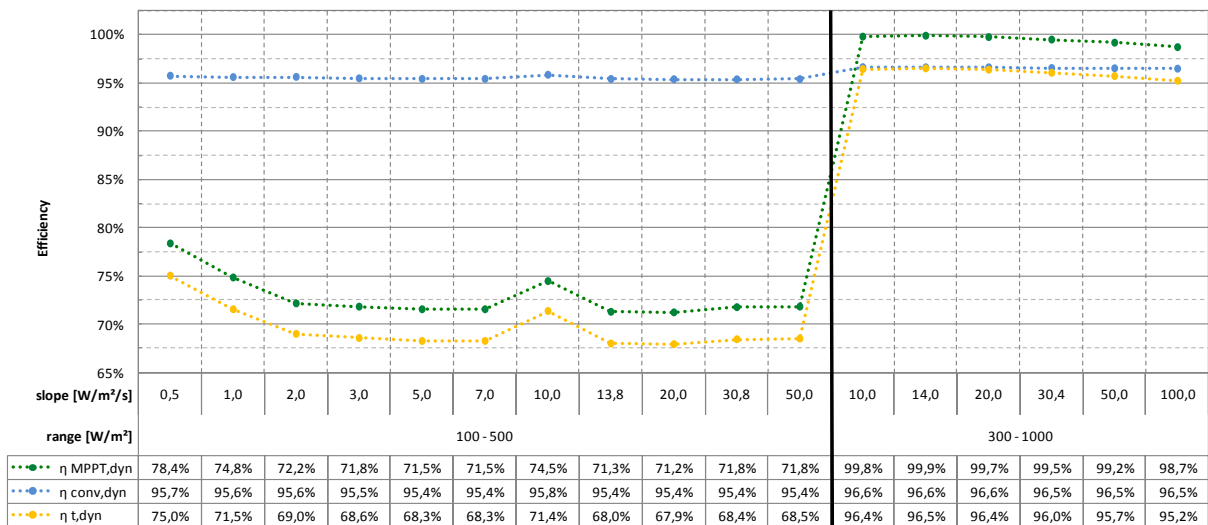


Abb. 28: Dynamischer Wirkungsgrad, Laderegler 4

Der in Abb. 29 zu sehende Laderegler 5 zeigt insgesamt einen hohen dynamischen Wirkungsgrad. Nichtsdestotrotz ist zu erkennen, dass bei bestimmten Änderungsgeschwindigkeiten der dynamische MPPT-Wirkungsgrad auf fast 90 % einbricht. Beispielsweise bei Einstrahlungsänderungen zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 und einer Steigung von $20 \text{ W/m}^2/\text{s}$. Überraschenderweise steigt der MPPT-Wirkungsgrad bei höheren Einstrahlungsänderungen wieder deutlich an. Wiederholmessungen konnten dieses Verhalten bestätigen. Es zeigt sich auch für Laderegler 5 ein über den gesamten Test nahezu konstanter Umwandlungswirkungsgrad. Die in Kapitel 9.4.2 folgende manuelle Analyse des Trackingverhaltens kann diese stark abfallenden dynamischen MPPT-Wirkungsgrade zwar nicht im Detail erklären, es werden jedoch einige Schwächen des MPPTs sichtbar.

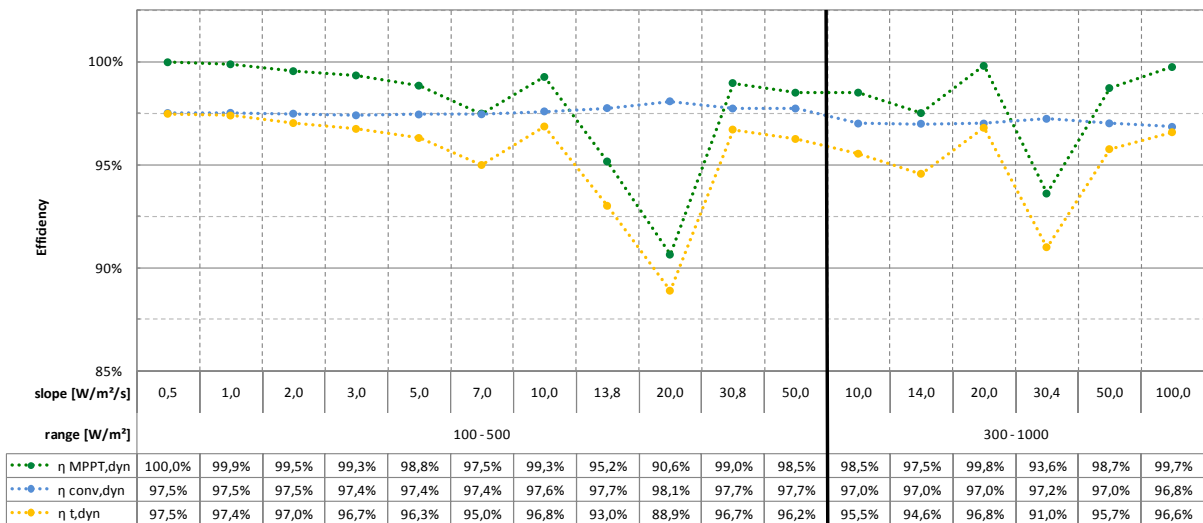


Abb. 29: Dynamischer Wirkungsgrad, Laderegler 5

Die dynamischen Wirkungsgradmessungen zeigen große Unterschiede in der Effizienz der einzelnen Laderegler unter wechselnden Einstrahlungsbedingungen. Es deutet sich eine sehr unterschiedliche Implementierung der MPPTs an. Der Wirkungsgrad einiger Laderegler fällt unter bestimmten Betriebsbedingungen auf ein unbefriedigendes Niveau ab.

Laderegler 2 zeigt über den gesamten Testbereich einen konstant hohen dynamischen MPPT-Wirkungsgrad von über 98 %. Die Einstrahlungsstärke sowie deren Änderungsgeschwindigkeit haben nur einen geringen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Ein ähnliches Verhalten zeigt ebenso, der hier nicht im Detail diskutierte, Laderegler 3. Dessen dynamischer MPPT-Wirkungsgrad liegt für die Mehrzahl der Messungen bei über 98 %. Lediglich bei der höchsten Änderungsgeschwindigkeit im Test fällt der dynamische MPPT-Wirkungsgrad auf 96 % ab.

Laderegler 4 zeigt sehr unterschiedliche Ergebnisse für die beiden Testsequenzen. Bei Einstrahlungsänderungen zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 liegt die Mehrzahl der gemessenen einzelnen MPPT-Wirkungsgrade bei unter 73 %. Dieser sehr niedrige Wirkungsgrad lässt darauf schließen, dass der MPPT bei niedrigen bis mittleren Einstrahlungen, unter dynamischen Betriebsbedingungen, praktisch keine Funktion zeigt. Demgegenüber werden bei Einstrahlungsänderungen zwischen 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 konstant hohe Wirkungsgrade von über 98 % erreicht. Ein ähnliches Verhalten, wenn auch in deutlich abgemilderter Form, zeigt Laderegler 1, welcher vorhergehend nicht im Detail diskutiert wurde. Bei Einstrahlungsänderungen zwischen 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 zeigt dieser konstant hohe MPPT-Wirkungsgrade von über 99 %. Bei Einstrahlungsänderungen zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 und

langsamen Änderungsgeschwindigkeiten bis $1 \text{ W/m}^2/\text{s}$ liegen diese ebenso bei über 99 %, sinken mit zunehmender Änderungsgeschwindigkeit jedoch kontinuierlich auf 78 % ab. Es wird vermutet, dass für beide Laderegler die mangelnde Genauigkeit der internen Strommessung ein Grund für die niedrigen Wirkungsgrade bei niedriger Einstrahlung ist. Durch die Ungenauigkeit der Strommessung bei kleinen Strömen können Änderungen des MPP vom Laderegler nicht ausreichend genau erfasst werden. Bei Laderegler 1 führt dies zu einem Abfall des MPPT-Wirkungsgrads mit zunehmender Änderungsgeschwindigkeit. Die konstant niedrigen MPPT-Wirkungsgrade von Laderegler 4 gleichen praktisch einem kompletten Aussetzen der Suche nach dem MPP.

Laderegler 4 zeigt insgesamt hohe dynamische MPPT-Wirkungsgrade, wobei die Mehrzahl der Werte bei über 98 % liegt. Es zeigt sich weder eine deutliche Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Einstrahlungsstärke noch von der Änderungsgeschwindigkeit. Nichtsdestotrotz bricht der MPPT-Wirkungsgrad bei einzelnen Messungen auf bis zu 90 % ein. Um Messfehler bei der Ermittlung der Wirkungsgrade als Grund für dieses Verhalten auszuschließen, wurde das Ergebnis in Wiederholmessungen überprüft. Wird berücksichtigt, dass es sich bei der MPP Suche förmlich um eine reine Softwarefunktion handelt, kann der Suchalgorithmus als mögliche Ursache vermutet werden. Unter bestimmten Betriebsbedingungen scheint der Suchalgorithmus nicht stabil zu sein, mit der Folge eines fehlerhaften Suchverhaltens.

Alle Laderegler zeigen über den gesamten dynamischen Test einen nahezu konstanten Umwandlungswirkungsgrad. Im Allgemeinen lässt sich keine Abhängigkeit des Umwandlungswirkungsgrads von der Änderungsgeschwindigkeit der Einstrahlung erkennen. Wie bei den statischen Tests, ist hingegen bei den meisten Ladereglern eine Abhängigkeit des Umwandlungswirkungsgrads von der Einstrahlungsstärke zu erkennen.

9.3.2 Übersicht dynamische Wirkungsgradtests

Die dynamischen Wirkungsgradmessungen geben ein detailliertes Bild wie effizient der Laderegler unter bestimmten Betriebsbedingungen arbeitet. Um zusätzlich die dynamische Gesamtperformance beurteilen und die Laderegler einfach vergleichen zu können, werden die einzelnen Wirkungsgrade durch Mittelwertbildung zusammengefasst. Da die Umwandlungswirkungsgrade keine Abhängigkeit von der Änderungsgeschwindigkeit der Umgebungsbedingungen zeigen, wird an dieser Stelle auf eine weitere Betrachtung der Umwandlungswirkungsgrade verzichtet. Der statische Test liefert ohnehin ein deutlich detaillierteres Kennfeld für den

Umwandlungswirkungsgrad. Darüber hinaus sieht die DIN EN 50530 keine Ermittlung des Umwandlungswirkungsgrads im dynamischen Test vor, sondern lediglich des MPPT-Wirkungsgrads.

Abb. 30 zeigt die zusammengefassten dynamischen MPPT-Wirkungsgrade der getesteten Laderegler. Der dynamische MPPT-Wirkungsgrad für niedrige bis mittlere Einstrahlungsstärken ist in orange dargestellt. Dieser berechnet sich als Mittelwert der einzelnen Wirkungsgrade der Testsequenz mit Einstrahlungsänderungen zwischen 100 W/m^2 und 500 W/m^2 . Der in grün dargestellte dynamische MPPT-Wirkungsgrad für mittlere bis hohe Einstrahlungsstärken ist der Mittelwert der einzelnen Wirkungsgrade der Testsequenz mit Einstrahlungsänderungen zwischen 300 W/m^2 und 1000 W/m^2 . Der in Gelb dargestellte dynamische MPPT-Gesamtwirkungsgrad ist der Mittelwert der beiden Testsequenzen. Die Minimal- und Maximalwerte der in den jeweiligen Testsequenzen gemessenen einzelnen MPPT-Wirkungsgrade sind mit Fehlerbalken dargestellt.

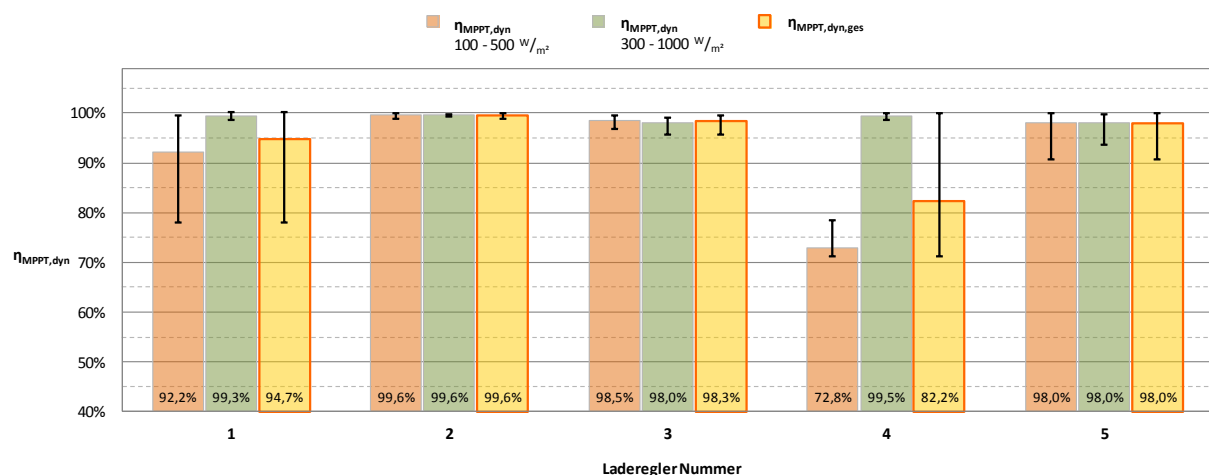


Abb. 30: Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad der getesteten Laderegler

Den höchsten MPPT-Gesamtwirkungsgrad von 99,6 % erreicht Laderegler 2. Für beide Testsequenzen zeigt Laderegler 2 einen gleich hohen MPPT-Wirkungsgrad bei geringer Streuung der einzelnen Messungen. Der statische EU-MPPT-Wirkungsgrad liegt mit 99,7 % nur geringfügig höher. Mit 98,3 % und 98,0 % zeigen Laderegler 3 und 5 einen nur etwas geringeren dynamischen MPPT-Gesamtwirkungsgrad. Vor allem Laderegler 5 zeigt jedoch eine deutlich größere Streuung der Einzelmessungen. Laderegler 3 zeigt überraschenderweise bei niedriger Einstrahlung einen etwas höheren Wirkungsgrad als bei hoher Einstrahlung. Für beide Laderegler liegt der dynamische MPPT-Gesamtwirkungsgrad rund 2 % niedriger als der statische EU-MPPT-Wirkungsgrad.

Laderegler 1 erreicht mit 94,7 % einen deutlich geringeren dynamischen MPPT-Gesamtwirkungsgrad. Dies wird hauptsächlich verursacht durch den geringen dynamischen MPPT-Wirkungsgrad bei niedrigen Einstrahlungsstärken von nur 92,2 %. Hier zeigt sich ebenso eine starke Streuung der Einzelmessungen. Der statische EU-MPPT-Wirkungsgrad liegt für Laderegler 1 mit 99,6 % um 4,9 % höher als der dynamische MPPT-Gesamtwirkungsgrad. Mit einem dynamischen MPPT-Gesamtwirkungsgrad von 82,2 % liefert Laderegler 4 ein unbefriedigendes Ergebnis, welches um mehr als 10 % unter dessen statischen EU-MPPT-Wirkungsgrad liegt. Auch bei Laderegler 4 liegt die geringe Effizienz in dem niedrigen MPPT-Wirkungsgrad bei geringen Einstrahlungsstärken begründet.

Im Vergleich fällt auf, dass die vergleichsweise effizienten Laderegler 2, 3 und 5 bei beiden Testsequenzen nahezu identische Wirkungsgrade erzielen. Die weniger effizienten Laderegler 1 und 4 hingegen zeigen bei der Testsequenz für geringere Einstrahlungsstärken einen deutlich reduzierten dynamischen MPPT-Wirkungsgrad. Ebenso zeigt sich die Tendenz, dass die Einzelwirkungsgrade der weniger effizienten Laderegler deutlich stärker streuen. Des Weiteren liegen die dynamischen MPPT-Gesamtwirkungsgrade der beiden weniger effizienten Laderegler deutlich unter deren statischen EU-MPPT-Wirkungsgrade. Somit zeigt sich als Charakteristikum der effizienteren Laderegler ein über den gesamten Testbereich gleichbleibend hoher dynamischer MPPT-Wirkungsgrad. Deren dynamischer MPPT-Wirkungsgrad wird kaum von der Einstrahlungsstärke beeinflusst und die Einzelwirkungsgrade streuen nur in einem geringen Maß.

Anhand der Ergebnisse anderer Autoren wurde in Kapitel 0 abgeschätzt, dass effiziente MPPT-Laderegler einen dynamischen MPPT-Wirkungsgrad von deutlich über 96 % aufweisen sollten. Die Laderegler 2, 3 und 5 liegen mit dynamischen MPPT-Gesamtwirkungsgraden von über 98 % sogar deutlich höher und können als effizient angesehen werden. Laderegler 1 und 4 bleiben jedoch hinter dieser Abschätzung zurück.

9.4 Sonstige MPPT-Tests

9.4.1 Einfluss Füllfaktoren

Bei ungefähr mittlerer MPP Spannung und Nennleistung werden U/I Kennlinien mit unterschiedlichen Füllfaktoren simuliert und der MPPT-Wirkungsgrad über 5 min gemessen. Zur Berechnung der U/I Kennlinien wird das PV-Generatormodell aus der DIN EN 5030 verwendet. Der Test stützt sich jedoch auf keine Norm und hat eher qualitativen Charakter. Zeigt der MPPT-Wirkungsgrad eine deutliche Abhängigkeit von den Füllfaktoren der U/I Kennlinie kann auf ein indirektes Trackingverfahren geschlossen werden, welches auf ein vordefiniertes Generatormodell zurückgreift. Neben den in DIN EN 50530 definierten Füllfaktoren, welche üblichen U/I Kennlinien entsprechen, werden hohe Füllfaktoren, welche eine sehr spitze Kurvenform ergeben, und niedrige Füllfaktoren, welche eine stark abgerundete Kurvenform ergeben, simuliert. Die verwendeten und in Tab. 11 zu sehenden Füllfaktoren sind nicht realen PV-Generatoren nachempfunden und dienen nur dem Test des Trackingalgorithmus.

Tab. 11: Simulierte Füllfaktoren

Füllfaktor	Spannung	Strom
DIN EN 50530	0,8	0,9
Hohe Füllfaktoren	0,95	0,95
Niedrige Füllfaktoren	0,7	0,7

Nachfolgende Schaubilder zeigen den Test zum Einfluss der Füllfaktoren für Laderegler 2. In den Schaubildern sind in grün und blau die U/I und Leistungskennlinien dargestellt. Der rote Punkt zeigt den vom Laderegler eingestellten Arbeitspunkt. Auf den Schaubildern ist ebenso der über 5 min gemessene statische MPPT-Wirkungsgrad angegeben.

Abb. 31 zeigt den Test mit Füllfaktoren nach DIN EN 50530. Diese Kurvenform entspricht durchschnittlichen kristallinen Silizium Solarzellen. Der Laderegler erreicht einen MPPT-Wirkungsgrad von 99,7 %. Abb. 32 zeigt den Test mit hohen Füllfaktoren, wobei ein Wirkungsgrad von 99,1 % erreicht wird. Bei dem in Abb. 33 dargestellten Test mit niedrigen Füllfaktoren erreicht der Laderegler einen Wirkungsgrad von 99,9 %. Laderegler 2 erreicht somit einen um 0,8 % höheren

MPPT-Wirkungsgrad bei niedrigen Füllfaktoren als bei hohen Füllfaktoren. Es ist die Tendenz zu erkennen, dass mit abnehmenden Füllfaktoren der MPPT-Wirkungsgrad des Ladereglers steigt. Die niedrigen Füllfaktoren im Test liegen rund 25 % unter den hohen Füllfaktoren. Betrachtet man im Vergleich, dass eine Variation der Füllfaktoren um 25 % eine Veränderung des MPPT-Wirkungsgrads um 0,8 % zur Folge hat, verdeutlicht sich nur ein geringer Einfluss der Füllfaktoren auf den MPPT-Wirkungsgrad. Es kann eindeutig geschlossen werden, dass in Laderegler 2 ein echter MPPT mit direktem Suchverfahren zum Einsatz kommt. Der geringere MPPT-Wirkungsgrad bei hohen Füllfaktoren liegt vermutlich in der größeren Steigung der U/I Kennlinie um den MPP begründet, welche höhere Genauigkeitsanforderungen an den MPPT stellt. Aus einer geringfügigen Abweichung des Arbeitspunkt vom MPP ergibt sich bei hohen Füllfaktoren ein deutlich größerer Leistungsabfall als bei niedrigen Füllfaktoren.

Alle Laderegler im Test zeigten nur eine geringe Abhängigkeit des MPPT-Wirkungsgrads von den Füllfaktoren. Die Schwankung des MPPT-Wirkungsgrads durch Variation der Füllfaktoren lag bei allen Ladereglern unter 1 %. Daraus kann gefolgert werden, dass alle 5 getesteten MPPT-Laderegler echte, direkte MPPT-Verfahren einsetzen. Somit sind diese nicht auf ein vordefiniertes PV-Generatormodell angewiesen und können technologieunabhängig für beliebige PV-Generatoren eingesetzt werden.

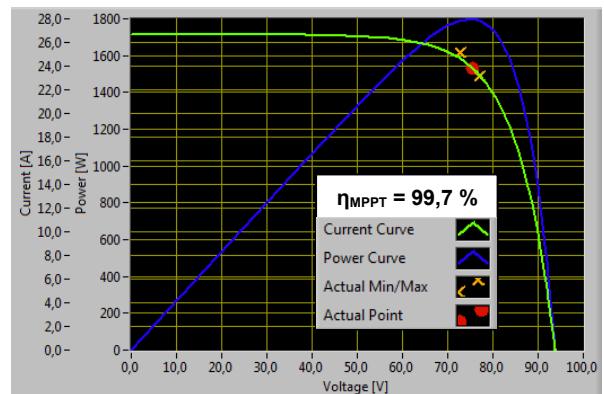


Abb. 31: Simulation DIN EN 50530 Füllfaktoren, Laderegler 2

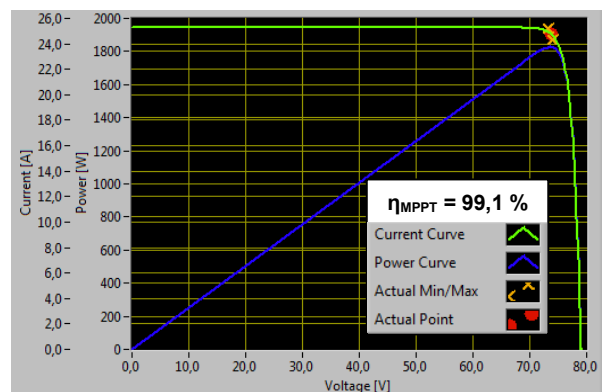


Abb. 32: Simulation hohe Füllfaktoren, Laderegler 2

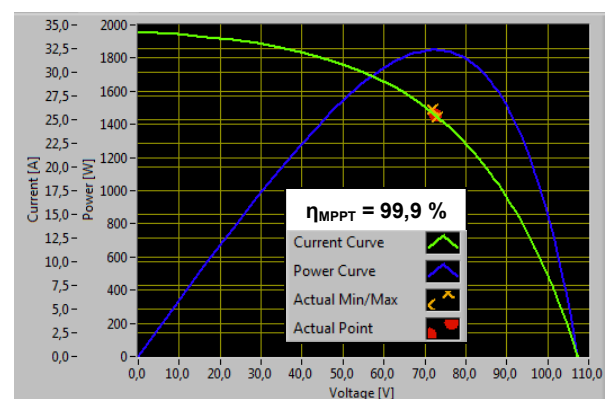


Abb. 33: Simulation niedrige Füllfaktoren, Laderegler 2

9.4.2 Analyse des Trackingverhaltens

Zur Analyse des Trackingverhaltens wird eine Abfolge unterschiedlicher Einstrahlungssituationen simuliert und die Messwerte werden mit einer zeitlichen Auflösung von 0,1 s geloggt. Die Testabfolge folgt keiner festen Vorgabe, sondern wird individuell so gewählt, dass das Trackingverhalten möglichst umfassend abgebildet wird. Das Ziel der Analyse ist es zu untersuchen, welche Suchverfahren zum Einsatz kommen und mögliche Schwachstellen zu identifizieren.

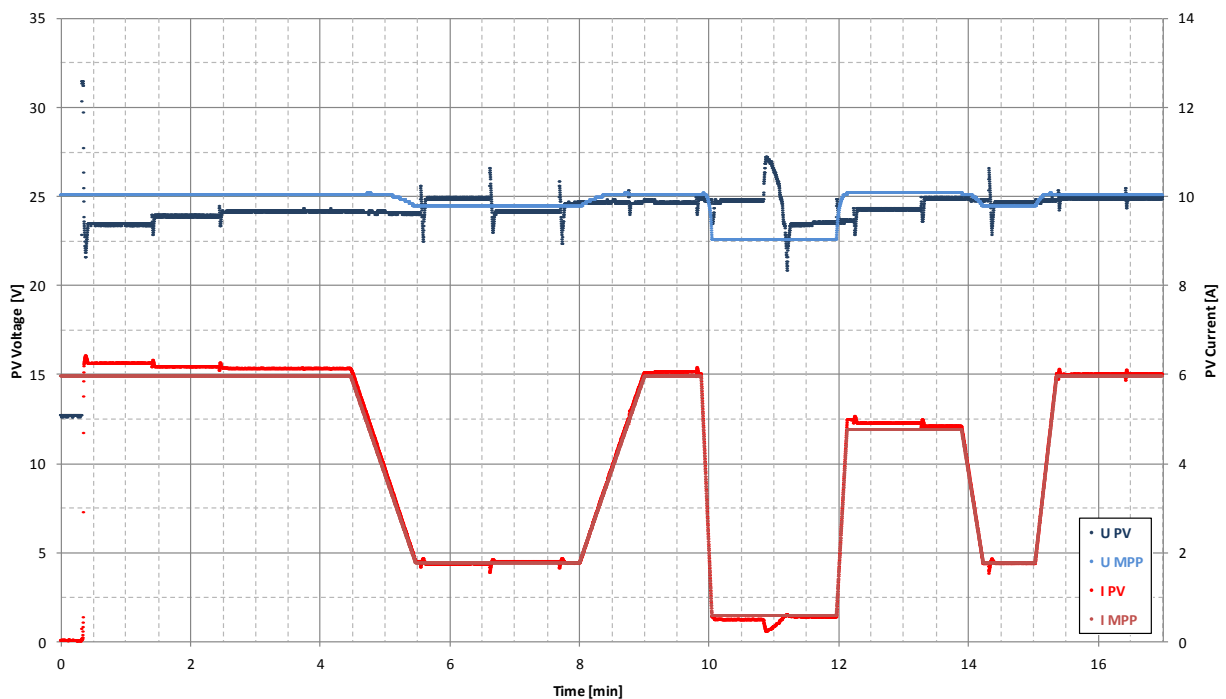


Abb. 34: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 1

Abb. 34 zeigt die Messungen der Testabfolge für Laderegler 1. Es ist die Abfolge einer Simulation unterschiedlicher Einstrahlungsstärken und unterschiedlich schneller Einstrahlungsänderungen zu sehen. Das Schaubild zeigt einerseits Spannung und Strom im tatsächlichen MPP, andererseits Spannung und Strom im vom Laderegler eingestellten Arbeitspunkt. Zu Beginn des Tests ist der DC-Ausgang des PV-Simulators nicht eingeschaltet. Der Laderegler legt eine PV-Spannung von 12,6 V an, wobei eine Batteriespannung von 13,2 V eingestellt ist. Nach knapp 30 s wird der DC-Ausgang des PV-Simulators eingeschaltet und simuliert eine Einstrahlung von 1000 W/m^2 . Nachdem kurzzeitig die Leerlaufspannung von 31 V anliegt, stellt der Laderegler umgehend die PV-Spannung auf rund 24 V ein und ein PV-Strom beginnt zu fließen. Weitere Analysen haben gezeigt, dass ein indirektes Verfahren verwendet wird, um den Arbeitspunkt erstmalig einzustellen. Hierzu misst

der Laderegler zuerst die Leerlaufspannung am PV-Generator und stellt dann die PV-Spannung auf ungefähr das 0,8-fache der Leerlaufspannung ein. Somit liegt diesem Verfahren die Annahme zugrunde, dass die MPP Spannung bei dem 0,8-fachen der Leerlaufspannung liegt, welches dem in der DIN EN 50530 definierten Füllfaktor für die Spannung entspricht. Ab Sekunde 30 ist das statische Trackingverhalten bei einer konstanten Einstrahlung von 1000 W/m^2 zu sehen. Der Laderegler nutzt einen Perturb and Observe Algorithmus um den Arbeitspunkt weiter dem MPP anzunähern. Hierbei wird die PV-Spannung 1-mal pro Minute um $\pm 0,5 \text{ V}$ variiert und in Abhängigkeit von der, durch die Störung hervorgerufenen, Leistungsänderung korrigiert. Dadurch nähert sich die PV-Spannung schrittweise der MPP Spannung an, bleibt jedoch 1 V niedriger. Bei $4 \text{ min } 15 \text{ s}$ wird die Einstrahlung innerhalb 1 min von 1000 W/m^2 auf 300 W/m^2 reduziert. Der Laderegler reagiert auf diese Einstrahlungsänderung mit einer größeren Auslenkung der PV-Spannung von $\pm 1,5 \text{ V}$ und korrigiert die PV-Spannung dahingehend, dass die PV-Spannung anschließend $0,5 \text{ V}$ über der MPP Spannung liegt. Bei Minute 10 ist eine sehr schnelle Änderung der Einstrahlung von 1000 W/m^2 auf 200 W/m^2 zu sehen. Der Laderegler kann den Arbeitspunkt dieser Änderung nicht unmittelbar nachführen. Bei Minute 11 ist zu sehen, dass der Laderegler ein I/V Tracing durchführt. Der Spannungsbereich wird von 27 V bis 21 V gescannt und die PV-Spannung anschließend korrigiert. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses I/V Tracing, unabhängig von der Einstrahlungssituation, alle 10 min bis 15 min durchgeführt wird. Im weiteren Verlauf der Testabfolge sind noch weitere Einstrahlungsänderungen zu sehen, welche das diskutierte Trackingverhalten weiter veranschaulichen. Im Schaubild ist ebenso zu sehen, wie sich der Strom in Abhängigkeit von der Spannung ändert. Durch die geringere Amplitude des Stroms ist hier das Suchverhalten nur in Ansätzen zu erkennen.

Insgesamt zeigt sich der MPPT von Laderegler 1 als vergleichsweise langsam. Auf Einstrahlungsänderungen reagiert der Laderegler erst mit einer zeitlichen Verzögerung von 30 s – 60 s . Ebenso erfolgt die schrittweise Annäherung des Arbeitspunkts an den MPP relativ langsam und es kann mehrere Minuten dauern bis sich der Arbeitspunkt stabilisiert hat. Darüber hinaus fällt auf, dass die PV-Spannung selbst im statischen Zustand um bis zu 1 V von der MPP Spannung abweicht. Die Kombination der eingesetzten Trackingverfahren zeigt sich als sehr robust. Während der Tests konnte kein fehlerhaftes Trackingverhalten festgestellt werden, welches die Betriebssicherheit beeinträchtigen könnte.

Zusammenfassend nutzt Laderegler 1 eine Kombination von 3 unterschiedlichen MPPT-Verfahren. Beim Start des Ladereglers wird die PV-Spannung auf das 0,8-fache der Leerlaufspannung eingestellt. Für die weitere Korrektur und dem Nachführen des Arbeitspunkts wird ein Perturb and Observe Algorithmus genutzt.

Der Perturb and Observe Algorithmus wählt die Größe der Auslenkung der PV-Spannung in Abhängigkeit der vorhergehenden Leistungsänderung. Alle 10 min - 15 min wird zusätzlich ein I/V Tracing durchgeführt, um zu überprüfen ob größere Änderungen der PV-Spannung notwendig sind.

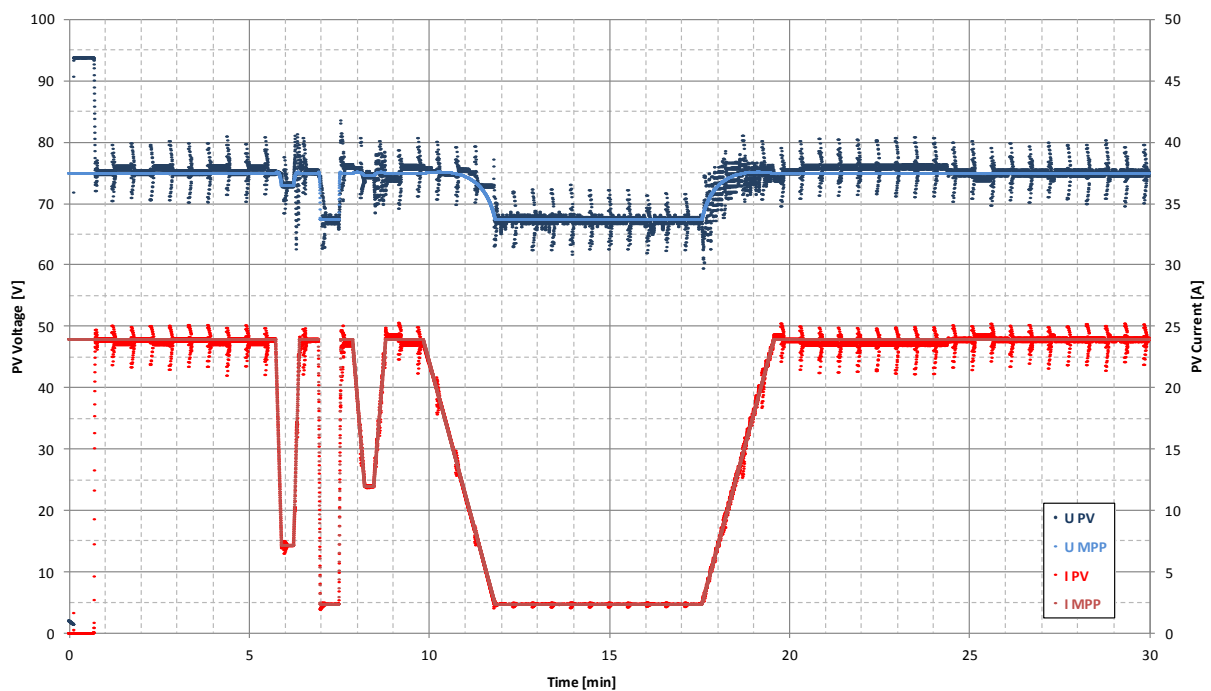


Abb. 35: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 2

Abb. 35 zeigt die Analyse des Trackingverhaltens von Laderegler 2. Es ist die Simulation einer Abfolge unterschiedlicher Einstrahlungssituationen zu sehen, welche sowohl das statische als auch dynamische Trackingverhalten veranschaulichen. Zu Beginn des Tests ist der DC-Ausgang des PV-Simulators nicht eingeschaltet und es liegt nur eine vernachlässigbar kleine Spannung von 1,5 V am PV-Generator an. Bei Sekunde 10 wird der DC-Ausgang des PV-Simulators eingeschaltet und eine Einstrahlung von 1000 W/m^2 simuliert. Für 30 s liegt die Leerlaufspannung von 94 V an, bevor der Laderegler mit der Suche nach dem MPP beginnt. Ausgehend von der Leerlaufspannung wird die PV-Spannung schrittweise, bis zum Unterschreiten der MPP Spannung reduziert. In der Folge ist zu erkennen, dass ein Perturb and Observe Algorithmus zum Einsatz kommt. Der Arbeitspunkt oszilliert mit einer Amplitude von ungefähr 0,7 V. Die PV-Spannung wird etwas weniger als 2-mal pro Minute um $\pm 5 \text{ V}$ variiert und in Abhängigkeit von der, durch die Störung hervorgerufene, Leistungsänderung korrigiert. Kurz vor Minute 6 ist eine schnelle Änderung der Einstrahlung auf 300 W/m^2 und wieder zurück auf 1000 W/m^2 zu sehen. Der Laderegler führt hierbei den Arbeitspunkt nahezu augenblicklich, dem

sich ändernden MPP, nach. Das schnelle Nachführen des MPP ist ebenfalls bei der sehr schnellen Einstrahlungsänderung ab Minute 7 zu sehen, wobei die Einstrahlung von 1000 W/m^2 auf 200 W/m^2 und wieder zurück auf 1000 W/m^2 geändert wird. Bei diesen schnellen und großen Einstrahlungsänderungen zeigt sich, dass der Laderegler die Spannung kontinuierlich anpasst bis der neue MPP erreicht ist. Es ist kein Perturb and Observe Suchvorgang und keine feste Schrittweite zu erkennen. Ab Minute 10 wird die Einstrahlung vergleichsweise langsam von 1000 W/m^2 auf 200 W/m^2 reduziert. Hierbei wird die PV-Spannung schrittweise mit jedem Suchvorgang angepasst. In der folgenden Einstrahlungsänderung von 200 W/m^2 auf 1000 W/m^2 zeigt sich ein starkes Schwanken der PV-Spannung. Selbst unter Zuhilfenahme der Strommesswerte kann dieses jedoch nicht klar interpretiert werden.

Auf Grund des unterschiedlichen Trackingverhaltens bei schnellen und langsamen Einstrahlungsänderungen wird vermutet, dass Laderegler 2 die Kombination eines Perturb and Observe Algorithmus und eines Incremental Conductance Algorithmus nutzt. Die periodische Auslenkung der PV-Spannung und das schrittweise Nachführen des Arbeitspunkts bei langsamen Einstrahlungsänderungen zeigen eindeutig einen Perturb and Observe Algorithmus. Hingegen zeigt das unmittelbare und kontinuierliche Nachführen des Arbeitspunkt bei schnellen Einstrahlungsänderungen die Merkmale eines Incremental Conductance Algorithmus.

Der MPPT von Laderegler 2 arbeitet sowohl sehr genau als auch sehr schnell. Unter statischen Bedingungen wird der Arbeitspunkt sehr nahe am MPP eingestellt. Unter dynamischen Bedingungen wird der Arbeitspunkt dem sich ändernden MPP nahezu augenblicklich nachgeführt.

Abb. 36 zeigt das statische Trackingverhalten von Laderegler 3. Beim Start des Ladereglers wird zuerst ein I/V Tracing durchgeführt. Hierbei wird der gesamte PV-Eingangsspannungsbereich 3-mal gescannt, bevor der Arbeitspunkt entsprechend dem ermittelten MPP eingestellt wird. Im weiteren Verlauf kommt ein Trackingverfahren zum Einsatz, welches, auch bei gleichbleibendem MPP, den Arbeitspunkt kontinuierlich korrigiert. Es ist ein kontinuierliches Schwanken von Spannung und Strom zu erkennen. Die Spannung schwankt ungefähr um $\pm 2 \text{ V}$. Auch unter Zuhilfenahme weiterer Tests konnte das Trackingverhalten nicht eindeutig zugeordnet werden. Aufgrund der kontinuierlichen Schwankung von Spannung und Strom wird vermutet, dass ein Incremental Conductance Algorithmus zum Einsatz kommt. Da keine periodische Auslenkung und Korrektur der PV-Spannung zu erkennen ist, kann ein Perturb and Observe Algorithmus ausgeschlossen werden. Während des Betriebs wird ebenso alle 10 min ein I/V Tracing durchgeführt, wobei der PV-Eingangsspannungsbereich jedoch nur 2-mal gescannt wird.

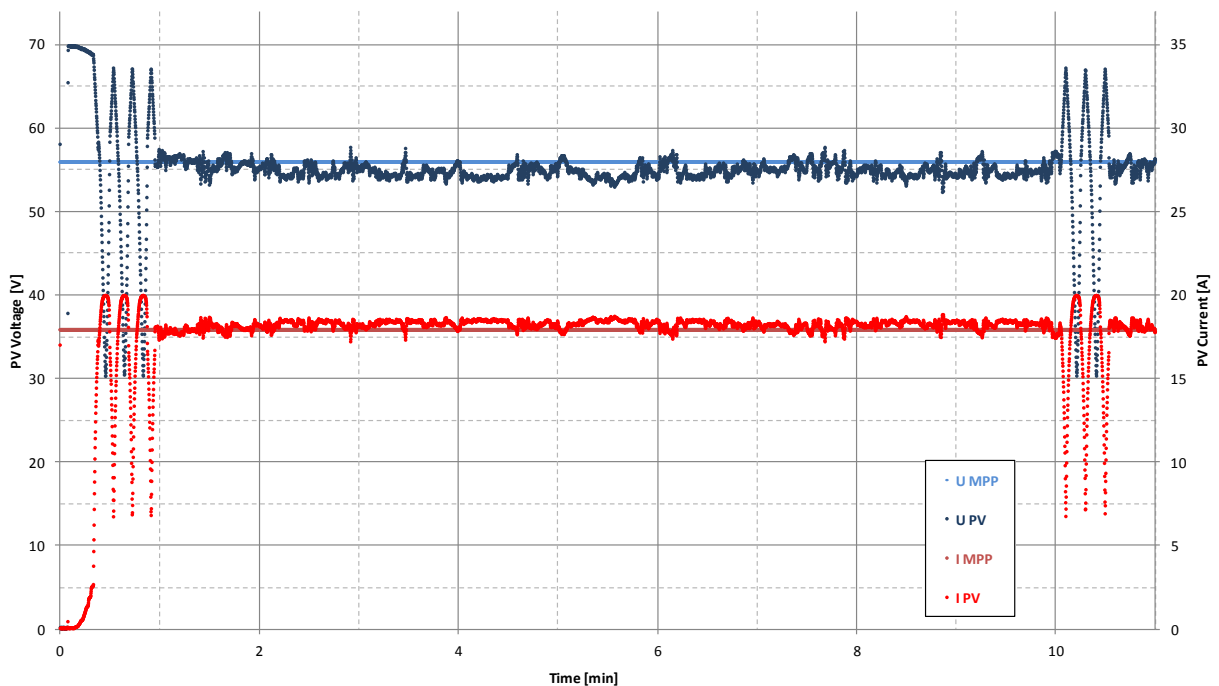


Abb. 36: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 3

Insgesamt arbeitet der MPPT von Laderegler 3 zuverlässig und es konnte kein fehlerhaftes Verhalten festgestellt werden. Der MPPT arbeitet recht genau und es wird vor allem im statischen Zustand ein Arbeitspunkt nahe am MPP sichergestellt. Unter sich ändernden Einstrahlungsbedingungen wird der Arbeitspunkt ebenso schnell und zuverlässig dem sich ändernden MPP nachgeführt. Erwähnenswert scheint die vergleichsweise große und kontinuierliche Schwankung von Spannung und Strom unter statischen Bedingungen. Vor allem im Vergleich zu Laderegler 2 zeigt der hier verwendete Algorithmus deutlich stärkere Oszillationen und begründet den niedrigeren MPPT-Wirkungsgrad.

Abb. 37 zeigt das Trackingverhalten von Laderegler 4 unter wechselnden Einstrahlungsbedingungen. Zu Beginn der Sequenz wird der Laderegler bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 betrieben. Kurz nach Beginn wird die Einstrahlung auf 200 W/m^2 reduziert, für 1,5 min gehalten und wieder auf 1000 W/m^2 erhöht. Als Reaktion auf diese Einstrahlungsreduktion reduziert der Laderegler die PV-Spannung leicht, kann der veränderten MPP Spannung jedoch nicht genau folgen. Bei der konstanten Einstrahlung von 1000 W/m^2 von 4 min bis 5 min 30 s wird die PV-Spannung sehr nah an der MPP Spannung eingestellt. Es folgt eine schnelle Reduktion der Einstrahlung auf 200 W/m^2 . Die PV-Spannung wird nur teilweise an die reduzierte MPP Spannung angepasst. Bei der Erhöhung der Einstrahlung von 200 W/m^2 auf 1000 W/m^2 wird die PV-Spannung vom Laderegler deutlich zu stark angehoben und liegt in der Folge 4 V über der MPP Spannung. In der folgenden Phase konstanter Einstrahlung wird die

PV-Spannung nur langsam und geringfügig korrigiert. Dieses Verhalten, dass bei schneller Zunahme der Einstrahlung die PV-Spannung deutlich zu stark angehoben wird, wurde bei Laderegler 4 mehrfach beobachtet. Ebenso wurde vielfach beobachtet, dass Korrekturen der PV-Spannung nur langsam erfolgen. Bei 11 min wird die Einstrahlung auf 200 W/m^2 und bei 12 min auf 100 W/m^2 reduziert. Die Einstrahlungsänderung von 200 W/m^2 auf 100 W/m^2 hat zur Folge, dass sich die PV-Spannung immer weiter von der MPP Spannung entfernt und bei 28 V stabilisiert. Es wird praktisch die Suche nach dem MPP eingestellt. Die PV-Spannung wird unabhängig von der tatsächlichen MPP Spannung knapp über der Batteriespannung von 26,4 V eingestellt. In Abb. 38 folgt eine weitere Untersuchung des fehlerhaften Verhaltens bei niedrigen Einstrahlungen.

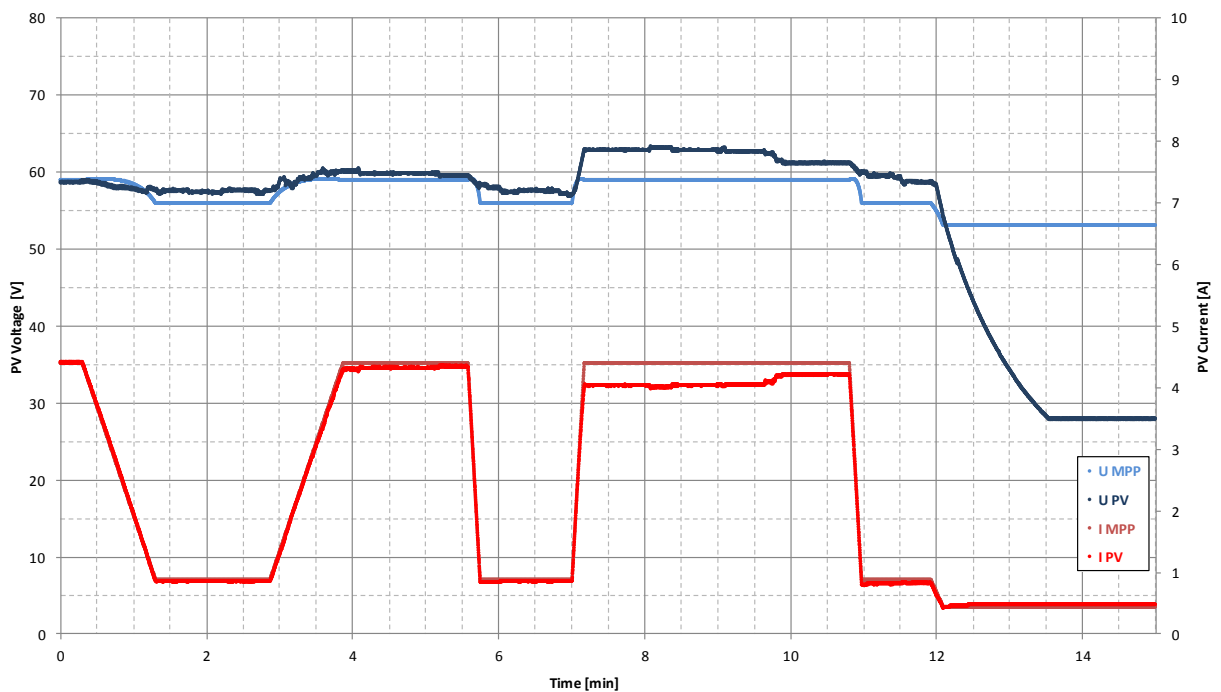


Abb. 37: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 4, wechselnde Einstrahlung

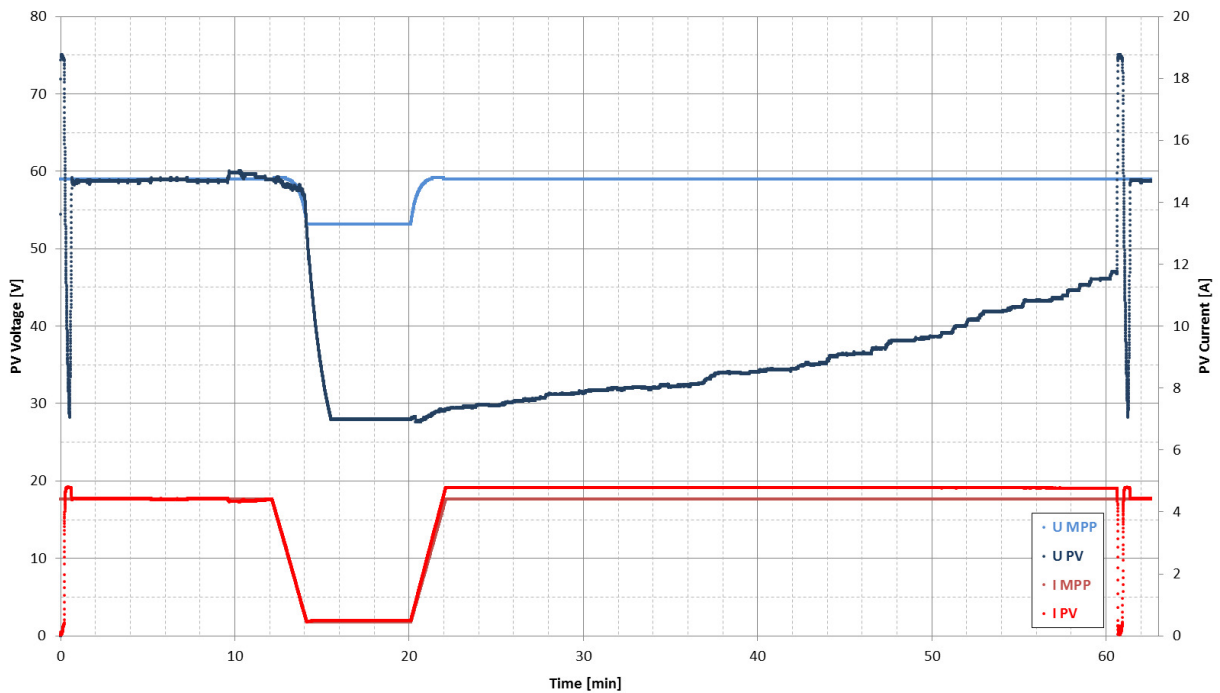


Abb. 38: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 4, niedrige Einstrahlung

Zu Beginn von Abb. 38 ist der Einschaltvorgang von Laderegler 4 bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 zu sehen. Es wird ein I/V Tracing durchgeführt, bei welchem der gesamte Eingangsspannungsbereich gescannt wird. Daraufhin wird der Arbeitspunkt sehr nahe am MPP eingestellt und fortlaufend leicht korrigiert. Bei Minute 12 wird die Einstrahlung auf 100 W/m^2 reduziert. Der Laderegler zeigt wiederum bereits vorhergehend diskutiertes Fehlverhalten. Eine viel zu niedrige PV-Spannung von 28 V wird eingestellt. Dies entspricht einem MPPT-Wirkungsgrad von rund 50 %. Bei Minute 20 wird die Einstrahlung auf 1000 W/m^2 angehoben, woraufhin der Laderegler die Suche nach dem MPP wieder aufnimmt. Die PV-Spannung nähert sich in der Folge nur sehr langsam der MPP Spannung an. 40 min später liegt die PV-Spannung immer noch 12 V unter der MPP Spannung. Bei Minute 60 führt der Laderegler ein I/V Tracing durch, in dessen Folge die PV-Spannung dann wieder richtig eingestellt wird. In Abb. 38 ist der Einschaltvorgang des Ladereglers bei hoher Einstrahlung zu sehen. Im realen Betrieb wird der Einschaltvorgang jedoch bei niedriger Einstrahlung, beispielsweise morgens beim Sonnenaufgang, stattfinden. Daher zeigt Abb. 39 den Tests des Einschaltvorgangs von Laderegler 4 bei niedriger Einstrahlung. Hierzu wurde die Einstrahlung innerhalb einer Stunde kontinuierlich von 10 W/m^2 auf 1000 W/m^2 erhöht. Abb. 39 zeigt, dass der Laderegler direkt nach dem Start eine PV-Spannung von 28 V eingestellt und praktisch keine Suche nach dem MPP stattfindet. Erst bei einem PV-Strom von ungefähr 1,5 A beginnt der Laderegler die Suche nach dem MPP. In der Folge wird die PV-Spannung schrittweise angehoben und nähert sich langsam der MPP Spannung. Die PV-Spannung erreicht

die MPP Spannung jedoch erst nach 85 min. Das heißt bei einem solchen Einschaltvorgang, beispielsweise bei Sonnenaufgang, vergeht deutlich über 1 Stunde bis der Laderegler anfängt effizient zu arbeiten.

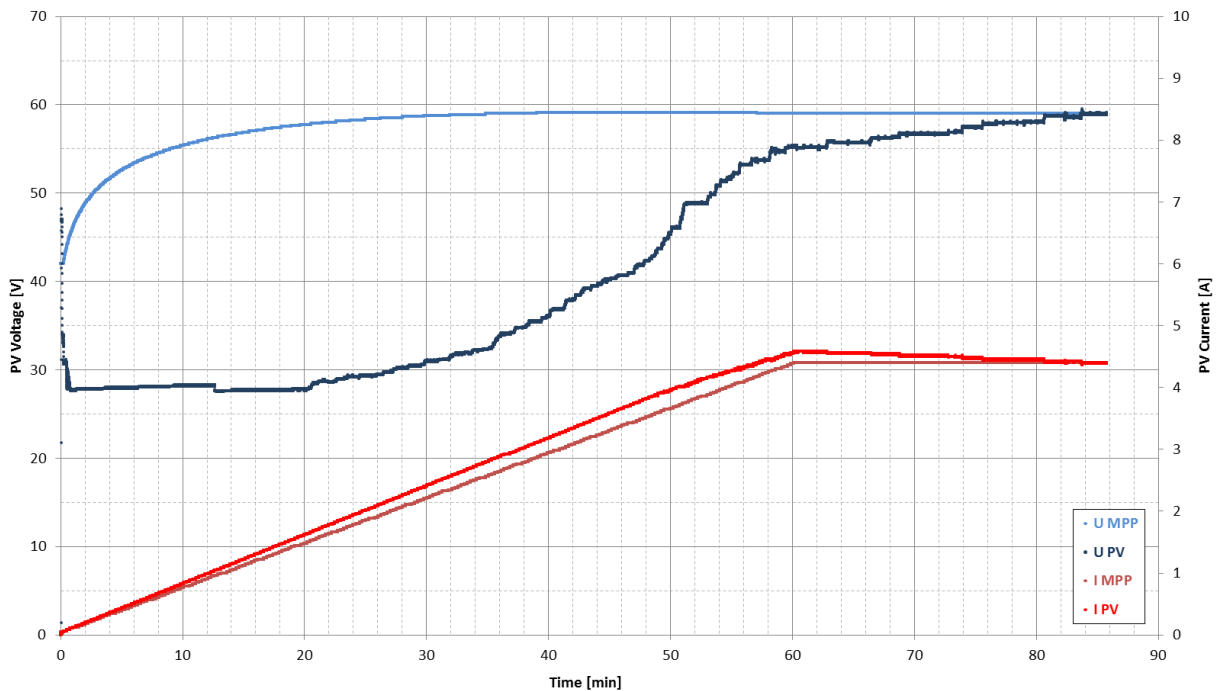


Abb. 39: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 4, Einschaltvorgang

In weiteren Tests wurde der Laderegler bei einer Einstrahlung von 100 W/m^2 eingeschaltet. Beim Start führte der Laderegler ein I/V Tracing durch, der MPP wurde gefunden und der Arbeitspunkt wurde nahe dem MPP eingestellt. Direkt im Anschluss begann der Laderegler jedoch die PV-Spannung zu reduzieren, sodass sich der Arbeitspunkt immer weiter vom MPP wegbewegte. Nach ungefähr 1 min stellte sich dann ein wiederum eine PV-Spannung von 18 V ein.

Teilweise zeigt der Laderegler ein scheinbar willkürliches Trackingverhalten und der verwendete Algorithmus kann nur schwer charakterisiert werden. Beim Start des Ladereglers wird immer ein I/V Tracing durchgeführt, welches den MPP auch zuverlässig findet. Ebenso wurde beobachtet, dass während des Betriebs ein I/V Tracing durchgeführt wird. Es konnte jedoch nicht herausgefunden werden, durch was das I/V Tracing während des Betriebs ausgelöst wird. Während des Betriebs erfolgen die Suche nach dem MPP und die Nachführung des MPP quasikontinuierlich. Die PV-Spannung wird fortlaufend in kurzen Zeitabständen in kleinen Schritten angepasst. Obwohl die schrittweise Anpassung der PV-Spannung auf einen Perturb and Observe Algorithmus hindeutet, ist das typische Suchverhalten

eines Perturb and Observe Algorithmus nur in Ansätzen zu erkennen. Daher könnte es sich ebenso um einen Incremental Conductance Algorithmus oder eine Kombination beider handeln. Bei konstant hoher Einstrahlung arbeitet der MPPT genau und effizient. Ebenso reagiert der Laderegler auf Einstrahlungsänderungen bei hoher Einstrahlung ausreichend schnell und genau. Der Laderegler ist jedoch nicht in der Lage den MPP bei niedriger Einstrahlung aufzufinden. Einstrahlungen kleiner 200 W/m^2 führen nicht nur dazu, dass die Suche nach dem MPP praktisch eingestellt wird, sondern haben auch ein nachhaltig gestörtes Suchverhalten zur Folge. So kann es selbst nach einem darauffolgenden deutlichen Anstieg der Einstrahlung bis zu einer Stunde dauern bis der Laderegler wieder effizient arbeitet. Aus diesem schlechten Trackingverhalten bei niedriger Einstrahlung ergibt sich auch ein mangelhaftes Einschaltverhalten unter realen Betriebsbedingungen. Als Grund für das mangelhafte Trackingverhalten werden sowohl Hardware- als auch Softwareprobleme vermutet. Es wird vermutet, dass der Laderegler bei niedriger Einstrahlung Änderungen des PV-Stroms nicht zuverlässig messen kann, wodurch es zu einem fehlerhaften Trackingverhalten kommt. Hingegen kann die langsame Korrektur der PV-Spannung bei höheren Einstrahlungen eindeutig auf eine schlechte Parametrierung des Suchalgorithmus zurückgeführt werden. Insgesamt wirkt der Trackingalgorithmus wenig ausgereift und wenig zuverlässig.

Umso erstaunlicher ist, dass Laderegler 4 einen statischen EU-MPPT-Wirkungsgrad von 97,5 % erreicht. Das fehlende Trackingvermögen bei niedriger Einstrahlung erklärt die starke Streuung der Ergebnisse beim statischen Wirkungsgradtest. Ebenso erstaunlicherweise erreicht der Laderegler beim dynamischen Wirkungsgradtest für hohe Einstrahlungen einen MPPT-Wirkungsgrad von beachtlichen 99,5 %. Das fehlerhafte Trackingverhalten bei niedriger Einstrahlung begründet den niedrigen dynamischen MPPT-Wirkungsgrad von nur 72,8 % für den Test bei niedriger Einstrahlung. Es zeigt sich hier die generelle Schwäche der standardisierten Wirkungsgradtests, dass praktisch nur ideale Betriebsituationen simuliert werden. Die Zuverlässigkeit und Robustheit des MPPT-Algorithmus werden beispielsweise nicht untersucht. Dadurch wird es möglich, dass Laderegler 4 trotz des schlechten Trackingverhaltens einen scheinbar guten EU-MPPT-Wirkungsgrad von 97,5 % erreicht.

Abb. 40 zeigt den Test des Trackingverhaltens von Laderegler 5. Bis Minute 2 der Testsequenz wird eine konstante Einstrahlung von 1000 W/m^2 simuliert. Dabei wird der MPP sehr genau getroffen und es ist keine Variation der Spannung zu erkennen. Anschließend wird die Einstrahlung auf 300 W/m^2 reduziert. Der Laderegler folgt dieser Änderung umgehend und genau. Ab 3 min wird die Einstrahlung wieder langsam auf 1000 W/m^2 erhöht. Von 3 min bis 6 min ist eine periodische Auslenkung der Spannung zur Suche nach dem MPP zu erkennen. Dabei wird die PV-Spannung etwas häufiger

als 1-mal die Minute um ungefähr ± 3 V ausgelenkt. Auffällig an diesem Perturb and Observe Algorithmus ist, dass die Spannung 2-mal in Folge mit unterschiedlicher Amplitude variiert wird. Von 3 min bis 6 min ist auch eine deutliche Abweichung der PV-Spannung von der MPP Spannung zu erkennen. Von 6 min bis 9 min zeigt sich bei konstanter Einstrahlung wieder eine konstante PV-Spannung. Ab 9 min wird die Einstrahlung von 1000 W/m^2 auf 500 W/m^2 reduziert und anschließend wieder auf 1000 W/m^2 angehoben. Als Reaktion auf diese Einstrahlungsänderung wird umgehend die PV-Spannung verändert und rund 30 s später ist wieder eine Variation der Spannung zu erkennen. Ab 11 min liegt eine konstante Einstrahlung von 1000 W/m^2 an, wobei bei 16 min eine weitere Auslenkung der PV-Spannung zu sehen ist. Es zeigt sich, dass bei sich ändernder Einstrahlung ein Perturb and Observe Algorithmus zum Einsatz kommt, welcher die Spannung ungefähr 1-mal pro Minute variiert. Weitere Tests haben ebenso gezeigt, dass bei konstanter Einstrahlung, wie bei 16 min, die PV-Spannung 1-mal in 5 min ausgelenkt wird. Ansonsten ist die PV-Spannung bei konstanter Einstrahlung nahezu konstant und es sind auch keine Oszillation zu erkennen.

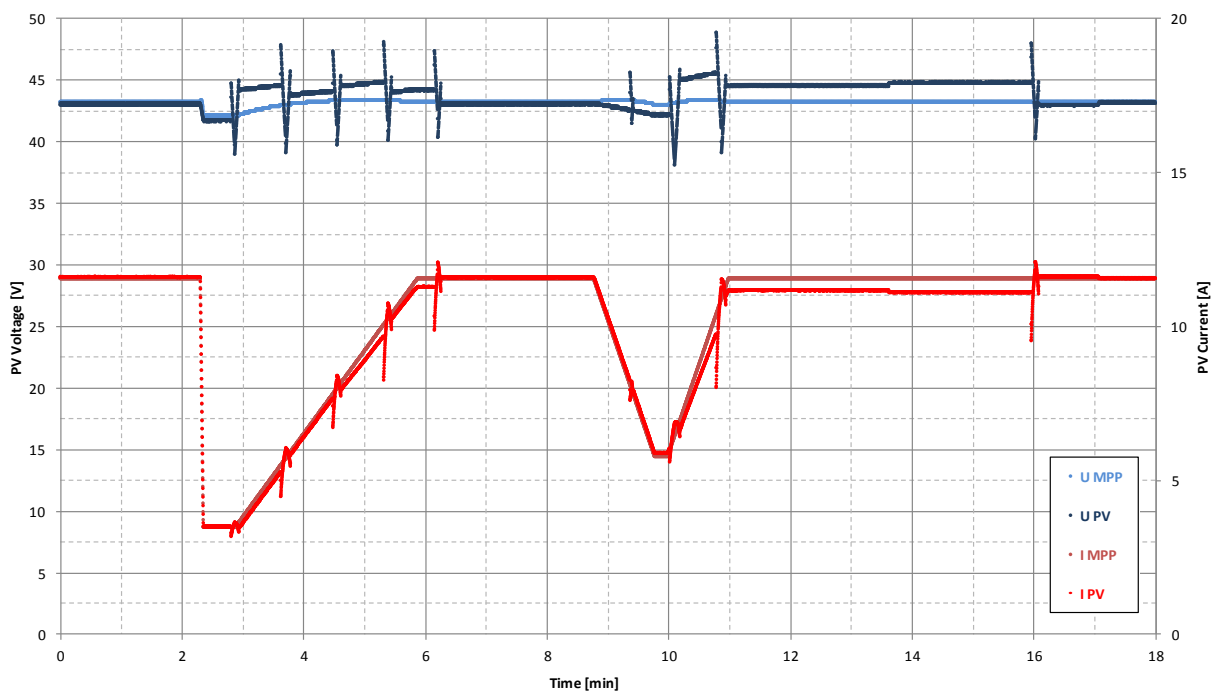


Abb. 40: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 5

Da der Laderegler auf die Änderungen bei 2 min und 9 min sehr schnell reagiert und die PV-Spannung bei 14 min leicht verändert, wird vermutet, dass bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen für die kontinuierliche Suche nach dem MPP ein Incremental Conductance Algorithmus zum Einsatz kommt. Wird eine

größere Änderung festgestellt, wird zusätzlich ein Perturb and Observe Algorithmus bemüht. Beim Einschaltvorgang, welcher nicht in Abb. 40 zu sehen ist, stellt der Laderegler die PV-Spannung auf das 0,8-fache der Leerlaufspannung ein, bevor die weiteren Suchverfahren zum Einsatz kommen.

Im statischen Zustand gelingt es Laderegler 5 den Arbeitspunkt sehr nahe am MPP einzustellen und es zeigen sich keine Oszillationen des Arbeitspunkts. Bei sich ändernden Umgebungsbedingungen weicht hingegen die PV-Spannung teilweise deutlich von der MPP Spannung ab. Während des Einsatzes des Perturb and Observe Algorithmus hat der Laderegler Probleme Einstrahlungsänderungen genau zu folgen und neigt zu übermäßigen Spannungskorrekturen. Nach Ende der Änderung wird die PV-Spannung jedoch wieder zuverlässig korrigiert. Insgesamt zeigt sich das Trackingverhalten von Laderegler 5 als zuverlässig und es konnte kein deutliches Fehlverhalten festgestellt werden.

9.4.3 Tracking von Mehrfachmaxima

Bei diesem Test wird qualitativ untersucht, ob der Laderegler in der Lage ist zuverlässig den tatsächlichen MPP aufzufinden, bei einer Leistungskennlinie mit mehreren lokalen Maxima. Hierzu wird eine Auswahl an U/I-Kennlinien unterschiedlicher Form simuliert und das Trackingverhalten des Ladereglers beobachtet. Die U/I-Kennlinien werden nach dem ISD (Ideal Single Diode) Modell berechnet.[18] Das ISD Modell stellt eine Vereinfachung des Eindiodenmodells nach DIN EN 50530 dar, wobei Serien- und Parallelwiderstand vernachlässigt werden. Die Einfachheit des Modells erlaubt die einfache Berechnung beliebiger U/I-Kennlinien mit mehreren Maxima. Durch die starke Vereinfachung bildet das ISDM Modell die Charakteristik realer PV-Zellen nicht sehr genau ab, welches für diesen qualitativen Test jedoch vernachlässigt werden kann.

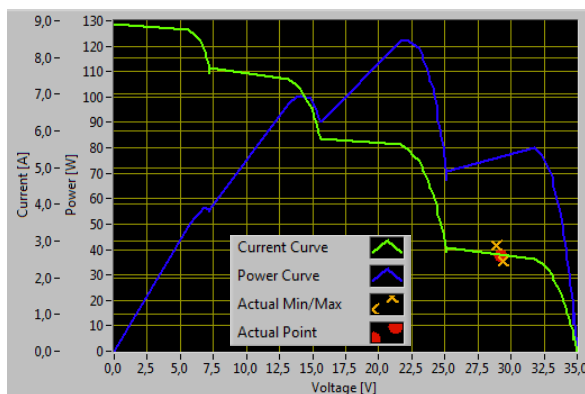


Abb. 41: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 1 zu Beginn

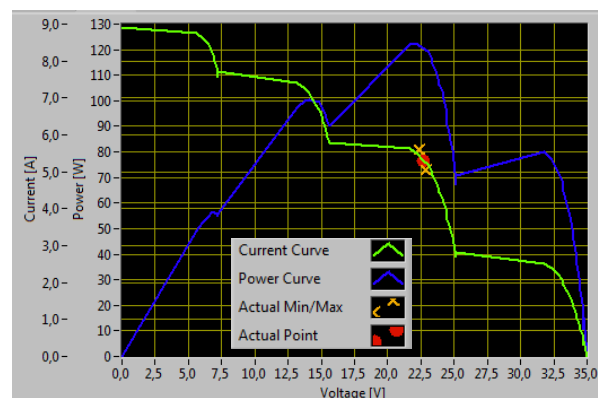


Abb. 42: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 1 nach 15 min

In Abb. 41 und Abb. 42 ist eine für Laderegler 1 simulierte PV-Kennlinie mit 4 Maxima zu sehen. Die Kennlinie kann als Resultat von 4 seriell verschalteten PV-Modulen mit unterschiedlich starker Abschattung interpretiert werden. Der tatsächliche MPP mit einer Leistung von 122 W liegt bei einer Spannung von 22 V. Weitere lokale Maxima mit deutlich niedrigerer Leistung liegen bei 31 V, 14 V und 7 V. Bei der Simulation stabilisiert sich der Arbeitspunkt direkt nach dem Start bei einer Spannung von knapp 30 V, zu sehen in Abb. 41. Der Laderegler versucht das lokale Maximum bei einer Spannung von 31 V einzustellen. Es wird eine Leistung von nur 75 W erreicht, welches einem MPP Wirkungsgrad von 61 % entspricht. Nach einer Betriebszeit von 15 min springt der Arbeitspunkt unerwartet zum tatsächlichen MPP, zu sehen in Abb. 42. In der Folge versucht der Laderegler diesen tatsächlichen MPP einzustellen und erreicht einen MPPT-Wirkungsgrad von annähernd 100 %.

Betrachtet man den in Abb. 43 dargestellten zeitlichen Verlauf des Tests, lässt sich anhand des Trackingverfahrens einfach erklären, warum erst nach 15 min der MPP gefunden wird.

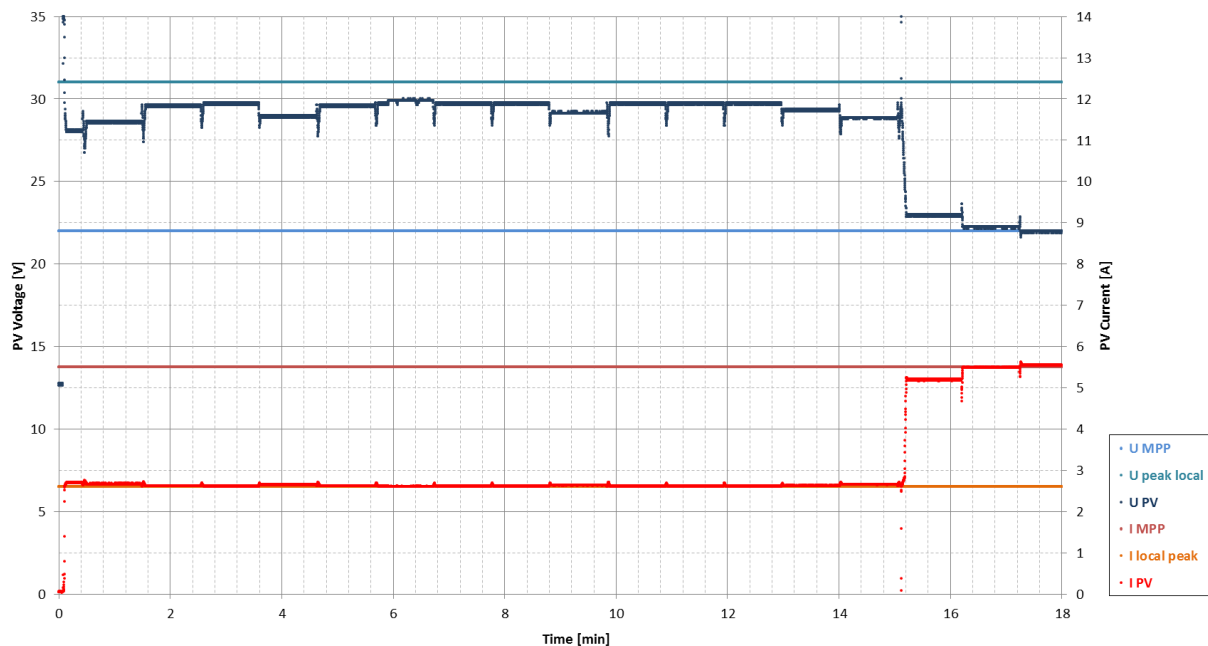


Abb. 43: Tracking Mehrfachmaxima, Laderegler 1

In Abb. 43 sind PV-Spannung und Strom über den zeitlichen Verlauf des Tests zu sehen. Ebenso zu sehen sind Strom und Spannung im MPP als auch im lokalen Maximum bei 31 V. Durch das beim Start eingesetzte indirekte MPPT-Verfahren stellt der Laderegler direkt nach dem Start eine PV-Spannung von 28 V ein, welches dem 0,8-fachen der Leerlaufspannung von 35 V entspricht. In der Folge nähert sich der

Perturb and Observe Algorithmus dem lokalen Maximum bei 31 V an. Verfahrensbedingt nähert sich der Perturb and Observe Algorithmus immer dem, vom Startpunkt gesehen, nächsten lokalen Maximum an. Nach 15 min wird ein I/V Tracing durchgeführt und in dessen Folge der tatsächliche MPP gefunden und eingestellt. In der Folge nähert sich nun der Perturb and Observe Algorithmus dem tatsächlichen MPP an.

Tests mit weiteren Kennlinien unterschiedlicher Form, unterschiedlicher Anzahl von Maxima und unterschiedlicher Leistung haben dieses Verhalten bestätigt. Im Ergebnis hat Laderegler 1 die Fähigkeit den MPP einer Leistungskennlinie mit mehreren lokalen Leistungsmaxima zuverlässig aufzufinden. Da das I/V Tracing erstmalig 15 min nach Start durchgeführt wird, dauert es jedoch lange bis der Laderegler den MPP gefunden hat, mit der Folge entsprechend großer Ertragsverluste. Kommt es während des Betriebs zu einer Teilabschattung der PV-Module, muss davon ausgegangen werden, dass es ebenso bis zu 15 min dauert bis diese vom Laderegler erkannt wird. Würde gleich beim Start des Ladereglers ein I/V Tracing durchgeführt und dessen Häufigkeit erhöht werden, könnte eine Teilabschattung deutlich schneller erkannt werden.

Laderegler 2 ist nicht in der Lage bei einer PV-Kennlinie mit mehreren Leistungsmaxima den tatsächlichen MPP zuverlässig zu finden. Der Arbeitspunkt wird immer entsprechend dem lokalen Leistungsmaximum mit der höchsten Spannung gewählt. Handelt es sich hierbei jedoch nicht um das globale Leistungsmaximum wird der tatsächliche MPP nicht gefunden. Da nur eine Kombination aus Perturb and Observe und Incremental Conductance Algorithmen zum Einsatz kommt, ist dies verfahrensbedingt nicht möglich. Die Suche nach dem MPP wird bei Leerlaufspannung begonnen und solange fortgeführt bis eine Leistungsabnahme, als Folge des Überschreitens eines Leistungsmaximums, gemessen wird. Somit wird immer das, der Leerlaufspannung am nächsten gelegene Leistungsmaximum eingestellt und weitere Leistungsmaxima bei niedrigerer Spannung bleiben unberücksichtigt.

Mit dem I/V Tracing hat Laderegler 3 eine Suchmethode implementiert, mit welcher der MPP problemlos gefunden werden kann. Dennoch scheint es eher zufällig, ob der Arbeitspunkt nach dem mehrmaligen Scannen der Kennlinie zum MPP oder einem anderen lokalen Leistungsmaximum springt. Abb. 45 und Abb. 44 zeigen das Ergebnis von zwei unterschiedlichen Testdurchgängen bei identischen PV-Kennlinien und identischen sonstigen Einstellungen.

Nach dem mehrmaligen Scannen der Kurve stabilisiert sich der Arbeitspunkt in Abb. 45 auf dem lokalen Maximum bei 50 V und 520 W. Bei dem in Abb. 44 zu sehenden Testdurchgang wird hingegen der tatsächliche MPP bei 30 V und 640 W gefunden. Beim Einstellen des lokalen Leistungsmaximums, anstatt des MPP, entsteht somit ein Leistungsverlust von 20 %. Gleiches Verhalten, dass der MPP manchmal gefunden wird und manchmal nicht, wurde ebenso bei anderen

Kurvenformen und anderen Leistungen beobachtet. Als erste Ursache wurde eine zu große Schrittweite beim Abtasten der Kennlinie vermutet, sodass der MPP hierbei praktisch übersprungen wird. Weitere Analysen hingegen haben dies widerlegt. Auch in Fällen, in welchen der MPP nicht gefunden wurde, wurden Punkte nahe des MPP, mit deutlich höherer Leistung als im lokalen Maximum, abgetastet. Ebenso wird aus Abb. 35 ersichtlich, dass beim I/V Tracing pro Durchgang mindestens 60 Punkte abgetastet werden, mit einer maximalen Schrittweite von 1 V. Gleichzeitig ist eine flexible Schrittweite zu erkennen, womit sich durch die 3 Abtastvorgänge eine deutlich höhere Genauigkeit ergibt. Somit kann eine zu geringe Auflösung beim Abtasten der Kennlinie als Fehlerursache für das Nichtauffinden des MPP ausgeschlossen werden. Da dieser Fehler auch bei signifikanten Leistungsunterschieden zwischen lokalem Leistungsmaximum und MPP, wie beispielsweise in Abb. 45 und Abb. 44, auftritt, wird ebenso eine zu geringe

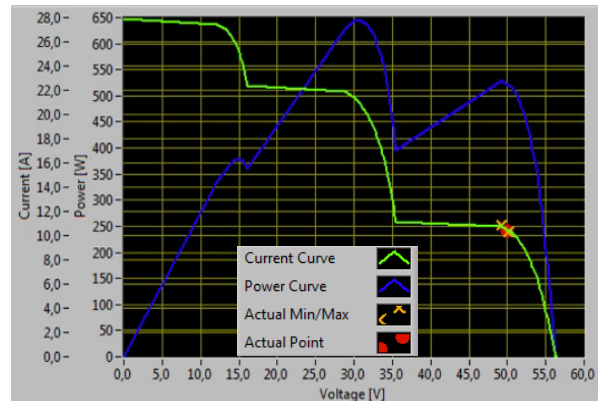


Abb. 45: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 3, lokales Maximum

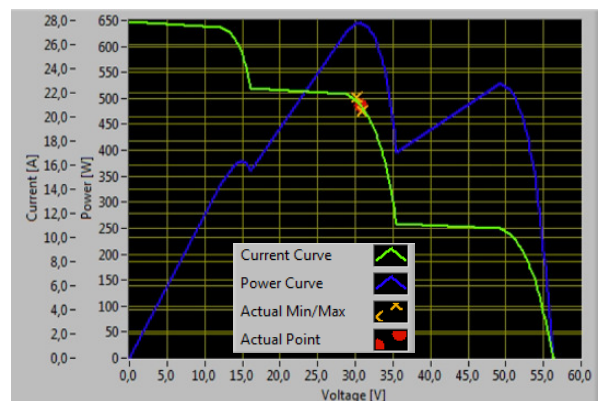


Abb. 44: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 3, globales Maximum

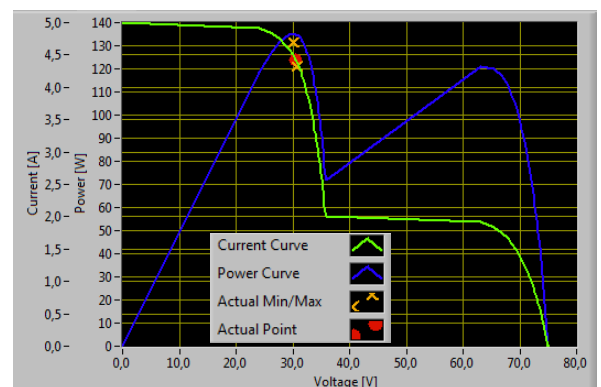


Abb. 46: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 4

Messgenauigkeit des Ladereglers als Fehlerursache ausgeschlossen. Das fehlerhafte Trackingverhalten scheint in der Software des Ladereglers begründet zu liegen. Offensichtlich kann der verwendete Algorithmus aus den Abtastwerten nicht zuverlässig den MPP berechnen.

Laderegler 4 hat bei allen getesteten PV-Kennlinien mit mehreren Leistungsmaxima zuverlässig den MPP gefunden. Abb. 46 zeigt die Simulation einer Kennlinie mit zwei Leistungsmaxima. Durch das direkt nach dem Start durchgeführte I/V Tracing gelingt es dem Laderegler den tatsächlichen MPP schnell und genau einzustellen. Auf Grundlage der Analyse des Trackingverhalten von Laderegler 4, muss in Frage gestellt werden, ob der Laderegler unter realen Betriebsbedingungen bei Teilabschattung ebenso zuverlässig den MPP findet. Die simulierten Abläufe entsprechen einem Einschalten des Ladereglers bei vorhandener Teilabschattung und hoher Einstrahlung. Aus technischen Gründen konnten keine, während des Betriebs einsetzende Teilabschattung oder eine Teilabschattung mit resultierender sehr geringer Leistung simuliert werden. Setzt die Teilabschattung während des Betriebs ein, wird vermutet, dass es einige Zeit dauern wird bis der neue MPP gefunden wird, da das I/V Tracing nicht in regelmäßigen, kurzen Abständen durchgeführt wird. Beispielsweise wurde in Abb. 38 erst 60 min nach dem Start ein erneutes I/V Tracing durchgeführt. Aufgrund des mangelhaften Trackingverhaltens bei niedriger Einstrahlung wird erwartet, dass Laderegler 4 nicht in der Lage ist den tatsächlichen MPP bei starker Abschattung beziehungsweise geringer Einstrahlung zu finden.

Laderegler 5 ist nicht in der Lage bei einer PV-Kennlinie mit mehreren Leistungsmaxima den tatsächlichen MPP zuverlässig zu finden. Beim Start des Ladereglers wird der Arbeitspunkt beim 0,8-fachen der Leerlaufspannung eingestellt. Dadurch stellen die eingesetzten Perturb and Observe und Incremental Conductance Algorithmen in der Folge immer das Maximum ein, welches diesem ursprünglichen Arbeitspunkt am Nächsten ist. Es kann nicht zwischen lokalem und globalem Leistungsmaximum unterschieden werden.

9.4.4 Übersicht sonstige MPPT-Tests

Die sonstigen MPPT-Tests konnten gute Einblicke in das Trackingverhalten der Laderegler geben. Vor allem konnte die Analyse des Trackingverhaltens Aufschluss geben, welche Suchverfahren die MPPT-Laderegler tatsächlich einsetzen und wie sich diese unter verschiedenen Umgebungsbedingungen verhalten. In der Literatur sind ähnliche Tests bisher weder für MPPT-Laderegler noch für netzgekoppelte Wechselrichter dokumentiert. Die einzelnen Laderegler zeigen ein sehr

unterschiedliches Suchverhalten. Vor allem bei sich ändernden Umgebungsbedingungen ergeben sich große Unterschiede. Bei mehreren Laderegler konnte die Detailanalyse des Trackingverhaltens Erklärungen für unerwartete Ergebnisse in den Wirkungsgradtests liefern. Bei den meisten Laderegler konnten Schwächen im Suchverhalten identifiziert werden. Mehrfach könnte die Effizienz und Zuverlässigkeit des MPPT, allein durch eine optimierte Parametrierung, deutlich verbessert werden. Dies deutet darauf hin, dass einige Hersteller bei der Entwicklung der MPPT-Laderegler auf ausgiebige Labortests zur Erprobung und Optimierung verzichten.

Tab. 12: Übersicht sonstige MPPT-Tests

Nummer	MPPT Suchverfahren				Tracking von Mehrfachmaxima	Korrektheit der Herstellerangaben
	Indirekt	I/V Tracing	P&O	IC		
1	●	●	●	●	●	●
2	●	●	●	●	●	●
3	●	●	●	●	●	●
4	●	●	●	●	●	●
5	●	●	●	●	●	●

Legende			
●	ja	ja	korrekt
●	wahrscheinlich	begrenzt	Unstimmigkeiten
●	nein	nein	Falschangaben

Tab. 12 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten sonstigen MPPT-Tests. Alle Laderegler im Test setzen eine Kombination mehrerer Suchverfahren ein. Da nur punktuell die Reaktion der Laderegler auf bestimmte Betriebssituationen analysiert werden konnte, kann in vielen Fällen nicht mit Sicherheit gesagt werden, welche Suchverfahren zum Einsatz kommen. Vor allem der Incremental Conductance Algorithmus lässt sich nicht eindeutig gegenüber weiteren Suchverfahren abgrenzen und dessen Einsatz kann nur mit hoher Wahrscheinlichkeit vermutet werden. Laderegler 1 und 5 setzen als einzige ein indirektes Suchverfahren ein, wobei beim Start die PV-Spannung auf das 0,8-fache der Leerlaufspannung eingestellt wird. Laderegler 3 und 4 führen beim Start, sowie auch während des Betriebs ein I/V Tracing durch, wobei Laderegler 1 das I/V Tracing nur während des Betriebs durchführt. Für das fortlaufende Suchen des MPP während des Betriebs setzen alle Laderegler einen Perturb and Observe Algorithmus, einen Incremental Conductance Algorithmus oder eine Kombination aus beiden ein.

Bei dem Test des Trackings von Mehrfachmaxima konnte keiner der Laderegler vollumfänglich zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Laderegler 1 benötigte 15 min zum Finden des tatsächlichen MPP, welches als deutlich zu lange angesehen wird. Laderegler 3 gelang es nur teilweise den MPP zu finden. In allen Tests fand Laderegler 4 den MPP. Aufgrund der Ergebnisse der Detailanalyse des Trackingverhaltens, wird jedoch die Zuverlässigkeit von Laderegler 4 unter realen Betriebsbedingungen angezweifelt. Daher werden diesen 3 Laderegler nur begrenzte Fähigkeiten zugeschrieben, den MPP unter realen Betriebsbedingungen, bei einer Leistungskennlinie mit mehreren Leistungsmaxima, zuverlässig und ausreichend schnell zu finden.

Während der Tests wurden auch die Herstellerangaben der Laderegler in den Datenblättern überprüft. Einzig für Laderegler 3 kann die Korrektheit aller Datenblattangaben bestätigt werden.

Laderegler 1 war nicht in der Lage, bei der im Datenblatt angegebenen maximalen Leerlaufspannung von 50 V zu arbeiten. Nur die Homepage des Herstellers konnte die Information liefern, dass die maximale Leerlaufspannung des Ladereglers, bei 12 V Batterienennspannung, tatsächlich bei nur 42 V liegt. Ebenso wird im Datenblatt keine minimale PV-Spannung angegeben.

Bei der im Datenblatt angegebenen maximalen Leerlaufspannung von 150 V lieferte Laderegler 2 eine Fehlermeldung und verweigerte den Dienst. Daher wurde für den Test eine maximale Leerlaufspannung von 144 V verwendet. Darüber hinaus erreichte der Laderegler nur eine maximale PV-Leistung von 1800 W, gegenüber den im Datenblatt angegebenen 2000 W.

Laderegler 4 meldete bei der angegebenen maximalen Leerlaufspannung von 150 V ebenso einen Fehler. Da bereits eine Reduzierung der Leerlaufspannung auf 149 V den Fehler beheben konnte, wird dieser Fehler als nicht sehr schwerwiegend angesehen.

Laderegler 5 ist bei einer Batterienennspannung von 24 V nicht in der Lage, bei der angegebenen minimalen MPP Spannung von 24 V zu arbeiten. Tests zeigten, dass für den Betrieb des Ladereglers die PV-Spannung immer mindestens 1 V über der aktuellen Batteriespannung liegen muss. Außerdem entsprachen die Ladeschwellen der einzelnen Ladephasen zur Batterieladung nicht den Datenblattangaben. Es zeigten sich Abweichungen von bis zu 1 V, welches eine schnelle Schädigung der Batterie zur Folge haben kann.
















Die Falschangaben in den Datenblättern von Laderegler 1, 2 und 5 werden als schwerwiegend angesehen, da diese ein Versagen der PV-Anlage oder Beschädigungen zur Folge haben können. Wären die Wirkungsgradtests dieser




Laderegler rein nach Datenblattangaben, ohne vorherige Überprüfung der tatsächlichen Fähigkeiten, ausgeführt worden, hätten sich für Teile des statischen Wirkungsgradtests sehr geringe Wirkungsgrade ergeben. So wären Laderegler 1 und 2 bei den Testdurchläufen bei maximaler MPP Spannung komplett funktionslos geblieben. Ebenso hätte Laderegler 2 bei den Testdurchläufen mit maximaler Leistung den Strom zum Schutz vor Überlast automatisch begrenzt und nur einen MPPT-Wirkungsgrad von unter 90 % erreicht.

9.5 Bewertung MPPT-Laderegler-Effizienz

Ein einfaches Bewertungsschema soll die Beurteilung der Effizienz der einzelnen Laderegler ermöglichen. Hierzu wurden Mindestanforderungen bezüglich des statischen gewichteten EU-Gesamtwirkungsgrad und des dynamischen MPPT-Wirkungsgrad definiert. Es wurde festgelegt, dass ein guter MPPT-Laderegler mindestens einen EU-Gesamtwirkungsgrad von 96 % und einen dynamischen MPPT-Wirkungsgrad von 98 % erreichen soll. Ein MPPT-Laderegler ausreichender Effizienz soll mindestens einen EU-Gesamtwirkungsgrad von 90 % und einen dynamischen MPPT-Wirkungsgrad von 94 % erreichen. Die Effizienz eines Ladereglers mit geringerem Wirkungsgrad wird als mangelhaft angesehen. Tab. 13 zeigt die EU-Gesamtwirkungsgrade und die dynamischen MPPT-Wirkungsgrade der getesteten Laderegler sowie deren Bewertung. Ebenso ist die Gesamtbewertung der Effizienz zu sehen, welche sich aus den Einzelbewertungen ergibt.

Tab. 13: Bewertung Laderegler-Wirkungsgrad

Nummer	$\eta_{t,stat,EUR}$	$\eta_{MPPT,dyn,ges}$	Bewertung gesamt
1	 95,2%	 94,7%	
2	 97,0%	 99,6%	
3	 96,8%	 98,3%	
4	 93,1%	 82,2%	
5	 97,8%	 98,0%	

Legende			
	≥ 96 %	≥ 98 %	gut
	≥ 90 %	≥ 94 %	ausreichend
	< 90 %	< 94 %	mangelhaft

Auf Grundlage dieser Bewertung wird die Effizienz der Laderegler 2, 3 und 5 als gut beurteilt. Die Effizienz von Laderegler 1 kann nur als ausreichend bewertet werden. Auf Grund des sehr niedrigen dynamischen MPPT-Wirkungsgrads muss die Effizienz von Laderegler 4 als mangelhaft angesehen werden. Die Ergebnisse der sonstigen MPPT-Tests fließen bewusst nicht in diese Bewertung ein. Einerseits ist eine Bewertung der sonstigen Tests schwer, da diese nicht standardisiert sind. Andererseits spiegeln sich beispielsweise die Ergebnisse der Analyse des Trackingverhaltens auch deutlich in den Wirkungsgraden wider. Darüber hinaus muss ein MPPT-Laderegler auch nicht zwingend fähig sein, den MPP bei einer Leistungskennlinie mit mehreren Leistungsmaxima zu finden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Wirkungsgradtests, dass sich unterschiedliche MPPT-Laderegler in der Effizienz stark unterscheiden. Die Effizienz der besten Laderegler im Test liegt durchaus im Bereich der Effizienz von modernen netzgekoppelten Wechselrichtern. Hingegen fallen die Wirkungsgrade der weniger effizienten Laderegler im Test, vor allem bei wechselnden Umgebungsbedingungen und niedriger Einstrahlung, deutlich ab. Dies wiegt besonders schwer bei in PV-Inselsystemen eingesetzten MPPT-Laderegler. Denn bei PV-Inselsystemen ist besonders die Effizienz unter nicht optimalen Einstrahlungsbedingungen, wie zum Beispiel während der Regenzeit, wichtig. Von keinem der Hersteller wurden aussagekräftige Wirkungsgradangaben, als Auswahlkriterium für den Nutzer, zur Verfügung gestellt. Die Tests haben gezeigt, dass weder ein hoher Preis, noch die Wahl eines etablierten Herstellers einen hohen Wirkungsgrad garantieren können. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer standardisierten Testnorm für die Effizienz von MPPT-Laderegler.

10 DISKUSSION

Aktuell existiert kein Standard für den Test des Wirkungsgrads von MPPT-Ladereglern. Nur wenige Hersteller stellen Wirkungsgradangaben für ihre MPPT-Laderegler zur Verfügung, welche als Qualitätsmerkmal eine Kaufentscheidung unterstützen könnten. Selbst wenn Wirkungsgrade angegeben werden, besitzen diese nur geringe Aussagekraft, da mangels eines gemeinsamen Teststandards eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Bei netzgekoppelten MPPT-Wechselrichtern hat sich DIN EN 50530 als Teststandard für die Bestimmung des Wirkungsgrads etabliert. Der Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des MPPT-Wirkungsgrads von Ladereglern wendet diese bestehende Norm in angepasster Form auf Laderegler an, um so ein standardisiertes Testen des Wirkungsgrads von MPPT-Ladereglern zu ermöglichen.

Eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten beschäftigt sich mit der Effizienz von MPPT-Algorithmen. Hierbei wird jedoch zumeist nur das Verhalten des MPPT-Algorithmus selbst simuliert und die hardwaretechnische Realisierung bleibt unberücksichtigt. Nur wenige veröffentlichte Arbeiten untersuchen den Wirkungsgrad von MPPT-Ladereglern durch Messungen am realen Objekt. Die Abläufe der durchgeführten Tests sind oft nicht im Detail beschrieben oder untersuchen den Wirkungsgrad nicht umfassend. Daher kann für den Wirkungsgrad von MPPT-Ladereglern die Literatur nur eine grobe Abschätzung über den Stand der Technik liefern. Im Gegensatz zu der großen Anzahl theoretischer Untersuchungen anhand von Simulationen, finden sich weder für Laderegler noch für Wechselrichter Untersuchungen, welche Art von MPPT-Algorithmen tatsächlich in der Praxis eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Fraunhofer ISE Laderegler-Teststand für das Testen des Wirkungsgrads von MPPT-Ladereglern erweitert, automatisiert und in Betrieb genommen. Eine geeignete Gestaltung der Test- und Messabläufe zeigte sich als entscheidend, um vergleichbare, reproduzierbare Wirkungsgradmessungen zu erhalten. Zu Beginn eines Tests besteht kein Vorwissen über das Betriebsverhalten des Ladereglers. Es ist nicht bekannt welche MPPT-Algorithmen Anwendung finden und durch welche Messgrößen Schalthandlungen ausgelöst werden. Simulationsabläufe, welche vom realen Betrieb abweichen, können schnell zu einer Betriebsstörung oder Verfälschung der Wirkungsgradmessungen führen. Während der durchgeführten Messungen mussten daher mehrfach die Testabläufe optimiert und den Anforderungen der zu testenden Laderegler angepasst werden.

Eine detaillierte Überwachung der Tests zeigte sich als unerlässlich um solche Verfälschungen der Wirkungsgradmessungen umgehend erkennen zu können.

Die einzelnen Wirkungsgrade mancher Laderegler liegen bei über 99 %. Um aussagekräftige Messergebnisse sicherzustellen ist daher eine hohe Messgenauigkeit erforderlich. Sowohl für den MPPT als auch den Umwandlungswirkungsgrad wurde als Genauigkeitsanforderung eine maximale Abweichung von $\pm 0,1\%$ definiert. Die durchgeführten Überprüfungs- und Fehlerabschätzungen deuten daraufhin, dass diese Genauigkeit mit dem gewählten Messaufbau nicht über den gesamten Messbereich gewährleistet ist. Gemäß Fehlerabschätzung ergibt sich für Leistungen größer 25 W eine maximale Abweichung des MPPT-Wirkungsgrads von $\pm 0,1\%$. Die maximale Abweichung der Messung des Umwandlungswirkungsgrads wird hingegen auf $\pm 0,7\%$ geschätzt. Eine weitere, detaillierte Untersuchung der Genauigkeit der Wirkungsgradmessungen ist unbedingt notwendig und war im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich. Auf diesen Ergebnissen aufbauend sollte eine Veränderung des Messaufbaus in Betracht gezogen werden. Um zertifizierte Wirkungsgradmessungen durchführen zu können, wird ebenso empfohlen den PV-Simulator sowie die Leistungsmessgeräte gemeinsam mit den externen Messshunts rückführbar zu kalibrieren.

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Laderegler unterscheiden sich teils stark. Einer der Laderegler verfügte entgegen der Herstellerangaben über gar kein MPPT. Die Ergebnisse der 5 ausführlich getesteten MPPT-Laderegler streuen von gut bis mangelhaft. Aus dem Vergleichstest mit dem herkömmlichen Laderegler ohne MPPT kann klar gefolgert werden, dass alle MPPT-Laderegler im Test einen deutlich höheren Ertrag erwarten lassen, als herkömmliche PV-Laderegler.

Die Effizienz von 3 der 5 ausführlich getesteten MPPT-Laderegler wird als gut bewertet. Als Kriterium für eine Bewertung mit gut wurden ein EU-Gesamtwirkungsgrad von mindestens 96 % und ein dynamischer MPPT-Wirkungsgrad von mindestens 98 % festgelegt. Ein MPPT-Laderegler, dessen EU-Gesamtwirkungsgrad und dynamischer MPPT-Wirkungsgrad bei 95 % liegen, wurde mit ausreichend bewertet. Ein weiterer mit mangelhaft bewerteter Laderegler erzielte nur einen EU-Gesamtwirkungsgrad von 93 % und einen dynamischen MPPT-Wirkungsgrad von 82 %. Generell leisten sich die Laderegler die meisten Schwächen im dynamischen MPPT-Test bei niedriger Einstrahlung. Insgesamt lieferten die Tests Wirkungsgrade, welche deutlich höher liegen als in früheren Studien veröffentlicht. Es bleibt unklar ob diese erhöhten Wirkungsgrade mit der technologischen Entwicklung begründet werden können oder auf abweichende Messmethoden und die Geräteauswahl zurückgeführt werden müssen. Die Wirkungsgrade der mit gut bewerteten MPPT-Laderegler liegen im Bereich der Wirkungsgrade von guten,

modernen netzgekoppelten PV-Wechselrichtern. Damit kann ein technologischer Rückstand von MPPT-Laderegler gegenüber PV-Wechselrichtern, wie von Müller et al. in 2013 befunden, verneint werden.[2] Die Testergebnisse deuten darauf hin, dass weder ein hoher Kaufpreis noch ein namhafter Hersteller als Garant für einen hohen Wirkungsgrad dienen können.

Die qualitativen Tests zur Analyse des Trackingverhaltens der MPPT-Laderegler liefern Einblicke in die Funktionsweise der in der Praxis eingesetzten MPPT-Verfahren. Alle Laderegler setzen eine Kombination mehrerer Verfahren ein. Bei 2 kommt ein indirektes Suchverfahren, bei 3 ein I/V Tracing und bei 3 ein Perturb and Observe Algorithmus zum Einsatz. Bei 4 Laderegler wird darüber hinaus der Einsatz eines Incremental Conductance Algorithmus als wahrscheinlich angesehen. Der Einsatz weiterer Verfahren ist möglich, konnte in den Tests jedoch nicht bestätigt werden.

Die qualitativen Tests zum Tracking von Mehrfachmaxima liefern ein ernüchterndes Ergebnis. Keiner der MPPT-Laderegler stellte bei Leistungskennlinien mit mehreren lokalen Leistungsmaxima zuverlässig den Arbeitspunkt entsprechend dem globalen Leistungsmaximum ein. 3 der Laderegler haben ein I/V Tracing implementiert, welches das Identifizieren des tatsächlichen MPP ermöglichen sollte. Allerdings scheint eine ungeeignete Wahl der Parameter des I/V Tracings dies in vielen Fällen zu verhindern.

Bei der Detailanalyse des Trackingverhaltens der Laderegler konnten vielfach ungünstige Schalthandlungen beobachtet werden, welche zu einem temporär reduzierten Wirkungsgrad führen. In einigen Fällen zeigten sich bei bestimmten Betriebszuständen sogar eindeutige Fehlfunktionen, welche das Trackingverhalten nachhaltig beeinträchtigen. Solche Fehlfunktionen konnten in einigen Fällen sogar als eindeutige Ursache für geringe MPPT-Wirkungsgrade in bestimmten Betriebszuständen identifiziert werden. Es wird die These aufgestellt, dass allein eine verbesserte Parametrierung der Algorithmen einige MPPT-Verfahren deutlich robuster und auch effizienter machen würde.

Im Rahmen der Tests wurden ebenso die technischen Angaben der Hersteller überprüft. Dabei konnte nur für einen Laderegler die Korrektheit der Herstellerangaben bestätigt werden. Bei 3 Laderegler mussten Falschangaben festgestellt werden, welche ein Versagen oder eine Beschädigung der PV-Anlage verursachen könnten.

11 AUSBLICK

Der Fraunhofer ISE Teststandard zur Bestimmung des Wirkungsgrads von MPPT-Laderegler konnte erfolgreich implementiert und für den Test unterschiedlicher Laderegler verwendet werden. Es zeigte sich eine gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse der unterschiedlichen Laderegler. Um MPPT-Ladereglertests international etablieren zu können, wird die Schaffung einer verbindlichen Norm als unerlässlich angesehen. Der verwendete hausinterne Fraunhofer ISE Teststandard wird als Vorlage für eine solche Norm vorgeschlagen. Dieser ist von den bestehenden Normen DIN EN 50530 und IEC 62509 abgeleitet und liefert somit den Vorteil, dass auf Ergebnisse vorhergehender Normungsverfahren zurückgegriffen werden kann. Die zu schaffende Norm sollte zusätzlich verbindliche Wirkungsgrad- und Datenblattangaben formulieren, da diese bei den meisten getesteten Ladereglern mangelhaft waren. Es wird die These aufgestellt, dass eine Norm für die Effizienz von MPPT-Ladereglern eine Entwicklung anstoßen kann, welche zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Effizienz von MPPT-Ladereglern führt. Standardisierte Wirkungsgradangaben ermöglichen nicht nur dem Nutzer sich bewusst für einen effizienten Laderegler zu entscheiden, sondern auch dem Hersteller die hohe Effizienz seiner Produkte als Verkaufsargument zu nutzen. Des Weiteren würde eine international gültige Norm ermöglichen Wirkungsgrad Mindestanforderungen für MPPT-Laderegler in Importbestimmungen oder Projektausschreibungen festzuschreiben. Bei herkömmlichen PV-Ladereglern werden aus diesen Gründen bereits vermehrt Zertifizierungen gefordert.

Die Analyse des Trackingverhaltens der getesteten Laderegler lieferte umfangreiche Erkenntnisse über in der Praxis eingesetzter MPPT-Verfahren. Es sind keine veröffentlichten Untersuchungen bekannt, welche in der Praxis eingesetzte MPPT-Verfahren in ähnlichem Umfang untersuchen. Die identifizierten Schwachstellen bergen beträchtliche Verbesserungspotenziale und sind zumeist softwaretechnischer Natur. Viele der entdeckten Fehler der MPPT-Verfahren werden auf unzureichende Erprobung der Laderegler in Labortests während der Produktentwicklung zurückgeführt. Daraus wird die These abgeleitet, dass durch eine verbesserte Erprobung der MPPT-Laderegler während der Produktentwicklung die MPPT-Parameter in einfacher Weise optimiert werden könnten, mit dem Ergebnis einer deutlich höheren Effizienz.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] F. Dold, „Maximum Power Point Tracking for Solar Charge Controllers,“ Projektarbeit TU Wien, Freiburg, 2016.
- [2] M. Müller, R. Bründlinger, O. Arz, W. Miller, J. Schulz und G. Lauss, „Performance of MPPT charge controllers - a state of the art analysis,“ *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Villepinte, 2013.
- [3] H. Schmidt, B. Burger, U. Bussemas und S. Elies, „How fast does an MPPT Tracker really need to be?,“ *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009.
- [4] Phaesun GmbH, „Phaesun Product Catalogue 2016/2017“.
- [5] V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*, 7. aktualisierte Auflage, München: Hanser Verlag München, 2011.
- [6] V. Salas, E. Olias, A. Barrado und A. Lazaro, „Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90, S. 1555 - 1578, 2006.
- [7] E. S. Babaa, M. Armstrong und V. Pickert, „Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems,“ *Journal of Power and Energy Engineering*, S. 59 - 72, 2 2014.
- [8] A. Brambilla, A. Gambarara, A. Garutti und F. Ronchi, „New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking,“ *30th IEEE Power Electronics Conference*, Charleston, USA, 1999.
- [9] V. Salas, E. Olias, A. Lazaro und A. Barrado, „New algorithm using only one variable measurement applied to a maximum power point tracker,“ *Solar Energy Materials and Solar Cells*, S. 675 - 684, 2005.
- [10] T. Veerachary, T. Senjyu und K. Uezato, „Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost-converter-supplied PV system using fuzzy controller,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 50, S. 749 - 758, 2003.

-
- [11] H. Häberlin, „Wirkungsgrade von Photovoltaik-Wechselrichtern,“ *Elektrotechnik*, S. 53 - 57, 2 2005.
- [12] K. K. Tse, H. S. Chung, S. Y. Hui und M. T. Ho, „A novel maximum power point tracking technique for PV panels,“ *Power Electronics Specialists Conference, PESC. 2001 IEEE 32nd Annual*, Vancouver, Canada, 2001.
- [13] IEC 62509, “Battery charge controllers for photovoltaic systems - Performance and functioning,” 2010.
- [14] DIN EN 50530, “Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters,” 2013.
- [15] M. Camino-Villacorta, M. A. Egido-Aguilera und P. Diaz, „Test procedures for maximum power point tracking charge controllers characterization,“ *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Bd. 20, S. 310 - 320, 2012.
- [16] PHOTON Laboratory GmbH, „PHOTON Laboratory’s inverter test,“ *PHOTON - Das Solarstrom-Magazin*, 2009.
- [17] PHOTON Laboratory GmbH, „Zehn plus eins - Die Spitzenreiter im PHOTON-Wechselrichtertest,“ *PHOTON - Das Solarstrom-Magazin*, S. 34 - 43, März 2013.
- [18] V. Tamrakar, S. C. Gupta und Y. Sawle, „SINGLE-DIODE PV CELL MODELING AND STUDY OF CHARACTERISTICS OF SINGLE AND TWO-DIODE EQUIVALENT CIRCUIT,“ *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal*, Vol 4, No. 3, S. 13 - 24, August 2015.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: U/I Kennlinie PV-Modul	4
Abb. 2: U/I Kennlinie Si PV-Modul, Einfluss Temperatur auf MPP	5
Abb. 3: U/I Kennlinie Si PV-Modul, Einfluss Sonneneinstrahlung auf MPP	5
Abb. 4: U/I Kennlinie Si PV-String, Simulation Teilabschattung	5
Abb. 5: PV-Heimsystem	8
Abb. 6: Solargenerator mit Gleichspannungswandler und Verbraucher	9
Abb. 7: Ablauf statischer Wirkungsgradtest	17
Abb. 8: Dynamische Testsequenz, hohe Einstrahlung	21
Abb. 9: Ablauf dynamischer Wirkungsgradtest	21
Abb. 10: Statische Umwandlungswirkungsgrade	26
Abb. 11: MPPT-Wirkungsgrade	26
Abb. 12: Laderegler-Teststand nach IEC 62509	34
Abb. 13: Messaufbau MPPT-Ladereglertests	39
Abb. 14: Schaltplan Messwerterfassung	43
Abb. 15: Fraunhofer ISE Laderegler-Teststand	43
Abb. 16: Struktur Simulation, Messdatenerfassung und Auswertung	45
Abb. 17: Ablaufdiagramm SASScript, statischer Wirkungsgradtest	48
Abb. 18: Ablaufdiagramm SASScript, dynamischer Wirkungsgradtest	50
Abb. 19: Ablaufdiagramm Arduino	51
Abb. 20: Ablaufdiagramm Processing	54
Abb. 21: Statischer MPPT-Wirkungsgrad, Laderegler 2	63
Abb. 22: Statischer Umwandlungswirkungsgrad, Laderegler 2	64
Abb. 23: Statischer Gesamtwirkungsgrad, Laderegler 2	66

Abb. 24: Gewichteter Europäischer Wirkungsgrad, Laderegler 2.....	68
Abb. 25: Gewichteter California Energy Commission Wirkungsgrad, Laderegler 2...	68
Abb. 26: Mittlerer Europäischer Wirkungsgrad der getesteten Laderegler	70
Abb. 27 Dynamischer Wirkungsgrad, Laderegler 2	72
Abb. 28: Dynamischer Wirkungsgrad, Laderegler 4	73
Abb. 29: Dynamischer Wirkungsgrad, Laderegler 5	74
Abb. 30: Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad der getesteten Laderegler	76
Abb. 31: Simulation DIN EN 50530 Füllfaktoren, Laderegler 2.....	79
Abb. 32: Simulation hohe Füllfaktoren, Laderegler 2.....	79
Abb. 33: Simulation niedrige Füllfaktoren, Laderegler 2.....	79
Abb. 34: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 1	80
Abb. 35: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 2	82
Abb. 36: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 3	84
Abb. 37: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 4, wechselnde Einstrahlung	85
Abb. 38: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 4, niedrige Einstrahlung.....	86
Abb. 39: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 4, Einschaltvorgang.....	87
Abb. 40: Analyse Trackingverhalten, Laderegler 5	89
Abb. 41: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 1 zu Beginn	90
Abb. 42: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 1 nach 15 min	90
Abb. 43: Tracking Mehrfachmaxima, Laderegler 1	91
Abb. 44: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 3, globales Maximum	93
Abb. 45: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 3, lokales Maximum	93
Abb. 46: Simulation Mehrfachmaxima, Laderegler 4	93

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Anpassungen und Ergänzungen zu DIN EN 50530	15
Tab. 2: Statische Wirkungsgrade	18
Tab. 3: Berechnung gewichteter Europäischer Wirkungsgrad	19
Tab. 4: Berechnung gewichteter California Energy Commission Wirkungsgrad	19
Tab. 5: Dynamische Wirkungsgrade	20
Tab. 6: Wechselrichter Bestenliste 2013, PHOTON-Wirkungsgrad	29
Tab. 7: Übersicht getestete Laderegler	60
Tab. 8: Statischer MPPT-Wirkungsgrad, Laderegler 2	63
Tab. 9: Statischer Umwandlungswirkungsgrad, Laderegler 2	64
Tab. 10: Statischer Gesamtwirkungsgrad, Laderegler 2	66
Tab. 11: Simulierte Füllfaktoren	78
Tab. 12: Übersicht sonstige MPPT-Tests	95
Tab. 13: Bewertung Laderegler-Wirkungsgrad	97

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AC	Wechselstrom
CEC	California Energy Commission
c-Si	Kristallines Silizium
DC	Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EU	Europa
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
I/O	Input/Output
I/V	Strom/Spannung
IC	Incremental Conductance
IEC	International Electrotechnical Commission
ISD	Ideal Single Diode
LED	Leuchtdiode
max	Maximal
min	Minimal
MPP	Maximum-Power-Point
MPPT	Maximum-Power-Point-Tracking
MPPT-Laderegler	Maximum-Power-Point-Tracking Photovoltaik-Laderegler
P&O	Perturb and Observe
PV	Photovoltaik
RS232	Standard für serielle Schnittstelle
RX	Leitung für eingehende Daten
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
Si	Silizium
SOC	State of Charge
STC	Standard Test Conditions
TTL	Transistor-Transistor-Logik
TX	Leitung für ausgehende Daten
U/I	Spannung/Strom
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter

ANHANG

TESTBERICHT LADEREGLER 1

Test and Measurement Protocol

MPPT BATTERY CHARGE CONTROLLER EFFICIENCY

According to Fraunhofer ISE test
standards
derived from DIN EN 50530 and IEC
62509

Date: 20.03.2017
Testing person: Fabian Dold

Head of Laboratory:
Dipl.-Ing. Norbert Pfanner
Senior Scientist
Team Applied Storage Systems
Dep. Electrical Energy Storage ELS

Phone: +49 (0) 7 61 / 45 88-52 24
Fax: +49 (0) 7 61 / 45 88-92 24
norbert.pfanner@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Germany
<http://www.ise.fraunhofer.de>

Table of Contents

1	List of Figures	4
2	List of Symbols	5
3	Device under test	7
4	Test setup	8
5	Test Summary	9
5.1	Static efficiency test	9
5.2	Dynamic efficiency test	9
5.3	Other tests	10
5.3.1	MPP tracking behavior.....	10
5.3.2	MPP tracking under partial shading conditions.....	11
5.3.3	General remarks	12
6	Test details	13
6.1	Results static efficiency test	13
6.1.1	Static MPPT efficiency	13
6.1.2	Static conversion efficiency	14
6.1.3	Static total efficiency	15
6.1.4	European weighted efficiency	16
6.1.5	California Energy Commission weighted efficiency	16
6.2	Dynamic efficiency test	17
7	Annex	19
7.1	Fraunhofer ISE MPPT battery charge controller efficiency test	19
7.2	Efficiency measurement and calculation	21
7.2.1	Static MPPT efficiency test	21
7.2.2	Dynamic MPPT efficiency test	23
7.3	Measurement setup	24

1

List of Figures

Fig. 01: Device under test.....	7
Fig. 02: Charge controller data	7
Fig. 03: PV settings	8
Fig. 04: Battery settings.....	8
Fig. 05: Other settings	8
Fig. 06: Remarks test setup.....	8
Fig. 07: Static efficiency extreme values.....	9
Fig. 08: Weighted static MPPT efficiencies	9
Fig. 09: Dynamic MPPT efficiencies	9
Fig. 10: Static MPP tracking behavior	10
Fig. 11: Tracking the local maximum.....	11
Fig. 12: Tracking the global maximum	11
Fig. 13: Measurements MPP tracking under partial shading conditions	12
Fig. 14: Remarks charge controller.....	12
Fig. 15: Static MPPT efficiency measurements	13
Fig. 16: Static MPPT efficiency chart.....	13
Fig. 17: Static conversion efficiency measurements	14
Fig. 18: Static conversion efficiency chart.....	14
Fig. 19: Static total efficiency measurements	15
Fig. 20: Static total efficiency chart.....	15
Fig. 21: European weighted efficiency.....	16
Fig. 22: California Energy Commission weighted efficiency	16
Fig. 23: Dynamic efficiency measurements	17
Fig. 24: Dynamic efficiency chart	18
Fig. 25: Adaptations DIN EN 50530	20
Fig. 26: Static efficiency calculations	21
Fig. 27: Weighted European efficiency calculations	22
Fig. 28: Weighted California Energy Commission efficiency calculations	22
Fig. 29: Dynamic efficiency calculations.....	23
Fig. 30: Irradiance ramp test signal	23
Fig. 31: Measurement setup	24

2

List of Symbols

E_{bat}	Wh	energy per test cycle fed into battery
E_{MPP}	A	theoretical MPP energy per test cycle of PV generator
E_{PV}	Wh	energy per test cycle actually obtained from PV generator
I_{max}	A	maximum charge controller current from PV generator
I_{MPP}	A	MPP current of PV generator
k	Wh	power scaling factor
P_{MPP}	kW	MPP power of PV generator
$P_{PV,r}$	kW	rated PV input power of the charge controller
T_{amb}	°C	ambient temperature
T_{CC}	°C	charge controller temperature
U_{bat}	V	battery voltage
$U_{bat,r}$	V	rated battery voltage of charge controller
U_{cell}	V	standardized voltage of single lead acid battery cell
U_{MPP}	V	MPP voltage of PV generator
$U_{MPP,max}$	V	maximum MPP input voltage of charge controller
$U_{MPP,min}$	V	minimum MPP input voltage of charge controller
$U_{MPP,r}$	V	rated MPP input voltage of charge controller
$U_{OC,max}$	V	maximum open circuit voltage of charge controller
$\alpha_{CEC,i}$		weighting factor California Energy Commission weighted efficiency
$\alpha_{EU,i}$		weighting factor European weighted efficiency
$\eta_{conv,dyn}$		dynamic conversion efficiency
$\eta_{conv,stat}$		static conversion efficiency
$\eta_{conv,stat,CEC}$		weighted California Energy Commission static conversion efficiency
$\eta_{conv,stat,EUR}$		weighted European static conversion efficiency
$\eta_{MPPT,dyn}$		dynamic MPPT efficiency
$\eta_{MPPT,dyn,t}$		dynamic total MPPT efficiency
$\eta_{MPPT,stat}$		static MPPT efficiency
$\eta_{MPPT,stat,CEC}$		weighted California Energy Commission static MPPT efficiency
$\eta_{MPPT,stat,EUR}$		weighted European static MPPT efficiency
$\eta_{MPPT,stat,EUR}$		weighted European static efficiency
$\eta_{stat,CEC}$		weighted California Energy Commission static efficiency
$\eta_{stat,CEC}$		weighted California Energy Commission static efficiency
$\eta_{t,dyn}$		dynamic total efficiency

$\eta_{t,stat}$	static total efficiency
$\eta_{t,stat,CEC}$	weighted California Energy Commission static total efficiency
$\eta_{t,stat,EUR}$	weighted European static total efficiency

3 Device under test

.....
Device under test
.....

Type: ██████████

Model: Laderegler 1

Reference: ██████████

Serial number: ██████████



Fig. 01: Device under test

Fig. 02: Charge controller data

	manufacturer		selected for testing	
	$U_{bat,r} = 12\text{ V}$	$U_{bat,r} = 24\text{ V}$	$U_{bat,r} = 12\text{ V}$	$U_{bat,r} = 24\text{ V}$
$P_{PV,r}$ [kW]	0.15	0.5	0.15	
$U_{OC,max}$ [V]	50	50	42	
$U_{MPP,min}$ [V]			17	
$U_{MPP,max}$ [V]	40	40	33.6	
$U_{MPP,r}$ [V]	20	20	25.3	
I_{max} [A]	10	10	10	

4 Test setup

Fig. 03: PV settings

	curve 1 at $U_{MPP,max}$	curve 2 at $U_{MPP,r}$	curve 3 at $U_{MPP,min}$
U_{MPP} [V]	33.6	25.3	17
I_{MPP} [A]	4.46	5.93	8.82
P_{MPP} [kW]	0.15	0.15	0.15
PV curves are calculated according to DIN EN 50530			

Fig. 04: Battery settings

Cells [no.]	6
U_{cell} [V]	2.2
U_{bat} [V]	13.2
In accordance with IEC 62509	

Fig. 05: Other settings

Charge algorithm	voltage control mode
PV-cell type	C-Si
Temperature ambient	25 °C ± 5°C
Measurement time static	5 min

Fig. 06: Remarks test setup

- $U_{MPP,Tmin}$ not given in datasheet, $U_{MPP,Tmin} = U_{bat,r} + 5V$ was chosen
 - charge controller is not able to operate at $U_{PV,max} = 50V$ as given in datasheet provided.
 Different information from the manufacturers homepage gives a reduced value $U_{PV,max} = 42V$ which was used for testing
 - testing at $k = 0,05$ was discarded due to limitations in the test setup. Thus for the calculation of the European efficiency the test cycle with $k = 0,1$ were weighted stronger with $\alpha_{EU,i} = 0.09$

5 Test Summary

5.1 Static efficiency test

Fig. 07: Static efficiency extreme values

	max	min
$\eta_{MPPT,stat}$	100.0%	98.6%
$\eta_{conv,stat}$	96.5%	93.9%
$\eta_{t,stat}$	96.2%	93.1%

Fig. 08: Weighted static MPPT efficiencies

	$U_{MPPT,max}$	$U_{MPPT,r}$	$U_{MPPT,min}$
$\eta_{MPPT,stat,EUR}$	99.5%	99.9%	99.3%
$\eta_{MPPT,stat,CEC}$	99.5%	99.9%	99.6%

5.2 Dynamic efficiency test

Fig. 09: Dynamic MPPT efficiencies

fluctuation [W/m ²]	$\eta_{MPPTdyn,i}$
100 - 500	92.2%
300 - 1000	99.3%
$\eta_{MPPTdyn,t}$	94.7%

5.3 Other tests

These tests are only carried out for research purposes and are not part of the standard test procedure.

5.3.1 MPP tracking behavior

The charge controller is using a modified multistage perturb and observe algorithm to track the MPP. When starting up the charge controller begins tracking at open circuit voltage and reduces stepwise the PV voltage. After the initial tracking a small perturbation of different amplitude and direction is carried out about once a minute. A bigger perturbation covering a wide part of the voltage range is carried out about every 15 min. Under changing irradiance conditions the charge controller has difficulties to follow the changes in MPP voltage and takes several minutes to find back to the MPP. Repeatedly it was also observed that a change in irradiance caused a change of the PV voltage into the wrong direction. Probably caused by the typical vulnerability of pure perturb and observe algorithms of misinterpreting changes in measured power. This change of voltage into the wrong direction can for example be seen in the graph below starting at minute 5. Videos attached to this test report further illustrate the tracking behavior.

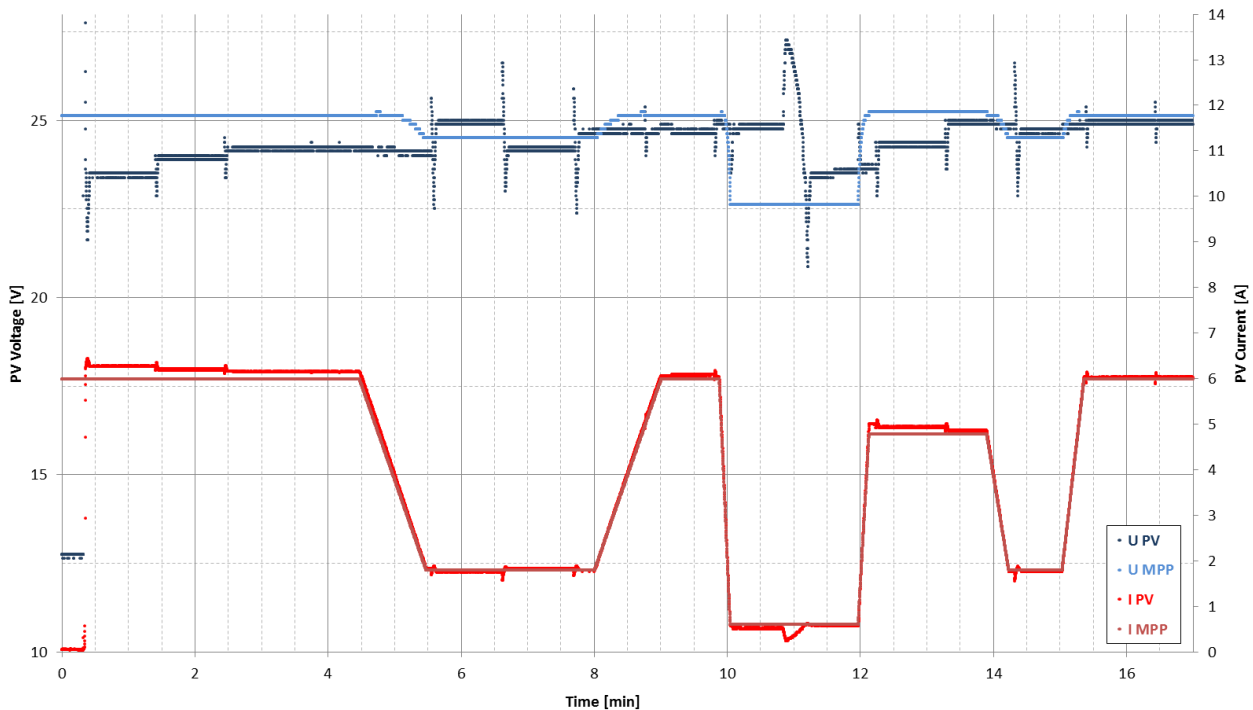


Fig. 10: Static MPP tracking behavior

5.3.2

MPP tracking under partial shading conditions

For analyzing the charge controller's ability to track the global power maximum amongst multiple local power maxima partial shading conditions were simulated.

The charge controller does not track the global power maximum amongst multiple local power maxima reliably. When starting up the charge controller begins tracking at open circuit voltage and reduces stepwise the PV voltage. If a peak is reached the charge controller ends its search. In consequence the charge controller is first tracking the peak nearest to the open circuit voltage, no matter if it is a global or local power maximum. Around every 15 minutes the charge controller performs a bigger perturbation which results in some cases in the tracking of the global MPP. During the tests the tracking of the global MPP only did happen for a few cases. One example can be seen in the graphs below where the tracking of the global MPP happened after around 15 minutes.

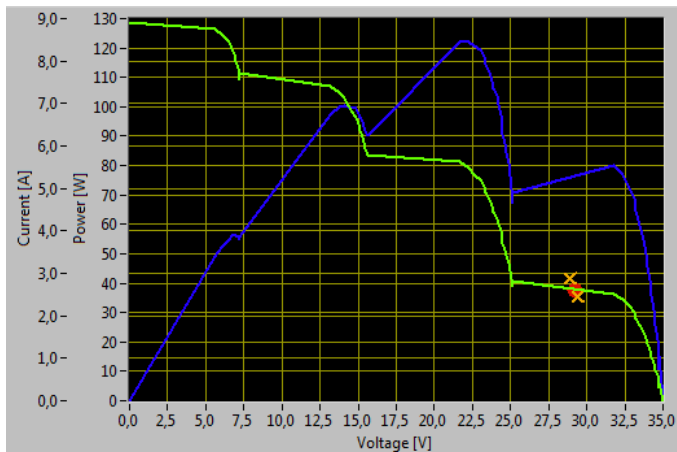


Fig. 11: Tracking the local maximum

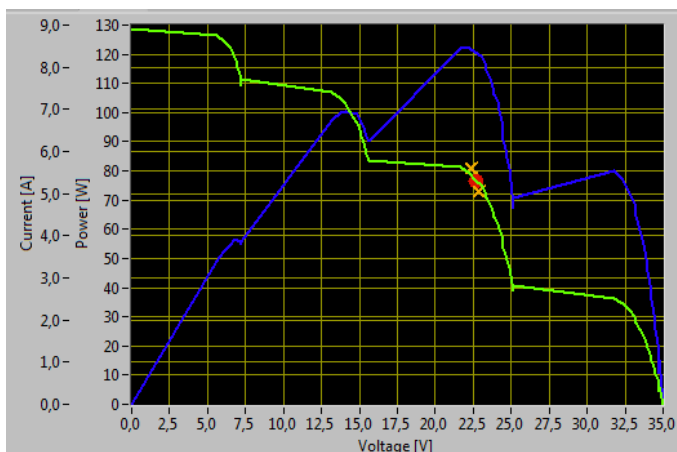


Fig. 12: Tracking the global maximum

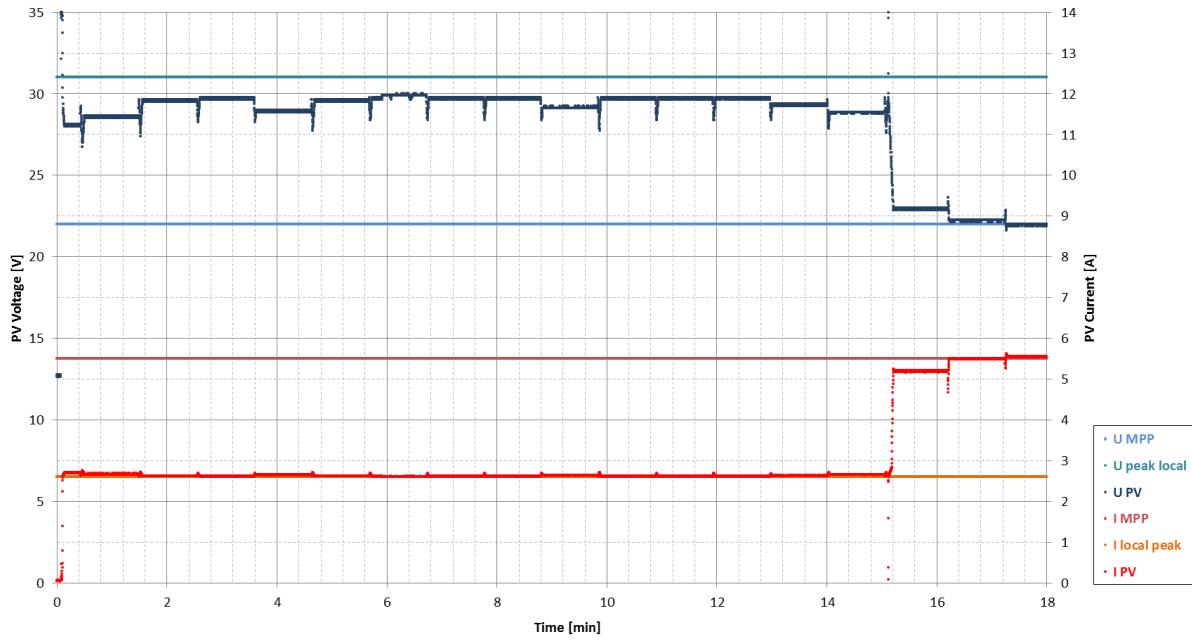


Fig. 13: Measurements MPP tracking under partial shading conditions

5.3.3 General remarks

Fig. 14: Remarks charge controller



6 Test details

6.1 Results static efficiency test

6.1.1 Static MPPT efficiency

Fig. 15: Static MPPT efficiency measurements

k	U _{MPP}		
	17 V	25 V	33 V
0.1	99.6%	100.0%	98.6%
0.2	99.5%	99.6%	99.5%
0.3	99.6%	99.8%	99.0%
0.5	99.6%	99.9%	99.5%
0.75	99.4%	99.9%	99.9%
1	99.4%	100.0%	99.1%

XX.X% max interval efficiency

XX.X% min interval efficiency

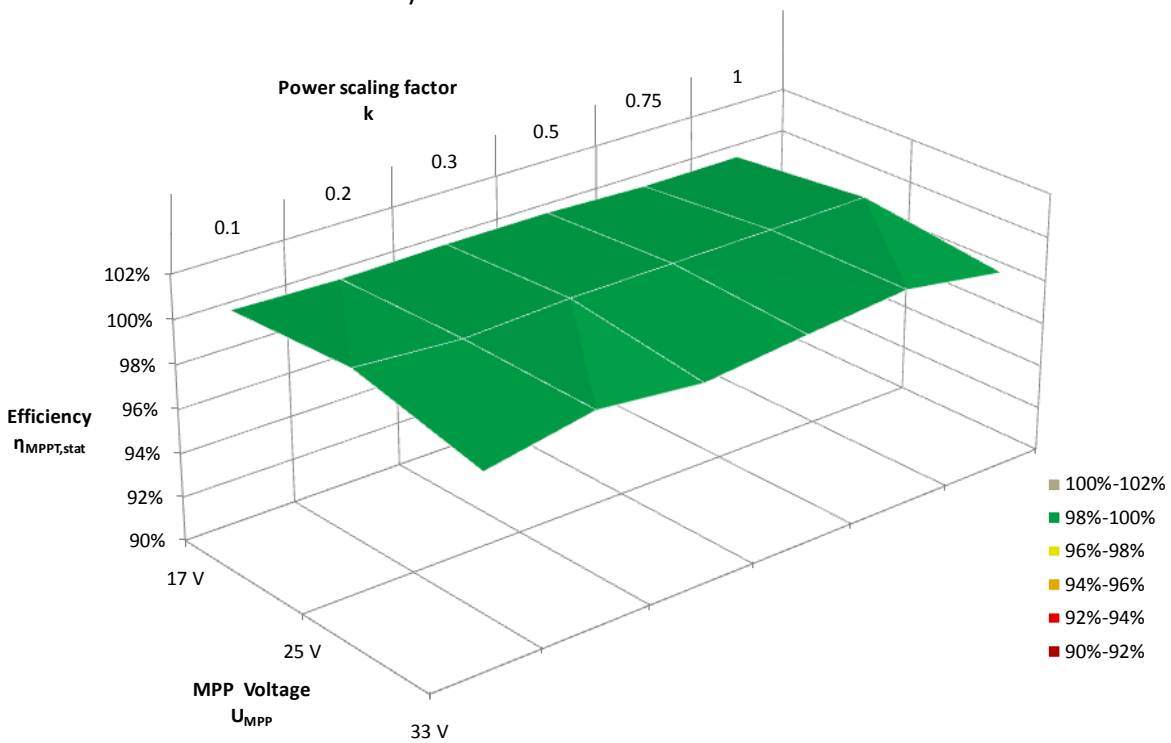


Fig. 16: Static MPPT efficiency chart

6.1.2
Static conversion efficiency

 Test details

Fig. 17: Static conversion efficiency measurements

k	U _{MPP}		
	17 V	25 V	33 V
0.1	96.0%	94.6%	96.0%
0.2	96.0%	96.5%	96.0%
0.3	95.9%	96.4%	95.9%
0.5	95.9%	96.0%	95.3%
0.75	96.0%	95.3%	94.5%
1	96.0%	94.6%	93.9%

XX.X% max interval efficiency

XX.X% min interval efficiency

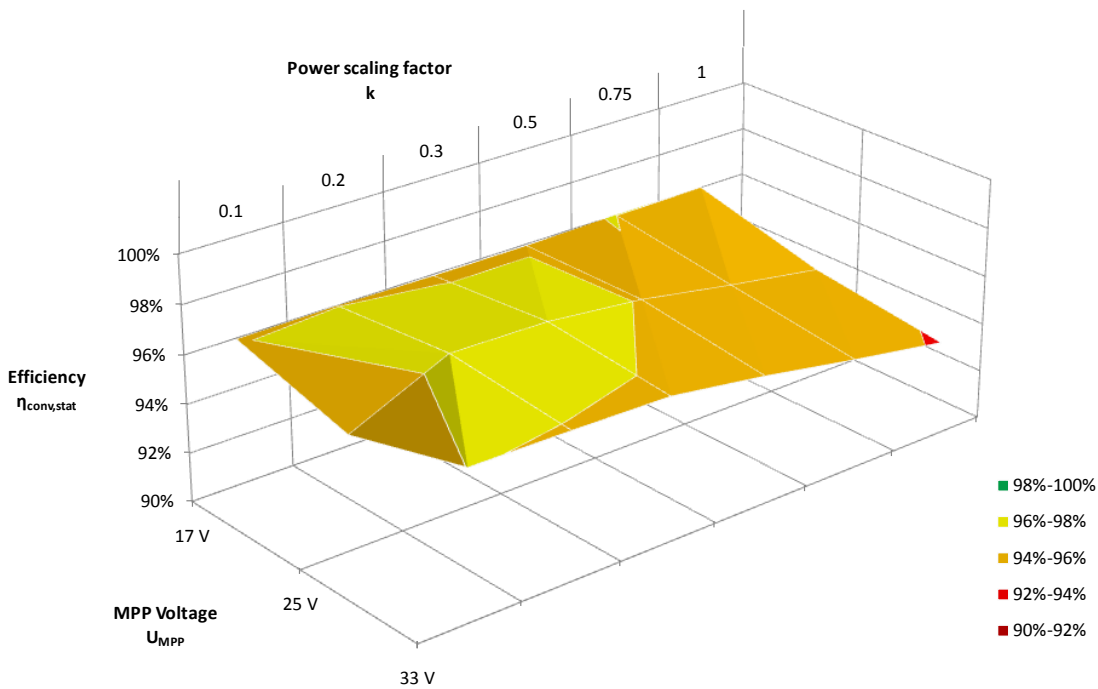


Fig. 18: Static conversion efficiency chart

6.1.3
Static total efficiency

Test details

Fig. 19: Static total efficiency measurements

k	U _{MPP}		
	17 V	25 V	33 V
0.1	95.6%	94.6%	94.7%
0.2	95.5%	96.1%	95.5%
0.3	95.5%	96.2%	94.9%
0.5	95.5%	95.8%	94.7%
0.75	95.4%	95.2%	94.4%
1	95.4%	94.6%	93.1%

XX.X% max interval efficiency

XX.X% min interval efficiency

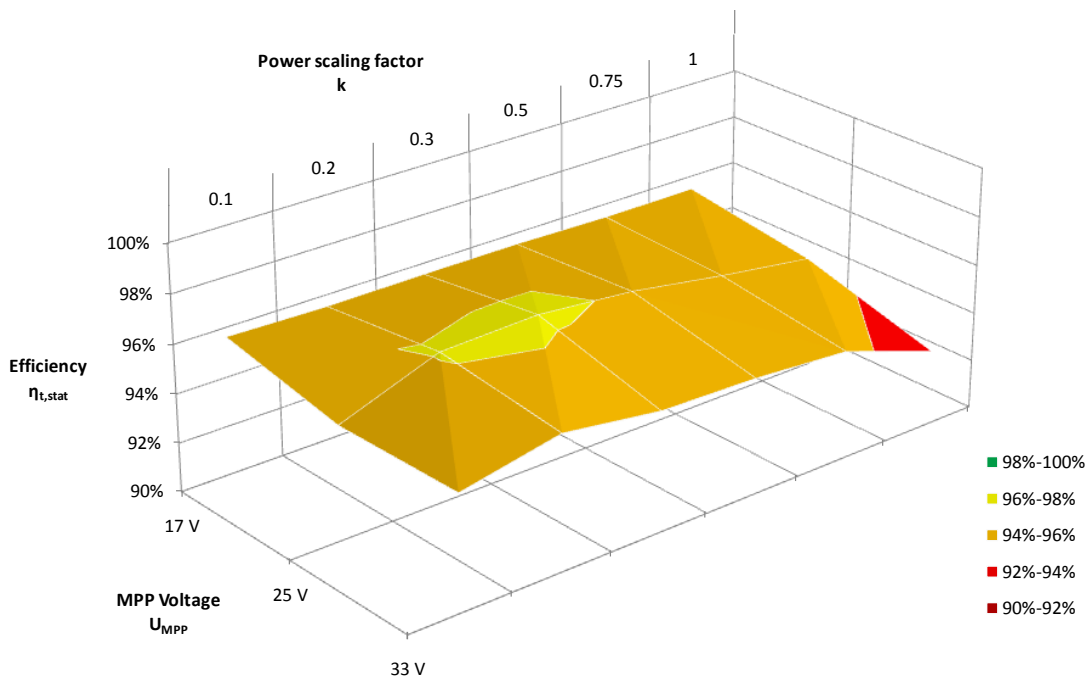


Fig. 20: Static total efficiency chart

6.1.4 European weighted efficiency

Test details

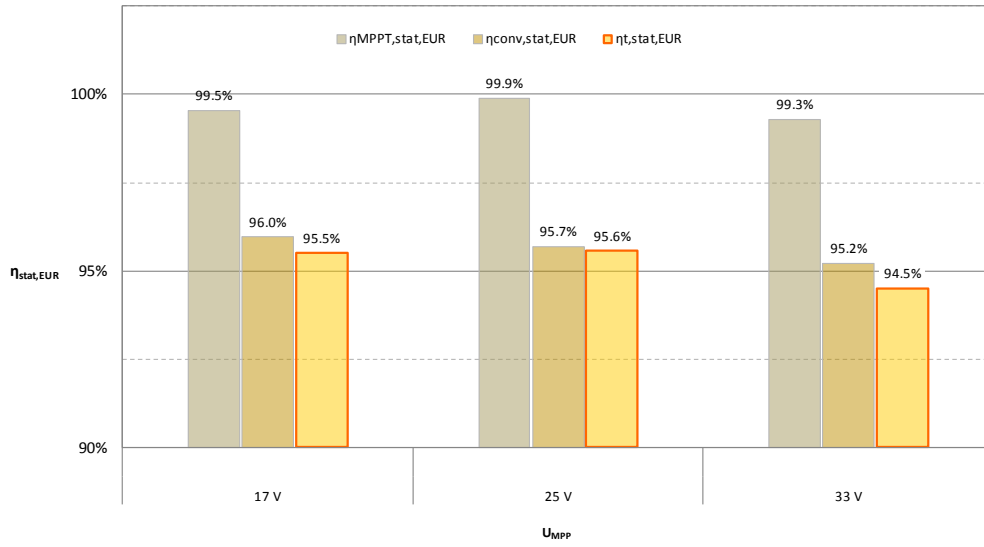


Fig. 21: European weighted efficiency

6.1.5 California Energy Commission weighted efficiency

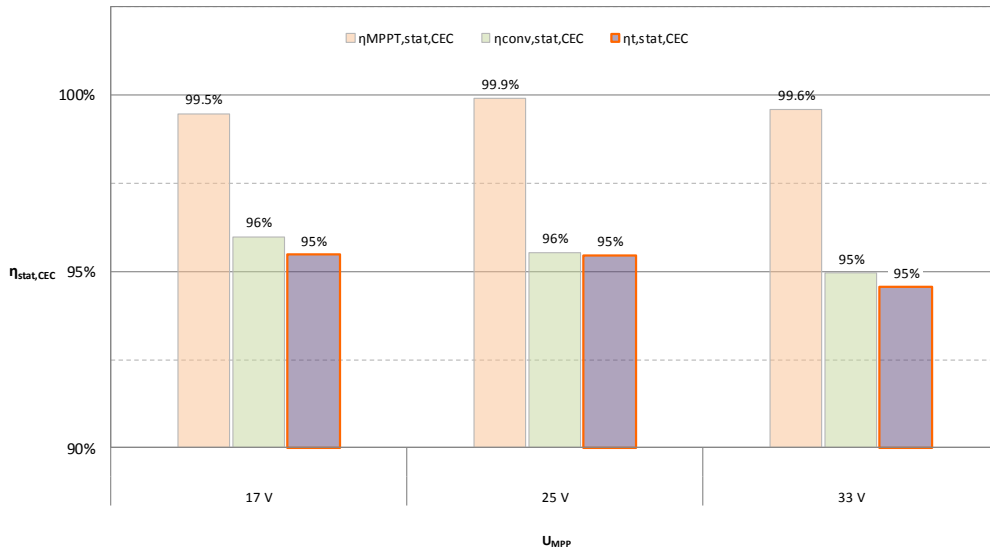


Fig. 22: California Energy Commission weighted efficiency

6.2 Dynamic efficiency test

Test details

Fig. 23: Dynamic efficiency measurements

range G [W/m ²]	slope [W/m ² /s]	$\eta_{MPPT,dyn}$	$\eta_{conv,dyn}$	$\eta_{t,dyn}$
100 - 500				
	0.5	99.4%	93.9%	93.3%
	1.0	99.4%	94.7%	94.2%
	2.0	98.7%	95.1%	93.8%
	3.0	96.4%	95.4%	92.0%
	5.0	98.1%	95.5%	93.7%
	7.0	92.3%	95.9%	88.5%
	10.0	98.6%	95.6%	94.2%
	13.8	85.2%	96.2%	82.0%
	20.0	87.8%	96.1%	84.4%
	30.8	80.2%	96.4%	77.3%
	50.0	78.0%	96.5%	75.3%
Average		92.2%	95.6%	88.1%
300 - 1000				
	10.0	100.1%	95.1%	95.1%
	14.0	99.5%	95.0%	94.6%
	20.0	99.0%	95.2%	94.3%
	30.4	98.6%	95.0%	93.7%
	50.0	99.1%	95.1%	94.3%
	100.0	99.4%	95.0%	94.4%
Average		99.3%	95.0%	94.4%
Total Average		94.7%	95.4%	90.3%

Test details

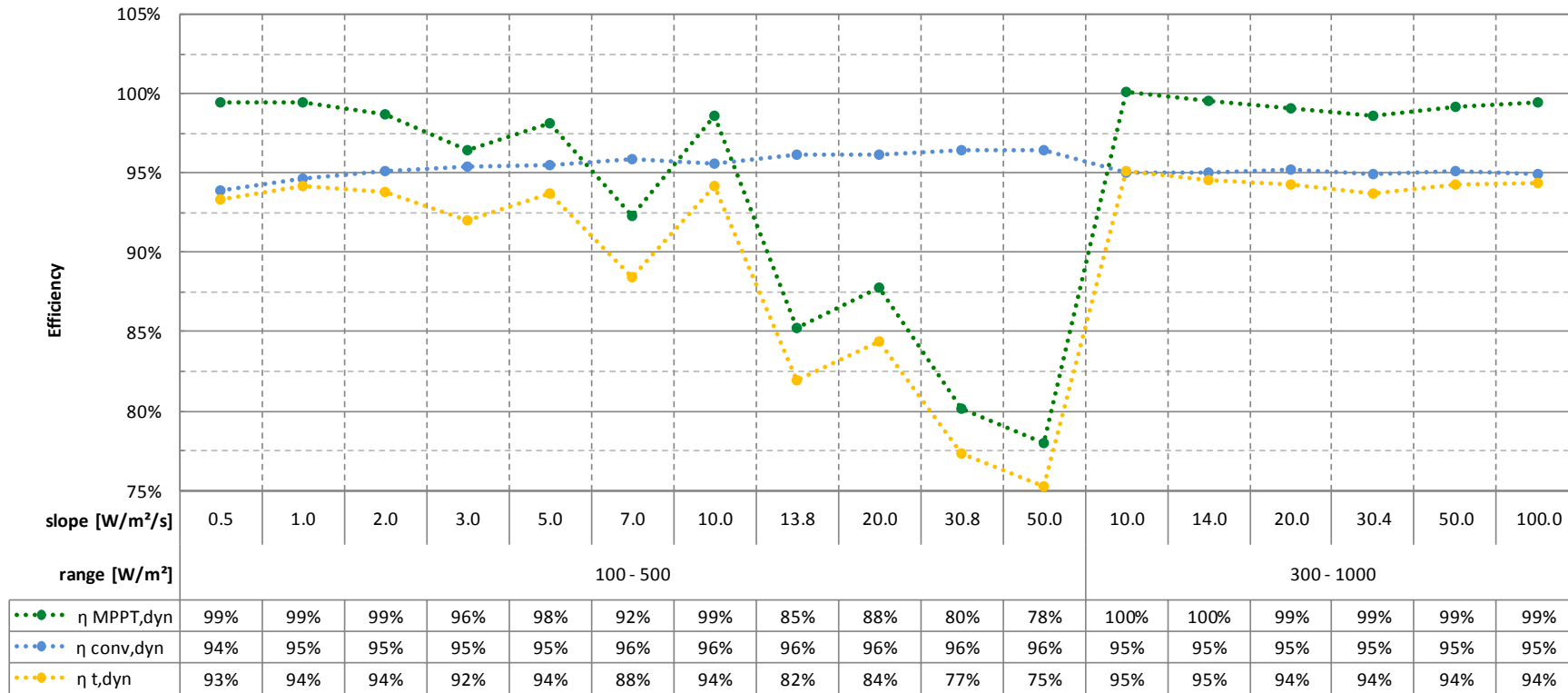


Fig. 24: Dynamic efficiency chart

7 Annex

The annex gives a short overview of DIN EN 50530 MPPT efficiency tests and about the specifics of the Fraunhofer ISE test standard for MPPT battery charge controller efficiency.

7.1 Fraunhofer ISE MPPT battery charge controller efficiency test

The Fraunhofer ISE test standard for MPPT battery charge controller efficiency is primarily based on DIN EN 50530 the well-established standard for efficiency testing of grid connected inverters and IEC 62509 the existing test standard for conventional charge controller. The charge controller test standard IEC 62509 does not provide test procedures for MPPT efficiency tests. Therefore MPPT efficiency test methods described in DIN EN 50530 are utilized and adopted for charge controller. In contrast to grid connected Inverters, charge controller are feeding DC power into batteries. This requires different test equipment a new definition of some test parameters.

For charge controller it is common that MPP voltage as well as rated MPP voltage is not declared by the manufacturer. In these cases the MPP voltages for testing are calculated according to the formulas below, given by DIN EN 50530.

$$U_{MPP,r} = \frac{U_{MPP,max} + U_{MPP,min}}{2}$$

$$U_{MPP} = 0.8 \cdot U_{OC}$$

The table below shows the specifics of the Fraunhofer ISE MPPT battery charge controller efficiency test and points out modifications in comparison to DIN EN 50530.

Fig. 25: Adaptations DIN EN 50530

Functionality and test	Adaptations and extensions
Measurement setup	
Power output	Use of battery simulator with IEC 62509 conformity
	Battery voltage fixed at 2.2 V/cell according to IEC 62509
Static MPPT efficiency	
	Simulation of c-Si characteristics only, unless TF explicitly requested
	Measuring time cut from 10 min to 5 min
	Waiting and stabilization time fixed at 2.5 min and 1min
Dynamic MPPT efficiency	
	Waiting time fixed at 2.5 min
	Number of repetitions for test sequences B.2 and B.3 cut into half
	Test sequence B.4 was omitted
Conversion efficiency	
	Calculation with battery terminal power output
	Simulation of c-Si characteristics only, unless TF explicitly requested
Overall efficiency	
	Calculation with battery terminal power output
Peak performance	
	Additional specification of peak performance
	Specification of max and min per efficiency
MPPT functionality	
MPPT algorithm	Verification of tracking procedure
Partial shading	Verify ability to track global MPP amongst multiple local MPP

7.2 Efficiency measurement and calculation

7.2.1 Static MPPT efficiency test

The static MPPT efficiency test measures the accuracy of the MPP-tracker and indicates how well the inverter locates the maximum power point of a PV source under static conditions. The static MPPT efficiency is calculated by dividing the energy obtained from the PV source by the theoretically available energy.

The conversion efficiency measures the charge controller's efficiency in converting the PV input at a higher voltage level to a lower voltage level for battery charging. It is calculated as the ratio of energy fed into the battery divided by the energy obtained from the PV source.

The overall or total efficiency describes the ratio of energy fed into the battery compared to the energy the PV generator could theoretically supply. The total efficiency is calculated as the product of conversion efficiency and MPPT efficiency.

Fig. 26: Static efficiency calculations

Type	Definition	Calculation
Static MPPT efficiency	$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} p_{DC}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$	$\eta_{MPPTstat} = \frac{E_{PV}}{E_{MPP}}$
Conversion efficiency	$\eta_{conv} = \frac{\int_0^{T_M} p_{AC}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{DC}(t) \cdot dt}$	$\eta_{conv} = \frac{E_{bat}}{E'_{PV}}$
Overall efficiency	$\eta_t = \frac{\int_0^{T_M} p_{AC}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$	$\eta_t = \eta_{conv} \cdot \eta_{MPPTstat}$

(cf. DIN EN 50530, 2013-12)

The weighted European and Californian Energy Commission efficiencies are calculated from the static MPPT efficiencies. The different power levels are weighted with individual weighing factors and summed up to reflect the contribution of the associated radiation conditions to annual energy yield in Central Europe respectively California. The power levels and their weighting factors can be seen in in the tables below.

Fig. 27: Weighted European efficiency calculations

$$\eta_{MPPTstat,EU} = \alpha_{EU_1} \cdot \eta_{MPPT1} + \alpha_{EU_2} \cdot \eta_{MPPT2} + \alpha_{EU_3} \cdot \eta_{MPPT3} + \alpha_{EU_4} \cdot \eta_{MPPT4} + \alpha_{EU_5} \cdot \eta_{MPPT5} + \alpha_{EU_6} \cdot \eta_{MPPT6}$$

	α_{EU_1}	α_{EU_2}	α_{EU_3}	α_{EU_4}	α_{EU_5}	α_{EU_6}
Weighting factor	0.03	0.06	0.13	0.1	0.48	0.2
Power scaling factor	MPP_1	MPP_2	MPP_3	MPP_4	MPP_5	MPP_6
$k = P_{MPP,PVS}/P_{DC,r}$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1

(cf. DIN EN 50530, 2013-12)

Fig. 28: Weighted California Energy Commission efficiency calculations

$$\eta_{MPPTstat,CEC} = \alpha_{CEC_1} \cdot \eta_{MPPT1} + \alpha_{CEC_2} \cdot \eta_{MPPT2} + \alpha_{CEC_3} \cdot \eta_{MPPT3} + \alpha_{CEC_4} \cdot \eta_{MPPT4} + \alpha_{CEC_5} \cdot \eta_{MPPT5} + \alpha_{CEC_6} \cdot \eta_{MPPT6}$$

	α_{CEC_1}	α_{CEC_2}	α_{CEC_3}	α_{CEC_4}	α_{CEC_5}	α_{CEC_6}
Weighting factor	0.04	0.05	0.12	0.21	0.53	0.05
Power scaling factor	MPP_1	MPP_2	MPP_3	MPP_4	MPP_5	MPP_6
$k = P_{MPP,PVS}/P_{DC,r}$	0.1	0.2	0.3	0.5	0.75	1

(cf. DIN EN 50530, 2013-12)

For the static efficiency test 24 different voltage-current curves are simulated. The number of simulated curves results from the different voltage and power levels specified. Each charge controller is tested at maximal, rated and minimal PV voltage. Moreover for each voltage level 8 different power levels are simulated.

For each voltage-current curve the stabilization of the charge controller is awaited before its static behavior is measured for 5 minutes. With the energy volumes measured the individual efficiencies are calculated.

7.2.2

Dynamic MPPT efficiency test

The dynamic MPPT efficiency test measures the speed of the MPP-tracker and indicates how fast the charge controller can adjust to changing environmental conditions. The dynamic MPPT efficiency is calculated by dividing the energy actually obtained from the PV source by the theoretically available energy. The definition and calculation can be seen in the table below.

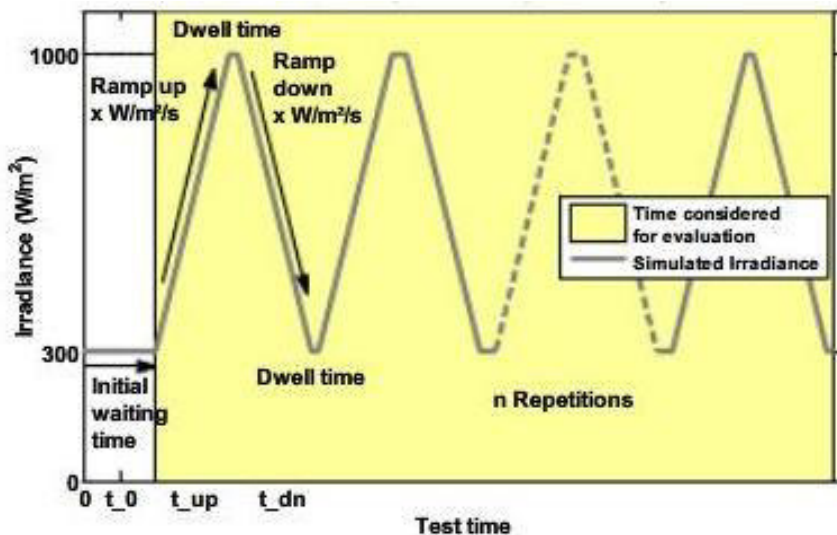
Fig. 29: Dynamic efficiency calculations

Type	Definition	Calculation
Individual dynamic MPPT efficiency	$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} p_{DC}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$	$\eta_{MPPTdyn,i} = \frac{E_{PV}}{E_{MPP}}$
Average dynamic MPPT efficiency		$\eta_{MPPTdyn,t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{MPPTdyn,i}$

(cf. DIN EN 50530, 2013-12)

For the dynamic MPPT efficiency test irradiance ramps are used as test signals. Two standardized tests are used for low to medium irradiance changes of 100 W/m² to 500 W/m² and medium to high irradiance changes of 300 W/m² to 1000 W/m². Each test consists of various cycles with defined repetitions, gradients and dwell time, illustrated in the graph below.

Fig. 30: Irradiance ramp test signal



(DIN EN 50530, 2013-12)

The dynamic efficiency test is carried out at rated voltage level. Before each cycle the stabilization of the charge controller is awaited before the

simulation starts. With the energy volumes measured during test time the individual efficiencies are calculated. The total dynamic efficiency is calculated as the mean of the efficiencies from low to medium and medium to high tests. The start-up and shut-down test is not considered.

7.3 Measurement setup

Fig. 31: Measurement setup

