

Bernburg
Dessau
Köthen



Hochschule Anhalt
Anhalt University of Applied Sciences

emw

Fachbereich
Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

Paul Weichold

Vorname Name

Elektro- und Informationstechnik, 2013, 4058485

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

**Entwicklung von Messverfahren für Modulleis-
tungsoptimierer**

Prof. Dr. Jürgen Schwarz

1. Prüfer / 1. Prüferin

Dr. Matthias Ebert

2. Prüfer / 2. Prüferin

07.04.2017

Datum der Abgabe

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen und beschriebenen Software, verwendet wurden.

Köthen, 07.04.2017

Ort, Datum

Unterschrift des/der Verfassers-/in

Sperrvermerk

Sperrvermerk

Ja

Nein

Köthen, 07.04.2017

Ort, Datum

Unterschrift des/der betrieblichen Betreuers/-in

Angaben zum Unternehmen



Logo des Unternehmens Fraunhofer CSP
Names des Unternehmens Fraunhofer CSP
Abteilung Zuverlässigkeit von Solarmodulen und Systemen
Betreuer Jens Fröbel Dipl.-Ing.

Kontaktdaten

Anschrift des Standortes an dem die Arbeit verfasst wurde Otto-Eißfeldt-Str. 12, D-06120 Halle(Saale)
E-Mail Adresse des Betreuers jens.froebel@csp.fraunhofer.de

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Moduloptimierer auf ihre Arbeitsweise untersucht, um qualitative Aussagen über den Aufbau für Messungen für Moduloptimierer zu treffen. Untersucht werden die Optimierer P350I von SolarEdge, der TS4-O von Tigo Energy und der AMPT-X V40 LC4 von AMPT. Dabei werden verschiedene Messaufbauten entworfen, in welchen das Verhalten der Optimierer ausgewertet wird.

Durch die Messungen soll das prinzipielle Verhalten der Optimierer geklärt sowie Auskunft über die Leistungsverluste und den Wirkungsgrad gegeben werden.

Inhaltsverzeichnis

Selbstständigkeitserklärung	iii
Angaben zum Unternehmen	iv
Kurzfassung	v
Inhaltsverzeichnis	vi
1 Motivation und Zielsetzung	1
1.1 Einleitung in die Thematik	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Der Hochsetzsteller	5
2.2 Der Tiefsetzsteller	10
2.3 Der Hoch - Tiefsetzsteller	14
2.4 Das Maximum Power Point Tracking	17
3 Vorstellung der Messgeräte, Prüfgeräte und Optimierer	21
3.1 Die Mess- und Prüfgeräte	21
3.1.1 Photovoltaik-Simulator Typ PVS 1000/LV	21
3.1.2 linearer Leistungsverstärker Typ PAS 2500	23
3.1.3 Analyser Reference System Typ ARS 16/1	24
3.1.4 Sycore / PC104	24
3.2 Die Moduloptimierer	26
4 Die Messergebnisse	29
4.1 Messaufbau: 1	29
4.2 Messaufbau: 2	38
4.3 Restliche Messaufbauten	43
5 Zusammenfassung und Ausblick	45
Anhang	a

Abbildungsverzeichnis	c
Tabellenverzeichnis	f
Formelverzeichnis	g
Abkürzungsverzeichnis	i
Symbolverzeichnis	k
Quellenverzeichnis	m
Danksagung	o

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Einleitung in die Thematik

Die Moduloptimierer werden eingesetzt, um die durch eine Verschattung hervorgerufenen Verluste zu reduzieren. Die Photovoltaik (PV)-Module arbeiten in der Regel im Verbund, also eine Reihenschaltung mehrerer PV-Module. Die Zusammenschaltung von Modulen nennt man String. Wie das erste Kirchhoffsche Gesetz erklärt, ist die Summe der zufließenden Ströme in einen Knotenpunkt gleich der Summe der abfließenden Ströme. Was in einer Reihenschaltung ohne Knotenpunkte bedeutet, dass der Strom überall gleich groß sein muss. Aus diesem Gesetz leitet sich ab, dass der maximale Strom im String durch das schwächste PV-Modul bestimmt wird. Allerdings kann es durch Umwelteinflüsse geschehen, dass PV-Module eine Teil- bis Vollverschattung erleiden. Die Verschattungen können zum Beispiel durch Laub, Vogelkot oder auch durch einen bewölkten Himmel auftreten. Eine Verschattung auf einem PV-Modul ist stets mit einer Reduzierung des erzeugten Stromes verbunden, womit sich auch der Gesamtstrom drastisch reduziert, obwohl nur ein Modul nicht die volle Leistung abgibt. Um genau diese Verluste zu reduzieren, kommen die Moduloptimierer zum Einsatz. Sie beeinflussen den Maximum Power Point (MPP) in sofern, dass ein neuer Arbeitspunkt eingestellt wird. Dieser neue Arbeitspunkt hebt den Strom wieder signifikant an, erhöht damit den Gesamtstrom und verringert die Gesamtverlustleistung des Strings [10, Kapitel 18].

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen funktionierenden Messaufbau für Moduloptimierer zu entwerfen. Dabei ist entscheidend, dass die Messungen wiederholbar und vergleichbar sind.

Die Messergebnisse sollen aussagekräftig für folgende Punkte sein:

- Funktionalität des Maximum Power Point Tracking (MPPT)
- Hervorgerufene Verluste durch die Optimierer
- Effizienz der Optimierer
- Arbeitsbereiche der Optimierer
- Verhalten im Verbund mit mehreren Optimierer

Als veränderliche Parameter während der Messung sollen die Einstrahlungsstärke und der Widerstandswert der Last dienen. Das Intervall der Einstrahlungsstärke orientiert sich, an den tatsächlich in Europa gemessenen Werten. Das Intervall wurde deshalb in 100 W/m^2 Schritten von 100 W/m^2 bis 1000 W/m^2 gewählt.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die Moduloptimierer sind im Grunde DC-DC-Wandler. Diese unterscheiden sich in 3 Untergruppen:

- Hochsetzsteller (Boostconverter)
- Tiefsetzsteller (Buckconverter)
- Hoch-Tiefsetzsteller (Buck-Boostconverter)

Alle Topologien bestehen aus mindestens einer Induktivität, einem Schalter und einer Diode. Allein die Anordnung dieser drei Bauelemente untereinander entscheidet darüber, welcher DC-DC-Wandler angewendet wird. In der Leistungsklasse der PV-Module werden vorrangig Schaltungen auf dem Pulse-Width-Modulation (PWM)-Prinzip verwendet. Für Anwendungen mit einer Spannung $\leq 2\text{ V}$, wie sie zum Beispiel Batterien liefern, werden sogenannte Resonanzwandler eingesetzt. Da diese mit größeren Spannungen und Strömen nicht arbeiten, welche PV-Module liefern, wird auf die Resonanzwandler in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Bevor die einzelnen DC-DC-Topologien näher vorgestellt werden, wird geklärt welche Kriterien für die Auswahl der Schalter relevant sind. Über den Schalter lässt sich das Tastverhältnis einstellen, welches in allen drei Topologien das Verhältnis der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung definiert. Der Schalter wird je nach Bedarf durch einen IGBT, MOSFET oder Thyristor realisiert (siehe Abbildung 2.1).

	Thyristor	MOSFET	IGBT
steuernde Größe	Strom i_G	Spannung u_{GS}	Spannung u_{GE}
aktiv einschaltbar	ja	ja	ja
aktiv ausschaltbar	nein	ja	ja
Steuersignalform	Impuls	Dauersignal	Dauersignal
Steuerleistung	hoch	gering	gering
Schaltgeschwindigkeit	gering	sehr hoch	hoch
typische Schaltfrequenz	50 Hz	>50 kHz	1...50 kHz
typische max. Spannung	1 kV...10 kV	<500 V	500 V...3 kV

Abbildung 2.1: Vergleich der Schaltertypen in DC-DC Wandler
Quelle: [2, S.47]

2.1 Der Hochsetzsteller

Bei dem Hochsetzsteller sind ausgangsseitig die Spannung größer und der Strom kleiner als an der Eingangsseite der Schaltung. Diese bleibt, abgesehen von den Bauteilverlusten, am Ausgang gleich der zur Verfügung stehenden Leistung am Eingang der Schaltung [3, S.98, Kapitel 3 Boost-PWM-DC-DC Converter]. Der Schalter wird je nach Bedarf durch einen IGBT oder MOSFET realisiert (siehe Abbildung 2.1). Aufgrund der geringen Schaltfrequenz des Thyristors wird dieser in der Praxis nicht verwendet. Im folgenden Bild (2.2) wird das Ersatzschaltbild (ESB) eines Hochsetzstellers dargestellt.

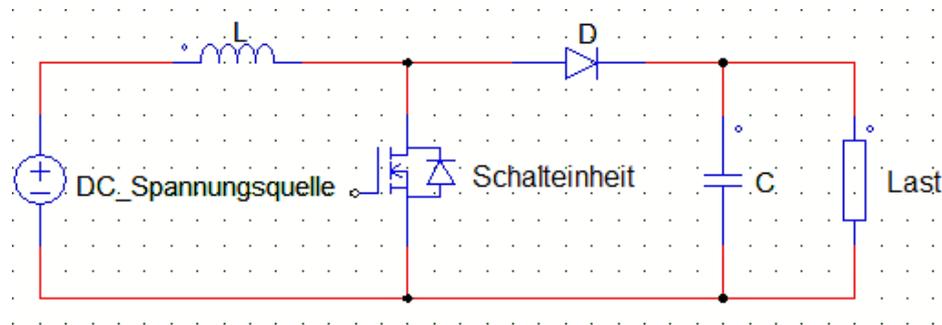


Abbildung 2.2: ESB eines Hochsetzstellers mit angeschlossenem Kondensator und Lastwiderstand

Das Tastverhältnis des Schalters ergibt sich durch den MPPT-Algorithmus und definiert damit den MPP als Arbeitspunkt. Die Ansteuerung für den Schalter wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Zudem liefert diese keinen Beitrag zur prinzipiellen Funktionsweise der Schaltung. Wie das MPPT prinzipiell funktioniert, wird in Kapitel 2.4 erläutert. Im Kapitel 2.4 wird geschildert, was ein MPP ist und wie das MPPT funktioniert.

Als erstes wird geklärt, wie die Gleichung für das Tastverhältnis am Hochsetzsteller hergeleitet wird (siehe Gleichung 2.1). Den Ausgangspunkt dazu liefert das folgende ESB. In diesem werden der Kondensator, die Diode und die Schalteinheit vernachlässigt. Berücksichtigt werden nur die Spannungen am Ein- und Ausgang der Schaltung sowie die Spule.

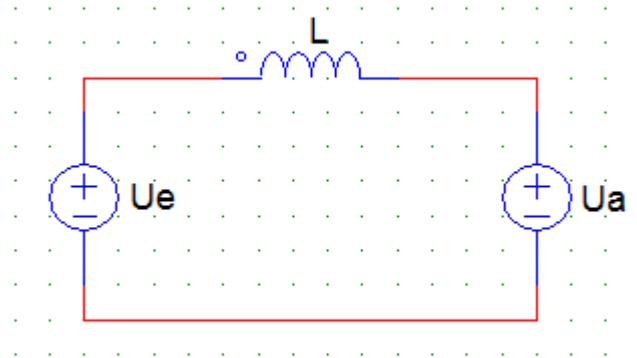


Abbildung 2.3: Ersatzschaltbild zur Herleitung des Tastverhältnisses am Hochsetzsteller

Es werden die beiden Zustände des Schalters betrachtet bei denen der leitet und sperrt. Die Anfangswerte C_1 und C_2 sind im betrachteten stationären Zustand von dem Betrag her gleich groß und heben sich somit gegenseitig auf.

Herleitung des Tastverhältnis am Hochsetzsteller

Schalter leitet:

$$0 \leq t \leq t_e \rightarrow i_L = \frac{U_e}{L} \cdot t + C_1$$

Schalter sperrt:

$$t_e \leq t \leq T \rightarrow i_L = \frac{U_e - U_a}{L} \cdot t + C_2$$

Die Stromdifferenz ist vom Betrag her in der Ein- und Ausschaltphase gleich groß

$$\frac{U_e}{L} \cdot t_e = \left| \frac{U_e - U_a}{L} \cdot t_a \right| = \frac{U_a - U_e}{L} \cdot t_a$$

mit: $T = t_e + t_a$

$$\frac{U_e}{L} \cdot t_e = \frac{U_a - U_e}{L} \cdot (T - t_e)$$

$$U_a \cdot t_e = (U_a - U_e) \cdot T$$

$$\frac{U_a \cdot t_e}{T} = U_a - U_e$$

$$\frac{t_e}{T} = D = 1 - \frac{U_e}{U_a}$$

Tastverhältnis am Hochsetzsteller

$$D = 1 - \frac{U_e}{U_a} \tag{2.1}$$

Das Tastverhältnis ist der entscheidende bzw. die grundlegende Einstellung für die Dimensionierung der restlichen Bauteile. Der Hochsetzsteller kommt zum Einsatz, wenn eine größere Gleichspannung benötigt wird, als sie vorhanden ist. Durch die Kenntnis wie groß die Eingangsspannung U_e ist und die Ausgangsspannung U_a werden soll, lässt sich das Tastverhältnis nach Gleichung 2.1 sehr genau einstellen.

Die Funktion der Spule besteht darin, zusätzliche Ladungsträger dem Kondensator zur Verfügung zu stellen. Bei der Dimensionierung der Spule muss gewährleistet werden, dass die Spule ihre gesamte im Magnetfeld gespeicherte Energie, nicht während der Sperrphase des Schalters aufgebraucht wird. Dies bedeutet, dass der Strom durch die Spule nicht zum Erliegen kommen darf. Sollte dies dennoch passieren, so spricht man von einem diskontinuierlichen Betrieb. In diesem sinkt die Ausgangsspannung U_a solange, bis sie das Niveau von der Eingangsspannung U_e erreicht hat oder durch eine neue Sperrphase wieder Ladungsträger von der Spule in den Kondensator wandern.

Im folgenden Bild werden die Stromverläufe bei leitendem und nicht leitendem Schalter dargestellt und darauf aufbauend die Vorgänge während der zwei Schaltphasen beschrieben.

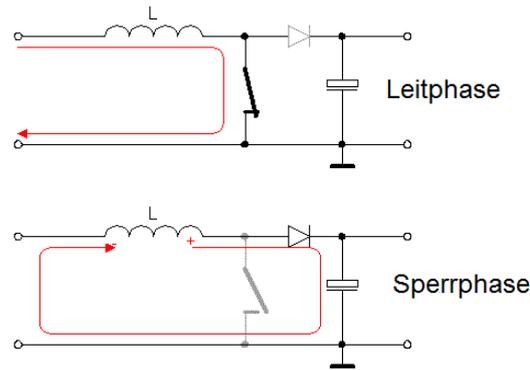


Abbildung 2.4: Strompfade im Hochsetzsteller während der Schalter geschlossen und geöffnet ist.

Quelle: [11]

Während der Leitphase fließt der Strom durch die Spule und den Schalter.

Der Stromfluss durch die Spule lässt ein Magnetfeld entstehen, in dem die Energie für die Sperrphase gespeichert wird. Während der Sperrphase steht der Last die gespeicherte Energie im Kondensator und der Spule zur Verfügung. In der Leitphase sieht diese die Energie im Kondensator.

Wenn sich der Schalter öffnet, kann die in der Spule gespeicherte Energie in Form von Ladungsträgern an den Kondensator abgegeben werden. Damit erhöht sich die Ausgangsspannung U_a .

Für die grobe Einschätzung der benötigten Induktivität zieht man die Gleichung 2.1 heran.

Gleichung zur Abschätzung der benötigten Induktivität bei dem Hochsetzsteller

$$L = \frac{U_e \cdot t_E}{\Delta i_L} \quad (2.2)$$

$$\text{mit } t_e = D \cdot T = \frac{D}{f_s}$$

$$\text{und } \Delta i_L = \left(\frac{U_e}{L} \cdot t \right) - \left(\frac{U_e - U_a}{L} \cdot t \right)$$

$$\Delta i_L = \Delta i_{L,\max} - \Delta i_{L,\min}$$

Quelle: [11]

Für eine größere Induktivität benötigt man eine größere Windungszahl. Dies wiederum

verursacht einen größeren Innenwiderstand R_i , der die Leistungsverluste anhebt. Als zweiter Faktor für die Auslegung der Spule kommt die Schaltfrequenz f_s hinzu. Je größer die Schaltfrequenz wird, desto kleiner kann die Spule ausgelegt werden. Dies beruht auf der Tatsache, dass sich mit einer größeren Schaltfrequenz die Ausschaltphase t_a des Schalters verkürzt und somit sich auch die Entladezeit der Spule reduziert.

Als letztes Bauelement für den Hochsetzsteller fehlt die Diode. Diese verhindert eine Entladung des Kondensators während der Sperrphase. Zudem sollte sie geringe Leckströme oder eine geringe Durchlassspannung haben. Wie sie z.B. eine Schottky-Diode vorweist.

Als letztes finden für den Hochsetzsteller die Strom und Spannungsverläufe über den einzelnen Bauteilen Beachtung. Zum einen für den diskontinuierlichen und zum anderen für den kontinuierlichen Betrieb. Wie zu erkennen ist die Ausgangsspannung, in der Abbildung 2.5 mit V_o bezeichnet, stets größer als die Eingangsspannung V_i . Die zweite wichtige Erkenntnis erschließt sich aus dem Stromfluss durch die Spule I_L . Dieser erreicht nie Null. Dadurch zeichnet sich der kontinuierliche Betrieb aus.

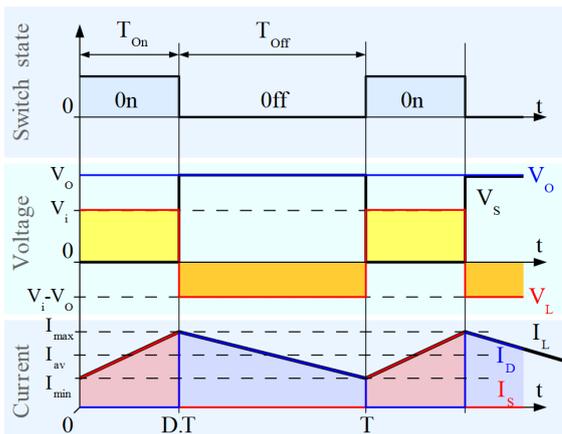


Abbildung 2.5: Strom- und Spannungsverläufe über die einzelnen Bauelemente des Hochsetzstellers im kontinuierlichen Betrieb
Quelle: [13]

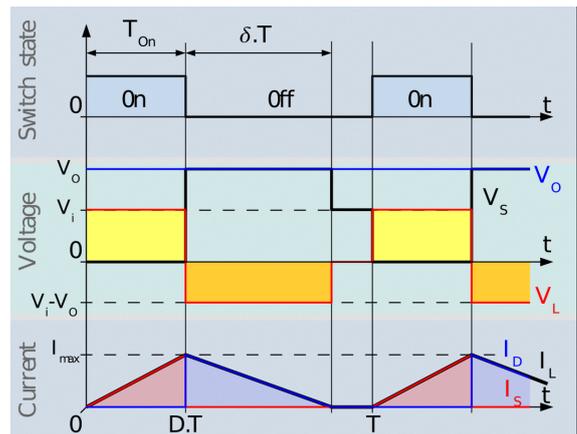


Abbildung 2.6: Strom- und Spannungsverläufe über die einzelnen Bauelemente des Hochsetzstellers im diskontinuierlichen Betrieb
Quelle: [13]

Die Abbildung 2.6 zeigt, dass in dem Zeitraum bei dem der Strom I_L gleich Null ist, die Spannung über dem Schalter V_s gleich V_i entspricht.

2.2 Der Tiefsetzsteller

Der Tiefsetzsteller ist das Gegenstück zum Hochsetzsteller. Er erfüllt die gleichen Aufgaben, nur in umgekehrter Richtung. So ist die Spannung am Ausgang stets kleiner und der Strom stets größer, als die Spannung und der Strom am Eingang der Schaltung. Wie bei dem Hochsetzsteller wird auch bei dem Tiefsetzsteller keine Veränderung der Leistung erfolgen.

Die Abbildung 2.7 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Schaltung eines Tiefsetzsteller. Auf die Darstellung für die Ansteuerung des Schalters wird wieder verzichtet.

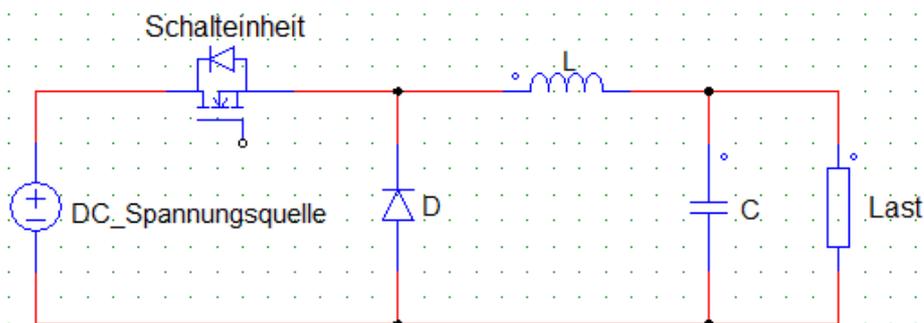


Abbildung 2.7: Ersatzschaltbild eines Tiefsetzstellers mit angeschlossenen Kondensator und Lastwiderstand

Wie bei dem Hochsetzsteller lässt sich das Verhältnis der Ausgangsspannung U_a zur Eingangsspannung U_e wieder über das Tastverhältnis D des Schalters einstellen. Somit orientiert sich die Dimensionierung der restlichen Bauteile wieder an dem Tastverhältnis. Zur Herleitung des Tastverhältnis wird das gleiche ESB wie bei dem Hochsetzsteller verwendet.

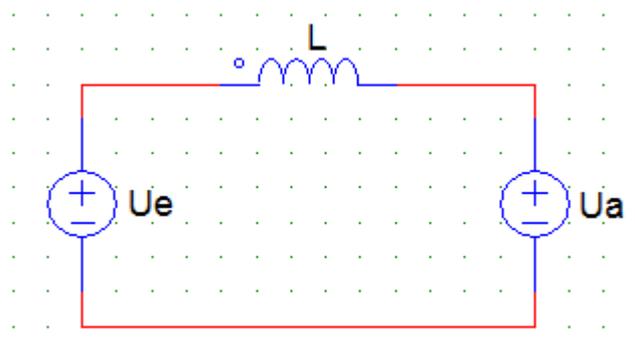


Abbildung 2.8: Herleitung Tastverhältnis am Tiefsetzsteller

Wieder ist der Ausgangspunkt der Moment des ersten Einschaltens. Die Anfangswerte C_1 und C_2 sind im stationären Zustand von dem Betrag her wieder gleich groß und heben

sich damit gegenseitig auf.

Herleitung des Tastverhältnis am Tiefsetzsteller

Schalter leitet:

$$0 \leq t \leq t_e \rightarrow i_L = \frac{U_e - U_a}{L} \cdot t_e + C_1$$

Schalter sperrt:

$$t_e \leq t \leq T \rightarrow i_L = \frac{U_a}{L} \cdot t_a + C_2$$

Die Stromdifferenz ist vom Betrag her in der Ein- und Ausschaltphase gleich groß

$$\frac{U_e - U_a}{L} \cdot t_w = \frac{U_a}{L} \cdot t_a$$

$$\text{mit: } T = t_e + t_a$$

$$\frac{U_e - U_a}{L} \cdot t_e = \frac{U_a}{L} \cdot (T - t_e)$$

$$U_e \cdot t_e = U_a \cdot T$$

$$\frac{U_a}{U_e} \cdot T = t_e$$

$$\frac{t_e}{T} = D = \frac{U_a}{U_e}$$

Tastverhältnis am Tiefsetzsteller

$$D = \frac{U_a}{U_e} \tag{2.3}$$

Das Verhältnis der Spannungen am Ein- und Ausgang lässt sich mit der Gleichung 2.3 einstellen. Davon ausgehend werden wie bei dem Hochsetzsteller die restlichen Bauelemente dimensioniert. Wieder ist bei der Spule besonders darauf zu achten, dass diese sich niemals vollständig entladen kann. Sollte sich beim Tiefsetzsteller der diskontinuierliche Betrieb einstellen, so steht der Last am Ausgang nur noch die Spannung von dem Kondensator zur Verfügung. Im Bild 2.9, sind die beiden Schalterstellungen und die zugehörigen Strompfade dargestellt.

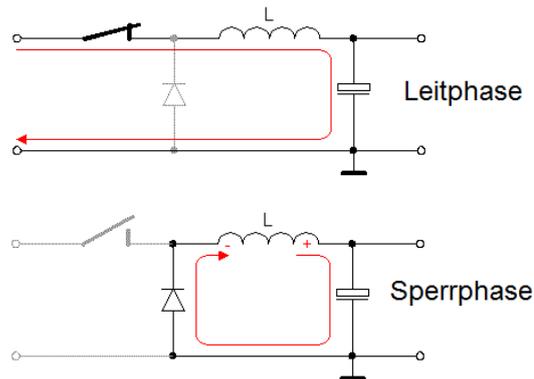


Abbildung 2.9: Strompfad im Tiefsetzsteller während der Schalter geöffnet und geschlossen ist

Quelle: [11]

Die Funktion der Spule ist erneut den Kondensator mit zusätzlichen Ladungsträgern, während der Sperrphase des Schalters, zu versorgen. Während der Schalter geschlossen ist, fließt Strom durch die Spule und der Ausgangslast. Dabei entsteht ein Magnetfeld, in dem die Energie zwischen gespeichert wird. Parallel zu diesem Vorgang steigt die Ausgangsspannung U_a immer weiter an. Hat diese den Sollwert erreicht, so tritt bei korrekter Dimensionierung die Sperrphase des Schalters ein.

In dieser stoppt der Stromfluss nicht sofort, sondern die Spule gibt weiterhin Ladungsträger an den Kondensator ab. Durch die neue Aufladung des Kondensators, während er sich selber entlädt, kann die Ausgangsspannung U_a auf ihren Sollwert gehalten werden. Der Ausgangsstrom wird während der Sperrphase des Schalters von der Spule und dem Kondensator bereit gestellt. Sollte sich diese während der Sperrphase komplett entladen, sinkt der Ausgangsstrom I_a wieder. Deswegen ist es ungemein wichtig, besonders bei einem Tiefsetzsteller darauf zu achten, dass der diskontinuierliche Betrieb nie erreicht wird. Wie bei dem Hochsetzsteller kann die Induktivität, aufgrund des sich erhöhenden Innenwiderstandes $R_{i,L}$, nicht beliebig viele Windungszahlen und somit eine größere Induktivität haben. Die Schaltfrequenz f_s geht abermals mit derselben Beziehung ein. Je größer f_s wird, desto kleiner kann die Spule ausgelegt werden. Dies hängt erneut damit zusammen, dass sich bei einer erhöhten Schaltfrequenz die Periodendauer verringert, womit sich auch der zeitliche Anteil der Sperrphase verkürzt. Somit steht

der Spule weniger Zeit zur Verfügung, um sich komplett entladen zu können.

Die Diode dient wieder zur Funktionalität der Schaltung, indem sie einen Strompfad während der Sperrphase ermöglicht.

Zum Abschluss werden nochmals die Strom und Spannungsverläufe über den einzelnen Bauelementen für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb betrachtet.

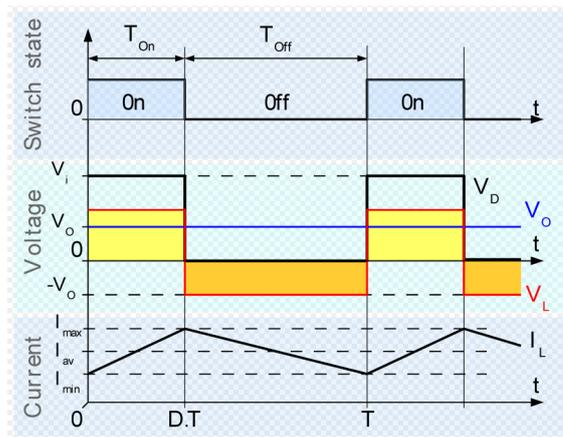


Abbildung 2.10: Strom- und Spannungsverläufe über die Bauelemente des Tiefsetzstellers im *kontinuierlichen* Betrieb
Quelle: [14]

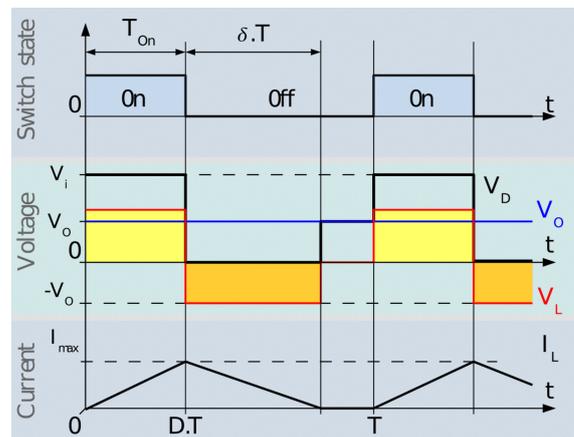


Abbildung 2.11: Strom- und Spannungsverläufe über die Bauelemente des Tiefsetzstellers im *diskontinuierlichen* Betrieb
Quelle: [14]

Im kontinuierlichen Betrieb (Abbildung 2.10) erreicht der von der Spule induzierte Strom nie den Wert null. Damit ist gewährleistet, dass stets eine Leistung am Ausgang abgegriffen werden kann. Wie deutlich zu erkennen, ist die Ausgangsspannung U_a stets kleiner als die Eingangsspannung U_e . Während der leitenden Phase liegt die gesamte Eingangsspannung über der Diode an. Die Spannung über der Spule wird negativ sobald der Schalter sperrt. In diesem Fall fällt die gesamte Eingangsspannung über dem Schalter ab. Nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz ist somit die Spulenspannung $U_L = U_D - U_a$

Im diskontinuierlichen Betrieb (Abbildung 2.11) erkennt man am Spulenstrom I_L die Lücke, welche entsteht wenn die gesamte im Magnetfeld gespeicherte Energie aufgebraucht wurde. Dadurch bricht der Stromfluss durch die Diode zusammen. Diese beginnt wieder zu sperren und nimmt dabei das Spannungsniveau von U_a an.

2.3 Der Hoch - Tiefsetzsteller

Der Hoch - Tiefsetzsteller ist eine Kombination aus den voran gegangenen DC-DC-Topologien. Abhängig vom Tastverhältnis ist die Ausgangsspannung U_a kleiner, gleich, größer als die Eingangsspannung U_e . Die Besonderheit ist die invertierte Ausgangsspannung. Das ESB gibt Aufschluss darüber, wieso.

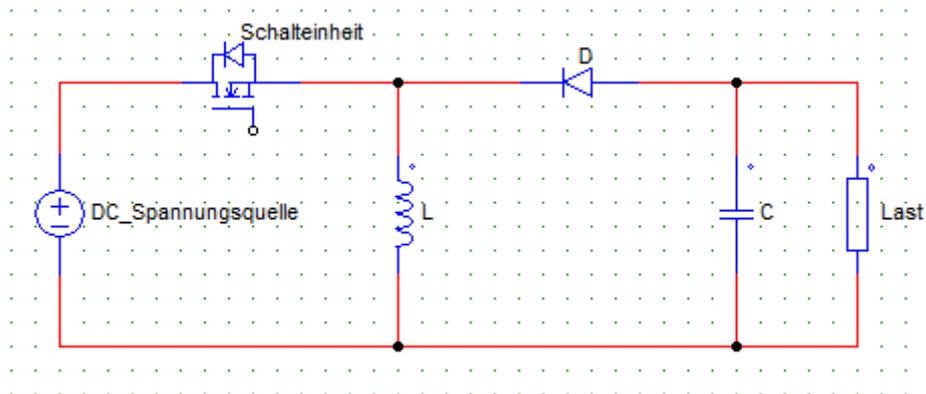


Abbildung 2.12: Ersatzschaltbild eines Hoch - Tiefsetzstellers

Das Spannungsverhältnis lässt sich mit der Formel 2.4 einstellen.

Tastverhältnis am Hoch - Tiefsetzsteller

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{D}{1 - D}$$

$$D = \frac{U_a}{U_a + U_e} \quad (2.4)$$

Je nachdem wie das Tastverhältnis eingestellt wird, ergibt sich das jeweilige wandlertypische Verhalten. Die Tabelle 2.3 gibt Auskunft darüber, welches Tastverhältnis zu welchem Verhalten führt. Bei einem Tastverhältnis von D gleich eins würde ein Ausdruck entstehen, bei dem eine Division durch null erfolgt. Theoretisch ist dies nicht möglich. In der Praxis lässt sich dieses Verhältnis durchaus einstellen. Allerdings liegt dann die gesamte Eingangsspannung über der Diode an und die Spannungsquelle ist kurzgeschlossen. Die Spannung am Ausgang beträgt null Volt. Dadurch wird auch praktisch gesehen dieses Tastverhältnis bedeutungslos.

Tastverhältnis	Spannungsverhältnis
$D < 0,5$	$U_a < U_e$
$D = 0,5$	$U_a = U_e$
$D > 0,5$	$U_a > U_e$

Tabelle 2.1: Einfluss des Tastverhältnis auf das Spannungsverhältnis

Durch die Diode wird der Stromfluss gezwungen seine Polarität zu ändern, was wiederum die negative Spannung hervorruft. In der Abbildung 2.13 werden die Strompfade dargestellt.

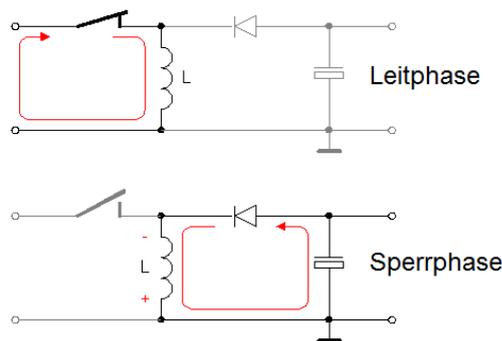


Abbildung 2.13: Strompfade im Tiefsetzsteller während Schalter geschlossen und geöffnet ist

Quelle: [11]

Die Funktion der Spule ist wieder Ladungsträger, während der Sperrphase, dem Ausgangskondensator zur Verfügung zu stellen und somit die gewünschte Spannung einzustellen. Da dies das gleiche Verhalten wie bei dem Hoch- und Tiefsetzsteller ist, wird darauf an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Als letztes werden wieder Strom und Spannungsverläufe über den Bauelementen betrachtet.

Eine Abweichung von dem Verhalten der Ströme und Spannungen, im Vergleich zu den beiden anderen Topologien (Kapitel 2.1 und 2.2), ist die Spannung über der Diode. Laut zweitem Kirchhoffschen Gesetz ergibt sich, dass $U_D = U_e - U_a$ ist. Wegen der durchgehend negativen Spannung am Ausgang, werden die Ein- und Ausgangsspannung addiert um die Spannung über die Diode zu bilden. In der Lücke des diskontinuierlichen Betriebes, fällt die Spannung über der Spule wieder auf null ab und die Diode nimmt das Spannungsniveau der Ausgangsspannung U_a an. Die restlichen Kurvenverläufe verhalten sich ebenso wie in den anderen beiden Schaltungen.

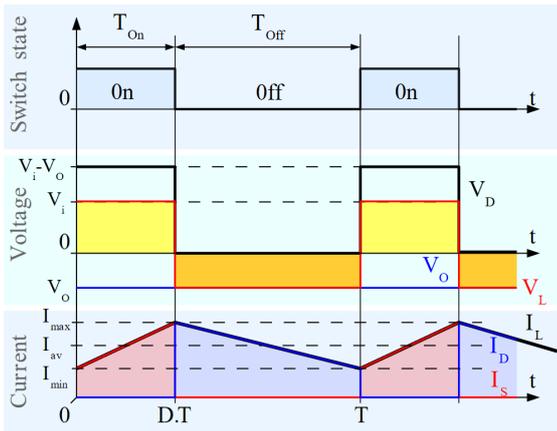


Abbildung 2.14: Strom und Spannungsverläufe über die Bauteile des Hoch - Tiefsetzstellers im *kontinuierlichen* Betrieb
Quelle: [14]

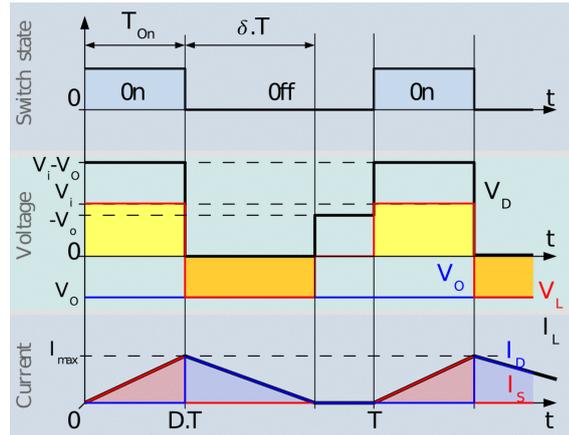


Abbildung 2.15: Strom und Spannungsverläufe über die Bauteile des Hoch - Tiefsetzstellers im *kontinuierlichen* Betrieb
Quelle: [14]

2.4 Das Maximum Power Point Tracking

Als MPP wird jener Arbeitspunkt auf der Ausgangskennlinie des PV-Moduls bezeichnet, bei dem die maximale Leistung abgegeben wird.

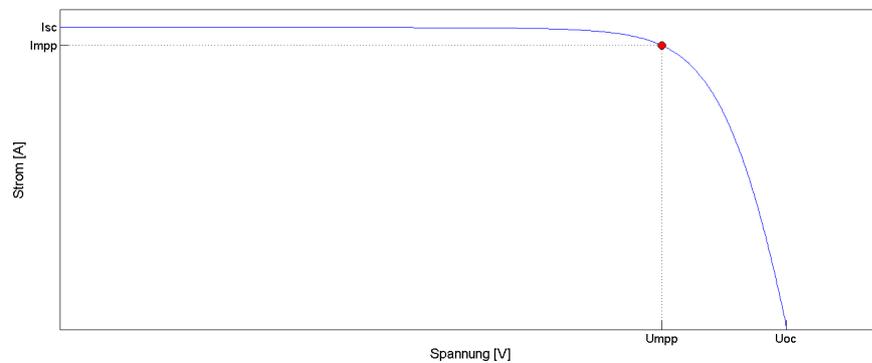


Abbildung 2.16: Ausgangskennlinie eines PV-Moduls in der I/U Darstellung mit eingezeichneten MPP

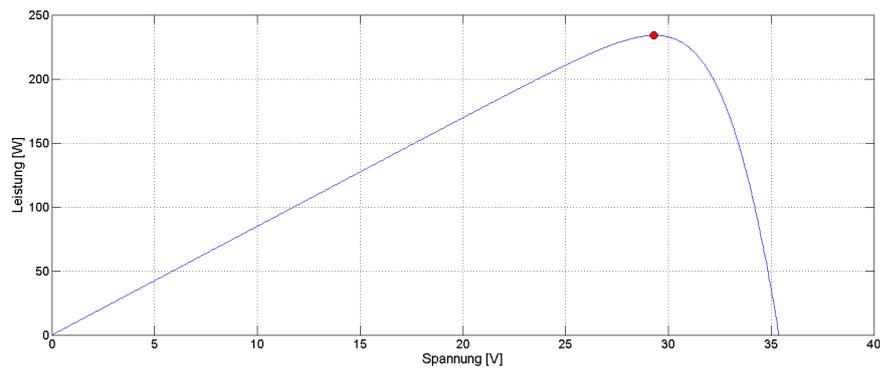


Abbildung 2.17: Ausgangskennlinie eines PV-Moduls in der P/U Darstellung mit eingezeichneten MPP

Der MPP ist kein stabiler Arbeitspunkt, er ist abhängig von der Einstrahlungsstärke und der Temperatur.

Bei jeder Änderung von Temperatur oder Einstrahlungsstärke, ergibt sich eine neue Kennlinie mit einem neuen MPP. Was wiederum verdeutlicht, dass ein statisch eingestellter MPP schnell nicht mehr dem realen MPP entspricht. Deswegen ist ein dynamisches Maximum Power Point Tracking MPPT erforderlich.

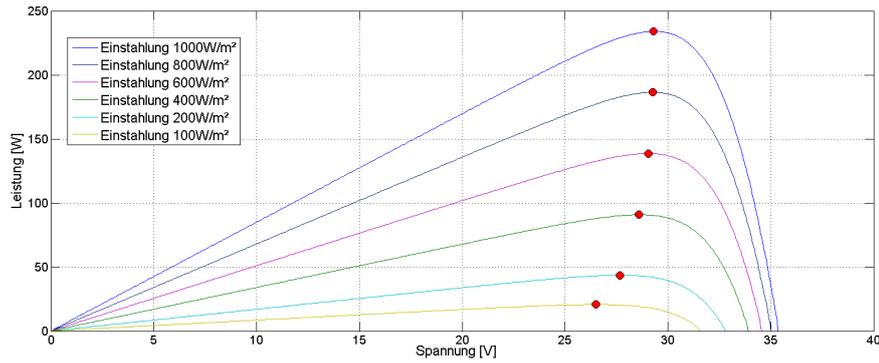


Abbildung 2.18: Ausgangskennlinien eines PV-Moduls in der P/U Darstellung bei Veränderung der Einstrahlungsstärke mit eingezeichneten MPP

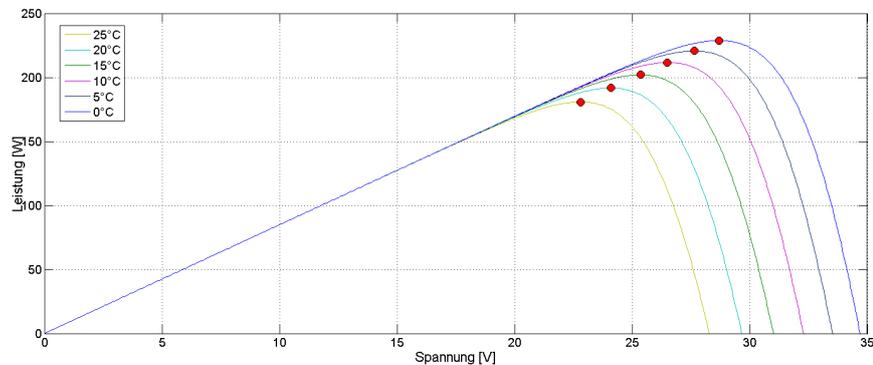


Abbildung 2.19: Ausgangskennlinien eines PV-Moduls in der P/U Darstellung bei Veränderung der Temperatur mit eingezeichneten MPP

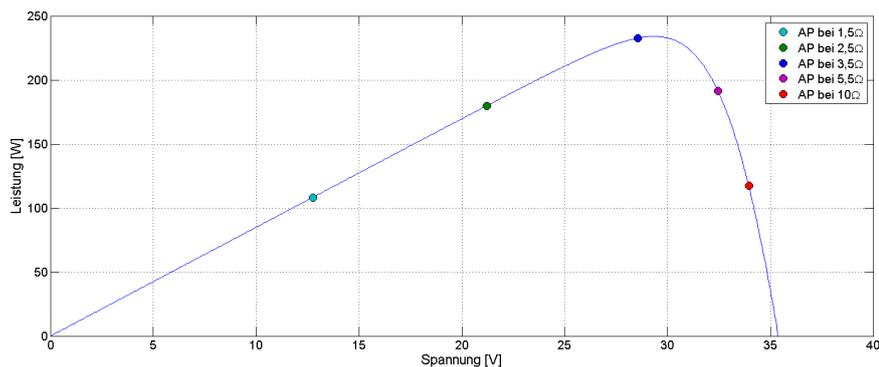


Abbildung 2.20: Ausgangskennlinie eines PV-Moduls in der P/U Darstellung bei Veränderung der Last mit eingezeichneten Arbeitspunkten

Im Laufe der Zeit wurden viele Verfahren entwickelt, um den MPP zu ermitteln. Bei den Verfahren handelt es sich um Algorithmen, die von einem Mikrocontroller ausgeführt werden. In der Praxis haben sich zwei Algorithmen durchgesetzt, welche bei den meis-

ten MPP-Trackern eingesetzt werden.

Zum einen findet die Methode der Lastsprünge, auf Englisch Perturb and Observe, Anwendung. Bei dieser wird die Last des PV-Moduls in kleinen Intervallen stetig verändert und dabei die abgegebene Leistung gemessen. Solange der gemessene Leistungswert größer ist, als der Wert der vorherigen Periode, wird die Last in die gleiche Richtung weiter verändert. Ab dem Punkt, bei dem der Leistungswert kleiner wird, im Vergleich zum Wert der vorherigen Periode, wird auch die Größe der Last in die andere Richtung verändert. Dies führt zu einem Oszillieren des Arbeitspunktes um den MPP [12].

Das zweite etablierte Verfahren nennt sich Methode des steigenden Leitwerts.

Bei dieser Variante wird stetig der Anstieg des aktuellen Arbeitspunktes gemessen. Der MPP befindet sich an dem Maxima der P-U-Kennlinie 2.17. An dieser Stelle ist der Anstieg gleich null. Ist der Aktuelle Arbeitspunkt links von dem MPP, ist der Anstieg größer null, sollte er rechts davon liegen kleiner null. Bei dieser Methode wird der MPP genauer ermittelt, aber ebenfalls nicht genau erreicht und es entsteht erneut ein oszillieren um den MPP.

Die höhere Genauigkeit bedeutet aber auch einen größeren Aufwand bei der Hardware und Software Gestaltung. Durch die länger benötigte Rechenzeit, bleibt die Anlage länger nicht in MPP Nähe, was größere Verluste bedeutet [12].

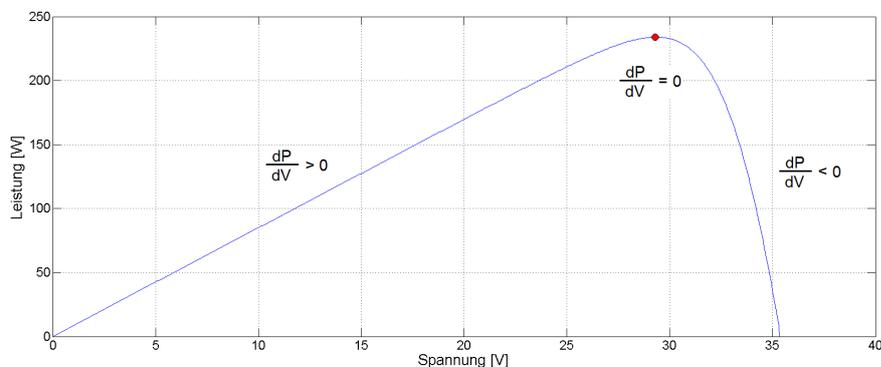


Abbildung 2.21: Darstellung der Arbeitspunktermittlung durch Lastsprünge

Die beiden vorgestellten Verfahren haben den Nachteil, dass der wirkliche MPP bei einer Verschattung, welche nur einen Teil des PV-Moduls betrifft, nicht gefunden werden kann, siehe Abbildung 2.22. Die Ansteuerung des falschen MPP, beruht auf der Tatsache, dass man die komplette Kennlinie vorher durchfahren müsste. Zusätzliche Verluste entstehen dabei durch die zusätzliche Elektronik und die für den Suchvorgang benötigte Zeit. Diese Verluste würden auch im unverschatteten Fall auftreten, deswegen wird der schlechtere MPP von den meisten Herstellern in Kauf genommen. Die besondere Form der Kennlinie (Abbildung 2.22) entsteht, durch die verbauten Bypass-Dioden im PV-

Modul. Diese leiten den Stromfluss im PV-Modul um, wenn einzelne Zellen verschattet sind.

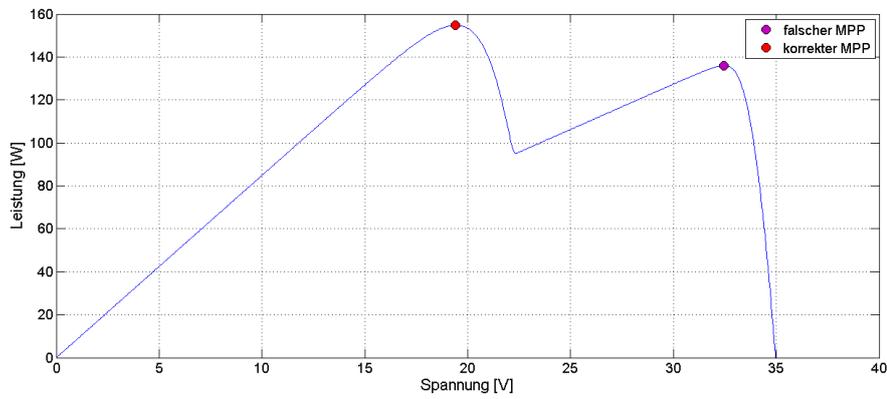


Abbildung 2.22: Die P/U Kennlinie eines Moduls, welches teilweise verschattet ist

3 Vorstellung der Messgeräte, Prüfgeräte und Optimierer

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Optimierer und die dazugehörigen Messgeräte und Messaufbauten vorgestellt.

3.1 Die Mess- und Prüfgeräte

Die Mess- und Prüfgeräte sind in einem Verbund von mehreren Einzelgeräten in einem Prüfstand von der Firma Spitzenberger & Spies vereint. Der Prüfstand war ursprünglich für Messung von Wechselrichtern gedacht. Dadurch, dass die Optimierer die gleichen Eingangsparameter haben und ihre abgegebene Leistung in einen Wechselrichter einspeisen, ist dieser Messstand auch für die Untersuchung von Optimierer geeignet. Die Messergebnisse am Ausgang der Optimierer werden durch die Elektronische Last der Firma ET Instrumente GmbH aufgenommen.

Für diese Arbeit wurden folgende Komponenten von der Firma Spitzenberger & Spies und Einzelgeräte anderer Hersteller verwendet:

- Photovoltaik-Simulator Typ PVS 1000/LV
- linearer Leistungsverstärker Typ PAS 2500
- Analyser Reference System Typ ARS 16/1
- Sycore / PC104

3.1.1 Photovoltaik-Simulator Typ PVS 1000/LV

Der Photovoltaik-Simulator (PVS) ist eine DC-Quelle für die sehr genaue Nachbildung von Kennlinien eines PV-Moduls, welche in der IEC/EN 50530 gefordert werden. Die Simulation der Kennlinie wird durch das Ein-oder Zwei-Dioden-Modell berechnet, siehe Abbildung 3.1 und 3.2.

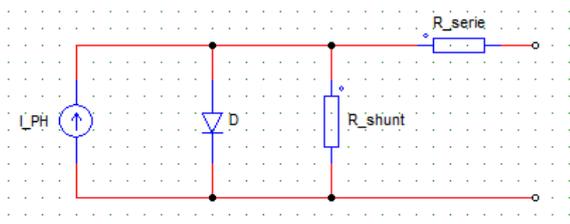


Abbildung 3.1: Ein-Diodenmodell einer Solarzelle

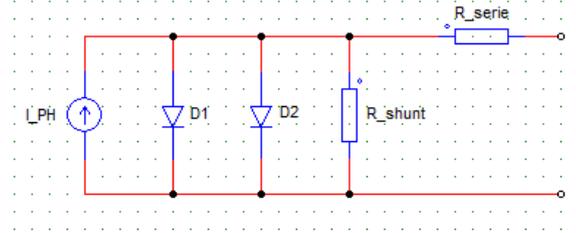


Abbildung 3.2: Zwei-Diodenmodell einer Solarzelle

Es können zudem Solarzellen verschiedener Technologien, wie z.B. mono- und polykristalline, simuliert werden. Um realitätsgetreue Messungen durchzuführen, können beliebige Einstrahlungsstärken sowie Teilverschattungen unterschiedlicher Zeitdauer eingestellt werden[8].

In den folgenden Tabellen werden die Kenndaten der simulierten PV-Module vorgestellt. In der Tabelle 3.1 werden die Kenndaten im unverschatteten Fall dargestellt, in Tabelle 3.2 jene im verschatteten Fall. Die Verschattung betrifft 50 % des PV-Moduls. Im verschatteten Bereich nimmt auch die Einstrahlungsstärke um 50 % ab. In Abbildung 2.16 und 2.17 wird verdeutlicht, wo die genannten Parameter in den Tabellen, auf den Kennlinien der PV-Module zu finden sind.

Bestrahlungsstärke [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [A]	U _{mpp} [V]	I _{mpp} [A]	P _{mpp} [W]
100	31,36	0,8494	25,94	0,7293	18,82
200	32,66	1,699	27,14	1,521	41,29
300	33,38	2,548	27,75	2,313	64,17
400	33,88	3,398	28,17	3,096	87,21
500	34,26	4,247	28,21	3,908	110,3
600	34,56	5,097	28,48	4,678	133,2
700	34,82	5,946	28,48	5,481	153,1
800	35,04	6,795	28,48	6,276	178,7
900	35,24	7,645	28,48	7,064	201,2
1000	35,41	8,494	28,42	7,861	223,4

Tabelle 3.1: Arbeitspunkte der PVS bei den getesteten Einstrahlungsstärken im unverschatteten Fall

Bestrahlungsstärke [W/m^2]	U_{oc} [V]	I_{sc} [A]	U_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	P_{mpp} [W]
100	30,87	0,847	16,61	0,7275	12,09
200	32,22	1,696	17,43	1,514	26,39
300	32,96	2,546	17,86	2,297	41,02
400	33,47	3,395	17,95	3,106	55,75
500	33,86	4,245	18,15	3,882	70,47
600	34,17	5,094	18,24	4,667	85,14
700	34,43	5,943	18,24	5,468	99,73
800	34,65	6,793	18,24	6,261	114,2
900	34,85	7,642	18,28	7,029	128,5
1000	35,03	8,492	18,19	7,842	142,7

Tabelle 3.2: Arbeitspunkte der PVS bei den getesteten Einstrahlungsstärken im verschatteten Fall. Die Einstrahlungsstärke im verschatteten Bereich nimmt um 50 % ab.

3.1.2 linearer Leistungsverstärker Typ PAS 2500

Der Leistungsverstärker PAS 2500 ist ein Linearverstärker, der kurzzeitig stark überlastbar ist. Die Nennleistung kann bei einem Leistungsfaktor von 0,7 induktiv - 1 - 0,7 kapazitiv entnommen werden. Durch die Gegenkopplung über alle Stufen sind der Klirrfaktor, die Phasenverschiebung zwischen Ansteuer- und Ausgangssignal sowie der Innenwiderstand und somit der Spannungsrückgang bei Belastung sehr gering [5]. Der PAS simuliert das Versorgungsnetz mit einem sehr geringen Klirrfaktor. Die Parameter für das Versorgungsnetz orientieren sich in dieser Arbeit an dem Europäische Wechselstromnetz. Dieses besteht typischerweise aus einer sinusförmigen Wechselspannung von 230 V mit 50 Hz. Die Parameter, welche an die PAS übermittelt werden, sind so gewählt, dass sich diese Spannung einstellt. Das AC - Netz ist für die Optimierer nicht direkt sichtbar, aber die Wechselrichter benötigen ein vorhandenes Netz um den Betrieb aufzunehmen. Damit die Messungen praxisnah erfolgen, werden die Wechselrichter benötigt, was den PAS unerlässlich macht.

3.1.3 Analyser Reference System Typ ARS 16/1

Das Analysator Referenz System (ARS) ermöglicht die Oberschwingungsmessung nach EN 61000-3-2 und die Flickermessung nach EN 61000-3-3. Er beinhaltet die Normimpedanz gemäß IEC 725, einen integrierten Analysator (der B10 von der Firma Boconsult) sowie eine Phasen- und Strombereichsumschaltung [6].

Das ARS ist in der Lage durch seine zwei Fast-Fourier-Transformation (FFT) Kanäle gleichzeitig die Messung und Auswertung der Oberschwingungsströme des Prüflings und die Oberschwingungsspannungen der Quelle durchzuführen.

3.1.4 Sycore / PC104

Die Steuer- und Messeinheit des Prüfstandes wird von dem Sycore realisiert. Er gibt die verschiedenen Kurvenformen vor, mit denen u. a. der PAS das sinusförmige Wechselstromnetz erstellen kann. Neben dem Steuersignal in Sinusform sind ebenfalls Dreieck, Rechteck, Puls, Rampe oder auch frei programmierbare Gemische aus harmonischen und subharmonischen Kurvenformen wählbar. Er ist zudem für die Messung von Spannung, Strom, Leistung, Leistungsfaktor, Crest Faktor und der Spitzenwerte zuständig. Die wichtigsten Komponenten des Sycore sind:

- frequenzstabiler Taktgenerator (10 MHz)
- Frequenzaufbereitung (17bit-Teiler)
- Adresszähler (bis 1 MByte)
- Kurvenformspeicher (RAM; bis 1 MByte)
- Amplitudenmultiplizierer (für jeden Kanal/Phase)
- Digital/Analog-Konverter (DAC, für jeden Kanal/Phase)

Ein Adresszähler liest die eingegebenen digitalen Werte aus dem Kurvenformspeicher. In diesen werden die gewünschten Kurvenformen abgespeichert. Im Amplituden-Multiplizierer wird die Amplitude für die gewünschte Spannung eingestellt. In dieser Arbeit werden ausschließlich 230 V verwendet. Der Digital/Analogkonverter wandelt zum Schluss das digitale Signal in ein analoges Steuersignal um. Dieses wird anschließend von der PAS verwendet. Die Arbeitsweise wird im folgenden Flussdiagramm, Abbildung 3.3, veranschaulicht [7].

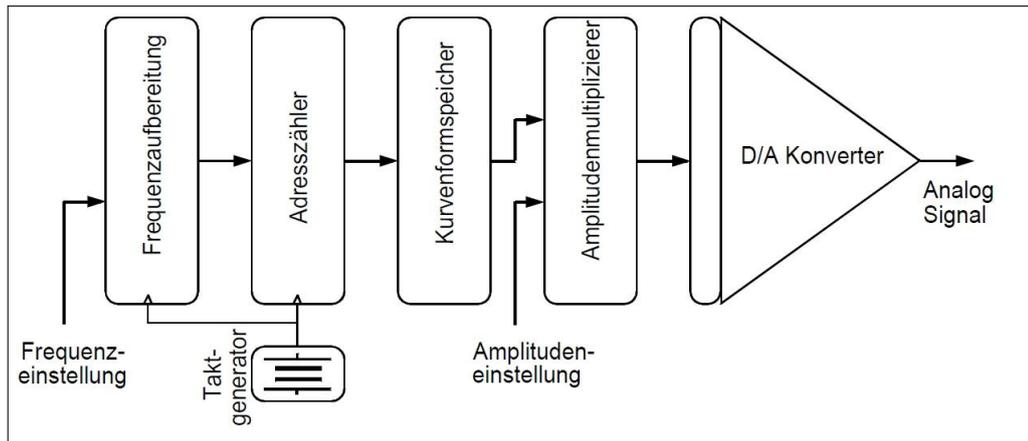


Abbildung 3.3: Arbeitsweise des Sycore. Dargestellt als Flussdiagramm
Quelle: [7]

3.2 Die Moduloptimierer

Die Moduloptimierer sollen, wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, die Verluste, im String die durch ein oder mehrere verschattete PV-Module hervorgerufen werden, reduzieren. Durch das erste Kirchhoffsche Gesetz bestimmt das stromschwächste PV-Modul in einem String, also einer Reihenschaltung von mehreren PV-Modulen, den maximalen Strom. Sollte nun mindestens ein PV-Modul verschattet sein, siehe Abbildung 3.5, verursachen die Bypass-Dioden eine neue I/U Kennlinie mit einem neuen MPP. Dieser neue MPP des PV-Moduls begrenzt den gesamten Strom im String.

Dies führt dazu, dass sich der Arbeitspunkt aller nicht verschatteten Module von dem MPP entfernt und womit sich die gesamte zur Verfügung stehende Leistung drastisch reduziert. Die Optimierer sind in der Lage, den Arbeitspunkt jedes einzelnen PV-Modules zu variieren. Jedes Modul besitzt einen Optimierer, welcher auch nur auf dieses direkten Einfluss hat. Die Optimierer werden zwischen der Anschlussdose des PV-Moduls und dem String verschaltet, bzw. die Ausgangsseite der Optimierer zu dem String verschalten. Die Beeinflussung des Arbeitspunktes geschieht durch eine Veränderung der Spannung. Dies ermöglichen die DC-DC-Topologien, siehe Kapitel 2, in den Optimierern. Bei unterschiedlich großen Strömen in einem String, wird der MPP bei dem schwächsten PV-Modul verlassen und ein Arbeitspunkt mit größerem Strom angefahren. Dadurch sinkt die abgegebene Leistung des beeinflussten PV-Moduls, aber die gesamte zur Verfügung stehende Leistung wird erhöht.

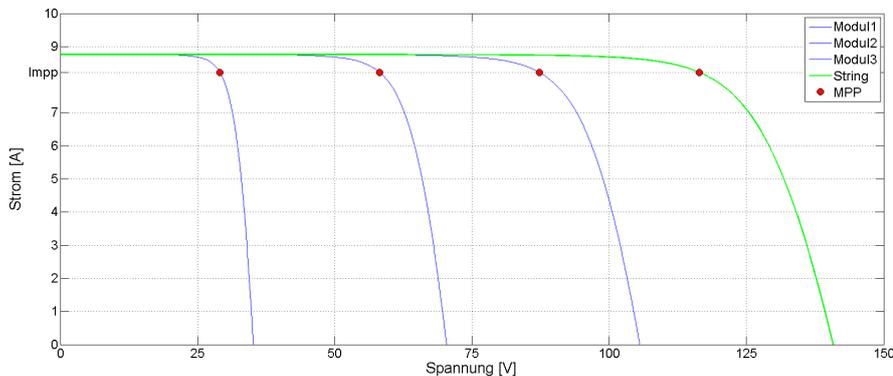


Abbildung 3.4: Modulstring von 4 Modulen ohne auftretende Verschattungseffekte.

3.2. Die Moduloptimierer

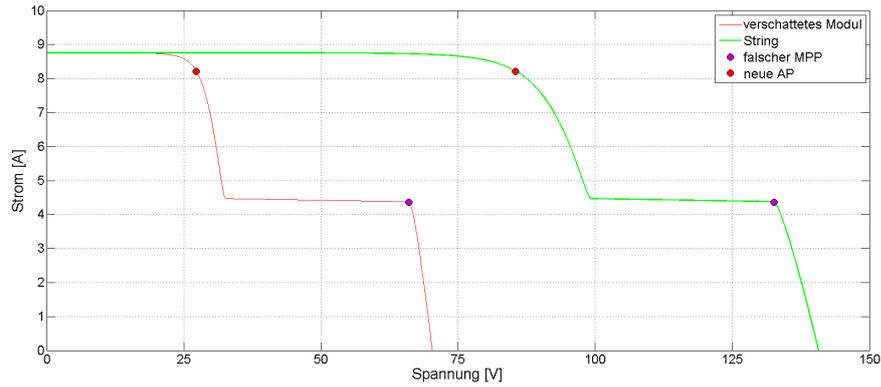


Abbildung 3.5: Modulstring von 4 Modulen mit auftretenden Verschattungseffekt auf einem Modul. Der neue Arbeitspunkt wird durch die Moduloptimierer eingestellt.

Untersucht wurden die Modelle P350I von SolarEdge, der TS4-O von Tigo Energy und der AMPT-X V40 LC4 von AMPT.

Eingangsseitig	Ausgangsseitig
$P = 375 \text{ W}$	$P = 0 - 375 \text{ W}$
$U = \text{max. } 52 \text{ V}$	$U = 0 - V_{oc} (52 \text{ V})$
$U_{\text{nenn}} = 16 - 48 \text{ V}$	
$I = \text{max. } 10 \text{ A}$	

Tabelle 3.3: Betriebsparameter des TS4-O

Eingangsseitig	Ausgangsseitig
$P = 300 \text{ W}$	$P = 300 \text{ W}$
$U = \text{max. } 52 \text{ V}$	$U = 0 - 46 \text{ V}$
$U_{\text{MPPT-Range}} = 10 - 38 \text{ V}$	$I = 9,2 \text{ A}$
$I = \text{max. } 8,5 \text{ A}$	

Tabelle 3.4: Betriebsparameter des AMPT-X V40 LC4

Eingangsseitig	Ausgangsseitig
$P = 350 \text{ W}$	$P = 350 \text{ W}$
$U = \text{max. } 60 \text{ V}$	$U = 0 - 60 \text{ V}$
$U_{\text{MPPT-Range}} = 16 - 60 \text{ V}$	$I = 15 \text{ A}$
$I = \text{max. } 11 \text{ A}$	

Tabelle 3.5: Betriebsparameter des P350I

4 Die Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die einzelnen vorgenommenen Messschaltungen erläutert und die dazugehörigen Messergebnisse präsentiert.

Für den Entwurf eines aussagekräftigen Messaufbaus wurden verschiedene Messaufbauten getestet und das Verhalten der Optimierer beobachtet und ausgewertet. Im folgenden wird verstärkt auf die beiden erfolgversprechendsten Schaltungen eingegangen. Im Abschluss werden die restlichen Versuchsaufbauten vorgestellt und kurz das Verhalten der Optimierer darin erläutert.

4.1 Messaufbau: 1

Ziel dieses Aufbaus ist es, das Verhalten der Optimierer im Einzelfall zu testen. Das heißt, es befindet sich nur ein Optimierer im String, siehe Abbildung 4.1. Durch diesen können die Leistungsverluste der Optimierer bestimmt werden. Zudem können Aussagen über das Verhalten, in Bezug auf ihr MPPT und Optimierungsverhalten getroffen werden.

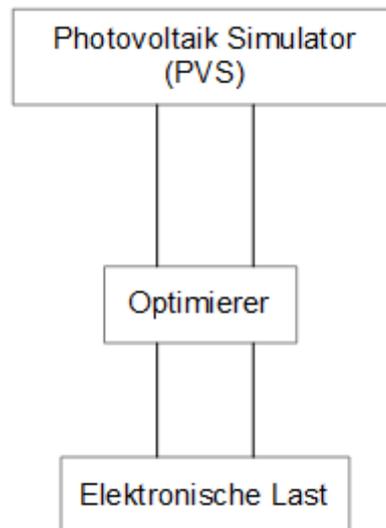


Abbildung 4.1: Aufbau der Messschaltung zum Testen des Verhaltens einzelner Optimierer

Interessant bei dieser Schaltung ist das MPPT, sowie das auftretende optimierende Verhalten. Anfangs wurde vermutet, dass sich dieses nur einstellt, wenn sich mindestens

eine zweite Spannungsquelle, also ein zusätzlicher Optimierer an einem PV-Modul, im String befindet. So könnten diese eine Stromdifferenz zwischen ihren Ein- und Ausgängen registrieren und das Hoch- oder Tiefsetzstellen beginnen, um die Stromdifferenz zu verringern. Diese Messschaltung zeigt aber, dass die Optimierung bereits einsetzt, wenn die angeschlossene Last einen Arbeitspunkt auf der Kennlinie ergibt, welcher vom MPP abweicht (siehe Abbildung 2.20). Warum an dieser Stelle nicht das reine MPPT eingreift, konnte bisher noch nicht geklärt werden.

Zuerst wird das Verhalten an der Eingangsseite der Optimierer betrachtet. Das heißt wie sich die Arbeitspunkte auf der vorgegebenen I/U Kennlinie einstellen und wie weit diese vom MPP abweichen. Die Werte wurden in einem Einstrahlungsbereich von 100 - 1000 W/m² und mit den Lastwerten von 3,5 Ω und 5,5 Ω aufgenommen. In der anderen Variante wurde eine Zelle des PV-Modul um 50 % verschattet. In dem verschatteten Bereich ist die Einstrahlungsstärke halb so groß wie im nicht verschatteten Bereich.

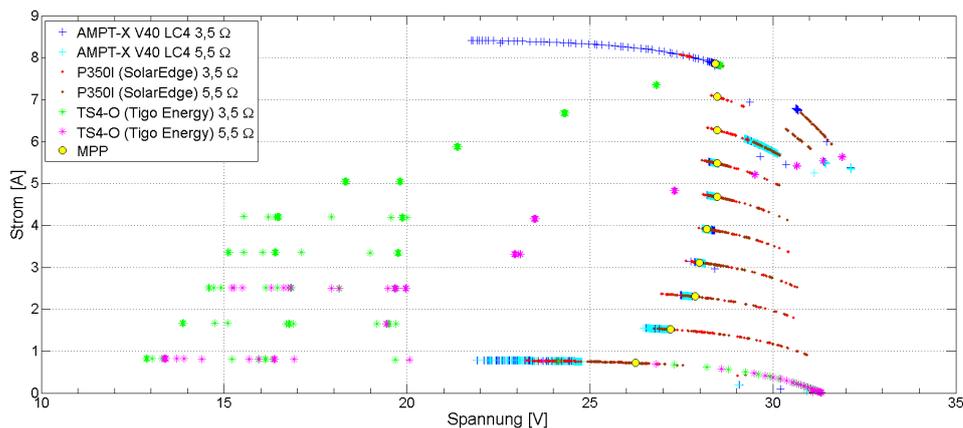


Abbildung 4.2: Verhalten der drei Optimierer auf der Eingangskennlinie, eines **vollständig unverschatteten Moduls**, bei einem Einstrahlungsintervall von 100-1000 W/m² mit jeweils einem angeschlossenen Widerstand von 3,5 Ω und 5,5 Ω als Last.

In Abbildung 4.2 ist das Verhalten der Optimierer auf der Eingangskennlinie im Einzelbetrieb zu erkennen. Die dargestellten Messpunkte sind jene, welche die Optimierer auf der Eingangskennlinie des simulierten PV-Modul eingestellt haben. Deutlich sichtbar sind die zehn verschiedenen Einstrahlungsstärken, welche sich klar voneinander abgrenzen. Die Einstrahlungsstärke steht in einem linearen Verhältnis zu der erzeugten Stromstärke. Dadurch sind die verschiedenen Einstrahlungsstärken klar voneinander abgegrenzt. Deutlich zu sehen sind die Unterschiede, wie der MPP angefahren wird. Der Optimierer AMPT-X-V40 LC4 von der Firma Amtpt fährt in fast allen Einstrahlungsbereichen und bei beiden angeschlossenen Lasten den MPP zuverlässig an.

Der Einfluss der angeschlossenen Last wird ab einer Einstrahlungsstärke von 800 W/m^2 sichtbar. Bei dem Lastwert von $5,5 \Omega$ wird der MPP ab 800 W/m^2 nicht mehr erreicht. Bei einer Last von $3,5 \Omega$ treten ebenfalls Abweichungen bei 800 W/m^2 und 900 W/m^2 auf, bei 1000 W/m^2 wird der MPP jedoch wieder erreicht.

Es wird eine Regelmäßigkeit sichtbar, dass mit zunehmender Belastung, welche der Optimierer an seinem Ausgang sieht, der Anpassungswirkungsgrad sinkt.

Der Anpassungswirkungsgrad beschreibt das Abweichen des eingestellten Arbeitspunktes zu dem MPP. Das Verhalten wurde bis zu 10Ω getestet. Bei diesem Lastwert entsteht eine deutliche Abweichung von dem MPP bereits bei einer Einstrahlungsstärke von 700 W/m^2 . Da sich das MPPT mit zunehmender Last zu verschlechtern scheint, wurden im folgenden mit kleinen Widerstandswerten gearbeitet.

Der P350I von SolarEdge weist ein ähnliches Verhalten auf. Bei kleinerer Last erreicht er bei allen Einstrahlungsstärken den MPP. Betrachtet man das Verhalten bei $5,5 \Omega$ wird deutlich, dass auch hier ab 800 W/m^2 der MPP nicht mehr erreicht wird.

Der TS4-O von Tigo Energy hingegen erreicht nur einmalig den MPP. Warum dieser Optimierer seinen Arbeitspunkt in kleineren Spannungsbereichen sucht, hängt wohl damit zusammen, dass er für den verschatteten Fall konzipiert ist und somit gezielt den Bereich anfährt, in dem sich der wirkliche MPP befindet. Dies bestätigt die Messung in der eine Verschattung simuliert wird (siehe Abbildung 4.3).

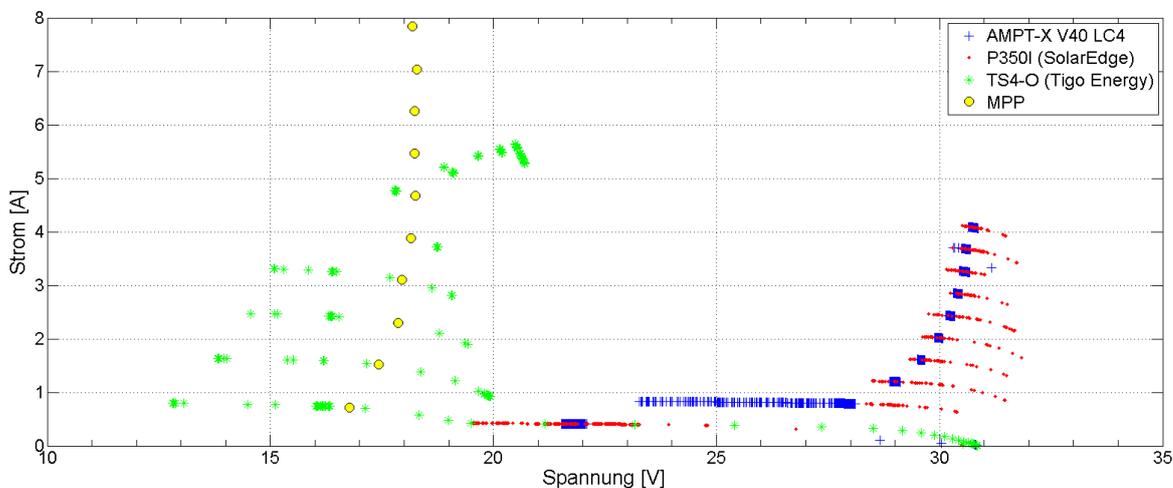


Abbildung 4.3: Verhalten der drei Optimierer auf der Eingangskennlinie, mit einer zu **50 % verschatteten Zelle** bei einem Einstrahlungsintervall von $100\text{-}1000 \text{ W/m}^2$ mit einem angeschlossenen Widerstand von $3,5 \Omega$ als Last. In dem verschatteten Bereich des Moduls nimmt die Einstrahlungsstärke um die Hälfte ab.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Optimierer von Ampt und SolarEdge den MPP nicht korrekt einstellen können. Weswegen dieses Verhalten auftritt, wurde in 2.4 erläutert. Der TS4-O von Tigo Energy hingegen schafft es, in den niedrigen Einstrahlungsberei-

chen den wirklichen MPP zu finden. Warum das erfolgreiche Tracking allerdings bei höheren Einstrahlungsstärken versagt, konnte bisher noch nicht geklärt werden. Durch den Vergleich der Spannungen, welche an der Eingangs- und Ausgangsseite der Optimierer anliegen, können Rückschlüsse auf die verwendete DC-DC-Topologie erfolgen.

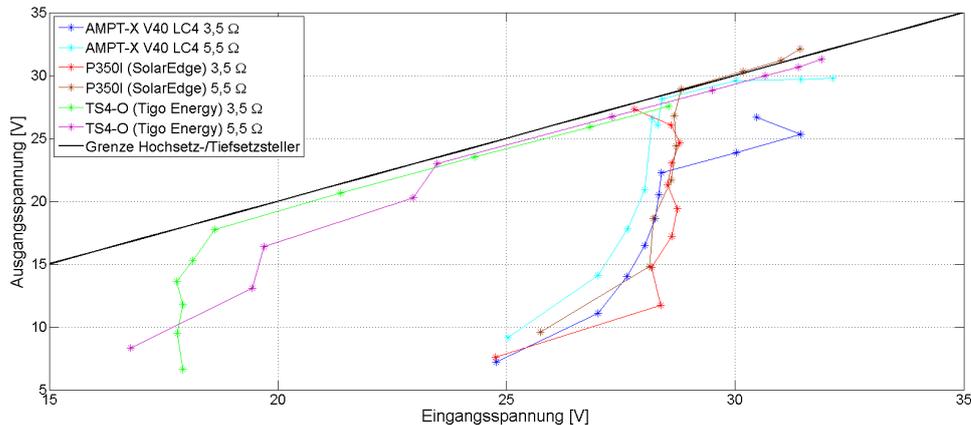


Abbildung 4.4: Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierern. An ihrer Ausgangsseite ist die Last von 3,5 Ω und 5,5 Ω zusehen. Eingangsseitig wurde die Einstrahlungsstärke im Bereich von 100 W/m² - 1000 W/m² variiert. Zudem liegt **keine Verschattung** vor. Die Grenze von Hochsetzstellen und Tiefsetzstellen kennzeichnet die durchgezogene schwarze Linie. Auf dieser ist die Spannung am Eingang gleich der am Ausgang des Optimierers. Werte unter der Linie zeigen das Verhalten eines Tiefsetzstellers, darüber die eines Hochsetzstellers.

Um festzustellen, ob und wann die Optimierer in diesem Messaufbau zu optimieren beginnen, zeigt die Abbildung 4.4. Die schwarze Kennlinie bildet die Grenze zwischen dem Verhalten eines Hochsetz - und Tiefsetzstellers. Auf der schwarzen Linie ist die Eingangsspannung gleich der Ausgangsspannung. Messwerte darüber weisen auf die Charakteristik eines Hochsetzstellers, Messwerte darunter auf die eines Tiefsetzstellers hin.

Der P350I weist bei einem angeschlossenen Lastwiderstand von 5,5 Ω in den letzten Messpunkten auf einen Hochsetzsteller hin. Da beide DC-DC-Topologien in einem Gerät vertreten sind, wird es sich hierbei sehr wahrscheinlich um einen Hoch-Tiefsetzsteller handeln.

Anscheinend besteht ein Zusammenhang zwischen dem Abweichen vom MPP und dem Anstieg der Kurve der Messergebnisse. In den Bereichen bei denen die Messergebnisse parallel zur Grenzlinie verlaufen, sind auch die Messpunkte bei denen sie sich vom MPP entfernen.

Mit Ausnahme des P350I von SolarEdge scheinen alle getesteten Optimierer reine Tief-

setzsteller zu sein. Bei den Messergebnissen die nahe und parallel der Grenzlinie verlaufen, scheint es sich um Verluste zu handeln und nicht um eine reduzierte Spannung, die von den Tiefsetzstellen herrührt. Das bedeutet, dass die Optimierer lediglich den Strom durchschalten und keinen Einfluss in Form von Hoch-/Tiefsetzstellen vornehmen. Dies wird in den Ergebnissen zu den Verlusten deutlich. Zunächst wird noch das gleiche Verhalten bei einer Verschattung getestet, siehe Abbildung 4.3.

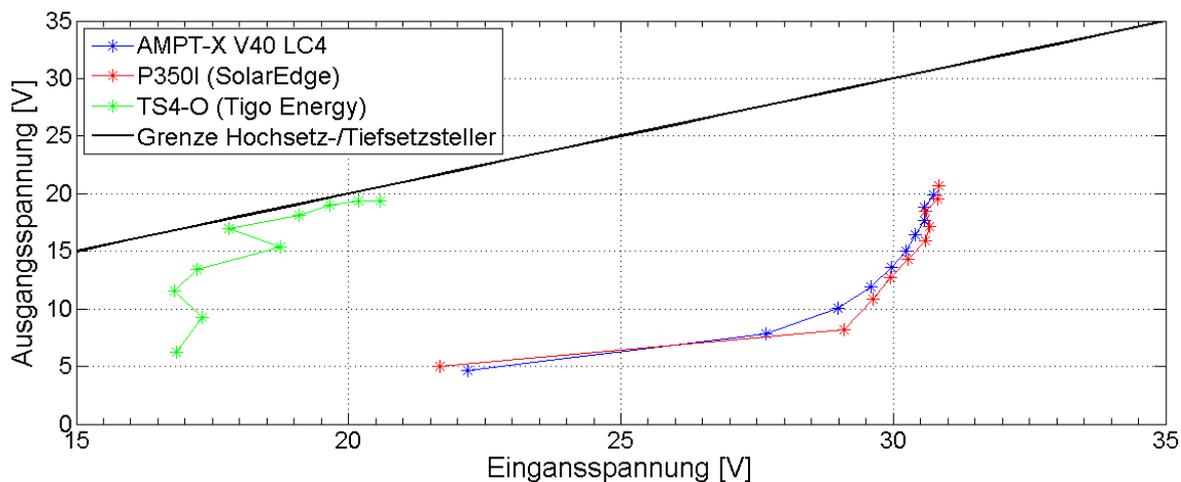


Abbildung 4.5: Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierern. An ihrer Ausgangsseite ist die Last von $3,5 \Omega$ zusehen. Eingangsseitig wurde die Einstrahlungsstärke im Bereich von 100 W/m^2 - 1000 W/m^2 variiert. Zudem liegt eine **Verschattung von 50 % auf einer Zelle** vor. In dem verschatteten Bereich nimmt die Einstrahlung die Hälfte ab. Die Grenze von Hochsetzstellen und Tiefsetzstellen kennzeichnet die durchgezogene schwarze Linie. Auf dieser ist die Spannung am Eingang gleich der am Ausgang des Optimierers. Werte unter der Linie zeigen das Verhalten eines Tiefsetzstellers, darüber die eines Hochsetzstellers.

Auch im Fall einer Verschattung weisen die drei Optimierer das Verhalten eines Tiefsetzstellers auf. Die Optimierer von Ampt und SolarEdge zeigen nun ganz eindeutig durchgehend dieses Verhalten. Im Gegensatz zu der Messung ohne Verschattung, siehe Abbildung 4.4, erreichen die Messwerte der Optimierer von SolarEdge und Ampt nicht die Grenzlinie. Dadurch kann angenommen werden, dass es sich durchgehend um reines Tiefsetzstellen handelt. Der Prüfling der Firma Tigo Energy hingegen, weist in Messpunkten bei höherer Einstrahlung wieder darauf hin, dass sich das Tiefsetzstellen einstellt und nur noch reine Elektronikverluste die leicht reduzierte Spannung hervorrufen.

Als letztes zu diesen Versuchsaufbau werden die Abweichungen von MPP und die des Gesamtwirkungsgrad dargestellt. Die Abweichung vom MPP kennzeichnet der jeweilige Anpassungswirkungsgrad.

Nach Betrachtung aller Messergebnisse ist zu vermuten, dass die Optimierer von Ampt und SolarEdge einen ähnlichen Schaltungsaufbau besitzen. Die Optimierer von Tigo Energy hingegen, unterscheiden sich in ihrem Verhalten in fast allen Betrachtungspunkten stark von denen der anderen Anbieter. Eine Gemeinsamkeit, die sich alle drei getesteten Optimierer teilen ist, dass mit einer größeren Last am Ausgang die Verluste im Bereich der niederen Einstrahlungsstärken kleiner sind und bei größeren Einstrahlungsstärken größer.

Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich aus dem Produkt des Anpassungswirkungsgrades und Umwandlungswirkungsgrades gemäß der Gleichung 4.1.

Berechnung des Gesamtwirkungsgrades

$$\eta = \eta_{\text{Anpassung}} \cdot \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} \quad (4.1)$$

$$\eta_{\text{Anpassung}} = \frac{P_{\text{zu}}}{P_{\text{mpp}}}$$

Im Anhang befinden sich, zusätzlich zu den Verlustleistungsdarstellungen, die Verluste in Tabellenform. Dort sind diese in Watt und Prozent angegeben.

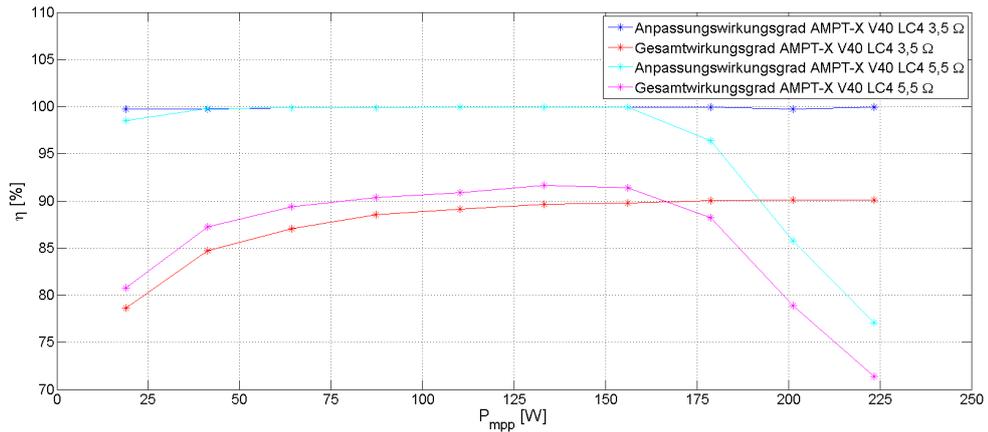


Abbildung 4.6: Vergleich der Anpassungsgrade und Gesamtwirkungsgrade, der Optimierer AMPT-X V40 LC4 von der Firma Ampt, mit einem variierenden Lastwiderstand von 3,5 Ω und 5,5 Ω im **unverschatteten Fall**. Die Fläche zwischen Anpassungsgrad und dem dazugehörigen Gesamtwirkungsgrad repräsentiert die Verlustleistung.

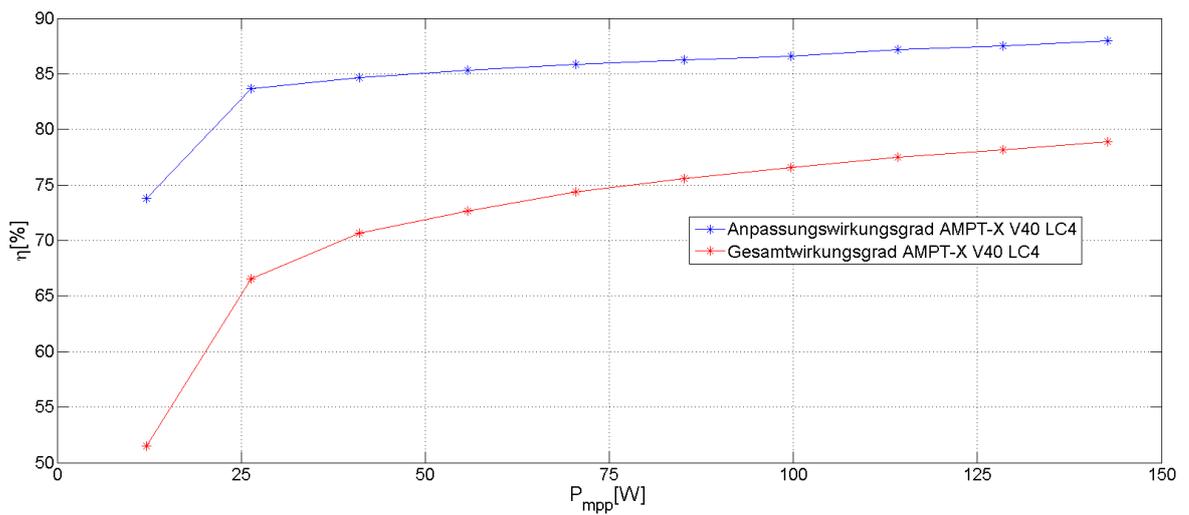


Abbildung 4.7: Darstellung des Anpassungsgrades und Gesamtwirkungsgrades, des Optimierers AMPT-X V40 LC4 von der Firma Ampt, mit einem Lastwiderstand von 3,5 Ω und einer **50 % Verschattung einer Zelle**. Die Fläche zwischen Anpassungsgrad und dem dazugehörigen Gesamtwirkungsgrad repräsentiert die Verlustleistung.

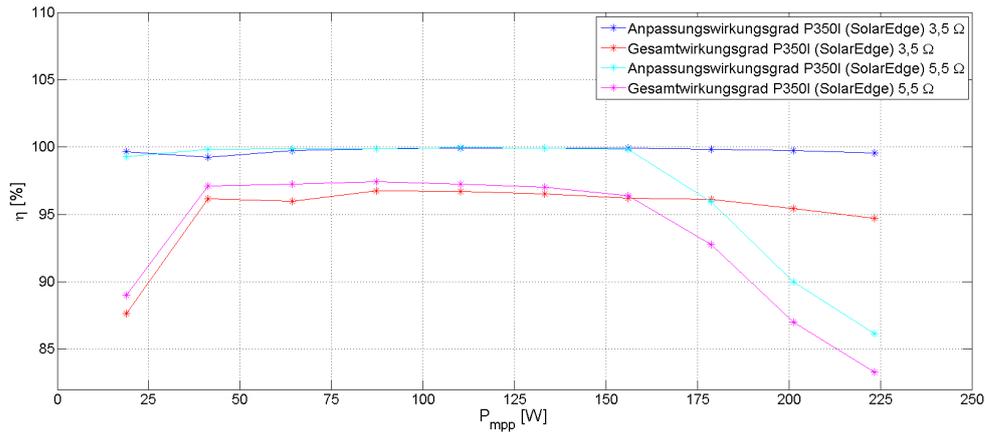


Abbildung 4.8: Vergleich der Anpassungsgrade und Gesamtwirkungsgrade, der Optimierer P350I von der Firma SolarEdge, mit einem variierenden Lastwiderstand von 3,5 Ω und 5,5 Ω im **unverschatteten Fall**. Die Fläche zwischen Anpassungsgrad und dem dazugehörigen Gesamtwirkungsgrad, repräsentiert die Verlustleistung.

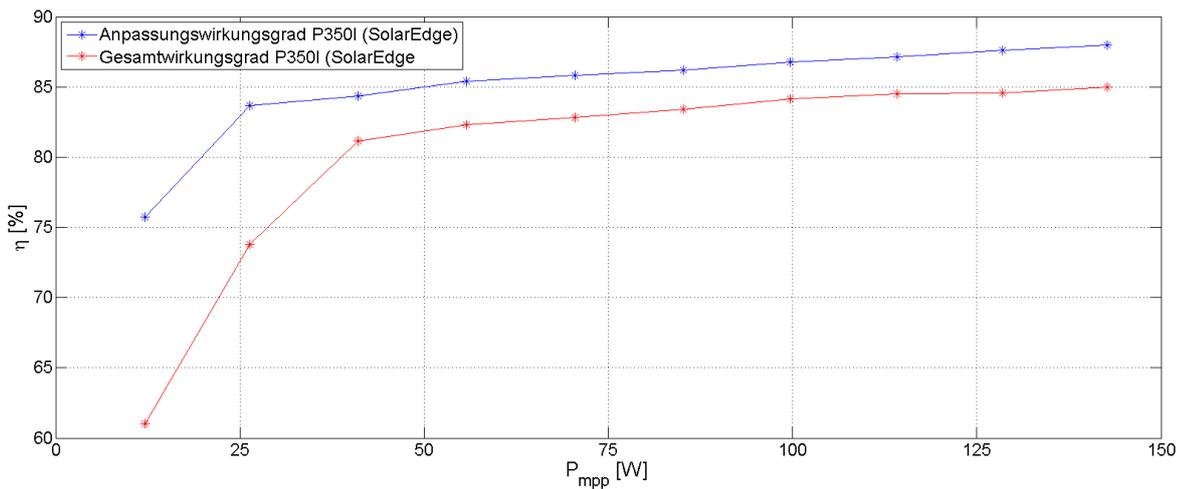


Abbildung 4.9: Darstellung des Anpassungsgrades und Gesamtwirkungsgrades, des Optimierer P350I von der Firma SolarEdge, mit einem Lastwiderstand von 3,5 Ω und mit einer **50 % Verschattung einer Zelle**. Die Fläche zwischen Anpassungsgrad und dem dazugehörigen Gesamtwirkungsgrad, repräsentiert die Verlustleistung.

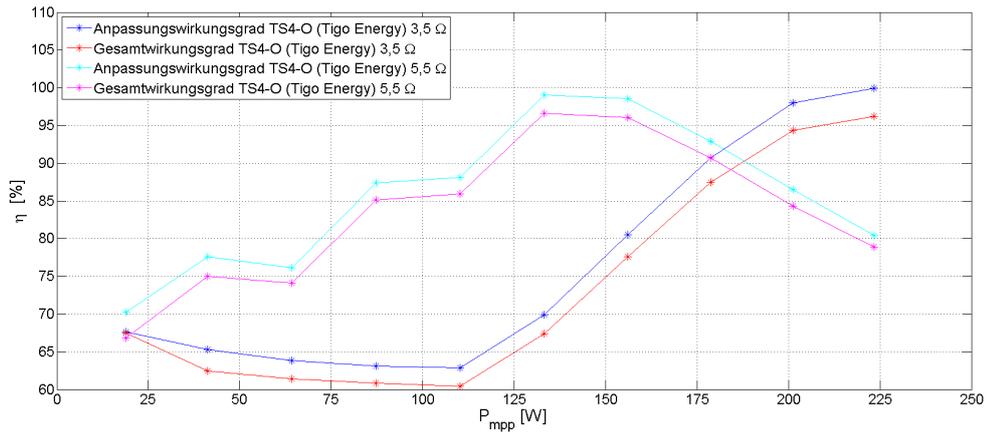


Abbildung 4.10: Vergleich der Anpassungsgrade und Gesamtwirkungsgrade, der Optimierer TS4-O von der Firma Tigo Energy, mit einem variierenden Lastwiderstand von 3,5 Ω und 5,5 Ω im **unverschatteten Fall**. Die Fläche zwischen Anpassungsgrad und dem dazugehörigen Gesamtwirkungsgrad, repräsentiert die Verlustleistung.

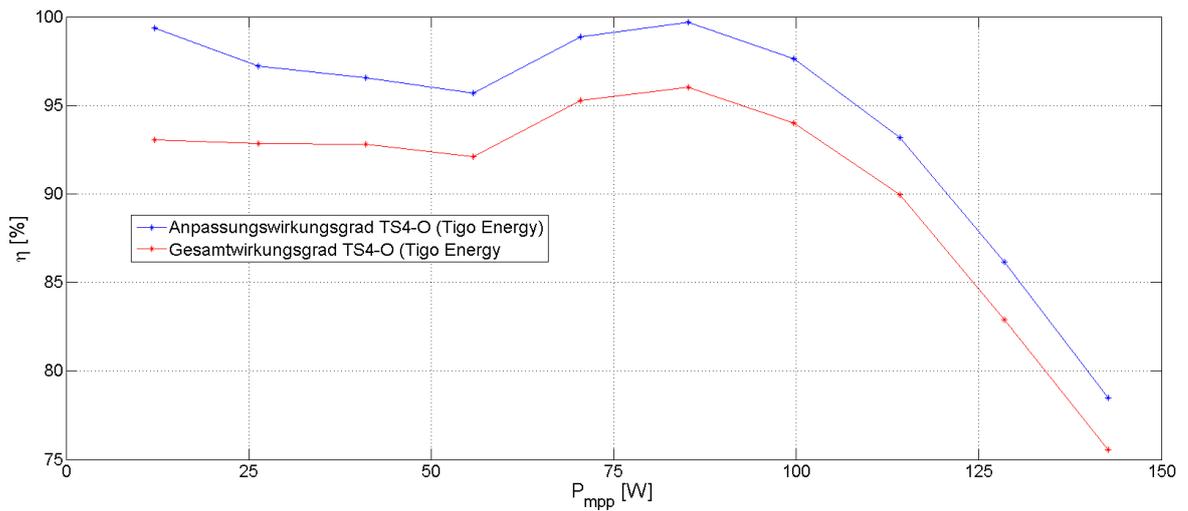


Abbildung 4.11: Vergleich der Anpassungsgrade und Gesamtwirkungsgrade, der Optimierer TS4-O von der Firma Tigo Energy, mit einem variierenden Lastwiderstand von 3,5 Ω und mit einer **50 % Verschattung einer Zelle**. Die Fläche zwischen Anpassungsgrad und dem dazugehörigen Gesamtwirkungsgrad, repräsentiert die Verlustleistung.

4.2 Messaufbau: 2

Bisher wurden nur die Optimierer unter Testbedingungen betrachtet. Da in der Praxis meistens mehrere PV-Module zu einen String verschalten werden und eher selten nur ein einzelnes PV-Modul Anwendung findet, werden nun die gleichen Messungen mit einem zusätzlichen Optimierer im String durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass die verwendete PVS nur ein PV-Modul gleichzeitig simulieren kann, wurde eine Gleichspannungsquelle als Ersatz für einen Optimierer gewählt. Der Spannungswert der Gleichspannungsquelle wurde mit acht Volt gewählt. Ein größerer Wert war nicht möglich. Die verwendeten Widerstände wären einem zu großen Strom bzw. einer zu großen Leistung ausgesetzt. Dies hätte wiederum Schäden daran zur Folge.

Folgend werden die gleichen Messungen wie bei dem Messaufbau: 1 durchgeführt, Vergleich 4.1. In diesem Aufbau sind keine Aussagen über die Verluste möglich. Aufgrund der Reihenschaltung kann nicht genau bestimmt werden, wie viel Leistung von dem Optimierer und wie viel von der Spannungsquelle zur Verfügung gestellt wird.

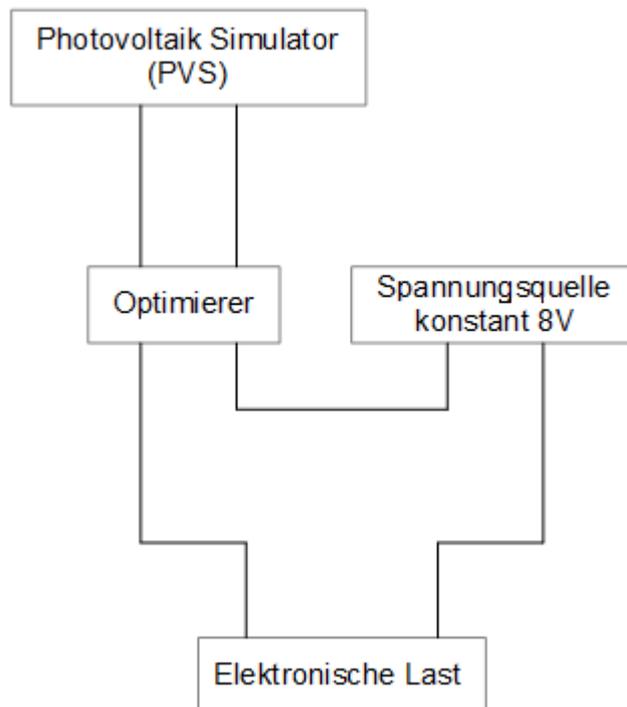


Abbildung 4.12: Aufbau der Messschaltung zum Testen des Verhaltens von einem Optimierer im Verbund mit anderem Optimierern

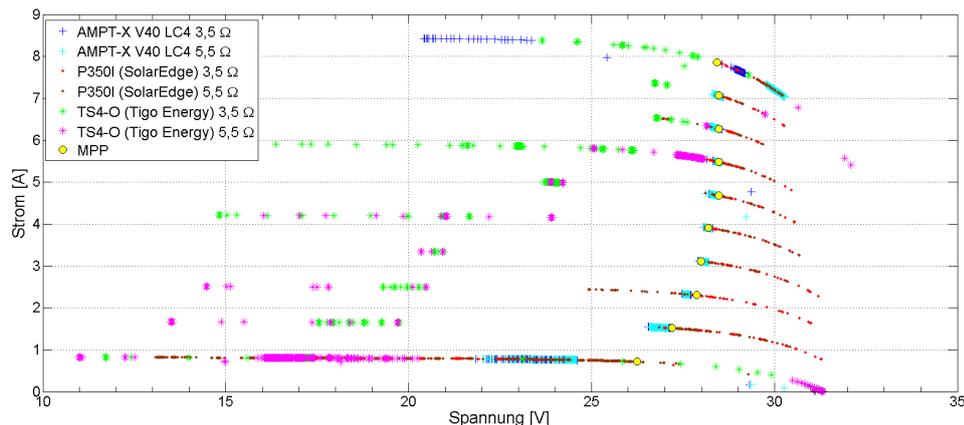


Abbildung 4.13: Verhalten der drei Optimierer auf der Eingangskennlinie in Kombination mit einer zweiten Spannungsquelle im String. Das PV-Modul ist **unverschattet** und die Einstrahlungsstärke ist im Intervall von 100-1000 W/m^2 mit jeweils einem angeschlossenen Widerstand von 3,5 Ω und 5,5 Ω als Last.

Im direkten Vergleich mit den Messergebnissen aus dem ersten Messaufbau, siehe Abbildung 4.2, erkennt man, dass sich die Optimierer in ihrem Verhalten auf der Eingangskennlinie kaum unterscheiden.

Die Optimierer von Ampt und SolarEdge finden nun auch in den Bereichen bei 800 W/m^2 und 900 W/m^2 erfolgreich den MPP. Auch in diesem Versuchsaufbau wird deutlich, dass die Last am Ausgang der Optimierer einen Einfluss auf das MPPT hat. Im Gegensatz zu den Messwerten mit einer Last von 3,5 Ω , erreichen jene mit einer angeschlossenen Last von 5,5 Ω den MPP bei 1000 W/m^2 nicht.

Auch die Optimierer von Tigo Energy scheinen in diesem Aufbau den MPP besser zu finden. Zumindest nähern sie sich diesem in einem kleinen Abstand bereits ab 700 W/m^2 Einstrahlungsstärke und einer angeschlossenen Last von 5,5 Ω . Ebenfalls ist zu bemerken, dass sich diese eingestellten Arbeitspunkte auf der Kennlinie von dem MPP bei größeren Einstrahlungsstärken wieder entfernen. Bei der Last von 3,5 Ω hingegen nähert sich der TS4-O dem MPP bei den größeren Einstrahlungsstärken wieder an. Bei 1000 W/m^2 erreicht er diesen auch wieder.

Der Trend, dass die Optimierer die jeweiligen MPP besser finden, setzt sich auch im Fall der Verschattung zumindest bei dem TS4-O fort, Vergleich 4.3.

50 % der Zelle sind verschattet und in dem verschatteten Bereich beträgt die Einstrahlungsstärke ebenfalls wieder die Hälfte.

Der TS4-O erreicht nun den MPP bis zu einer Einstrahlungsstärke von 900 W/m^2 . Warum er auch hier bei einer Einstrahlungsstärke von 1000 W/m^2 den MPP nicht mehr findet ist ebenfalls noch unklar. Wie bereits in der vorausgegangenen Messung zeigen die Optimierer von Ampt und SolarEdge erneut, dass der falsche MPP angefahren wird. Auch hier ist es wieder auf den fehlerhaften MPPT-Algorithmus zurückzuführen.

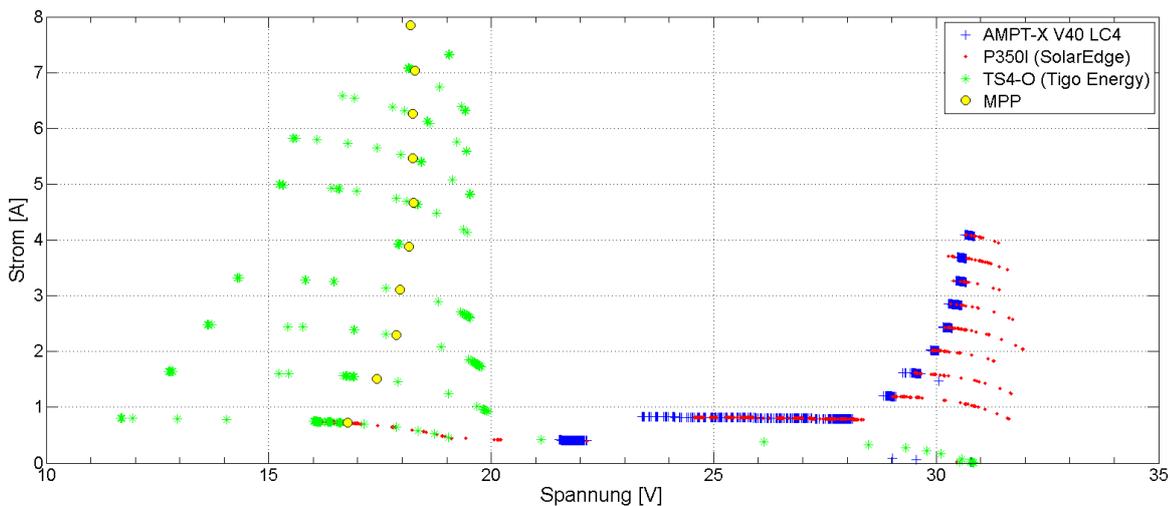


Abbildung 4.14: Verhalten der drei Optimierer auf der Eingangskennlinie in Kombination mit einer zweiten Spannungsquelle im String. Bei dem PV-Modul ist eine **Zelle zu 50 % verschattet**, bei einem Einstrahlungsintervall von $100\text{-}1000 \text{ W/m}^2$ mit einem angeschlossenen Widerstand von $3,5 \Omega$ als Last. In dem verschatteten Bereich des Moduls entspricht die Einstrahlungsstärke die Hälfte.

Als nächstes wird in diesem Messaufbau das Verhalten auf der Ausgangsseite der Optimierer untersucht. Jeweils einmal ohne und einmal mit Verschattung des PV-Moduls. Dabei werden wieder Vergleiche mit den Messwerten von dem ersten Messaufbau gezogen. Wie bereits erwähnt, simuliert eine Gleichspannungsquelle einen zweiten Optimierer. Damit die Messergebnisse nur das Verhalten der Optimierer veranschaulichen, wurde für die Auswertung die konstanten acht Volt aus den Messergebnissen abgezogen.

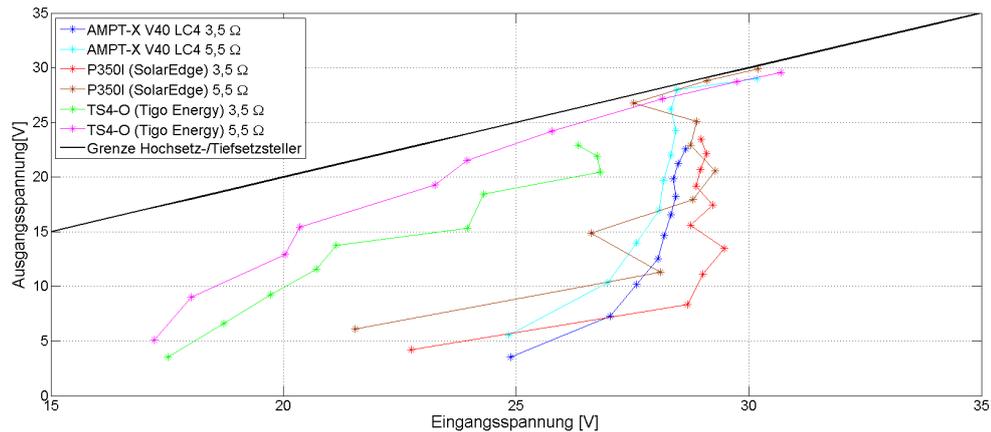


Abbildung 4.15: Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierern. An ihrer Ausgangsseite ist die Last von $3,5 \Omega$ und $5,5 \Omega$ zusehen. Eingangsseitig wurde die Einstrahlungsstärke im Bereich von 100 W/m^2 - 1000 W/m^2 variiert. Zudem liegt **keine Verschattung** vor. Die Grenze von Hochsetzstellen und Tiefsetzstellen kennzeichnet die durchgezogene schwarze Linie. Auf dieser ist die Spannung am Eingang gleich der am Ausgang des Optimierers. Werte unter der Linie zeigen das Verhalten eines Tiefsetzstellers, darüber die eines Hochsetzstellers.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Messaufbau 1 (Vergleich siehe Abbildung 4.4), überschreitet dieses mal kein Optimierer die Grenzlinie. Dadurch ist deutlich das reine Tiefsetzstellen zu erkennen. Auch hier entsteht ein Unterschied im Verlauf der Kurven in Abhängigkeit des angeschlossenen Widerstandes als Last. Bei dem Lastwert von $3,5 \Omega$ wird die Grenzlinie bei keinem der drei Optimierer erreicht. Bei dieser Last ist auch ein sich deutlich abgrenzendes Verhalten von den Messwerten von Versuchsaufbau 1 zu sehen.

Betrachtet man die Kurvenverläufe bei dem angeschlossenen Lastwiderstand von $5,5 \Omega$ so wird hier sichtbar, dass in den größeren Einstrahlungsbereichen fast die Grenzlinie erreicht wird. Der geringe Abstand zu dieser ist abermals auf die Verluste durch die verbaute Elektronik in den Optimierern zurückzuführen. Auch bei der Betrachtung der Spannungswerte sind diese am Ausgang im Vergleich zu Messschaltung 1 stets geringer.

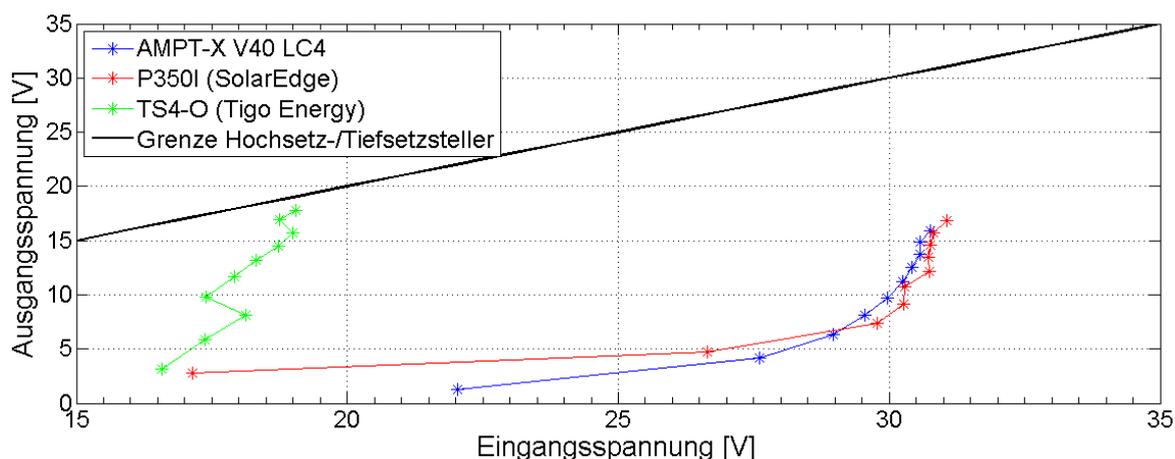


Abbildung 4.16: Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierern. An ihrer Ausgangsseite ist die Last von $3,5 \Omega$ und $5,5 \Omega$ zusehen. Eingangsseitig wurde die Einstrahlungsstärke im Bereich von 100 W/m^2 - 1000 W/m^2 variiert. Zudem liegt eine **50 % Verschattung auf einer Zelle** vor. In dem verschatteten Bereich beträgt die Einstrahlungsstärke die Hälfte. Die Grenze von Hochsetzstellen und Tiefsetzstellen kennzeichnet die durchgezogene schwarze Linie. Auf dieser ist die Spannung am Eingang gleich der am Ausgang des Optimierers. Werte unter der Linie zeigen das Verhalten eines Tiefsetzstellers, darüber die eines Hochsetzstellers.

Auch im Fall der Verschattung ähneln sich die Kennlinien in diesem Messaufbau, mit denen aus dem Messaufbau 1 (Vergleich siehe Abbildung 4.5). Der deutlichste Unterschied tritt bei den TS4-O auf. Ohne eine zusätzliche Spannungsquelle im String erreichte dieser bereits mit dem sechsten Messwert die Grenzlinie. Im Gegenzug mit einer zusätzlichen Spannungsquelle liegen alle zehn Messpunkte deutlich unterhalb dieser. Dies kennzeichnet das klare Tiefsetzstellen. Ein weiterer stark auffälliger Punkt, ist der Wert des ersten Messpunktes von der Eingangsspannung bei dem Optimierer von Ampt. Dieser liegt nun in einen viel kleineren Spannungsbereich als zuvor. Die restlichen Messpunkte zu diesem Optimierer befinden sich wieder in dem gleichen Eingangsspannungsintervall wie in der Messung ohne eine zweite Quelle.

Ansonsten weisen die Messergebnisse im direkten Vergleich mit Abbildung 4.15 alle eine kleine Ausgangsspannung auf.

4.3 Restliche Messaufbauten

Als letzten Punkt in dieser Arbeit werden jene Messaufbauten kurz vorgestellt, unter denen die Optimierer nicht zu arbeiten begannen.

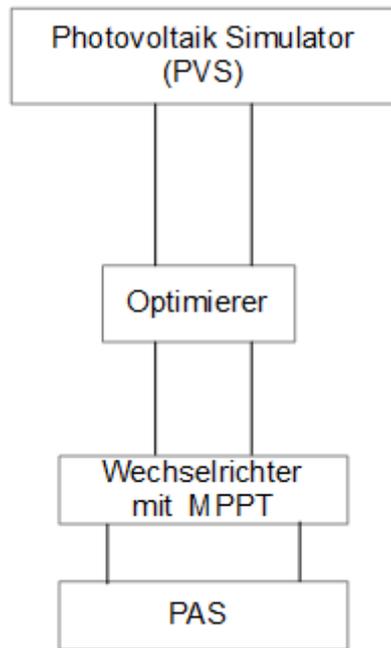


Abbildung 4.17: Eigentlicher Messaufbau zum Prüfen der Wechselrichter. Dieser wurde mit einem Optimierer ergänzt. Das Ziel dieses Aufbaues ist das Verhalten der Optimierer in diesem zu Testen.

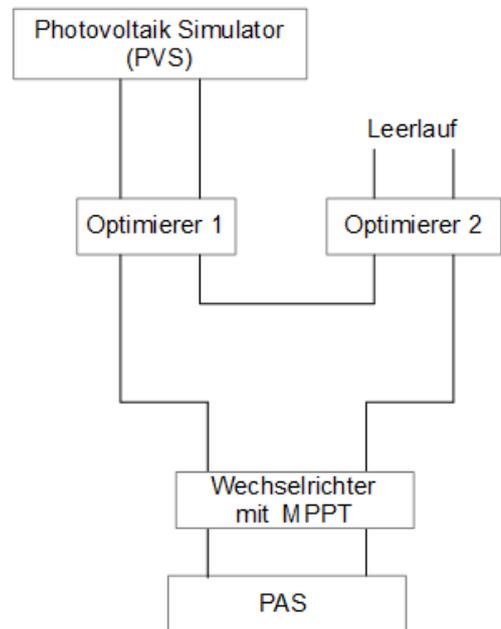


Abbildung 4.18: Erweiterung des ersten Messaufbaus (Abbildung 4.17) mit einem zweiten Optimierer der sich auf der Eingangsseite im Leerlauf befindet.

In diesem Messaufbau 4.17 wurde bemerkt, dass nicht alle Wechselrichter kompatibel mit den getesteten Optimierern sind. Zum einen wurde der Leerlauf auf der I/U-Kennlinie des PV-Moduls nicht verlassen oder das MPPT dauerte sehr lange.

Bei Versuchen mit einem kompatiblen Wechselrichter konnte nicht eindeutig geklärt werden, welches Verhalten auf den Kennlinien von dem Optimierer und welches von dem Wechselrichter herrührt.

Der Aufbau 4.18 zeigte keine Veränderung. Der im Leerlauf betriebene Optimierer schaltet den Strom nur durch, ohne einen Einfluss auf diesen zu nehmen. Zudem kamen größere Verluste hervor, welche wohl von der Elektronik des zweiten Optimierers stammen.

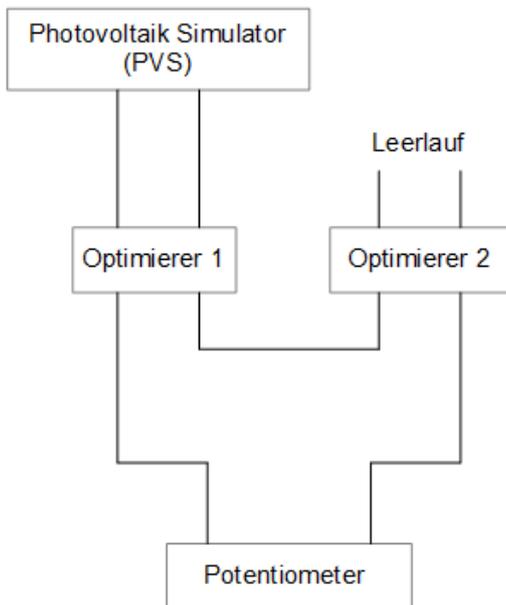


Abbildung 4.19: Messaufbau zum Testen der Optimierer im Verbund mit einem zweiten Optimierer der sich auf der Eingangsseite im Leerlauf befindet. Beide Optimierer sehen als Lastwiderstand ein analoges Potentiometer.

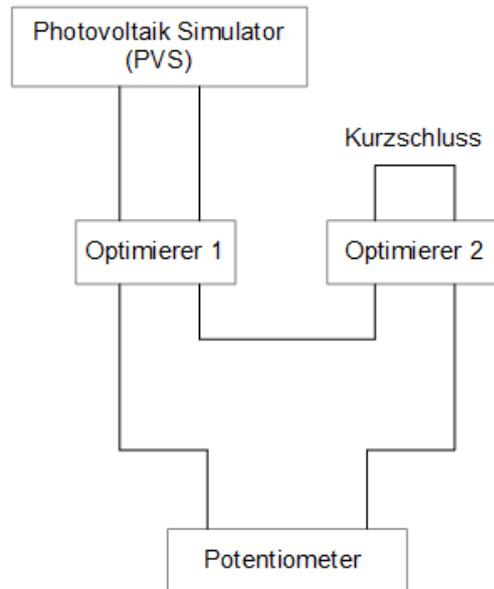


Abbildung 4.20: Messaufbau zum Testen der Optimierer im Verbund mit einem zweiten Optimierer der sich auf der Eingangsseite im Kurzschluss befindet. Beide Optimierer sehen als Lastwiderstand ein analoges Potentiometer.

In diesen beiden Aufbauten war das Verhalten identisch. Der Leerlauf wird nicht verlassen. Bei Versuchen den Widerstandswert zu ändern, wurde bemerkt, dass der verwendete Potentiometer eine starke Temperaturabhängigkeit vorweist, wodurch sämtliche Versuche mit diesem Gerät hinfällig wurden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Messaufbauten entworfen, die Aussagen über die relevanten Parameter der Optimierer geliefert haben. Als erstes muss erwähnt werden, dass aus zeitlichen Gründen von jedem Optimierer nur ein Gerät geprüft werden konnte. Dazu musste zunächst das Verhalten der Optimierer geklärt werden. Wie sich herausstellte unterscheiden sich die Produkte der einzelnen Hersteller enorm voneinander. Als erstes musste nachträglich für die P350I von SolarEdge ein zusätzliches Gerät gekauft werden damit diese überhaupt anfangen zu funktionieren. Ohne dieses Zusatzgerät beginnen die Optimierer nur zu Arbeiten, wenn sich ein Wechselrichter von SolarEdge am Ende des Strings befindet. Am Anfang wurden Messaufbauten mit Wechselrichtern getestet. Dabei traten die Probleme auf, dass der MPP nur sehr langsam angesteuert oder erst gar nicht der Leerlauf auf der I/U-Kennlinie des PV-Moduls verlassen wurde.

Im Bezug auf die Verluste haben die AMPT-X V40 LC4 die größten Verlustleistungen und der TS4-O die geringsten. Der AMPT-X V40 LC4 findet dafür im unverschatteten Fall den MPP zuverlässigsten und der TS4-O am schlechtesten. Der P350I findet ebenfalls den MPP im unverschatteten Fall, aber er oszilliert in einem deutlich größerem Intervall. Im Fall einer Verschattung hingegen, findet nur der TS4-O den MPP.

Mit den beiden vorgestellten Messaufbauten ist die Grundlage geschaffen, ein Messverfahren zu entwickeln, was für alle Optimierer verlässliche Aussagen über deren Arbeitsverhalten trifft.

Offene Fragen sind nach wie vor die scheinbare Lastabhängigkeit der Optimierer im Bezug darauf wie groß der Lastwiderstand werden kann, bevor das erfolgreiche MPPT abbricht. Da diese im Regelfall als Last nur den Leitungswiderstand des Strings sehen, ist diese Abhängigkeit wohl von größter Bedeutung. Wenn sich der Verdacht bestätigt, ist dadurch die maximale Länge, bzw. Größe des Strings begrenzt. Ebenso ungeklärt bleibt, warum die Optimierer im Verbund anscheinend besser funktionieren als alleine und warum das MPPT bei größeren Einstrahlungsstärken aufhört. Wieso besonders im Messaufbau: 1 nicht das reine MPPT eingreift, sondern das Tiefsetzstellen bereits zu sehen ist, konnte ebenfalls noch nicht geklärt werden.

Wenn diese Fragen geklärt sind, sollte es durchaus möglich sein, ein universelles Messverfahren zu entwerfen, welches auch als Grundlage für eine standardisierte Norm dienen kann. Zudem wäre es interessant, die Vorteile der drei verschiedenen Optimierer in einem Gerät zu vereinen. Sollte dies gelingen, würde ein konkurrenzloses Produkt auf dem Markt erscheinen.

Anhang

AMPT-X V40 LC4										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	18.84	41.22	64.09	87.13	110.2	133.1	156	178.6	200.7	223.3
P _v [W]	3.98	6.21	8.23	9.91	11.94	13.67	15.89	17.68	19.41	21.94
P _v [%]	21.13	15.07	12.84	11.37	10.83	10.27	10.19	9.90	9.67	9.83
P350I										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	18.78	40.78	64.08	87.03	110.2	133.2	155.8	178.5	201.1	222.5
P _v [W]	2.26	1.27	2.4	2.73	3.56	4.55	5.77	6.58	8.7	10.81
P _v [%]	12.03	3.11	3.75	3.14	3.23	3.42	3.70	3.69	4.33	4.86
TS4-O										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	10.52	26.72	40.81	55.02	69.41	92.51	125.6	162.1	197.2	223.3
P _v [W]	0.02	1.14	1.51	1.92	2.75	3.38	4.53	5.89	7.43	8.41
P _v [%]	0.19	4.27	3.70	3.49	3.96	3.65	3.61	3.63	3.77	3.77

Tabelle 5.1: Verluste der Optimierer AMPT-X V40 LC4, P350I und TS4-O bei einem angeschlossenen Lastwiderstand von **3,5 Ω** und im **unverschatteten Fall**

AMPT-X V40 LC4										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	8.918	22.08	34.72	47.57	60.49	73.46	86.48	99.54	112.5	125.5
P _v [W]	2.698	4.51	5.75	7.04	8.05	9.13	10.01	11.06	12.05	12.95
P _v [%]	30.25	20.43	16.56	14.80	13.31	12.43	11.57	11.11	10.71	10.32
P350I										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	9.211	22.12	34.7	47.62	60.55	73.35	86.52	99.49	112.6	125.6
P _v [W]	1.79	2.61	1.3	1.72	2.12	2.35	2.63	3	3.88	4.3
P _v [%]	19.44	11.80	3.75	3.61	3.50	3.20	3.04	3.02	3.45	3.42
TS4-O										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	11.96	25.67	39.62	53.44	69.63	84.87	97.35	106.4	110.7	110.7
P _v [W]	0.76	1.16	1.54	2	2.51	3.12	3.64	3.69	4.16	4.1
P _v [%]	6.35	4.52	3.89	3.74	3.60	3.68	3.74	3.47	3.76	3.71

Tabelle 5.2: Verluste der Optimierer AMPT-X V40 LC4, P350I und TS4-O bei einem angeschlossenen Lastwiderstand von **3,5Ω** und im **verschatteten Fall**

AMPT-X V40 LC4										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	18.64	41.23	64.09	87.12	110.2	133.1	155.9	172.2	172.6	172.1
P _v [W]	3.36	5.19	6.74	8.33	9.99	11.02	13.33	14.54	13.87	12.69
P _v [%]	18.03	12.59	10.52	9.56	9.07	8.28	8.55	8.44	8.04	7.37
P350I										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	18.72	41.25	64.13	87.15	110.2	133.2	155.8	171.5	181	192.2
P _v [W]	1.94	1.13	1.7	2.13	2.97	3.9	5.34	5.7	6.08	6.43
P _v [%]	10.36	2.74	2.65	2.44	2.70	2.93	3.43	3.32	3.36	3.35
TS4-O										
E [W/m ²]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P _{zu} [W]	13.27	32.05	49.8	76.22	97.66	132	153.8	166.1	173.9	179.7
P _v [W]	0.64	1.07	1.29	2.03	2.38	3.26	3.94	3.91	4.24	3.54
P _v [%]	4.82	3.34	2.59	2.66	2.44	2.47	2.56	2.35	2.44	1.97

Tabelle 5.3: Verluste der Optimierer AMPT-X V40 LC4, P350I und TS4-O bei einem angeschlossenen Lastwiderstand von **5,5 Ω** und im **unverschatteten Fall**

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vergleich der Schaltertypen in DC-DC Wandler	4
2.2	ESB eines Hochsetzstellers mit angeschlossenem Kondensator und Lastwiderstand	5
2.3	Ersatzschaltbild zur Herleitung des Tastverhältnisses am Hochsetzsteller	6
2.4	Strompfade im Hochsetzsteller während der Schalter geschlossen und geöffnet ist.	8
2.5	Strom- und Spannungsverläufe über die einzelnen Bauelemente des Hochsetzstellers im <i>kontinuierlichen</i> Betrieb	9
2.6	Strom- und Spannungsverläufe über die einzelnen Bauelemente des Hochsetzstellers im <i>diskontinuierlichen</i> Betrieb	9
2.7	Ersatzschaltbild eines Tiefsetzstellers mit angeschlossenem Kondensator und Lastwiderstand	10
2.8	Herleitung Tastverhältnis am Tiefsetzsteller	10
2.9	Strompfade im Tiefsetzsteller während der Schalter geöffnet und geschlossen ist	12
2.10	Strom- und Spannungsverläufe über die Bauelemente des Tiefsetzstellers im <i>kontinuierlichen</i> Betrieb	13
2.11	Strom- und Spannungsverläufe über die Bauelemente des Tiefsetzstellers im <i>diskontinuierlichen</i> Betrieb	13
2.12	Ersatzschaltbild eines Hoch - Tiefsetzstellers	14
2.13	Strompfade im Tiefsetzsteller während Schalter geschlossen und geöffnet ist	15
2.14	Strom und Spannungsverläufe über die Bauteile des Hoch - Tiefsetzstellers im <i>kontinuierlichen</i> Betrieb	16
2.15	Strom und Spannungsverläufe über die Bauteile des Hoch - Tiefsetzstellers im <i>kontinuierlichen</i> Betrieb	16
2.16	Ausgangskennlinie eines PV-Moduls in der I/U Darstellung mit eingezeichneten MPP	17
2.17	Ausgangskennlinie eines PV-Moduls in der P/U Darstellung mit eingezeichneten MPP	17

2.18	Ausgangskennlinien eines PV-Moduls in der P/U Darstellung bei Veränderung der Einstrahlungsstärke mit eingezeichneten MPP	18
2.19	Ausgangskennlinien eines PV-Moduls in der P/U Darstellung bei Veränderung der Temperatur mit eingezeichneten MPP	18
2.20	Ausgangskennlinie eines PV-Moduls in der P/U Darstellung bei Veränderung der Last mit eingezeichneten Arbeitspunkten	18
2.21	Darstellung der Arbeitspunktermittlung durch Lastsprünge	19
2.22	Die P/U Kennlinie eines Moduls, welches teilweise verschattet ist	20
3.1	Ein-Diodenmodell einer Solarzelle	22
3.2	Zwei-Diodenmodell einer Solarzelle	22
3.3	Arbeitsweise des Sycore. Dargestellt als Flussdiagramm	25
3.4	Modulstring ohne Verschattung	26
3.5	Modulstring mit Verschattung	27
4.1	Aufbau der Messschaltung zum Testen des Verhaltens einzelner Optimierer	29
4.2	Eingangsseitiges Verhalten der Optimierer	30
4.3	Eingangsseitiges Verhalten der Optimierer im verschatteten Fall	31
4.4	Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierern im unverschatteten Fall	32
4.5	Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierer im verschatteten Fall	33
4.6	Verluste des AMPT-X V40 LC4 im Messaufbau Eins unverschattet	35
4.7	Verluste des AMPT-X V40 LC4 im Messaufbau Eins bei einer Verschattung	35
4.8	Verluste des P350I im Messaufbau Eins	36
4.9	Verluste des P350I im Messaufbau Eins bei einer Verschattung	36
4.10	Verluste des TS4-O im Messaufbau Eins	37
4.11	Verluste des TS4-O im Messaufbau Eins bei einer Verschattung	37
4.12	Aufbau der Messschaltung zum Testen des Verhaltens von einem Optimierer im Verbund mit anderem Optimierern	38
4.13	Eingangsseitiges Verhalten der Optimierer mit einer zusätzlichen Spannungsquelle im String	39
4.14	Eingangsseitiges Verhalten der Optimierer im verschatteten Fall	40
4.15	Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierer im unverschatteten Fall	41
4.16	Vergleich der Eingangsspannungen zu den Ausgangsspannungen von den Optimierer im unverschatteten Fall	42
4.17	Fehlgeschlagener Messaufbau: 1	43
4.18	Fehlgeschlagener Messaufbau: 2	43
4.19	Fehlgeschlagener Messaufbau: 3	44

4.20 Fehlgeschlagener Messaufbau: 4 44

Tabellenverzeichnis

2.1	Einfluss des Tastverhältnis auf das Spannungsverhältnis	15
3.1	Arbeitspunkte der PVS bei den getesteten Einstrahlungsstärken im unverschatteten Fall	22
3.2	Arbeitspunkte der PVS bei den getesteten Einstrahlungsstärken im verschatteten Fall. Die Einstrahlungsstärke im verschatteten Bereich nimmt um 50 % ab.	23
3.3	Betriebsparameter des TS4-O	27
3.4	Betriebsparameter des AMPT-X V40 LC4	27
3.5	Betriebsparameter des P350I	27
5.1	Verluste der Optimierer AMPT-X V40 LC4, P350I und TS4-O bei einen angeschlossenen Lastwiderstand von 3,5 Ω und im unverschatteten Fall .	a
5.2	Verluste der Optimierer AMPT-X V40 LC4, P350I und TS4-O bei einen angeschlossenen Lastwiderstand von 3,5Ω und im verschatteten Fall . . .	a
5.3	Verluste der Optimierer AMPT-X V40 LC4, P350I und TS4-O bei einen angeschlossenen Lastwiderstand von 5,5 Ω und im unverschatteten Fall .	b

Formelverzeichnis

Gl. 2.1 Tastverhältnis am Hochsetzsteller	7
Gl. 2.2 Gleichung zur Abschätzung der benötigten Induktivität bei dem Hochsetzsteller	8
Gl. 2.3 Tastverhältnis am Tiefsetzsteller	11
Gl. 2.5 Tastverhältnis am Hoch - Tiefsetzsteller	14
Gl. 4.1 Berechnung des Gesamtwirkungsgrades	34

Abkürzungsverzeichnis

PV	Photovoltaik
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PWM	Pulse-Width-Modulation
ESB	Ersatzschaltbild
PVS	Photovoltaik-Simulator
ARS	Analysator Referenz System
FFT	Fast-Fourier-Transformation

Symbolverzeichnis

t	Zeit
t_e	Einschaltdauer
t_a	Ausschaltdauer
T	Periodendauer
D	Tastverhältnis
L	Induktivität
i_L	Spulenstrom
Δi_L	Spulenrippelstrom
U_e	Eingangsspannung
U_a	Ausgangsspannung
U_D	Spannung über der Diode
C_1	Anfangswert 1
C_2	Anfangswert 2
η	Gesamtwirkungsgrad
$\eta_{\text{Anpassung}}$	Anpassungswirkungsgrad
P_{ab}	abgegebene Leistung
P_{zu}	zugeführte Leistung
P_v	Verlustleistung
P_{mpp}	Leistung am MPP
E	Einstrahlungsstärke

Quellenverzeichnis

- [1] M. Lokanadham K.Vijaya Bhaskar. Incremental Conductance Based Maximim Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2012.
- [2] Merfert Igor. Bidirektionale Stromrichter - Vorlesungsskript, 2014.
- [3] Marian K. Kazimierczuk. *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters*. WILEY, 2016. ISBN 978-1-119-00954-2.
- [4] Spitzenberger & Spies GmbH & Co. KG. Analyser Reference System Typ ARS 16 Oberschwingungsanalysator/ Flickermeter. 2015.
- [5] Spitzenberger & Spies GmbH & Co. KG. *Bedienungsanleitung EMV Basis System Typ EMV E 2500/PAS*, 2015.
- [6] Spitzenberger & Spies GmbH & Co. KG. *Bedienungsanleitung Analyser Reference System Typ ARS 16/1*, 2015.
- [7] Spitzenberger & Spies GmbH & Co. KG. *Bedienungsanleitung SyCore / PC104 - Handbuchversion V6.12*, 2015.
- [8] Spitzenberger & Spies GmbH & Co. KG. „Wir können das Wetter machen“ - der High-level Photovoltaic Simulator PVS von Spitzenberger & Spies. 2013.
- [9] Marc Oertel. Step-Up-Converter. 2014. URL http://service.projektlabor.tu-berlin.de/wordpress/bob/wp-content/uploads/sites/9/2015/01/Energie_Folien_StepUP_Oertel_2014_11_18.pdf.
- [10] Joachim Specovius. *Grundkurs Leistungelektronik*. Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-658-03308-8.
- [11] sprut. Schaltregler - Grundlagen, 2016. URL www.sprut.de/electronic/switch/schalt.html.
- [12] Nicola Femia Giovanni Petrone Giovanni Spagnuolo Massimo Vitelli. Optimization of Perturb an Observe Maximum Power Point Tracking Method. *Transactions on Power Electronics, Vol.20, NO.4, July 2005*, 2005.

- [13] Wikipedia. Boost converter, 2016. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter.
- [14] Wikipedia. Buck converter, 2016. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Prof. Schwarz und Herrn Fröbel, die meine Bachelorarbeit nicht nur betreut haben, sondern mir auch stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Sei es bei der Untersuchung der Optimierer oder bei den Korrekturen in dem Schriftstück selbst gewesen.

Ebenfalls möchte ich dem gesamten Team Zuverlässigkeit von Solarmodulen und Systemen dafür danken, dass sie mir die Möglichkeit gaben, bereits seit dem Praktikum im fünften Semester in der Forschung tätig zu sein. Darüber hinaus wurde ich sofort herzlich aufgenommen und mit spannenden und vielseitigen Aufgaben betreut.

Ein besonderer Dank gilt den Studenten aus unserem Büro 1.25, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen und maßgeblich dazu beigetragen haben, jeden Tag gerne auf Arbeit zu fahren.

Anschließend möchte ich noch meiner Familie und Freundin bedanken, die mich während des gesamten Studiums in jeglicher Form unterstützt haben.