



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Thomas Varnhorn

Analyse und Optimierung eines 1,8 kW
Wechselrichters zur
Solargenerator-Netzeinspeisung

Thomas Varnhorn
Analyse und Optimierung eines 1,8 kW
Wechselrichters zur
Solargenerator-Netzeinspeisung

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Michael Röther
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel

Abgegeben am 13. Juli 2017

Thomas Varnhorn

Thema der Bachelorthesis

Analyse und Optimierung eines 1,8kW Wechselrichters zur Solargenerator-Netzeinspeisung

Stichworte

Regenerative Energietechnik, Leistungselektronik, Photovoltaik, Wechselrichter, Gleichspannungswandler, dSpace, LabView, Matlab/Simulink

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorthesis ist die Analyse des Versuchsstands eines einphasigen Wechselrichters zur Solargenerator-Netzeinspeisung durchgeführt. Der Versuchsstand soll dementsprechend optimiert werden, dass Studentinnen und Studenten an dem Versuchsstand arbeiten und ihr Wissen erweitern können.

Thomas Varnhorn

Title of the paper

Analysis and optimization of a 1,8kW grid-tie inverter for Photovoltaic power supply

Keywords

Renewable energy technology, power electronics, photovoltaics, inverter, grid-tie converter, dSpace, LabView, Matlab / Simulink

Abstract

This thesis is about the analysis of a scientific test regarding and a set up single phase grid-tie inverter for photovoltaik power. The test should be optimized in a way that students can work with it an therefore broaden their knowledge.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	7
1. Einleitung	9
2. Theoretische Grundlagen	11
2.1. Solarmodul	11
2.2. Hochsetzsteller	14
2.3. Wechselrichter	16
2.4. Energieverbundnetz	17
3. Analyse der Rahmenbedingungen	19
3.1. Simulation der Solarmodule mit dem Delta Elektronika	21
3.2. Hardwarekomponenten des Aufbaus	23
3.2.1. Schaltschrank	23
3.2.2. dSpace Schnittstelle	25
3.2.3. dSpace Board DS1104	27
3.3. Software des Aufbaus	28
3.3.1. Bedienoberfläche ControlDesk	28
3.3.2. Das Simulink Modell	28
4. Anforderungsanalyse	29
4.1. Auswertung des Versuchsaufbaus	29
4.1.1. Ausreißer des Stroms I_{AC}	29
4.1.2. Aussetzer des Systems	33
4.1.3. Maximum Power Point Tracking	34
4.2. Erweiterungen des Versuchsaufbaus	36
4.2.1. Kopierverstärker TET Hercules 5000 als PV-Generator	36
4.2.2. Grafische Bedienoberfläche	36
4.2.3. Realisierung eines zweiten Versuchsstands	37
4.2.4. Optimierung des Regelprogramms	37

5. Optimierungen	38
5.1. Ausreißer des Ausgangsstroms	38
5.2. Optimierung des Simulink Programms	42
5.2.1. Verbesserung der Messwerteerfassung	42
5.2.2. Aussetzen des Systems	43
5.2.3. Verbessertes MPPT	44
5.3. Erstellen der grafischen Bedienoberfläche	46
6. Implementierung des HERCULES 5000	48
6.1. Kommunikation mit dem PC	48
6.2. Funktionalitäten des Programms	49
6.3. Regelung der Solarkennlinie	49
6.4. Test des Hercules 5000 am Versuchsaufbau	52
6.4.1. Konstantspannungsquelle	52
6.4.2. Solargenerator Betrieb	52
6.4.3. Zusammenfassung der Tests	57
7. Versuchsdurchführung und Test	59
7.1. Hochsetzsteller	59
7.2. Test der Simulation von Solarkennlinien am Hochsetzsteller	64
7.3. Solarwechselrichter im Gleichstromsteller-Betrieb	65
7.4. Solarwechselrichter mit Netzeinspeisung	68
8. Fazit und Ausblick	70
Literaturverzeichnis	72
A. Anhang	74
A.1. Versuchsbeschreibung Solarwechselrichter	75

Tabellenverzeichnis

3.1. Kennwerte des Delta Elektronika SM660-AR-11	21
3.2. Passive Bauelemente im Schaltschrank	24
3.3. Daten der IGBT Halbbrücke SEMiX 202GB12Vs	24
3.4. Daten der IGBT Vollbrücke SKS 15F B2CI 03 V12	25
4.1. Kennwerte des TET Electronics HERCULES 5000	36
5.1. Reihenfolge und Aufruffrequenz der einzelnen Programmteile	43
5.2. Erklärung zur Abbildung 5.7	46

Abbildungsverzeichnis

1.1. Bruttostromerzeugung in Deutschland	9
2.1. Ersatzschaltbild einer Solarzelle (Eindiodenmodell) abgeändert nach [22]	12
2.2. Kennlinien einer Solarzelle	13
2.3. Ersatzschaltbild eines Hochsetzstellers	14
2.4. Zeitverläufe des Hochsetzstellers im stationären Betrieb	15
2.5. Schaltbild einer B2-Brückenschaltung mit nachgeschaltetem Tiefpassfilter	16
3.1. Energie und Signalfluss des Versuchsaufbaus	19
3.2. Schaltplan des Versuchs 'Wechselrichter zur Solargenerator-Netzeinspeisung'	20
3.3. Präzisionslabor-Netzgerät Delta Elektronik SM660-AR-11	21
3.4. Simulation eines Solarmoduls mit dem Delta Elektronik	22
3.5. Stecktafelbild des Schaltschranks	23
3.6. IGBT-Halbbrücke mit Freilaufdioden	24
3.7. IGBT-Vollbrücke SKS 15F B2CI 03 V12 mit Kühlkörper und Lüfter	25
3.8. Vereinfachter Schaltplan der Schnittstelle	26
4.1. Strom (Ch2) und Spannung (Ch1) am Ausgang des Wechselrichters	30
4.2. I_{AC} , Steuerspannung sowie die Freigabe der Ventile im Fehlerfall, markierter Bereich zeigt Fehlerfall	31
4.3. Bildung der PWM-Freigabe im Simulink Programm	31
4.4. Signal des Hilfskontakts des wechselstromseitigen Hauptschütz	32
4.5. Aussetzen des sinusförmigen Stroms ab dem Zeitpunkt T_{Start}	33
4.6. Aussetzen der Netzspannung zwischen den Zeitpunkten T_{Start} und T_{Stopp}	34
4.7. Programmablaufplan zur Verdeutlichung des vorhandenen Such-Schwing-Verfahrens zum automatischen MPP-Tracking	35
5.1. Bestimmung der Frequenz der periodischen Ausreißer	39
5.2. Übersichtsplan der Montageplatte	40
5.3. Schaltplan mit Steckplätzen des Filters	41
5.4. Bildung des Effektivstroms in Simulink	43
5.5. Programmaufrufe untersucht mit dSpace Profiler	43
5.6. Strom, Spannung und Leistung während des automatischen MPPT	45

5.7. Grafische Oberfläche für den Aufbau mit Netzeinspeisung	46
5.8. Zustandsdiagramm zur Absicherung der Bedienfehler	47
6.1. Signale in dem RS232-Schnittstellenkabel	49
6.2. Vorgegebene Kennlinie eines Solarmoduls	50
6.3. Zwei Bereiche zur Regelung der Solarkennlinie	50
6.4. Regelung im MPP-Bereich	51
6.5. Regelung im Konstantstrom-Bereich	51
6.6. Spannung (Ch3) und Strom (Ch4) der Konstantspannungsquelle bei einem Tastverhältnis von $a = 0,5$	53
6.7. Spannung und Strom der Konstantspannungsquelle bei einem Tastverhältnis von $a = 0,5$	54
6.8. Verhalten von Strom (Ch4) und Spannung (Ch3) des Leistungsverstärkers bei einem Sprung des Tastgrads von $a = 0,2$ auf $a = 0,6$	55
6.9. Netzspannung (Ch3) und Netzstrom (Ch4) im MPP	56
6.10. Nicht konstanter Netzstrom (Ch 4) während der instabilen Phase	57
6.11. Ausgangsstrom (Ch4) und Ausgangsspannung (Ch3) des Hercules während Instabilität	58
7.1. Taktfrequenz $f_{Takt} = 8kHz$ aus der über dem Schalter liegende Spannung u_S (Ch1)	60
7.2. Ch1: Ausgangsspannung u_A , Ch2: Ausgangsstrom i_A	60
7.3. Ch1: Spannung an der Drossel u_L , Ch2: Strom durch die Drossel i_L	61
7.4. Ch1: Spannung am Schalter u_S , Ch2: Strom durch den Schalter i_S	62
7.5. Ch3: Spannung an der Diode u_D , Ch4: Strom durch die Diode i_D	63
7.6. Ch3: Eingangsspannung des Hochsetzstellers u_B , Ch4: Eingangsstrom Des Hochsetzstellers i_B	63
7.7. Simulationsprogramm zur Einstellung und Steuerung des zu simulierenden Solarmoduls	64
7.8. Aufbau des Versuchs im Gleichstromsteller-Betrieb	65
7.9. Spannung u_{WR} (Ch3) und Strom i_{WR} (Ch4) zwischen Wechselrichter und Fil- ter bei einem Tastgrad von $a = 0,75$	66
7.10. Spannung u_{WR} (Ch3) und Strom i_{WR} (Ch4) zwischen Wechselrichter und Fil- ter bei einem Tastgrad von $a = 0,25$	67
7.11. Spannung u_{WR} (Ch3) und Strom i_{WR} (Ch4) zwischen Wechselrichter und Fil- ter bei einem Tastgrad von $a = 0,5$	67
7.12. Netzspannung u_{AC} (Ch3) und der in das Netz eingespeiste Strom i_{AC} (Ch4) im MPP	69
7.13. Netzspannung u_{AC} (Ch3) und der in das Netz eingespeiste Strom i_{AC} (Ch4) im MPP mit einem Netzphasenwinkel von $+25^\circ$	69

1. Einleitung

Mit der Energiewende wurde das Ziel ausgerufen, das Zeitalter der erneuerbaren Energien so schnell wie möglich zu erreichen. Die Energieversorgung wird dabei komplett umgestaltet und trotz wettbewerbsfähigen Energiepreisen und einem hohen Wohlstandsniveau soll Deutschland eines der umweltschonendsten und energiesparendsten Volkswirtschaften werden. Heute stellen die erneuerbaren Energien mit 29% der Bruttostromerzeugung bereits die zweitstärkste Gruppe im Strommix (Abbildung 1.1). Doch sollen sie noch weiter ausgebaut werden, sodass bis zum Jahr 2035 55% bis 60% des in Deutschland verbrauchten Stroms aus Sonne, Wind und Co. stammen [7].

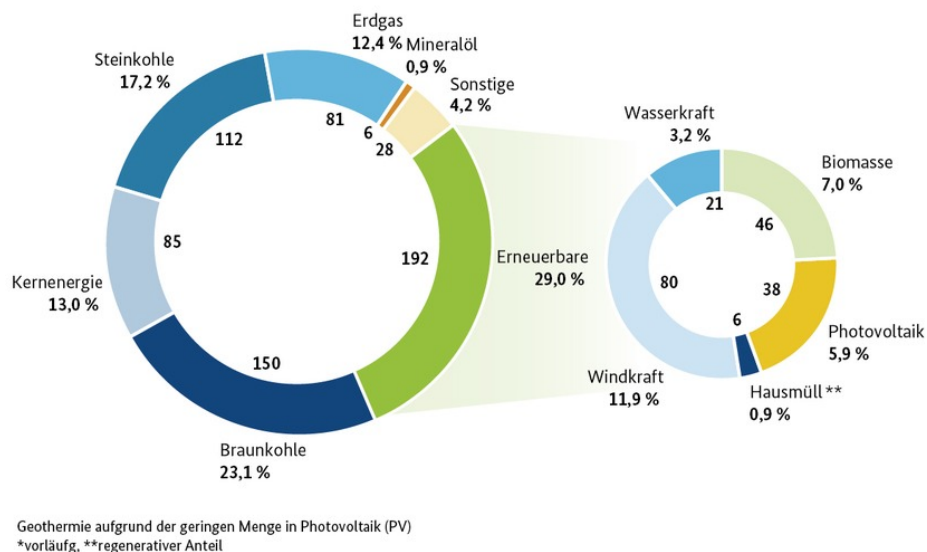


Abbildung 1.1.: Bruttostromerzeugung in Deutschland [2]

Die Photovoltaik liefert inklusive der Geothermie mit knapp 6% der Bruttostromerzeugung relevante Beiträge zur Stromversorgung. Zählte vor einigen Jahren die Erzeugung von Solarenergie noch zu den teuersten erneuerbaren Energien, so gehören heute neue Solaranlagen aufgrund der technischen und ökonomischen Entwicklung zu den günstigsten

erneuerbaren Energien. Da die technische Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, wird auch in Zukunft mit weiteren Kostensenkungen gerechnet. Photovoltaikanlagen sind häufig kleine Anlagen (kleiner 10kW), wie sie auf privaten und gewerblichen Gebäuden zu sehen sind. Es gibt allerdings auch größere Anlagen, bei denen ansonsten nicht nutzbare Fläche auf diese Art und Weise genutzt wird, wie zum Beispiel auf einem alten Fliegerhorst in Ahlhorn oder einer ehemaligen Mülldeponie Hamburg-Georgswerder. So kommt es, dass die in Deutschland mit etwa 41 GW installierte Nennleistung auf ungefähr 1,5 Millionen Photovoltaikanlagen verteilt ist [23].

Damit die technische Entwicklung weiter vorangetrieben wird, wird den Studierenden der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg über verschiedene Laborversuche die Möglichkeit gegeben, ihre theoretischen Kenntnisse durch die praktische Anwendung auszubauen. So soll den Studierenden der Versuch des Solarwechselrichters im Labor der Leistungselektronik die Funktion des Hochsetzstellers und des Wechselrichters nahebringen. Zudem sollen sie nach dem Versuch das Verhalten der Solarkennlinie in Bezug auf die Strahlungsstärke und der Anzahl der in Reihe geschalteten Module kennen. Bisher konnte mit dem Versuchsaufbau nicht in das Netz gespeist werden, daher wurde ein neuer Versuchsaufbau entwickelt, der in das Netz speisen kann und den alten Aufbau ablösen soll. In der Arbeit von Herrn Brüggemann [1] wurde ein provisorischer Versuchsaufbau entwickelt. Dieser Aufbau wurde dann durch die Arbeit von Herrn Stefanowski [18] dahingehend weiterentwickelt, dass ein Grundgerüst des neuen Versuchsaufbaus eines Wechselrichters zur Solargenerator-Netzeinspeisung steht. Das Ziel dieser Arbeit ist es den Versuchsaufbau dahingehend weiterzuentwickeln, dass Studierende in dem Versuch das theoretisch Erlernte wiederzufinden. Dazu muss der Versuchsaufbau einwandfrei funktionieren, um eine Versuchsbeschreibung durchführen zu können. Da der Versuch nicht von einem Leistungsverstärker abhängig sein und gegebenenfalls dupliziert werden soll, soll ein weiterer Leistungsverstärker zur Simulation der Solarkennlinie implementiert werden.

Zu Beginn dieser Arbeit werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der einzelnen Komponenten eines Wechselrichters zur Solargenerator-Netzeinspeisung beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 3 eine Analyse der Rahmenbedingungen durchgeführt. In diesem Kapitel wird die Ausgangssituation beschrieben und analysiert. In der Anforderungsanalyse im Kapitel 4 ist das Lastenheft dieser Arbeit beschrieben. Hier sind zum einen die Optimierungen, die aus der Analyse heraus erkannt wurden, und zum anderen die Erweiterungen beschrieben, die im Laufe dieser Arbeit erarbeitet werden sollen. Diese Optimierungen und Erweiterungen werden dann im Kapitel 5 thematisiert. Die Implementierung eines weiteren Leistungsverstärkers folgt in Kapitel 6. Das Kapitel 7 beinhaltet die ausgiebige Versuchsdurchführung und das Testen des Versuchsaufbaus. Mit dem Fazit und dem Ausblick in Kapitel 8 wird die Arbeit abgeschlossen.

2. Theoretische Grundlagen

Photovoltaik bezeichnet die Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie. Dies geschieht mittels Solarzellen. Um allerdings die dadurch gewonnene elektrische Energie nutzen zu können, müssen die elektrischen Größen dahingehend umgewandelt werden, dass sie in das Versorgungsnetz gespeist werden können. In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der einzelnen Komponenten sowie deren Funktionsweise beschrieben.

2.1. Solarmodul

Ein Solarmodul besteht aus Solarzellen, die bestimmte Anteile der Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umwandeln. Es gibt verschiedene Technologien zur Herstellung von Solarzellen. Man unterscheidet zwischen kristallinen Solarzellen und Dünnschichtzellen, wobei die kristallinen Solarzellen mit 90% der Weltproduktion den Photovoltaikmarkt dominieren. Aktuell werden ebenso neue Technologien, wie organische Solarzellen entwickelt. Bei kristallinen Solarzellen wird als Halbleiter Silizium verwendet. Schaltungstechnisch stellen Solarzellen eine Gleichstromquelle dar. Das Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell) in Abbildung 2.1 der Solarzelle zeigt deren elektrische Eigenschaften. Bei einer realen Solarzelle müssen auch die Verluste berücksichtigt werden, welche durch jeweils einen Serien- und Parallelwiderstand zusammengefasst werden. Der Serienwiderstand R_S addiert sich aus dem Widerstand des Halbleiters, und den Kontaktwiderständen. Die Leckströme, die an den lokalen Kurzschlüssen des p-n-Übergangs fließen, bildet der Parallelwiderstand R_P . Aus der Stromquelle fließt der Photostrom I_{ph} . Dieser beschreibt den Strom der aufgrund der optischen Anregung in der Zelle fließt. Der Strom I_D durch die Diode vermindert den Photostrom. Er bildet sich aus Diffusionsstrom und Rekombinationsstrom. Der Einfluss der Temperatur wirkt sich besonders hier aus [22].

Die Gleichung der Strom-Spannungskennlinie [13] bei dem Eindiodenmodell lautet:

Mit

$$I_{ph} = \frac{U_D}{R_P} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \quad (2.1)$$

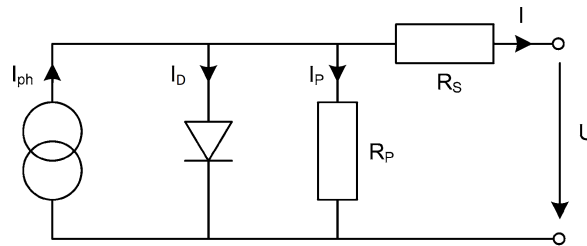


Abbildung 2.1.: Ersatzschaltbild einer Solarzelle (Eindiodenmodell) abgeändert nach [22]

ergibt sich

$$\begin{aligned}
 I &= I_{ph} - I_D - I_P \\
 &= I_{ph} - I_S \cdot \left(e^{\frac{U + R_S \cdot I}{m \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + R_S \cdot I}{R_P}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

- $I_{Ph} = c_0 \cdot E$: Photostrom in [A]
 - c_0 : Koeffizient des Photostroms in [$\frac{m^2}{V}$]
 - E : Bestrahlungsstärke in [$\frac{W}{m^2}$]
- I_S : Sättigungsstrom in [A] ($\approx 10^{-10} A$)
- m : Diodenfaktor, bei idealer Diode $m = 1$, bei realer Diode $1 < m \leq 5$
- $U_T = \frac{k \cdot T}{e}$: Temperaturspannung, $U_T(25^\circ C) = 25,7 mV$
 - k : Boltzmannkonstante
 - T : absolute Temperaturspannung in [K]
 - e : Elementarladung

Da die Gleichung 2.2 nicht explizit nach Strom oder Spannung auflösbar ist, gibt es numerische Verfahren oder Simulationsprogramme der Leistungselektronik [13].

Das elektrische Verhalten einer Solarzelle spiegelt sich in Strom-Spannungs-Kennlinien wider. Die Kennlinie einer Solarzelle ist dabei abhängig von der Strahlungsstärke E und der Zelltemperatur. In Abbildung 2.2 sind typische Strom-Spannungs-Kennlinien abgebildet. Die Kennlinie unter (a) beschreibt das Verhalten für unterschiedliche Strahlungsstärken und die unter (b) für verschiedene Temperaturen. Als Standardwerte wird eine Temperatur von $25^\circ C$ und eine Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ genommen.

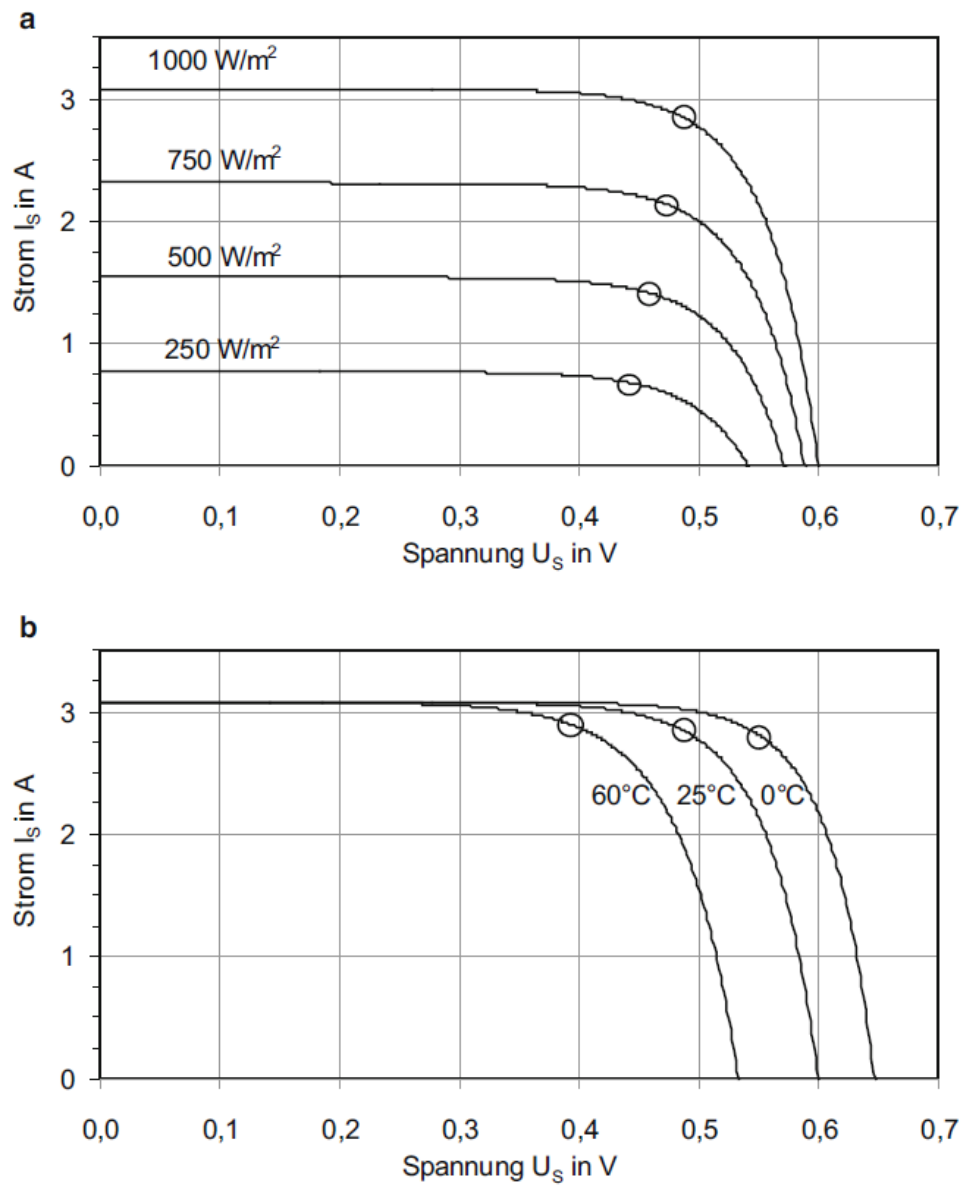


Abbildung 2.2.: Kennlinien einer Solarzelle für unterschiedliche Einstrahlungen (a) und Temperaturen (b) [22]

Die Spannung in dem Punkt, in dem der Strom $I = 0A$ ist, nennt man Leerlaufspannung U_0 . Der Strom bei einer Spannung von $U = 0V$ nennt sich Kurzschlussstrom I_K . Ein weiterer wichtiger Punkt auf der Kennlinie ist der Maximum-Power-Point (MPP). In diesem Punkt ist die Leistung, also das Produkt aus Strom und Spannung, am höchsten. Dieser ist in der Abbildung 2.2 mit einem Kreis markiert. Verändert sich die Kennlinie auf Grund der Strahlungsstärke oder der Temperatur, so verschiebt sich auch der MPP.

Solarzellen haben handelsüblich eine Leerlaufspannung zwischen $0,6V$ und $0,7V$. Da diese Spannung für den elektrischen Verbraucher nicht ausreicht, werden Solarzellen miteinander zu einem Solarmodul verschaltet. So werden beispielsweise 20 Solarzellen in Reihe geschaltet, wodurch sich bei gleichbleibendem Strom die Spannungen addieren. Hat diese Zelle bei einer Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ im MPP eine Spannung von $U_{MPP} = 0,5V$ und einen Strom von $I_{MPP} = 3A$ kommt man auf eine Leistung von $P_{MPP} = 1,5W$. Bei 20 Solarzellen in Reihe ergibt sich eine Spannung von $U_{MPP} = 10V$ und folgend eine Leistung von $P_{MPP} = 30W$. Werden Zellen parallel verschaltet, so addieren sich die einzelnen Ströme. Die abfallende Spannung ist in diesem Fall über alle Zellen dieselbe. Handelsübliche kristalline Solarmodule enthalten üblicherweise zwischen 36 und 144 Solarzellen [22].

2.2. Hochsetzsteller

Hochsetzsteller gehören zu der Gruppe der Gleichstromsteller. Ist die unregelte Eingangsspannung U_B kleiner als die erforderliche Ausgangsspannung U_A , so wird ein Hochsetzsteller verwendet. Er besteht aus einer Drossel L , einem Schalter S , einer Freilaufdiode D und einer Kapazität C (Abbildung 2.3).

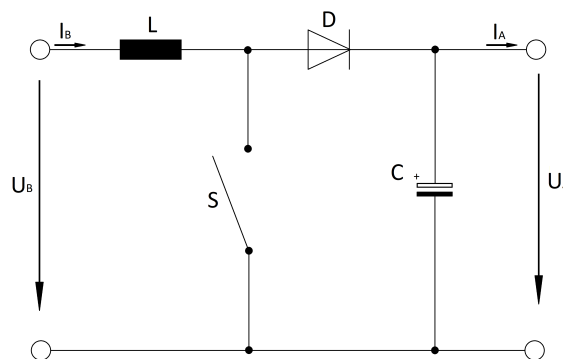


Abbildung 2.3.: Ersatzschaltbild eines Hochsetzstellers

Es gibt zwei Schaltzustände des Hochsetzstellers: Zum einen den Schaltzustand T_{ein} , wenn der Schalter S geschlossen ist, zum anderen den Schaltzustand T_{aus} , wenn der Schalter S geöffnet ist. Während des Schaltzustands T_{ein} ist der Schalter geschlossen. Auf diese Weise sperrt die Diode, da ihr Kathodenpotenzial der Spannung U_A entspricht und diese größer ist als die Eingangsspannung U_B . In diesem Schaltzustand wird die Last alleine von der Kapazität C mit Energie versorgt. Die Eingangsspannung U_B liegt nun an der Drossel L . Der Strom durch den Schalter und durch die Drossel steigt nun linear mit der Zeit an. Öffnet sich der Schalter, Schaltzustand T_{aus} , fließt kein Strom mehr durch den Schalter S . Aufgrund des Induktionsgesetzes ist eine abrupte Änderung des Drosselstroms i_L nicht möglich, daher wird in der Drossel eine Spannung induziert. Diese induzierte Spannung ist addiert mit der Eingangsspannung U_B größer als die Ausgangsspannung U_A , wodurch die Diode nicht weiter sperrt. Die zur Zeit T_{ein} in der Drossel L gespeicherte Energie wird nun an den Kondensator C abgegeben. Da die Ausgangsspannung U_A größer ist als die Eingangsspannung U_B , nimmt der Drosselstrom linear mit der Zeit ab (Abbildung 2.4).

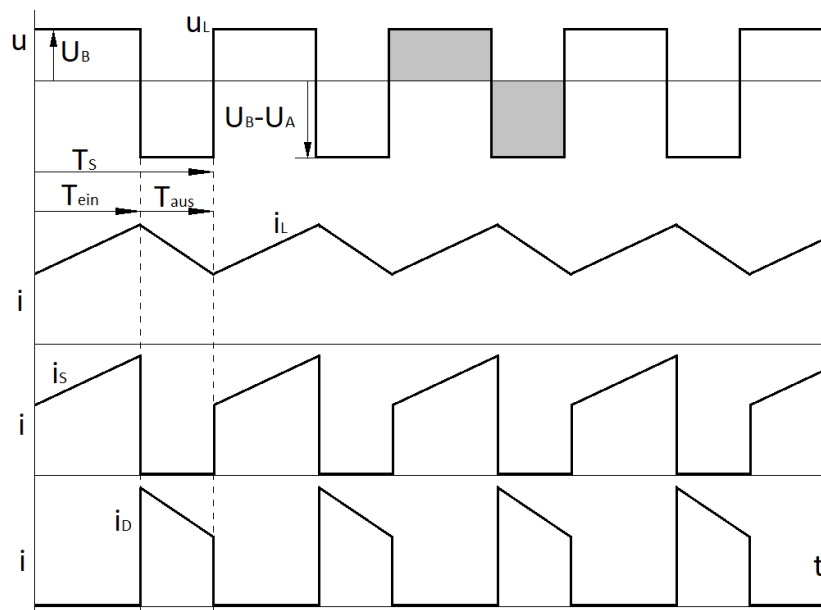


Abbildung 2.4.: Zeitverläufe des Hochsetzstellers im stationären Betrieb

Die schraffierten Spannungszeitflächen in Abbildung 2.4 sind an der Drossel gleich groß, woraus sich ein Zusammenhang zwischen der Eingangsspannung U_B und der Ausgangsspannung U_A ergibt.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{T_S}{T_S - T_{ein}} = \frac{1}{1 - a} \quad (2.3)$$

Dabei ist a der Tastgrad und gibt das Verhältnis von der Impulsdauer zur Periodendauer an:

$$a = \frac{\text{Impulsdauer}}{\text{Periodendauer}} \quad (2.4)$$

Aus Formel 2.3 geht hervor, dass das Verhältnis zwischen Eingangsspannung U_B und Ausgangsspannung U_A kein lineares ist. Bei hohen Tastgraden nahe $a = 1$ wird die Ausgangsspannung U_A sehr schnell sehr groß [11].

2.3. Wechselrichter

Damit man den vom Photovoltaikgenerator erzeugten Gleichstrom ins Versorgungsnetz speisen kann, muss er in einphasigen Wechselstrom oder in dreiphasigen Drehstrom umgewandelt werden. Dazu werden Wechselrichter benötigt. Für einphasige Systeme werden standardmäßig Zweipuls-Brückenschaltungen (B2-Brückenschaltung) verwendet (Abbildung 2.5). Die linke (U_{ZK}) ist die Gleichstrom- und die rechte (U_{AC}) die Wechselstromseite.

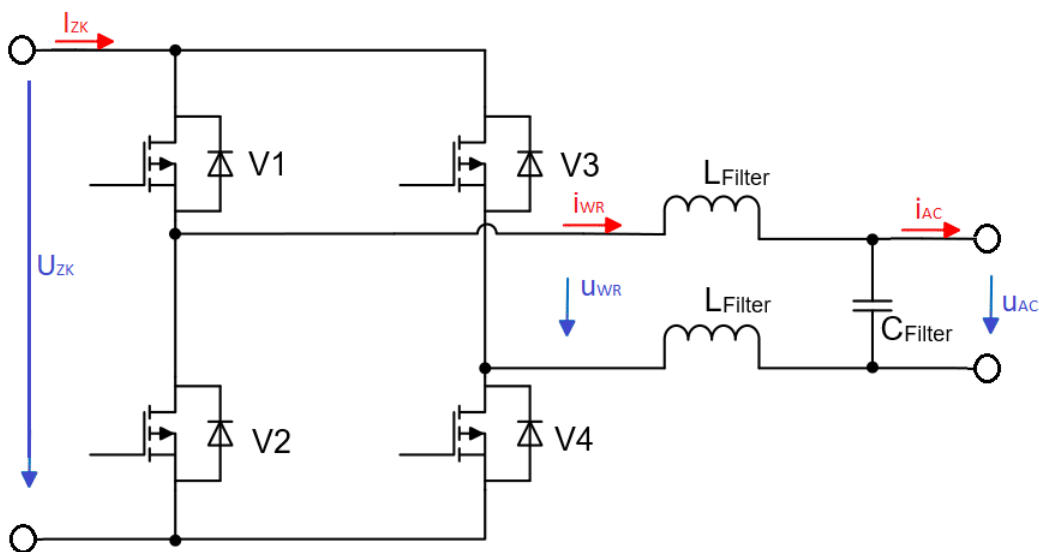


Abbildung 2.5.: Schaltbild einer B2-Brückenschaltung mit nachgeschaltetem Tiefpassfilter

Die Ventile V1 und V4 sowie V3 und V2 bilden dabei Paare. Sind die Ventile V1 und V4 geöffnet, so sind V3 und V2 geschlossen und $u_{WR} = U_{DC}$. Sind V3 und V2 geöffnet und sind V1 und V4 geschlossen, so ist $u_{WR} = -U_{DC}$. Um aus Gleichstrom einen sinusförmigen

Wechselstrom zu generieren, werden die Ventile mit einem sinusbewerteten PWM¹-Signal angesteuert. Am Ausgang des Wechselrichters ergibt sich so ein zerhacktes Signal, welches über einen Tiefpassfilter ein sinusförmiges Signal ergibt.

Der Tiefpassfilter lässt die Netzfrequenz durch und filtert höherfrequente Störsignale heraus. Das Signal vor dem Filter ist ein Rechtecksignal mit der Frequenz der PWM f_{PWM} , welche herausgefiltert werden muss.

2.4. Energieverbundnetz

Das Stromnetz in Deutschland ist Teil des engmaschigen Stromnetzes im europäischen Verbundnetz. In diesem erfolgt der Austausch elektrischer Energie mit Höchstspannung von $200kV$ und $380kV$ zwischen den einzelnen Netzbetreibern. Durch diesen Austausch können Schwankungen zwischen Erzeugung und Verbrauch besser ausgeglichen werden, als wenn jeder Netzbetreiber ein alleinstehendes Versorgungsnetz hätte [6]. In Deutschland gibt es vier große Netzbetreiber in einem Netzregelverbund, die den Strom über längere Strecken transportieren. Die Energie, die in das Netz gespeist wird, muss gleich der Energie sein, die aus dem Netz gezogen wird. Diese Regelung übernimmt in Deutschland jedes der vier Verbundunternehmen in der eigenen Regelzone. Dort gibt es Regelenergiearten, die sich hinsichtlich ihrer Aktivierungs- und Änderungsgeschwindigkeit unterscheiden. Kommt es zu einer Abweichung zwischen Erzeugung und Last, so verändert sich die Netzfrequenz, die im europäischen Verbundnetz $50Hz$ beträgt. Herrscht ein Überangebot der erzeugten Energie, so steigt die Netzfrequenz, bei einem Unterangebot nimmt die Frequenz ab. Im Normalfall bewegen sich die Veränderungen in Westeuropa bei unter $0,2Hz$ [4].

Das Übertragungsnetz wird von der Höchstspannung heruntertransformiert auf Hoch-, Mittel- und Niederspannung. Größere Solarparks speisen in die Mittelspannungsebene ein, kleinere Solaranlagen speisen direkt in das Niederspannungsnetz ein. Die kleineren Solaranlagen können dabei dreiphasig ($400V$) oder einphasig ($230V$) einspeisen.

Da Erzeugung und Verbrauch in der Waage sein müssen um die Frequenz zu halten, müssen sich auch kleinere Solaranlagen an Regeln zur Regelung halten. So hat der Verband der Netzbetreiber in den Jahren 2005/06 in der Richtlinie 'Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz' vorgeschrieben, dass bei einer Frequenz von $50,2Hz$ alle Photovoltaikanlagen abgeschaltet werden müssen. Da die installierte Leistung von Photovoltaikanlagen in den darauffolgenden Jahren sehr stark stieg und Ende 2011 bereits etwa $25GW$ betrug, musste diese Vorschrift geändert werden, da bei einer Abschaltung von $25GW$ ein Black-out² droht. Aufgrund dessen ist am 26. Juli 2012 die Systemstabilitätsverordnung in Kraft

¹Pulsweitenmodulation

²großflächiger Zusammenbruch der Stromversorgung

getreten, die die Nachrüstung von Photovoltaikanlagen regelt. Die Verordnung beschreibt Abschaltkriterien von Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von mehr als 10kW , die nun nicht weiter abrupt abschalten sollen, sondern sich in einem gestuften Prozess vom Netz trennen sollen [4].

3. Analyse der Rahmenbedingungen

Um den Stand des Versuchsaufbaus nach den Arbeiten von Herrn Stefanowski und Herrn Brüggemann zu erfahren, bedarf es einer Analyse aller hardware- sowie softwaretechnischen Komponenten, welche die vorgefundenen Rahmenbedingungen beschreiben. Um einen Überblick des Versuchsaufbaus zu bekommen, wurde der Energie- und Signalfluss nachgebildet und grafisch dargestellt (Abbildung 3.1). Dabei beschreibt der Hilfsenergiefluss, die benötigte Energie von PC, Lüfter und die der Bauteile im Schaltschrank. Der Energiefluss beschreibt hingegen die Energie der Solargenerator-Netzeinspeisung.

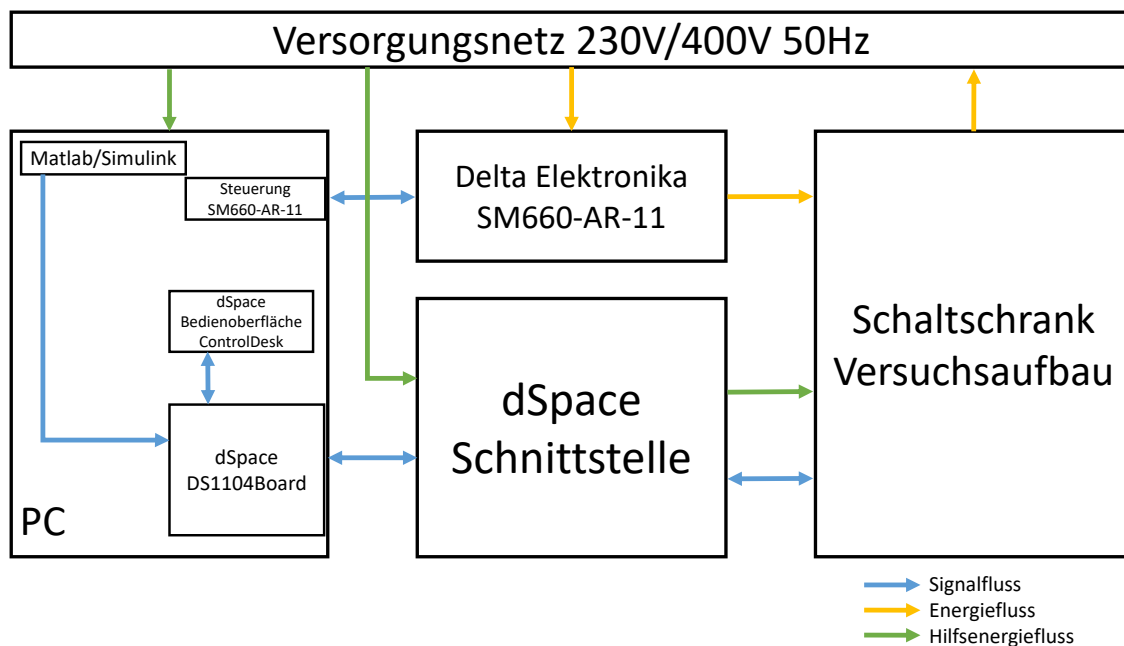


Abbildung 3.1.: Energie und Signalfluss des Versuchsaufbaus

Der Versuchsaufbau wird über den PC gesteuert. Dies geschieht über die Bedienoberfläche ControlDesk. Programmiert wird der Versuchsaufbau über Matlab/Simulink und das dSpace¹

¹Unternehmen, welches heute eines der weltweit führenden Anbieter von Werkzeugen für die Entwicklung und den Test mechatronischer Regelungssysteme ist [8]

Board DS1104, welches über eine Schnittstelle den Aufbau steuert. Die Photovoltaikmodule werden über den Leistungsverstärker Delta Elektronik SM660-AR-11 simuliert, welcher über ein eigenes Programm zur Steuerung verfügt. Des Weiteren soll der Delta Elektronik durch den TET HERCULES 5000 austauschbar sein. Dieser soll im Laufe dieser Arbeit implementiert werden.

Nach dem leistungselektronischen Aufbau des Hochsetzstellers und des Wechselrichters, liegt am Ausgang des Filters eine Spannung von 130V, welche über einen Netz-Trafo auf die sich im einphasigen Versorgungsnetz befindenden 230V transformiert werden. Der Schaltplan zur Solargenerator-Netzeinspeisung ist in Abbildung 3.2 zu finden.

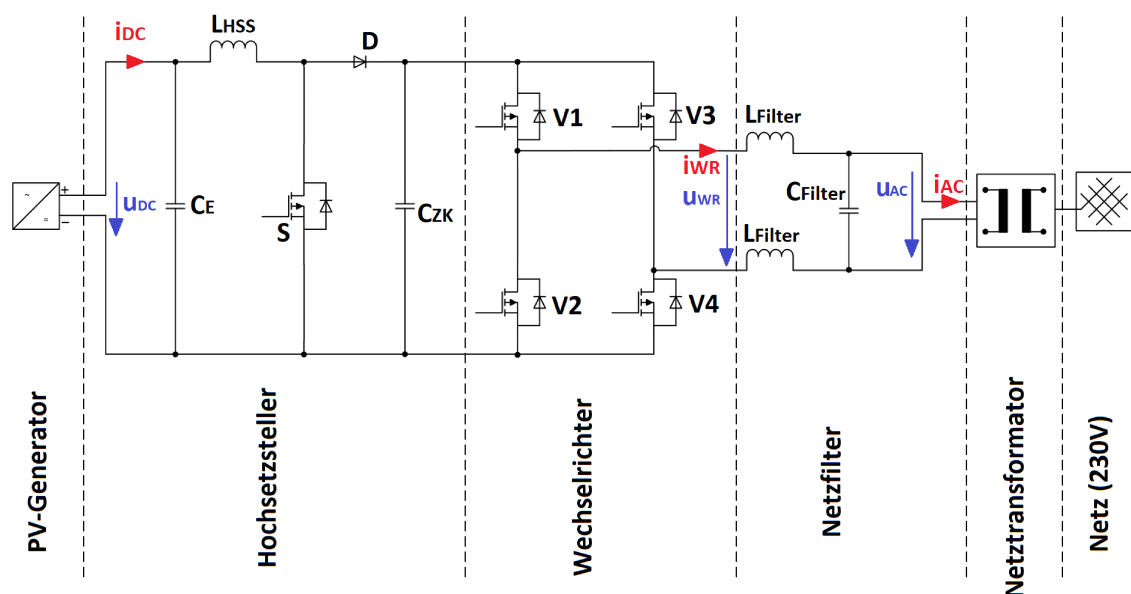


Abbildung 3.2.: Schaltplan des Versuchs 'Wechselrichter zur Solargenerator-Netzeinspeisung'

Des weiteren lässt sich der Versuchsaufbau beispielsweise auch als Hochsetzsteller, Tiefsetzsteller oder Gleichstromsteller an einem externen Widerstand verschalten.

3.1. Simulation der Solarmodule mit dem Delta Elektronika

Die Simulation eines Solarmoduls oder mehrerer Solarmodule wird mit einem Leistungsverstärker realisiert, bei dem sich Strom und Spannung programmieren lassen.

Der Leistungsverstärker SM660-11 der Firma Delta Elektronika in Abbildung 3.3 ist ein Präzisionslabor-Netzgerät. Er wurde in der Vorgängerarbeit zur Simulation der Solarmodule genutzt.



Abbildung 3.3.: Präzisionslabor-Netzgerät Delta Elektronika SM660-AR-11

Tabelle 3.1.: Kennwerte des Delta Elektronika SM660-AR-11 [5]

Ausgangsspannung	0-660V
Ausgangsstrom	0-11A
Ausgangsleistung	0-3300W
Schnittstelle	Ethernet
Wirkungsgrad	>90%
Genauigkeit	0,01%

Zu dem Gerät gibt es eine passende Software (Abbildung 3.4), mit der ein Solarmodul oder auch mehrere Solarmodule simuliert werden. Diese Software läuft auf einem PC, der über eine Ethernet Schnittstelle mit dem Präzisions-Labornetzgerät verbunden ist. Die Eigenschaften der Solarmodule werden in der Software frei gewählt. Es ist die Strom-Spannungs-Kennlinie sowie die Leistungs-Spannungs-Kennlinie zu sehen.

Der Arbeitspunkt wird angezeigt, sobald der PC mit dem Netzgerät verbunden ist. Wird die Kennlinie beispielsweise durch Variieren der Bestrahlungsstärke oder der Temperatur geän-

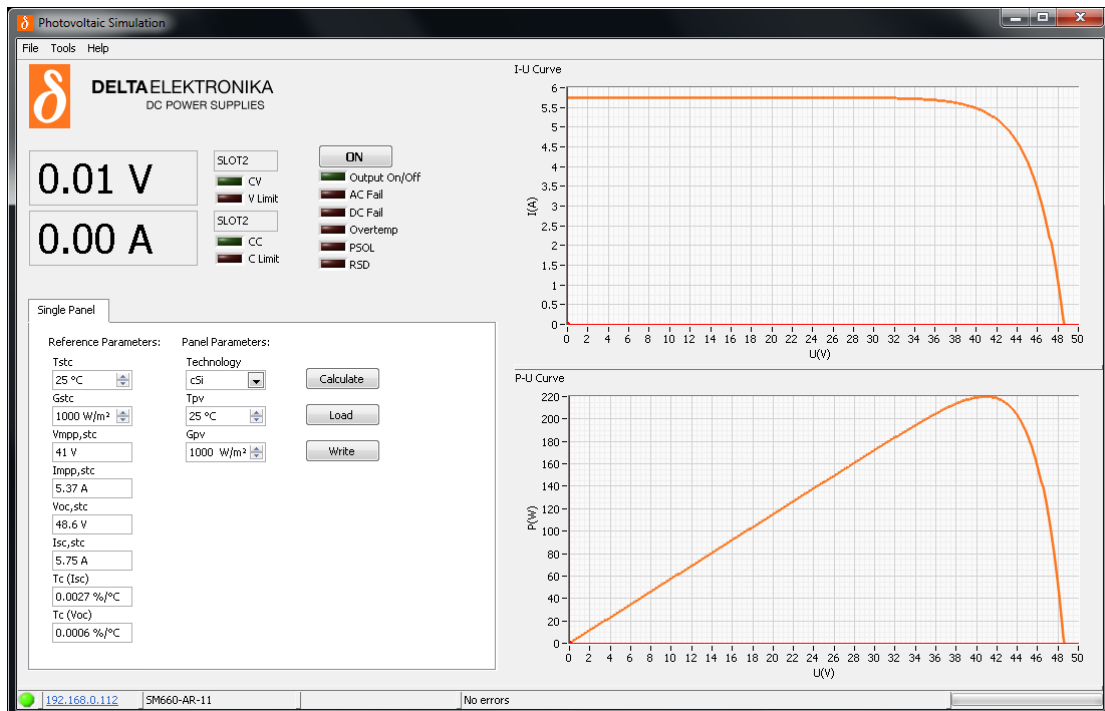


Abbildung 3.4.: Simulation eines Solarmoduls mit dem Delta Elektronika

dert, so wird der Ausgang des Netzgerätes ausgeschaltet, sodass keine Spannung anliegt und kein Strom fließt. Dies ist von der Software vorgegeben. Bei Veränderung der Variablen errechnet sie neue Daten für die Strom-Spannungskennlinie, schreibt diese in eine Tabelle und übermittelt sie an das Gerät. Nachdem die neuen Daten übertragen wurden, kann der Ausgang wieder eingeschaltet werden. Die Kennlinie kann also nicht im laufenden Betrieb verändert werden.

3.2. Hardwarekomponenten des Aufbaus

Der in den Vorgängerarbeiten entwickelte Schaltschrank beinhaltet Komponenten, mit denen man über Steckbuchsen Hochsetzsteller oder Tiefsetzsteller und Wechselrichter verschalten kann (Abbildung 3.5). Angesteuert wird dieser über das dSpace Board DS1104 im PC und den Schnittstellen. Das auf dem Board abzuarbeitende Programm wird mit Matlab/Simulink geschrieben und kompiliert. Anschließend wird es auf das Board übertragen und gestartet.

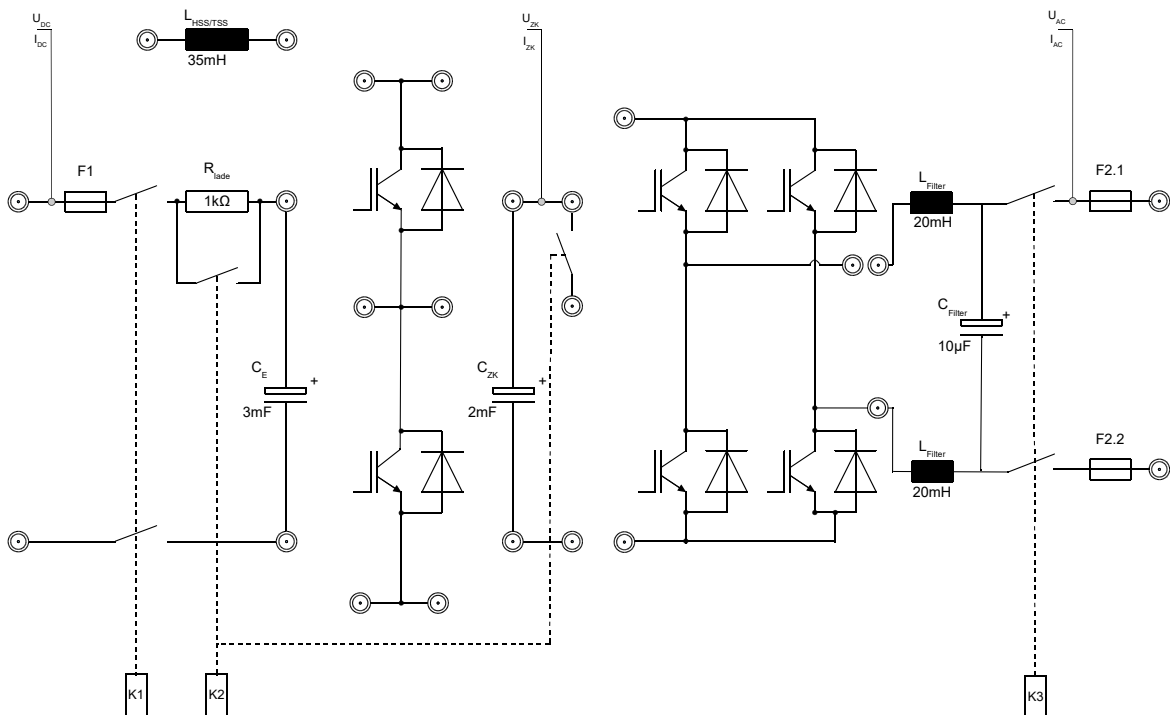


Abbildung 3.5.: Stecktafelbild des Schaltschranks [18]

3.2.1. Schaltschrank

Zu den Komponenten des Gleichstromstellers und des Wechselrichters sind dort auch Sicherungen, Ladewiderstand, Schütze und das Netzfilter untergebracht. Die Stellen, an denen Messungen von Strom und Spannung intern betrieben werden, sind auf dem Stecktafelbild in Abbildung 3.5 zu sehen und auch im Schaltschrank wiederzufinden. Die grundsätzlichen, passiven Bauelemente für den Aufbau eines Solarwechselrichters am Netz sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2.: Passive Bauelemente im Schaltschank

Ladewiderstand	R_{Lade}	$1k\Omega$
Gleichstromstellerinduktivität	$L_{HSS/TSS}$	$35mH$
Eingangskondensator	C_E	$3mF$
Zwischenkreiskondensator	C_{ZK}	$2mF$
Netzfilterinduktivität	L_{Filter}	$20mH$
Netzfilterkapazität	C_{Filter}	$10\mu F$

Tabelle 3.3.: Daten der IGBT Halbbrücke SEMiX 202GB12Vs

Spitzensperrspannung	U_{CES}	$1200V$
Nennstrom	I_{Cnom}	$200A$

Die IGBT-Halbbrücke ist mit dem SEMiX 202GB12Vs von SEMIKRON realisiert. Sie besteht aus vier IGBT mit jeweils einer dazugehörigen Freilaufdiode, wobei zweimal zwei IGBT parallel geschaltet sind und als einzelner IGBT mit Freilaufdiode betrachtet werden, da sie gleichzeitig angesteuert werden. Dadurch ergibt sich die Halbbrücke in Abbildung 3.6. Die Spitzensperrspannung von $1200V$ darf nicht überschritten werden (Tabelle 3.3) [16].

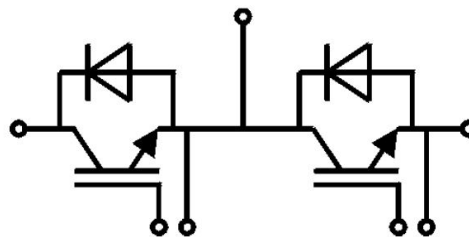


Abbildung 3.6.: IGBT-Halbbrücke mit Freilaufdioden [16]

Das SEMiX 202GB12Vs ist durch sein Gehäuse isoliert und geschützt, angesteuert wird es durch Federkontakte an der Vorderseite. Der zu dem Modul passende Treiber SKYPER 32 R wird mit dem Adapterboard Board 2s eingesetzt. Die Ansterelektronik, die der SKYPER 32R beinhaltet, sorgt zudem für eine Verriegelung der in Reihe geschalteten IGBT [14].

Für die IGBT-Vollbrücke ist die vollgesteuerte B2-Brücke SKS 15F B2CI 03 V12 von SEMIKRON eingesetzt (Tabelle 3.4). Kühlkörper mit Lüftung und Treiber für die IGBT sind dort fertig integriert (Abbildung 3.7). Die Grenze der möglichen Leistung des Aufbaus ist hier durch den in Tabelle 3.4 Nennstrom I_{rms} beschrieben.

Tabelle 3.4.: Daten der IGBT Vollbrücke SKS 15F B2CI 03 V12 [15]

Spannung DC	U_{DC}	450V
Spannung AC	U_{AC}	240V
Nennstrom	I_{rms}	15A
maximale Schaltfrequenz	f_{PWMmax}	20kHz

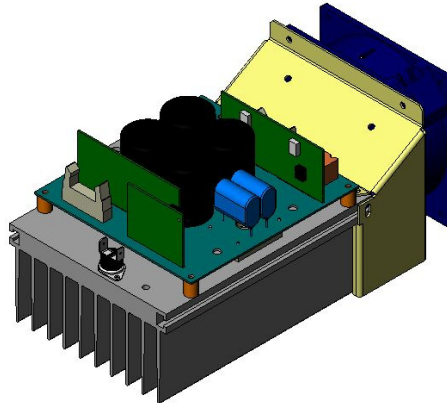


Abbildung 3.7.: IGBT-Vollbrücke SKS 15F B2CI 03 V12 mit Kühlkörper und Lüfter [15]

3.2.2. dSpace Schnittstelle

Um die Signale vom Mikroprozessorboard DS1104 zur Steuerung und Regelung nutzen zu können, werden die Signale vom Aufbau über eine Schnittstelle auf die Spezifikation des Boards angepasst. In dem Gehäuse der Schnittstelle (Abbildung 3.8) sind folgende Komponenten untergebracht. Die Leiterplatte 'dSpace Schnittstelle' ist für die Verteilung der einzelnen Signale zuständig. Sie verteilt die Signale von den zwei vom Board kommenden 25-poligen D-Sub-Steckern auf die weiteren Platinen. Auf der Leiterplatte 'Digital I/O²-Anpassung' werden die digitalen Signale vom Gleichstromsteller und Wechselrichter angepasst. Weiter beinhaltet die Schnittstelle zwei Solid-State-Relais, um von 24V auf 5V für die TTL³ zu kommen und umgekehrt. Für die Hilfsenergien der Leistungselektronik sind hier zwei 15V-Netzteile sowie ein 24V-Netzteil untergebracht, welche 24V, 15V und -15V bereitstellen.

²Input/Output, Eingang/Ausgang

³Transistor-Transistor-Logik

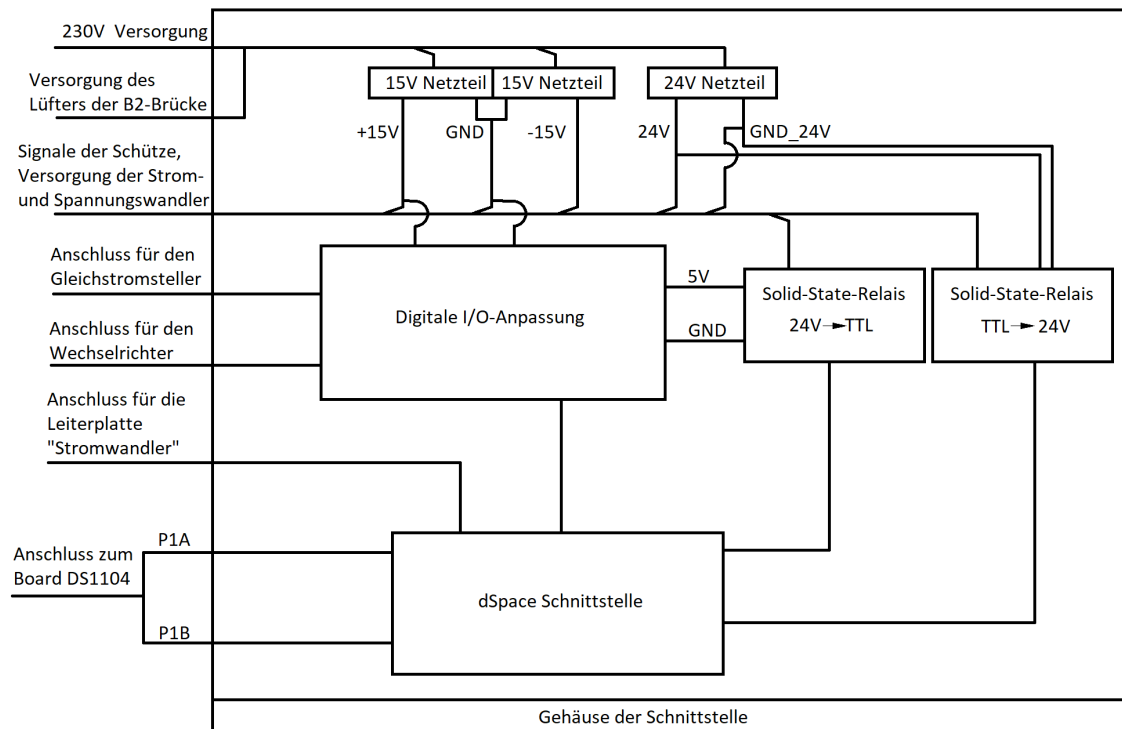


Abbildung 3.8.: Vereinfachter Schaltplan der Schnittstelle

Die Anschlüsse der Schnittstelle sind:

- 230V Gerätesteckeranschluss mit Feinsicherung und Schalter
- 230V Anschluss zur Versorgung des Lüfters
- 12-polige Leitung mit den Signalen der Schütze und der Versorgung der Strom- und Spannungswandler
- 15-poliger D-Sub-Anschluss des Gleichstromstellers
- 25-poliger D-Sub-Anschluss des Wechselrichters
- 9-poliger D-Sub-Anschluss für die Leiterplatte 'Stromwandler'
- Zwei 25-polige D-Sub-Anschlüsse zum dSpace Board DS1104

3.2.3. dSpace Board DS1104

Das verwendete Controller Board ist ein Single-Board-System für die Reglerentwicklung. Die Karte ist im PC an einem PCI⁴-Steckplatz installiert. Das direkt in den PC installierte Board besitzt einen Echtzeitprozessor und I/O-Schnittstellen. Es wird vollständig aus der Blockdiagramm-Umgebung in Simulink programmiert. Im Blockdiagramm in Simulink werden RTI⁵-I/O-Blöcke eingebunden, sodass eine Verbindung zu den I/O-Schnittstellen gegeben ist. Aus dem Modell wird der Echtzeitmodellcode automatisch generiert, kompiliert, auf das DS1104 geladen und gestartet.

⁴Peripheral Component Interconnect ist ein Bus-Standard zur Verbindung von Peripheriegeräten mit dem Chipsatz eines Prozessors.

⁵Real-Time Interface

3.3. Software des Aufbaus

Das auf dem Board abzuarbeitende Programm wird mit Matlab/Simulink geschrieben und kompiliert und auf das Board geladen. Über die Bedienoberfläche dSpace ControlDesk bedient man den Aufbau.

3.3.1. Bedienoberfläche ControlDesk

ControlDesk ist eine Experimentierungssoftware von dSpace. Hiermit lässt sich das auf dem Board befindliche Programm steuern. Auch die Variablen aus dem Simulink Programm sind hier zu finden und lassen sich ändern und mit einer Vielzahl an Messinstrumenten anzeigen. Die zeitlichen Verläufe der Variablen lassen sich aufnehmen und können dann in Matlab ausgewertet werden. Der Versuchsaufbau exklusive der Simulation von Solarmodulen soll mit diesem Programm gesteuert werden. Ein provisorischer Aufbau ist dazu in den Vorgängerarbeiten erarbeitet worden.

3.3.2. Das Simulink Modell

Die Programmierung der Regelung des Versuchsaufbaus geschieht über Matlab/Simulink. Durch hierarchische Modellierung mit Hilfe grafischer Blöcke entsteht so das Programm, welches dann mit Hilfe des dSpace Real-Time Interface (RTI) auf das dSpace Boards DS1104 geladen wird. Das RTI ist das Zwischenstück zwischen Simulink und dem Board, in dem I/O-Blöcke in die Simulinkbibliothek integriert werden. Ein fertiges Modell kann direkt in ein lauffähiges Programm kompiliert werden, welches auf das Prozessorboard nach dem Laden auch gestartet wird.

4. Anforderungsanalyse

In dieser Arbeit soll der Versuchsstand optimiert und erweitert werden. Hierzu sind Korrekturen durchzuführen, die sich in der Analyse der Rahmenbedingungen (Kapitel 3) ergeben haben. Sie werden nachfolgend in Kapitel 4.1 beschrieben. Des Weiteren soll der Versuchsstand um einige Komponenten erweitert werden (Kapitel 4.2).

4.1. Auswertung des Versuchsaufbaus

Der Versuchsaufbau ist so weit, dass bereits die grundlegende Regelung funktioniert. Jedoch zeigen sich noch einige Fehler, die beseitigt werden müssen, bevor Studenten an dem Versuchsaufbau arbeiten können.

4.1.1. Ausreißer des Stroms I_{AC}

Ist der Versuchsaufbau als Wechselrichter zu Solargenerator-Netzeinspeisung verschaltet (Abbildung 3.2), so soll er einen sinusförmigen Strom in das Netz einspeisen. Dieser soll in Phase oder mit einem vorgegebenen Phasenwinkel von -25° bis 25° zur Spannung eingespeist werden. Dazu wird im Programm der Winkel der Spannung gemessen. Eine Variable gibt den vorgegebenen Phasenwinkel an, wodurch sich dann der Winkel des Stroms ergibt. Der Spitzenwert der Amplitude ergibt sich aus der Zwischenkreisregelung. Mit dem sinusförmigen Stromsollwert als Eingangsgröße des Reglers ergibt sich als Ausgangsgröße eine Steuerspannung. Aus dieser Steuerspannung ergibt sich für die Ventile V1 und V2 sowie V3 und V4 ein Tastgrad, der direkt vom Board verwendet wird und die PWM an die Ventile gibt. Zu jedem Tastgrad ergibt sich auch noch eine spezielle Freigabe für die Ventile. Dies dient der Sicherheit. Nur wenn der Wechselrichter korrekt läuft, sollen die Ventile arbeiten.

Der Strom, der in das Netz eingespeist wird, weist große Stromanstiege und -abfälle auf. Schaut man sich einen Stromabfall bzw. -anstieg an und zeichnet gleichzeitig die Spannung am Ausgang des Wechselrichters auf, so erkennt man, dass der Strom diese Spitzen aufzeigt und gleichzeitig der Wechselrichter in einer Ventilschaltung bleibt (Abbildung 4.1). Während T_1 sind die Ventile V3 und V4 geöffnet, der Strom sinkt und der Wechselrichter arbeitet

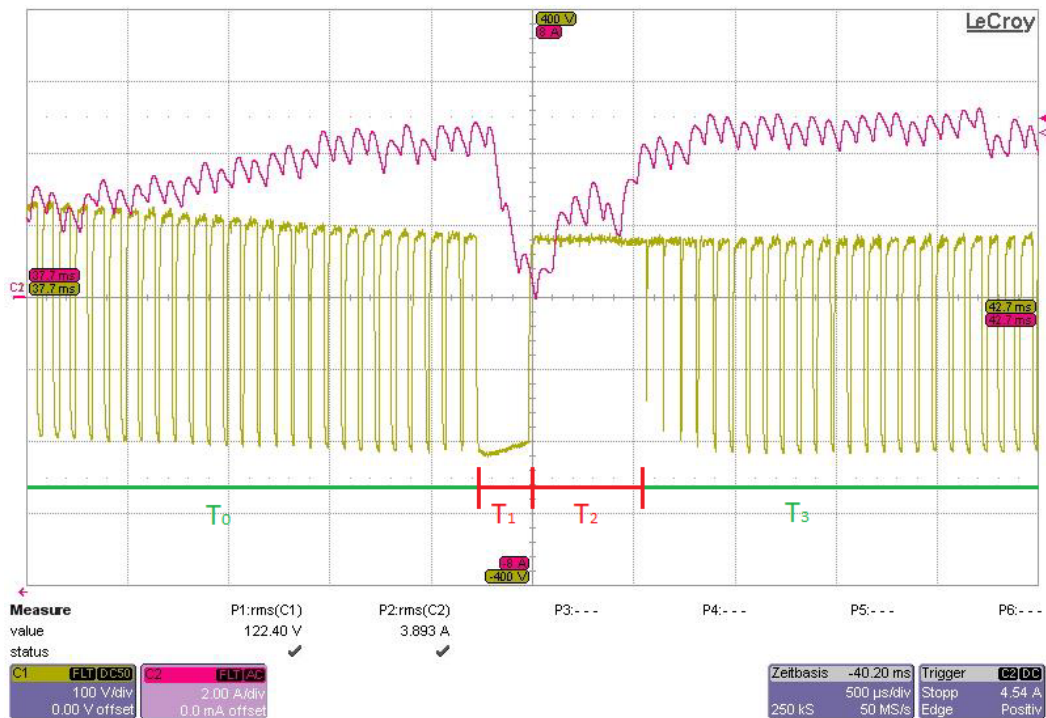


Abbildung 4.1.: Strom (Ch2) und Spannung (Ch1) am Ausgang des Wechselrichters während den Zeiten T_0 : Strom und Spannung wie erwartet, T_1 : Wechselrichter schaltet nicht weiter, Strom fällt, T_2 : Wechselrichter arbeitet wieder, Stromabfall wird korrigiert, und T_3 : Strom und Spannung wieder wie erwartet

nicht. Während des Zeitpunkts T_2 sind V3 und V4 wieder geschlossen und V1 und V2 sind geöffnet. Der Wechselrichter arbeitet zu diesem Zeitpunkt. Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Strom ist allerdings nun so groß, dass die Ventile für die Zeit T_2 geöffnet sind, um zum Sollstrom zu gelangen. Erst zum Zeitpunkt T_3 ist der Strom wieder am Sollstrom und es ist in dem Verlauf der Spannung zu sehen, dass der Wechselrichter wieder korrekt arbeitet.

4.1.1.1. Softwareseitige Wirkung und Herkunft

Während der Untersuchung der Signale zur Ansteuerung der Ventile wurde festgestellt, dass die Steuerspannung zur Bildung der PWM Aussetzer hat, welche aufgrund der Freigabe auftreten (Abbildung 4.2). In Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass die Freigabe in einem einzelnen Punkt auf logisch '1' springt. Im fehlerfreien Fall ist die Freigabe auf logisch '0'. In diesem einen Punkt ist aufgrund der Freigabe auch die Steuerspannung gleich Null. Dadurch bleibt der Wechselrichter in seiner Position, entweder V1 und V2 oder V3 und V4 geöffnet, wodurch der Strom stark steigt oder fällt. Die Freigabe der PWM bildet sich im

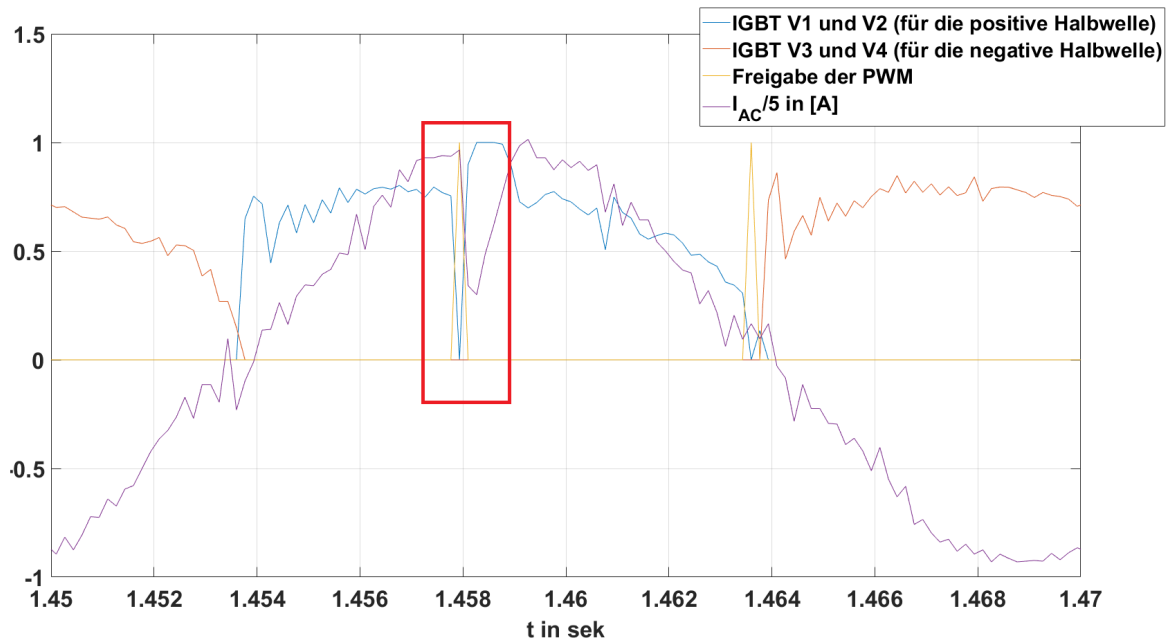


Abbildung 4.2.: I_{AC} , Steuerspannung sowie die Freigabe der Ventile im Fehlerfall, markierter Bereich zeigt Fehlerfall

Programm wie in Abbildung 4.3. Die Variable 'WR_ON_OFF' gibt an, ob der Wechselrichter grundsätzlich im Programm aktiviert sein soll oder nicht. Sie wird logisch '1' sobald in der Bedienoberfläche der Wechselrichter aktiviert wird. 'DS1104Bit_IN_C13' ist ein digitaler Eingang des Boards. Dieser ist mit 'HK_AC_HS' beschriftet, das bedeutet, es ist der Hilfskontakt des wechselstromseitigen Hauptschützes. Dieser soll anzeigen, ob das wechselstromseitige Hauptschütz geschlossen oder geöffnet ist.

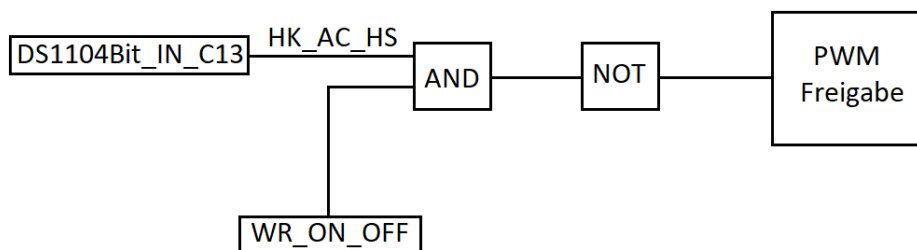


Abbildung 4.3.: Bildung der PWM-Freigabe im Simulink Programm

4.1.1.2. Untersuchung des Signals vom wechselstromseitigen Hauptschütz

Das Hauptschütz ist geschlossen und auch bautechnisch nicht in der Lage, sich für einen so kurzen Moment zu öffnen (Ansprechzeit 20ms und Rückfallzeit 4ms) [10]. Daher wurde das Signal vom Hilfskontakt gemessen und verfolgt. Das Signal kommt aus dem Schaltschrank, in dem es auf der 24V Ebene ist. Das heißt, dass 24V anliegen, sobald das Schütz geschlossen ist. Von dort wird es über die 12-polige Leitung mit den Signalen der Schütze und der Versorgung der Strom- und Spannungswandler zur dSpace Schnittstelle geführt. Hier wird es von 24V auf 5V für TTL mittels des Solid-State-Relais gebracht und über den 25-poligen Anschluss 'P1B' weiter zum dSpace Board DS1104. Auf dem Signal des Hilfskontakts des wechselstromseitigen Hauptschützes K3 sind auf der 24V-Ebene starke Störsignale zu messen, die sich auch weiter auf der 5V-Ebene fortsetzen. In Abbildung 4.4 die Störungen deutlich zu sehen. Sie gehen auch in den logischen Low Bereich, sodass das Signal für kurze Momente auch als Low zu werten ist. Die digitalen Eingänge des dSpace Boards DS1104 bewerten die Eingangsspannungen wie folgt [9]:

- Highpegel: 2V...5V
- Lowpegel: 0V...0,8V

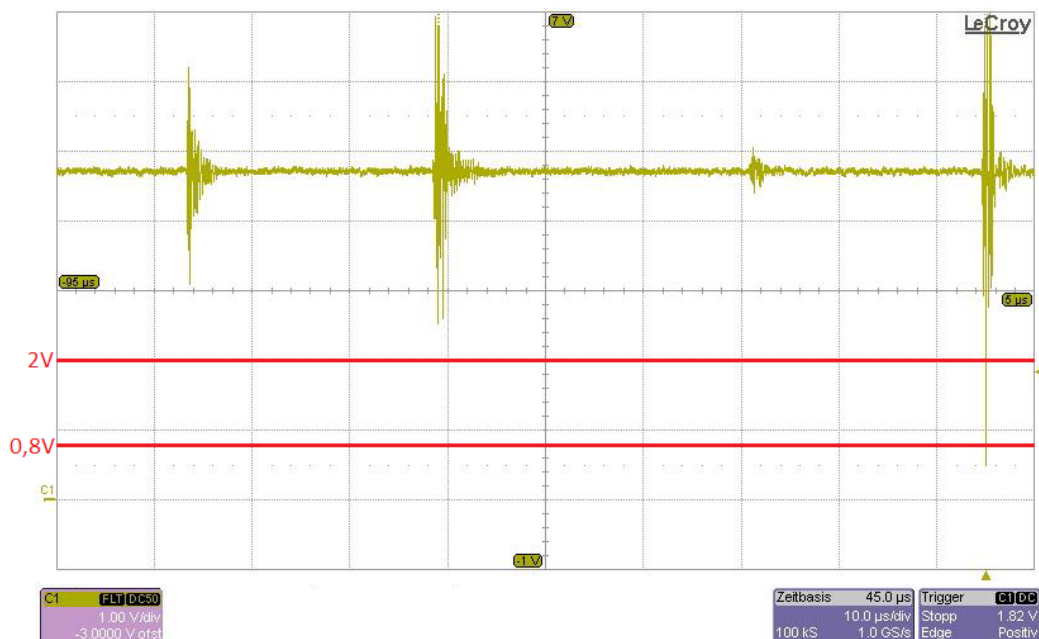


Abbildung 4.4.: Signal des Hilfskontakt des wechselstromseitigen Hauptschütz auf der 5V Ebene mit kritischem Störsignal

4.1.2. Aussetzer des Systems

Wird der Versuch als Wechselrichter zur Solargenerator-Netzeinspeisung gefahren (Abbildung 3.2), kommt es im Programm immer wieder zu Aussetzern, die sich durch einen nicht sinusförmigen Strom bemerkbar machen. Wie in Abbildung 4.5 zu sehen, ist der Strom hier bis zum Zeitpunkt T_{Start} sinusförmig und ab dem Zeitpunkt T_{Start} verrauscht. Es ist auch ersichtlich, dass es sich hierbei um ein anderes Problem als das in Kapitel 4.1.1 dreht, da es sich hier nicht nur um einen Ausreißer handelt.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass es sich nicht nur bei dem gemessenen Ausgangs-

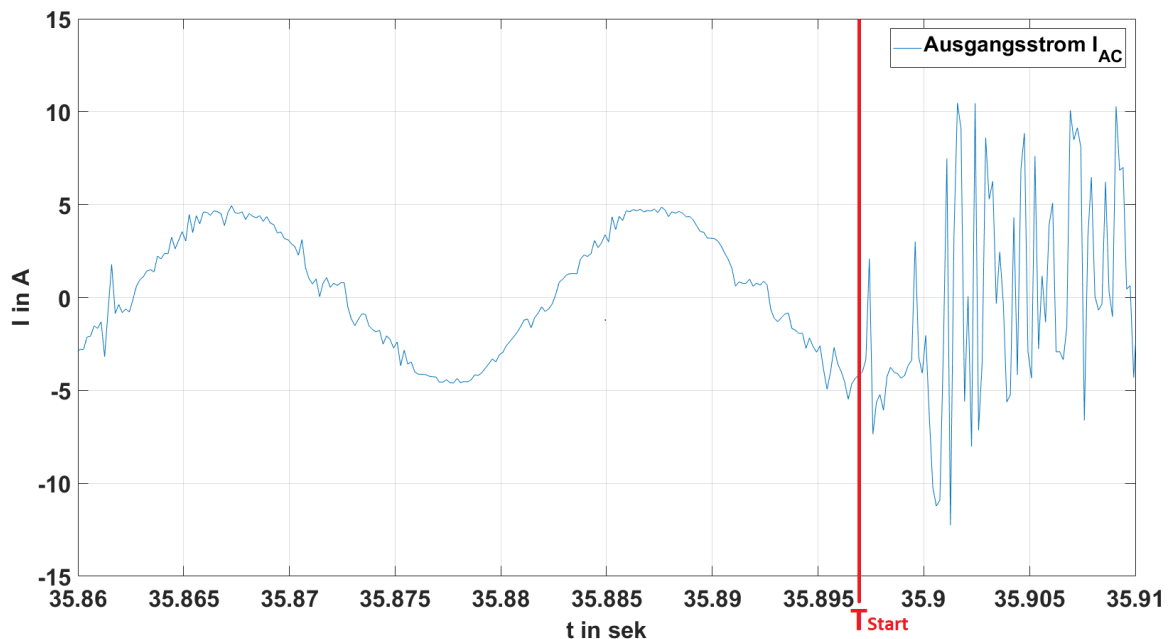


Abbildung 4.5.: Aussetzen des sinusförmigen Stroms ab dem Zeitpunkt T_{Start}

strom so verhält. Auch die aus dem Bedienprogramm ControlDesk gemessene Netzspannung enthält diese Aussetzer (Abbildung 4.6). Dort ist das Rauschen zwischen den Zeiten T_{Start} und T_{Stopp} zu sehen. Nach dem Zeitpunkt T_{Stopp} ist die gemessene Spannung wieder gleich der Netzspannung. Die Spannung wird, wie der Strom in Abbildung 4.5, nach dem Netzfilter gemessen. Da die Spannung zwischen dem Netzfilter und dem Netz noch transformiert wird, ist sie an diesem Messpunkt bei $U_{AC} = 130V$. Die mit dem Oszilloskope gemessene Netzspannung zeigt kein Rauschen auf. Infolgedessen lässt sich vermuten, dass es sich um ein Softwareproblem handelt.

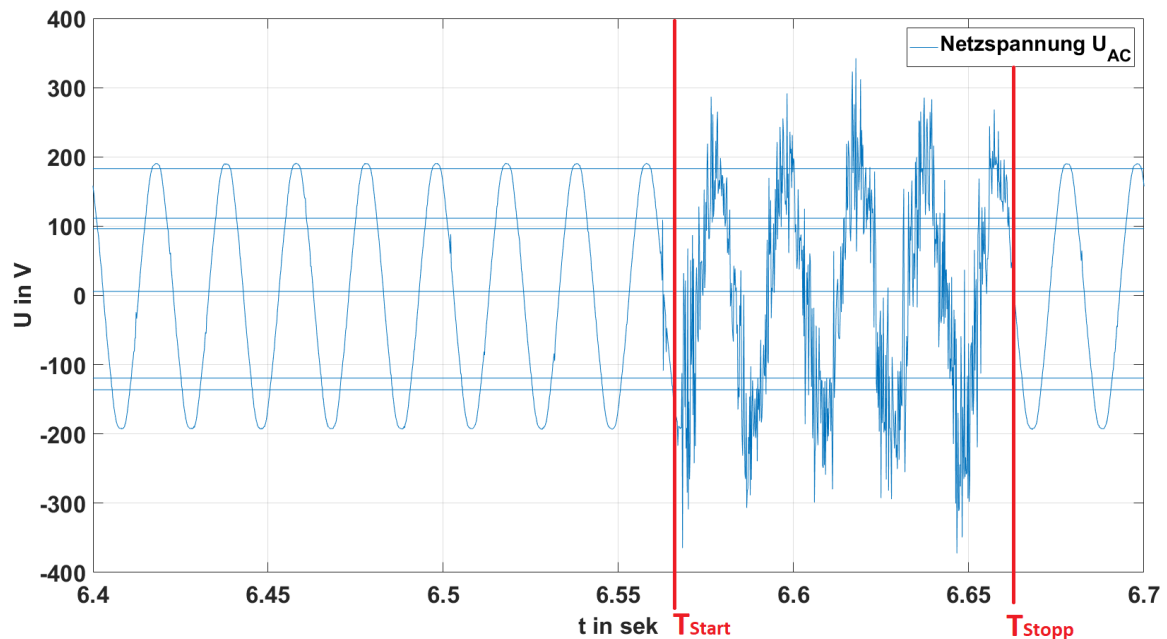


Abbildung 4.6.: Aussetzen der Netzspannung zwischen den Zeitpunkten T_{Start} und T_{Stopp}

4.1.3. Maximum Power Point Tracking

Das automatische MPPT soll mittels Such-Schwing-Verfahren den Tastgrad des Hochsetzstellers so verändern, dass der Arbeitspunkt im Punkt der maximalen Leistung der Kennlinie des Solarmoduls ist. Hierfür wird im Programm alle zwei Sekunden der aktuelle Wert der Spannung und des Stromes am Eingang des Hochsetzstellers gemessen. Aus der Multiplikation dieser Werte wird die Leistung berechnet. Dann werden die Differenzen der vorherigen Werte der Spannung und der Leistung zu den aktuellen errechnet. Im Anschluss wird der Zwischenkreisstrom mit

$$I_{ZK} = I_{DC} \cdot (1 - a_{T-1}) \quad (4.1)$$

berechnet, wobei das Tastverhältnis a_{T-1} das des letzten Aufrufs ist. Wenn nun die aktuelle Leistung kleiner als die vorherige und die neue Spannung kleiner als die alte ist, wird der Tastgrad um die vorgegebene Schrittweite verringert. Sollte die aktuelle Spannung allerdings größer als die vorherigen sein, so wird der Tastgrad erhöht. Ist die aktuelle Leistung größer als die vorherige und die Spannung kleiner, wird der Tastgrad erhöht. Ist sowohl die Leistung als auch die Spannung größer, wird der Tastgrad verringert (Abbildung 4.7).

In der Anwendung fällt beim automatischen MPPT auf, dass das Programm sehr langsam arbeitet. Zudem findet das Programm den MPP nicht auf dem direkten Wege. Es kehrt auf

dem Weg zum MPP des Öfteren um, dies bedeutet anstatt den Tastgrad so zu ändern, dass sich der Betriebspunkt zum MPP bewegt, wird er so geändert, dass sich der Betriebspunkt von dem MPP wegbewegt.

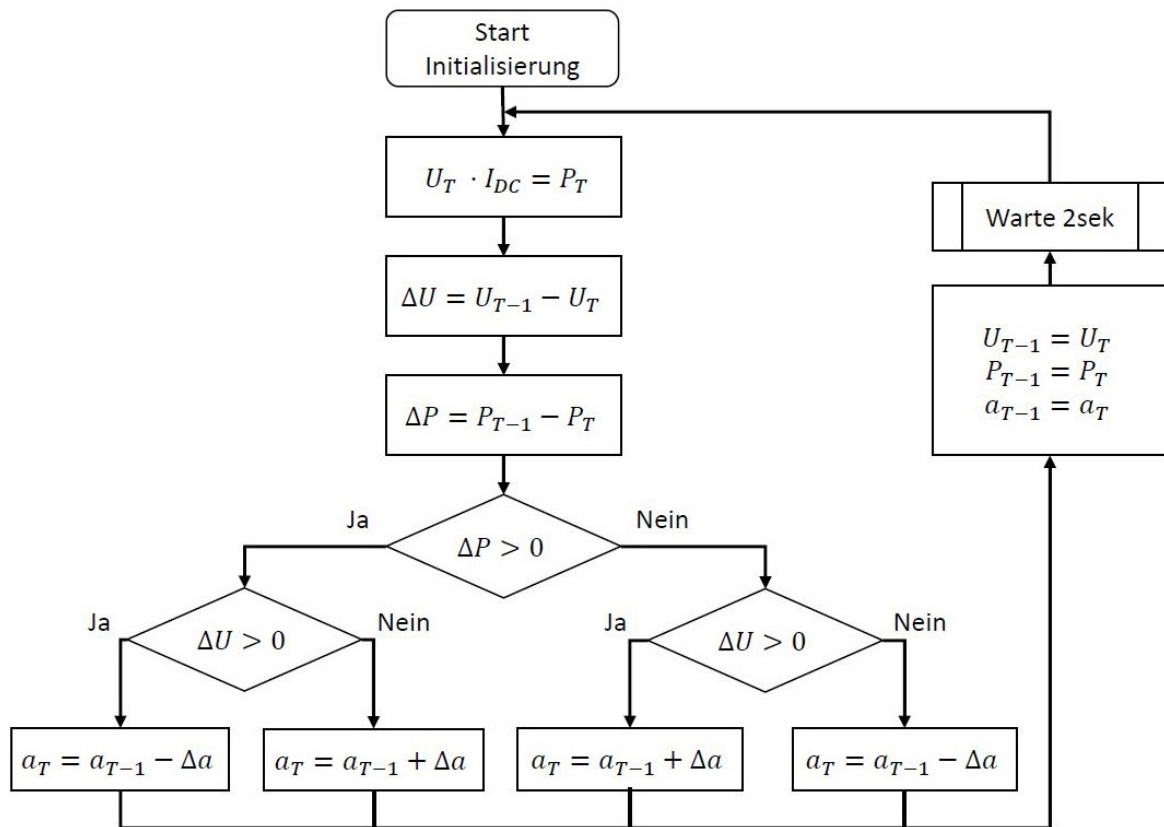


Abbildung 4.7.: Programmablaufplan zur Verdeutlichung des vorhandenen Such-Schwing-Verfahrens zum automatischen MPP-Tracking

4.2. Erweiterungen des Versuchsaufbaus

4.2.1. Kopierverstärker TET Hercules 5000 als PV-Generator

Um variabler zu sein, soll der Leistungsverstärker HERCULES 5000 der Firma TET Electronics implementiert werden. Dieser wurde bereits in einem vorigen Versuchsaufbau zur Simulation einer Solarkennlinie genutzt.

Tabelle 4.1.: Kennwerte des TET Electronics HERCULES 5000 [20]

Ausgangsspannung	0-450V
Ausgangsstrom	0-11A
Ausgangsleistung	0-5000W
Schnittstelle	RS232
Wirkungsgrad	>90%

Angesteuert und programmiert wird der Leistungsverstärker mit LabVIEW¹ über die RS232 Schnittstelle. Die erforderlichen Treiber für die Steuerung gibt es dafür ebenfalls von TET Electronics. Die Ansteuerung erfolgt über ein handelsübliches RS232 Kabel, über welches das Gerät mittels Senden und Empfangen mit dem PC und dem Programm über LabVIEW kommuniziert.

Der HERCULES 5000 soll in dem Versuch ein oder mehrere Solarmodule simulieren. Dabei soll die Kennlinie abhängig von der Strahlungsstärke und der Anzahl der in Reihe geschalteten Module sein. Es soll hier auch im Gegensatz zum Delta Elektronika möglich sein die Kennlinie im laufenden Betrieb zu ändern.

4.2.2. Grafische Bedienoberfläche

Um den Versuchsaufbau zu steuern, soll eine Bedienoberfläche erstellt werden. Diese soll übersichtlich und selbsterklärend sein. Der Anwender soll dabei wissen, welche Schritte er macht und was er steuert. Es sollen nur die relevanten Parameter zu sehen sein und verändert werden können. Fehler durch falsche Bedienung sollen abgeriegelt sein. Des Weiteren sollen auch aktuelle Werte in dem Versuchsaufbau sowohl als zeitliche Darstellung, als auch in einer dezimalen Darstellung zu sehen sein. Bedient werden soll der Versuchsaufbau dabei mit dem Programm dSpace Control Desk.

¹Grafisches Programmiersystem der Firma Nation Instruments

4.2.3. Realisierung eines zweiten Versuchsstands

Um den Versuch parallel fahren zu können, soll der Versuchsstand ein weiteres Mal aufgebaut werden. Dabei sollen die Optimierungen, die im Laufe dieser Arbeit erarbeitet wurden, bereits in den neuen Aufbau einfließen. Dieser Versuchsstand soll zudem auch mobil sein, wodurch sämtliche Verbindungen zu dem Schaltschrank steckbar sein sollen.

4.2.4. Optimierung des Regelprogramms

Das Regelprogramm für das dSpace Board DS1104 soll verbessert werden. Dabei muss die Echtzeitfähigkeit berücksichtigt werden. Die Messwerterfassung sowie die Regelung des Ausgangsstroms und des Zwischenkreises sollen optimiert werden.

5. Optimierungen

Bevor Studenten an dem Versuchsaufbau arbeiten können, müssen einige Optimierungen vorgenommen werden. Zum einen die Optimierungen, die bei der Analyse in Kapitel 3 genannt wurden, zum anderen das Erstellen der grafischen Bedienoberfläche und die Implementierung des HERCULES 5000.

5.1. Ausreißer des Ausgangsstroms

Der Ursprung der Ausreißer sind die Störungen, die in Kapitel 4.1.1 erkannt wurden. In Abbildung 5.1 wurde mit dem Oszilloskope das zeitliche Wiederkehren der Störsignale aufgenommen. Es handelt sich hier um drei Störsignale. Jedes Störsignal tritt alle $83\mu s$ auf. Das entspricht einer Frequenz von $f_{Ausreißer} = 12kHz$ (Abbildung 5.1).

Da die PWM-Frequenz ebenfalls $f_{PWM} = 12kHz$ beträgt, kommt der Verdacht, dass die Störungen abhängig vom Wechselrichter sind. Dieser Verdacht wurde bestätigt, da beim ausgeschalteten Wechselrichter keine Störungen gemessen wurden.

Um der Frage nachzugehen, wie die Störfrequenzen auf die Signalleitung kommen, muss das Innere des Schaltschranks genauer untersucht werden.

In Abbildung 5.2 ist der innere Aufbau des Schaltschranks zu erkennen. Das mit der Nummer 1 gekennzeichnete Bauteil ist das wechselstromseitige Schütz K3, die Nummer 2 ist die IGBT-Vollbrücke SKS 15F B2CI 03 V12 mit Kühlkörper und Lüfter (Abbildung 3.7), also der Wechselrichter, mit Nummer 3 ist der Kabelkanal zwischen diesen Bauteilen gekennzeichnet. Diese Störungen auf der Signalleitung sind vorhanden, da in dem Kabelkanal sowohl die Leitungen aus dem Leistungsteil, als auch die aus dem Signalteil zusammengeführt worden sind. Des Weiteren sind in dem Aufbau auch keine zusätzlichen Vorsorgungen getroffen worden, um die Signalleitungen vor Störungen zu schützen. Lediglich die Messungen von Strom und Spannung sind in einer metallischen Box.

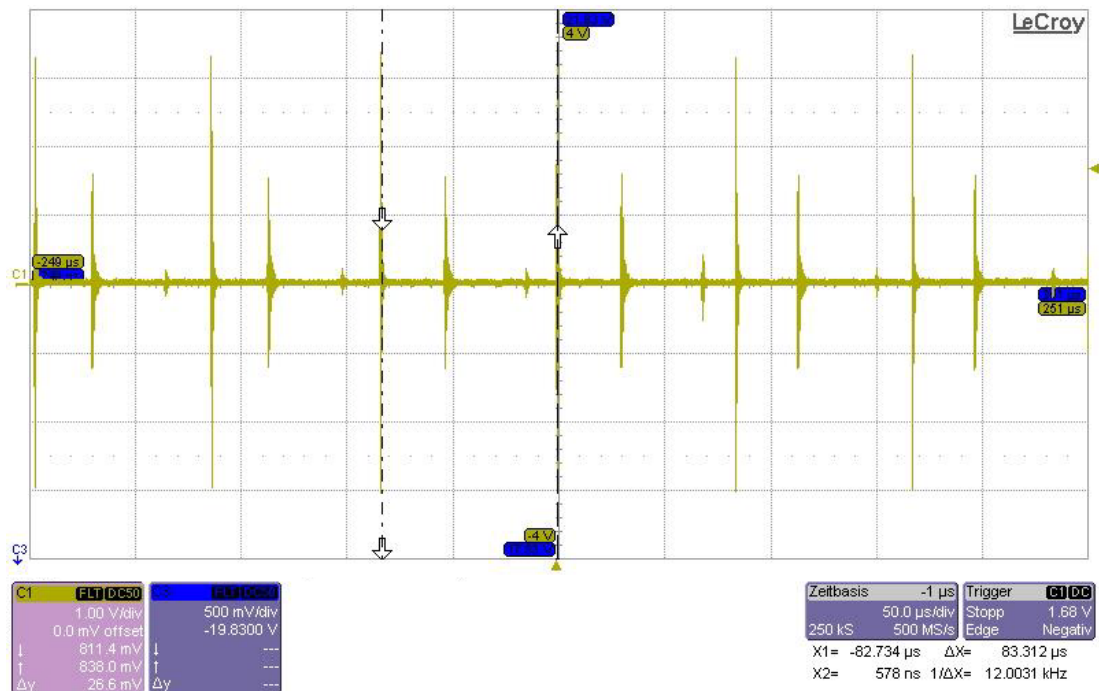


Abbildung 5.1.: Bestimmung der Frequenz der periodischen Ausreißer über die Messung der zeitlichen Differenz am digitalen Eingang des Prozessorboards DS1104

$$f_{\text{Ausreißer}} = \frac{1}{83\mu\text{sek}} = 12\text{kHz}$$

Um sämtliche Signalleitungen störungsfrei zu bekommen, muss der Aufbau dementsprechend geändert werden. Der Leistungsteil und der Signalteil werden getrennt und die Leitungen werden nicht mehr in einem Kabelkanal zusammen verlegt. Zudem müssen die Signalleitungen abgeschirmt werden. Da dieser Umbau ökonomisch nicht sinnvoll erscheint, wurde eine andere Lösung getroffen. Neben der Signalleitung des Hilfskontaktes des wechselseitigen Hauptschützes ist nur der Hilfskontakt der Vorladung des Zwischenkreises betroffen. Also wird ein Tiefpassfilter entworfen, welches die Störsignale herausfiltert, sodass der Versuchsaufbau fehlerfrei arbeitet.

Es wird eine Grenzfrequenz von $f_{g\text{sol}} = 1\text{kHz}$ gewählt. Damit wird sichergestellt, dass die realen Schaltvorgänge des Schützes erfasst werden können und sämtliche Störungen auf dem Signal werden weggefiltert, da diese Störungen wesentlich größer 1kHz sind. Als Tiefpassfilter wird ein einfacher RC-Tiefpass gewählt, weil es ein einfacher Aufbau ist und für diesen Zweck sehr gut geeignet ist. Der Widerstand wird in Abhängigkeit des Stroms gewählt. Der maximale Eingangsstrom des digitalen Eingangs am Prozessorboard DS1104 ist $I_{\text{Input}_{\text{max}}} = 500\mu\text{A}$. Daraufhin wird ein Widerstand $R = 150\Omega$ gewählt. Dadurch erhält man einen maximalen Spannungsabfall am Widerstand:

$$\Delta U_{\text{max}} = I_{\text{N}_{\text{max}}} \cdot R = 500\mu\text{A} \cdot 150\Omega = 0,075\text{V} \quad (5.1)$$

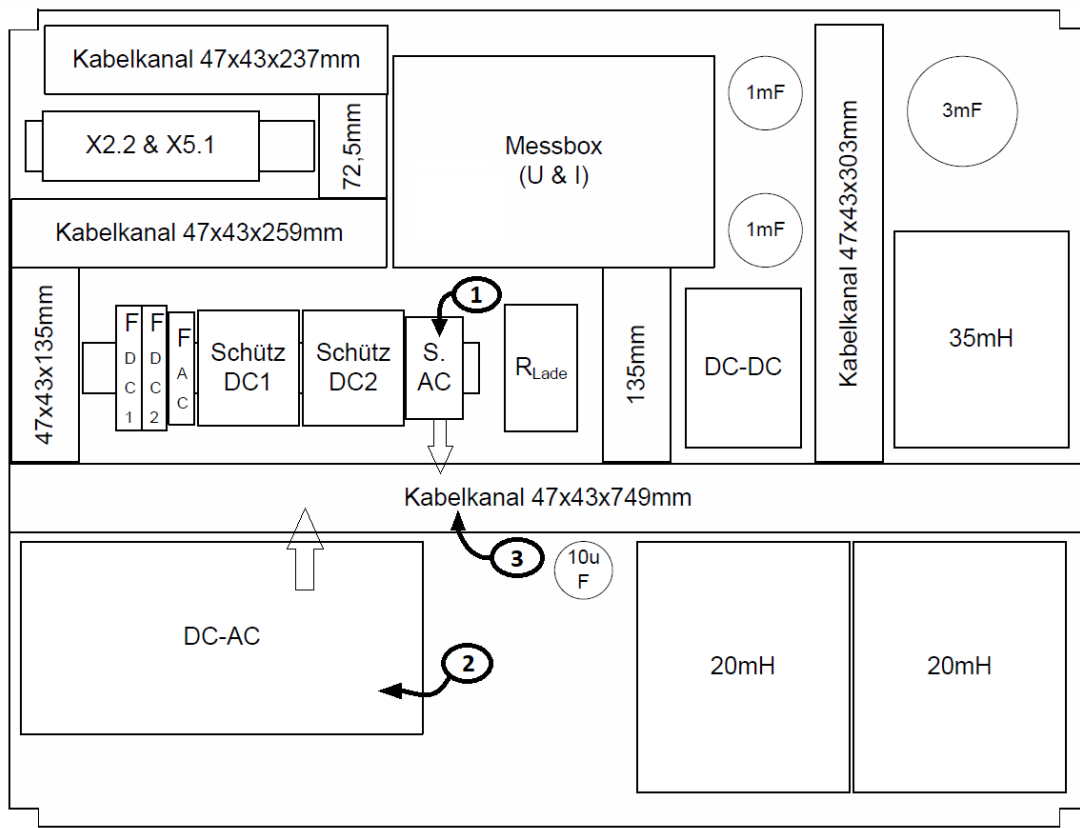


Abbildung 5.2.: Übersichtsplan der Montageplatte in Anlehnung an [18] mit den essentiellen Bauteilen 1. wechselseite Hauptschütz 2. Wechselrichter 3. Zusammenführen der Leitungen im Kabelkanal

Aus den vom Board vorgegebenen Größen der Spannungen für High und Low ist ein maximaler Spannungsabfall von $\Delta U_{max} = 0,075V$ nicht kritisch.

Zuletzt fehlt noch die Größe der Kapazität. Aus der Formel der Grenzfrequenz

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (5.2)$$

[12] erhält man durch Umstellen

$$C_{soll} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot f_{g,soll}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 150\Omega \cdot 1kHz} = 1,06\mu F \quad (5.3)$$

Naheliegender wurde als reale Kapazität $C = 1\mu F$ gewählt. Nun lässt sich dadurch die reelle

Grenzfrequenz des Filters mit 5.2 berechnen:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 150\Omega \cdot 1\mu F} = 1061Hz \quad (5.4)$$

Dieses Filter wird nun die Störungen auf den beiden Signalen 'HK_AC_HS' und 'HK_VL_ZK' herausfiltern. Es wird in die dSpace Schnittstelle eingebaut, sodass direkt vor dem Board auf der 5V-Ebene gefiltert wird (Abbildung 5.3). Das Signal des Hilfskontakts des Hauptschützes kommt auf der 5V-Ebene auf das Filter und das gefilterte Signal geht dann über den Steckplatz X5E-7 auf den 25 poligen D-Sub-Anschluss auf das Prozessorboard. Gleiches geschieht mit dem Signal des Hilfskontakts der Vorladung des Zwischenkreises, nur über den Steckplatz X5E-5. Auf dem Steckplatz X5E-1 ist Masse. Durch diese Maßnahme kommen die beiden Signale ohne Störung auf das Board.

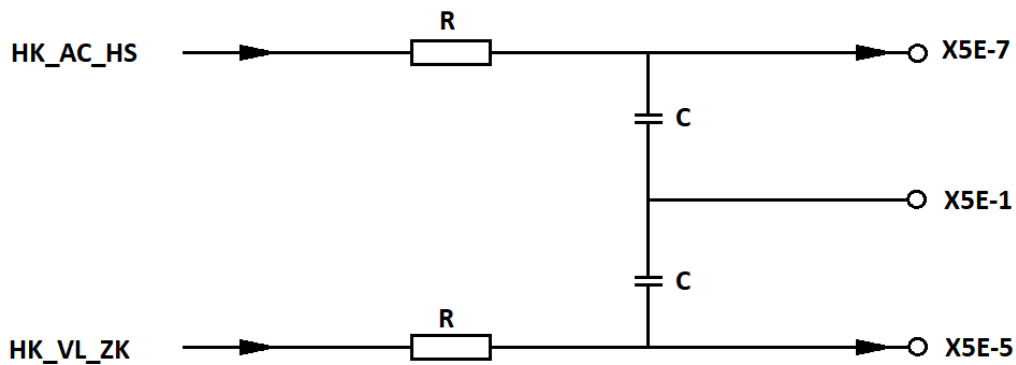


Abbildung 5.3.: Schaltplan mit Steckplätzen des Filters

5.2. Optimierung des Simulink Programms

Die in Kapitel 4 beschriebenen Optimierungen, die in Zusammenhang mit dem Matlab/Simulink-Programm stehen, werden nachfolgend weiter untersucht und verbessert.

5.2.1. Verbesserung der Messwerteerfassung

Am analogen Eingang des Boards liegt i_{AC} an, also der sinusförmige Strom am Ausgang des Netzfilters (Abbildung 3.5). Dieser sinusförmige Strom wird $i_{\alpha} = \hat{i} \cdot \sin(\omega t)$ genannt. Nun wird i_{AC} um 90° phasenverschoben. Dies geschieht in Simulink mittels des 'Integer Delays', welches die Werte mit Verzögerung herausgibt. Um hier eine Verschiebung von 90° zu erreichen müssen die Werte um 5msek verzögert werden, da die Netzfrequenz 50Hz beträgt:

$$t_{delay} = \frac{1}{f_{Netz}} \cdot \frac{90^{\circ}}{360^{\circ}} = \frac{1}{50\text{Hz}} \cdot \frac{90^{\circ}}{360^{\circ}} = 5\text{msek} \quad (5.5)$$

Multipliziert man nun die Verzögerungszeit t_{delay} mit der Frequenz der Abtastung f_{PWM} , so erhält man den Wert für die Länge der Verzögerung für Funktion 'Integer Delay' (Formel 5.6).

$$Delaylength = t_{delay} \cdot f_{PWM} = 5\text{msek} \cdot 8\text{kHz} = 40 \quad (5.6)$$

Der phasenverschobene Strom wird $i_{\beta} = \hat{i} \cdot \cos(\omega t)$ genannt. Der Effektivwert errechnet sich aus [12]:

$$I_{Eff} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (5.7)$$

mit

$$i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2 = (\hat{i} \cdot \sin(\omega t))^2 + (\hat{i} \cdot \cos(\omega t))^2 = \hat{i}^2 (\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t)) \quad (5.8)$$

und

$$\sin^2 + \cos^2 = 1 \quad (5.9)$$

eingesetzt in 5.7 ergibt sich:

$$I_{Eff} = \frac{\sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{\hat{i}^2 (\sin^2 + \cos^2)}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{\hat{i}^2 \cdot 1}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (5.10)$$

Die Umsetzung in Simulink ist in der nachfolgenden Abbildung 5.4 zu sehen.

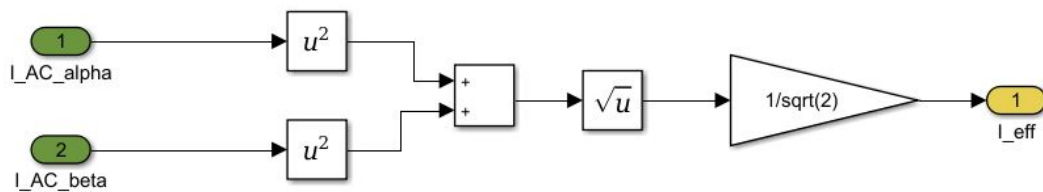


Abbildung 5.4.: Bildung des Effektivstroms in Simulink

5.2.2. Aussetzen des Systems

Das in Kapitel 4.1.2 beschriebene Problem wurde untersucht. Um die Arbeit des Programms zu verfolgen, wurde es mit dem Programm dSpace Profiler überprüft. In diesem Programm ist zu sehen wann welcher Programmteil, abhängig von der jeweiligen Aufrufhierarchie abgearbeitet wird.

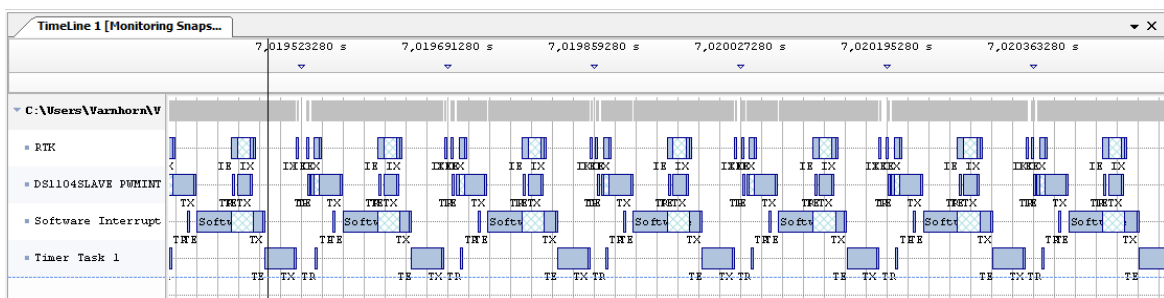


Abbildung 5.5.: Programmaufrufe untersucht mit dSpace Profiler

In Abbildung 5.5 ist ein Ausschnitt aus dem Programm zu sehen. Dort ist zu erkennen, dass zwischen den abgearbeiteten Teilen des Programms kaum noch Zeit übrig ist. Das Programm arbeitet also am Limit. Zudem werden aufgrund der Hierarchie, Teile des Programms unterbrochen. Die Hierarchie ist in Tabelle 5.1 festgelegt.

Tabelle 5.1.: Reihenfolge und Aufruffrequenz der einzelnen Programmteile

Hierarchie	Name	Programmteile	Aufrufgeschwindigkeit
1.	DS1104SLAVE PWMINT	Analoge Signale	f_{PWM}
2.	RTK	System	f_{PWM}
3.	Software Interrupt	Regelung	$\frac{f_{PWM}}{2}$
4.	Timer Task 1	restl. Programm	5 kHz

Für die Dauer der drei Programmabläufe wurden folgende Zeiten gemessen:

- DS1104SLAVE PWMINT: $14\mu s$ bis $34\mu s$
- Software Interrupt: $75\mu s$ bis $77\mu s$
- Timer Task 1: $33\mu s$ bis $35\mu s$

Eine maximale Programmdauer wird aus den maximalen Zeiten der drei Programmabläufe errechnet. Die einzelnen Zeiten werden dafür in ein Verhältnis zwischen $\frac{\text{Programmaufruf}}{\text{Systemfrequenz}}$ gesetzt, um die durchschnittliche Zeit für einen Durchlauf zu berechnen. Bei einer Systemfrequenz von $f_{PWM} = 12kHz$ kommt man auf eine maximale Programmdauer von:

$$t_{12kHz} = 34\mu s \cdot \frac{12kHz}{12kHz} + 77\mu s \frac{6kHz}{12kHz} + 35\mu s \frac{5kHz}{12kHz} = 87,08\mu s. \quad (5.11)$$

Die Frequenz f_{PWM} ist mit $12kHz$ am Grenzbereich des DS1104 5.11. Aus diesem Grund wird eine neue Frequenz festgelegt, wodurch sich Lücken ergeben und das System stabil läuft. Mit einer $f_{PWM} = 8kHz$ ergibt sich mit der Formel 5.11:

$$t_{8kHz} = 34\mu s \cdot \frac{8kHz}{8kHz} + 77\mu s \frac{4kHz}{8kHz} + 35\mu s \frac{5kHz}{8kHz} = 94,38\mu s. \quad (5.12)$$

Da die Periodendauer $t_{PWM} = \frac{1}{f_{PWM}} = \frac{1}{8kHz} = 125\mu s$ beträgt, ist genug Reserve vorhanden. Im praktischen Test gab es keine Aussetzer mehr.

5.2.3. Verbessertes MPPT

Da das MPPT langsam und ungenau ist (Kapitel 4.1.3), wird es neu programmiert. Die grundlegende Veränderung in der neuen Programmierung ist der Entschluss den Mittelwert aus mehreren Messungen zu nehmen und anschließend mit dem vorigen Mittelwert zu vergleichen. Zudem ändert sich der Tastgrad des Hochsetzstellers nun alle $0,5sek$ statt alle $2sek$, wie in Abbildung 5.6 zu sehen.

In dem neuen Programm werden 50 Leistungen aus der Multiplikation von Strom- und Spannungswerten errechnet, woraus ein arithmetisches Mittel gebildet wird. Von diesem Gleichwert wird nun der Gleichwert der vorherigen 50 Messungen abgezogen, um eine Differenz der Leistungen nach Veränderung des Tastverhältnisses a zu bekommen. Nun wird überprüft wie sich das Tastverhältnis beim letzten Aufruf verändert hat. Wurde es erhöht und hat sich die Leistung P verringert, so muss der Tastgrad verringert werden. Hat sich die Leistung

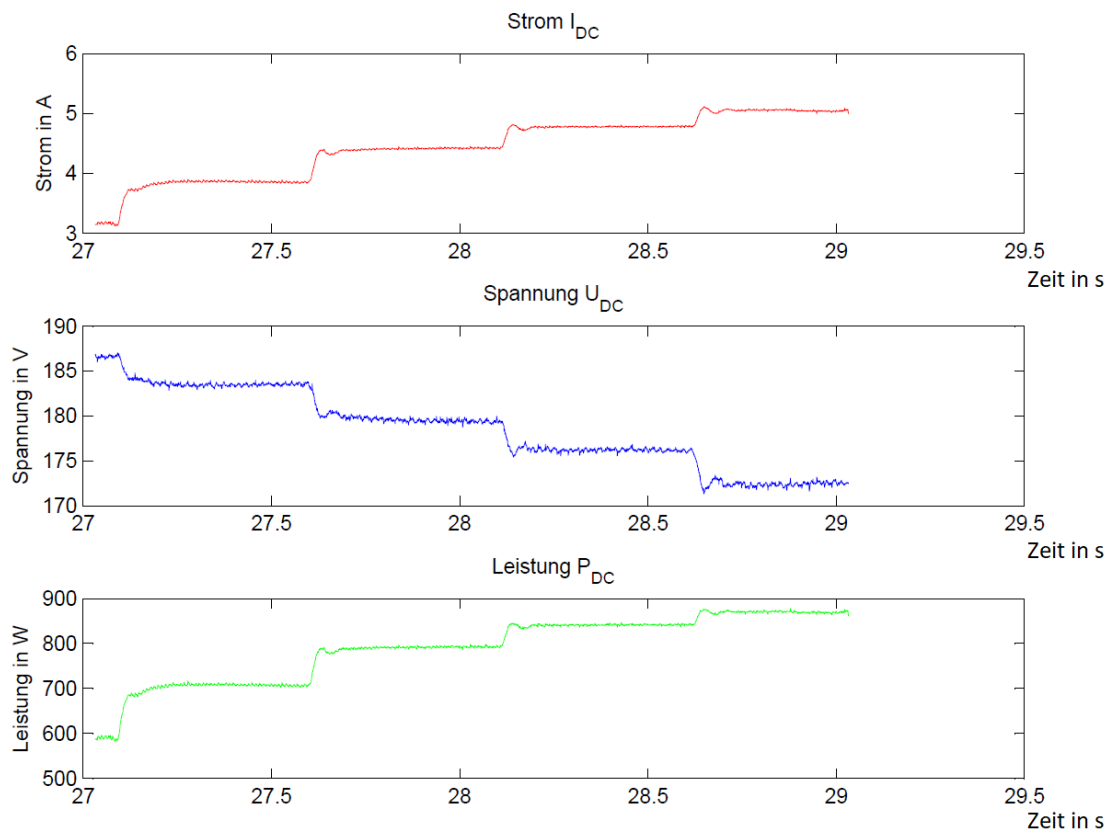


Abbildung 5.6.: Zeitliche Verläufe von Strom, Spannung und Leistung während des automatischen MPPT

ebenfalls erhöht, so wird auch der Tastgrad weiter erhöht. Wurde allerdings beim letzten Aufruf das Tastverhältnis verringert und die Leistung hat sich erhöht, so wird das Tastverhältnis weiter verringert. Hat sich auch die Leistung verringert, wird das Tastverhältnis erhöht.

- a wurde erhöht und P ist gestiegen, so wird der Tastgrad a erhöht
- a wurde erhöht und P ist gesunken, so wird der Tastgrad a verkleinert
- a wurde verkleinert und P gestiegen, so wird der Tastgrad a verkleinert
- a wurde verkleinert und P gesunken, so wird der Tastgrad a erhöht

Mit dieser neuen Regelung ist das automatische MPPT schnell und präzise.

5.3. Erstellen der grafischen Bedienoberfläche

Über die grafische Bedienoberfläche im Programm dSpace ControlDesk soll der Versuchsaufbau gesteuert werden. Dabei soll die Bedienung möglichst einfach sein und der Bediener soll auch visuell verstehen, was passiert. Zudem muss die Oberfläche auch gegen eventuelle Bedienfehler gesichert sein. Für jeden Versuchsteil wurde eine eigene Oberfläche gestaltet, wobei sich die einzelnen Oberflächen vom Aufbau her gleichen (Abbildung 5.7).

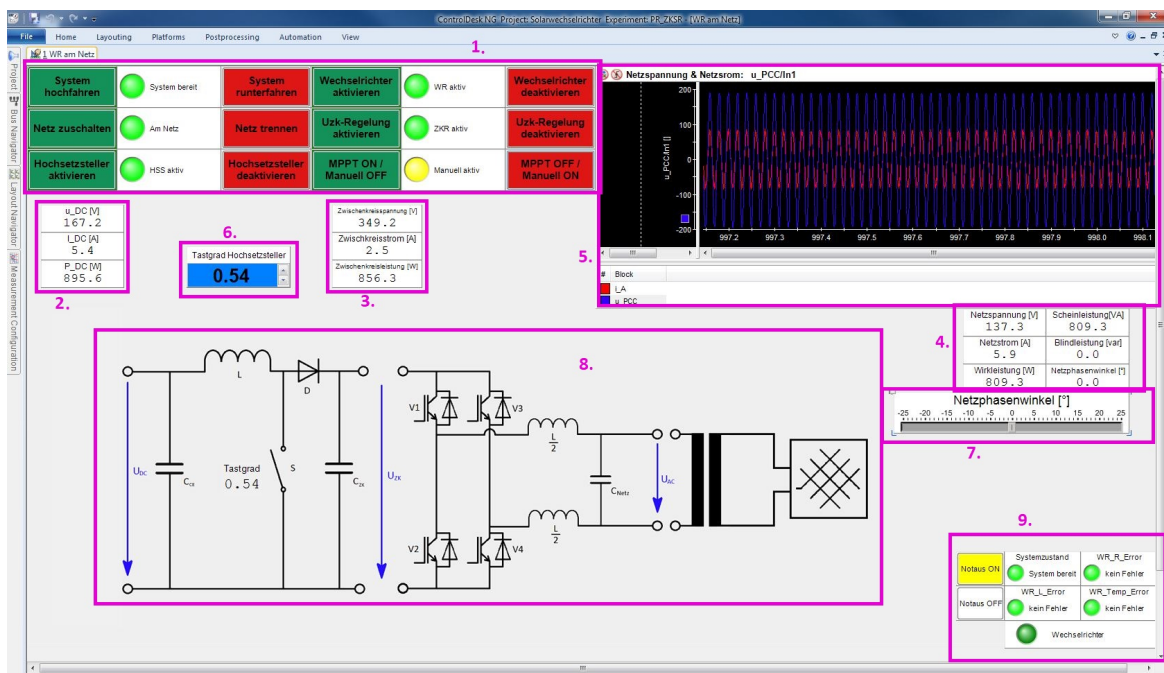


Abbildung 5.7.: Grafische Oberfläche für den Aufbau mit Netzeinspeisung

Tabelle 5.2.: Erklärung zur Abbildung 5.7

1. Bedienelemente zum Ein- und Ausschalten
2. Anzeige der Eingangsgrößen
3. Anzeige der Zwischenkreisgrößen
4. Anzeige der Ausgangsgrößen
5. Zeitlicher Verlauf der Ausgangsgrößen
6. Vorgabe des Tastgrads Hochsetzsteller
7. Vorgabe des Netzphasenwinkels
8. Schematisches Bild des Versuchsaufbaus
9. Systemanzeigen und Notaus

Für die anderen Versuchsaufbauten wird das Bild des Versuchsaufbaus geändert. Zudem sind nicht benötigte Bedienelemente und Anzeigen deaktiviert. Des Weiteren ist die Vorgabe des Netzphasenwinkels nur bei der Netzeinspeisung einstellbar. Wird der Wechselrichter am Widerstand betrieben, so ist anstelle der Vorgabe für den Tastgrad des Hochsetzstellers, die Vorgabe des Tastgrads des Wechselrichters.

Um eventuelle Bedienfehler abzusichern, wurde ein Zustandsdiagramm in Simulink erstellt, der die Variablen absichert (Abbildung 5.8).

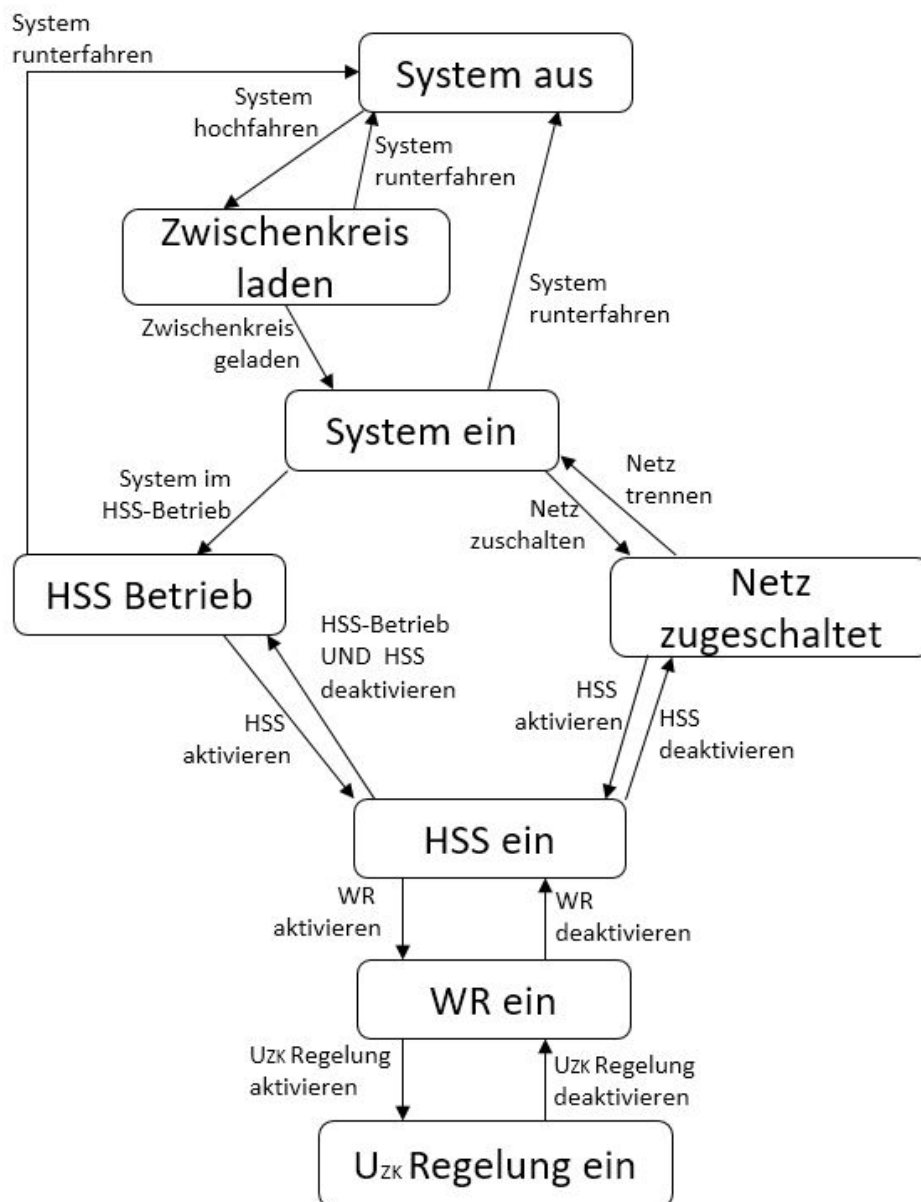


Abbildung 5.8.: Zustandsdiagramm zur Absicherung der Bedienfehler

6. Implementierung des HERCULES 5000

Für einen eventuellen zweiten Aufbau und um unabhängiger von dem Leistungsverstärker von Delta Elektronik zu sein, soll zur Simulation einer oder mehrerer Solarmodule der TET Hercules 5000 implementiert werden. Der Leistungsverstärker wird über ein LabView Programm programmiert und gesteuert.

6.1. Kommunikation mit dem PC

Die Kommunikation zwischen dem Hercules 5000 und dem PC erfolgt über die serielle¹ RS232 Schnittstelle. Die Datenrate wird mit 115200Baud ² [17] festgelegt. Damit hat jedes Bit eine Länge von $8,68\mu\text{s}$. Allerdings ist aufgrund der hohen Datenrate die Länge der Übertragungsleitung auf 2m begrenzt [17].

Das Kabel für die serielle Schnittstelle übermittelt die Signale

- RXD (Receive Data) für die Kommunikation Hercules 5000 \Rightarrow PC
- TXD (Transmit Data) für die Kommunikation PC \Rightarrow Hercules 5000
- GND (Ground) als Masseleitung

Die Pinbelegung ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Das Kabel hat auf der PC-Seite eine 9-polige Sub-D Buchse und auf der Seite des Leistungsverstärkers einen 9-poligen Sub-D Stecker. Hardwareseitig ist der Leistungsverstärker bereits eingestellt, da er bereits in anderen Laborversuchen zum Einsatz kam.

Um nun in LabView mit dem Hercules 5000 zu kommunizieren, werden die zum vom Hercules 5000 mitgelieferten Vi's³ benutzt. Mit diesen Vi's lässt sich der Hercules 5000 konfigurieren. Des Weiteren lassen sich Strom und Spannung über die Vi's messen und steuern [21].

¹Bei seriellen Schnittstellen werden Daten nacheinander über eine Leitung übertragen

²Einheit der Datenrate, Bit pro Sekunde

³Virtuell Instruments in LabView

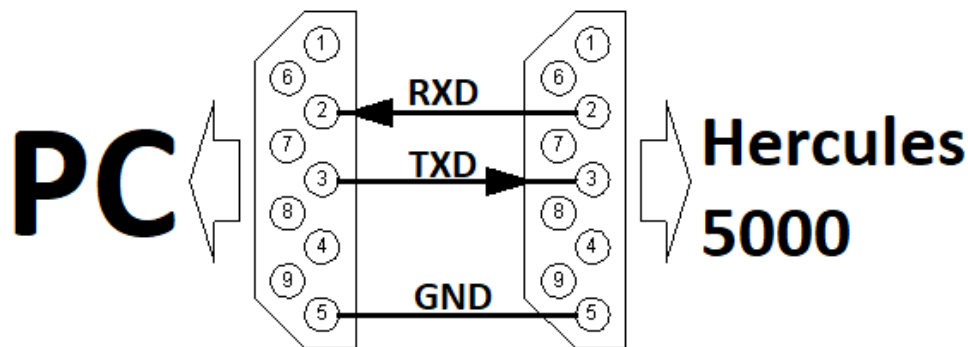


Abbildung 6.1.: Signale in dem RS232-Schnittstellenkabel

6.2. Funktionalitäten des Programms

Damit der Hercules 5000 in dem Versuchsaufbau eingesetzt werden kann, muss dieser zum einen als Konstantspannungsquelle arbeiten und zum anderen soll er die Kennlinie eines Solarmoduls simulieren. Als Konstantspannungsquelle bekommt er eine Spannung und eine Strombegrenzung vorgegeben, die direkt an den Hercules 5000 übermittelt werden. Bei der Simulation des Solarmoduls soll die Kennlinie abhängig von der Bestrahlungsstärke und der Anzahl der in Reihe geschalteten Module sein. Hierzu ist die Kennlinie eines Solarmoduls bei einer Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ vorgegeben (Abbildung 6.2). Diese Kennlinie ist in einem Array mit 130 Werten von Strom und Spannung gespeichert. Ändern sich die Vorgaben bezüglich Strahlungsstärke oder Anzahl der in Reihe geschalteten Module, so werden die einzelnen Werte des Arrays dementsprechend umgerechnet, die Anzahl der Werte im Array bleibt also gleich. Diese Kennlinien sollen über die Steuermöglichkeiten zur Strombegrenzung und Spannungsvorgabe an das Gerät übertragen werden.

6.3. Regelung der Solarkennlinie

Um dem Hercules die Strombegrenzung und die Spannungsvorgabe zu übergeben, wird die Regelung in zwei Bereiche eingeteilt (Abbildung 6.3). In dem MPP-Bereich sind die Werte klar definiert, jedem Strom kann eine Spannung zugeordnet werden. In dem Konstantstrom-Bereich ist der Strom nahezu konstant. Deshalb wird zu jedem Bereich eine eigene Regelung konzipiert.

Befindet sich der Betriebspunkt im MPP-Bereich, so tritt die Regelung aus Abbildung 6.4 ein. Hier wird anfangs der Strom gemessen. Die zu dem Strom passende Spannung wird aus

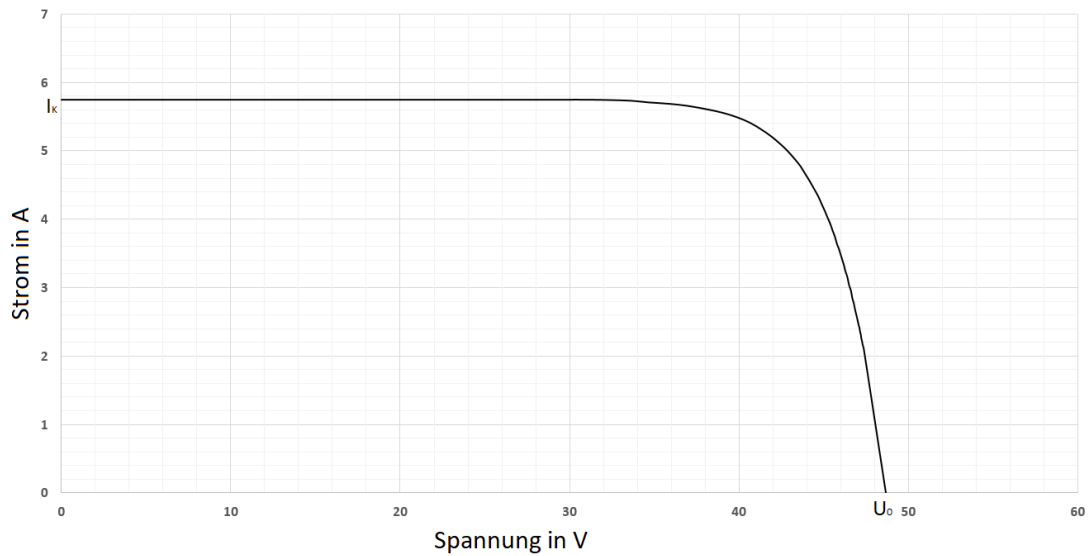


Abbildung 6.2.: Vorgegebene Kennlinie eines Solarmoduls mit $E = 1000 \frac{W}{m^2}$

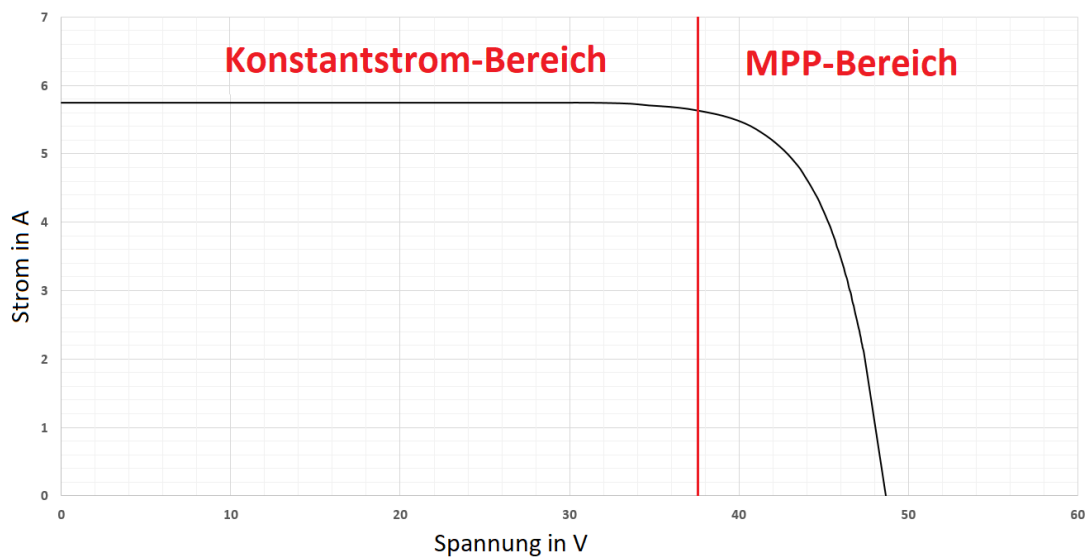


Abbildung 6.3.: Zwei Bereiche zur Regelung der Solarkennlinie

der Tabelle der Kennlinie interpoliert und ausgegeben. Diese Spannung wird als Vorgabe zu dem Hercules 5000 geschickt. Als Strombegrenzung wird der höchste Strom in der Tabelle vorgegeben. Der höchste Strom ist der Kurzschlussstrom I_K .

Diese Regelung aus dem MPP-Bereich ist im Konstantstrom-Bereich nicht möglich, da dort der Strom konstant ist und es so zu dem gemessenen Strom keine definierte Spannung

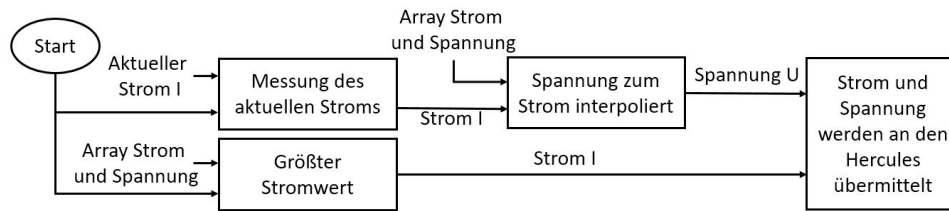


Abbildung 6.4.: Regelung im MPP-Bereich

gibt. Es wird also geschaut, wie sich der Strom verhält und dementsprechend die Spannung geändert. Aus der gemessenen Spannung am Leistungsverstärker wird nun ein Stromsollwert interpoliert. Hier ist für jeden Spannungswert ein fester Stromwert definiert. Die Strombegrenzung ist nun der Stromsollwert plus ein Prozent. Ist der gemessene Strom größer als der interpolierte Stromsollwert, so wird die Spannung verringert, ist der Strom niedriger, wird sie erhöht. Dadurch kann der Betriebspunkt im Konstantstrom-Bereich angefahren werden. Diese Regelung ist in Abbildung 6.5 grafisch dargestellt.

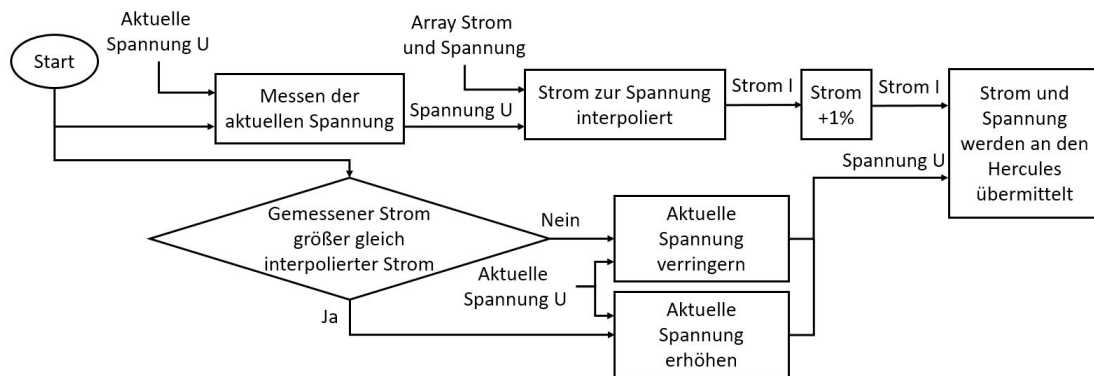


Abbildung 6.5.: Regelung im Konstantstrom-Bereich

Die Übergänge zwischen den beiden Bereichen laufen in Form einer Hysterese ab. So wird sichergestellt dass ein ständiges Hin- und Herspringen zwischen beiden Bereichen ausgeschlossen ist. Folgende Bereichswechsel sind vorgesehen:

- MPP-Bereich \Rightarrow Konstantstrom-Bereich: $I_{Mess} > 0,9 \cdot I_K$
- Konstantstrom-Bereich \Rightarrow MPP-Bereich: $I_{Mess} < 0,75 \cdot I_K$

6.4. Test des Hercules 5000 am Versuchsaufbau

Nun wird der Hercules 5000 in der Praxis zur Simulation von Solarmodulen eingesetzt. Er soll an dem Versuchsaufbau den Leistungsverstärker von Delta Elektronik ersetzen.

Der Hercules 5000 soll im Versuchsaufbau als

- Konstantspannungsquelle über den Hochsetzsteller am Widerstand
- Simulation von Solarmodulen am Widerstand
- Simulation von Solarmodulen über den Hochsetzsteller am Widerstand
- Simulation von Solarmodulen im Gleichstromsteller-Betrieb
- Simulation von Solarmodulen über Hochsetzsteller und Wechselrichter mit Netzeinspeisung

überprüft werden.

6.4.1. Konstantspannungsquelle

Der Hercules 5000 soll die Konstantspannungsquelle mit dem Spannungssollwert $U_{soll} = 50V$ und einer Strombegrenzung von $I_{sollmax} = 3A$ sein, die über den Hochsetzsteller an einer Last von $R_{Last} = 90\Omega$ anliegt. Mit Hilfe des Tastgrads vom Hochsetzsteller kann man aus Sicht der Konstantspannungsquelle den Strom erhöhen. Ist der Strom $I_{sollmax}$ erreicht, so geht die Spannungsquelle in die Strombegrenzung und somit sinkt die Spannung zwingend. Dies geschieht in diesem Fall ab einem Tastgrad von $a = 0,58$. In Abbildung 6.6 sind die Spannung und der Strom aus der Konstantspannungsquelle zu sehen. Das am Hochsetzsteller eingestellte Tastverhältnis ist in diesem Fall $a = 0,5$.

Die Sollwerte der Spannung und der Strombegrenzung lassen sich im laufenden Betrieb ändern und sie können unter Beachtung der Grenzen des Leistungsverstärkers (Tabelle 4.1) frei gewählt werden.

6.4.2. Solargenerator Betrieb

Im Solargenerator Betrieb werden die Funktion und Eigenschaften der Simulation von Solarmodulen getestet. In der grafischen Bedienoberfläche (Abbildung 6.7) ist hier die zu simulierende Solarkennlinie zu sehen sowie die Einstellmöglichkeiten der Strahlungsstärke und die Anzahl der in Reihe geschalteten Module. Je nach Einstellung ergibt sich die neue Kennlinie.

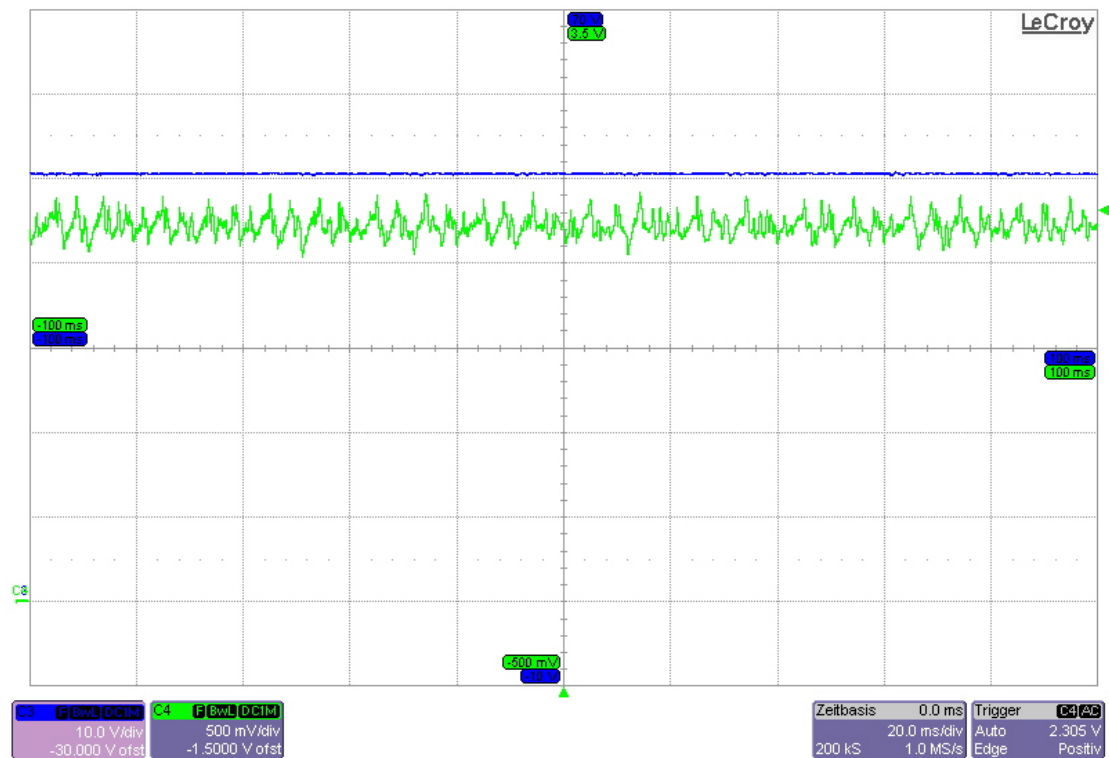


Abbildung 6.6.: Spannung (Ch3) und Strom (Ch4) der Konstantspannungsquelle bei einem Tastverhältnis von $a = 0,5$

Diese Einstellungen lassen sich, im Gegensatz zum Delta Elektronika (Kapitel 3.1) im laufenden Betrieb ändern. Dabei lässt sich die Strahlungsstärke von $E = 100 \frac{W}{m^2}$ bis $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ in einer Schrittweite von $\Delta E = 100 \frac{W}{m^2}$ frei wählen. Die Anzahl der in Reihe geschalteten Module ist von einem bis zu vier Modulen frei wählbar. Über Start bzw. Stopp wird die Simulation gestartet bzw. gestoppt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Anforderungen aus der Versuchsbeschreibung (Anhang A.1) getestet.

6.4.2.1. Hochsetzsteller am Widerstand

Für diesen Versuchsteil wird der Ausgang des Leistungsverstärkers auf den Hochsetzsteller, dessen Ausgang auf eine Last von $R_{Last} = 90\Omega$ geht, gegeben. Hier lässt sich nun mit Hilfe des Tastgrads a der Betriebspunkt auf der Solarkennlinie einstellen.

Der Leistungsverstärker simuliert nun die Solarkennlinie eines Solarmoduls mit einer Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$. Den Maximum-Power-Point erreicht man bei einem Tast-

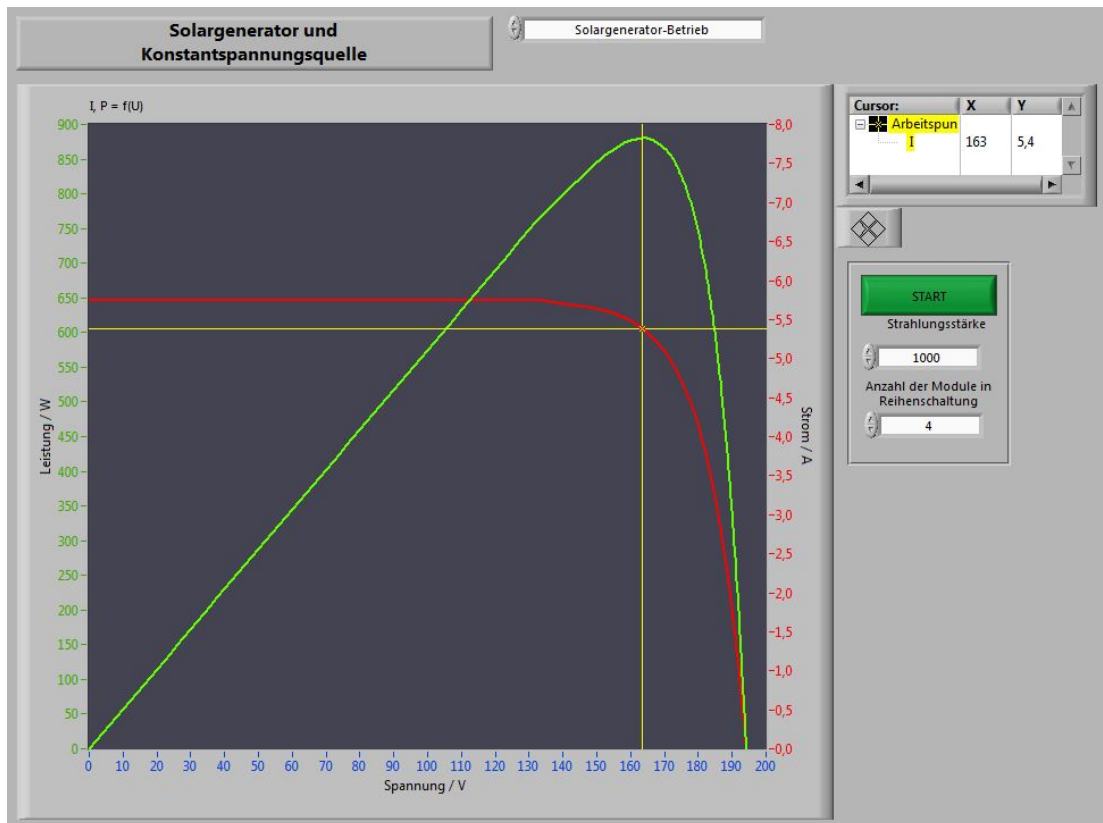


Abbildung 6.7.: Spannung und Strom der Konstanzspannungsquelle bei einem Tastverhältnis von $a = 0,5$

verhältnis von $a = 0,72$ und der Betriebspunkt liegt hier bei $U_{MPP} = 40,7V$ und $I_{MPP} = 5,41A$, was einer Leistung von $P_{MPP} = 220W$ entspricht. Wird der Tastgrad wie in Abbildung 6.8 sprunghaft von $a = 0,2$ auf $a = 0,6$ geändert, so benötigt der Leistungsverstärker eine Zeit von ungefähr $200msek$ um den neuen Betriebspunkt zu finden. Zudem sind sehr hohe Stromspitzen von bis zu $8A$ zu erkennen. Da zum einen das automatische MPPT (Kapitel 5.2.3) innerhalb von $500msek$ die 50 Werte aufnimmt um dann zu entscheiden, ob das Tasthältnis vergrößert oder verkleinert werden soll und zum anderen der Hercules $200msek$ braucht um den Wert zu bekommen, ist hier das automatische MPPT nicht möglich.

Auch bei einer Simulation von 4 Modulen in Reihe und gleichbleibender Strahlungsstärke sind diese Stromspitzen und Zeiten zu sehen.

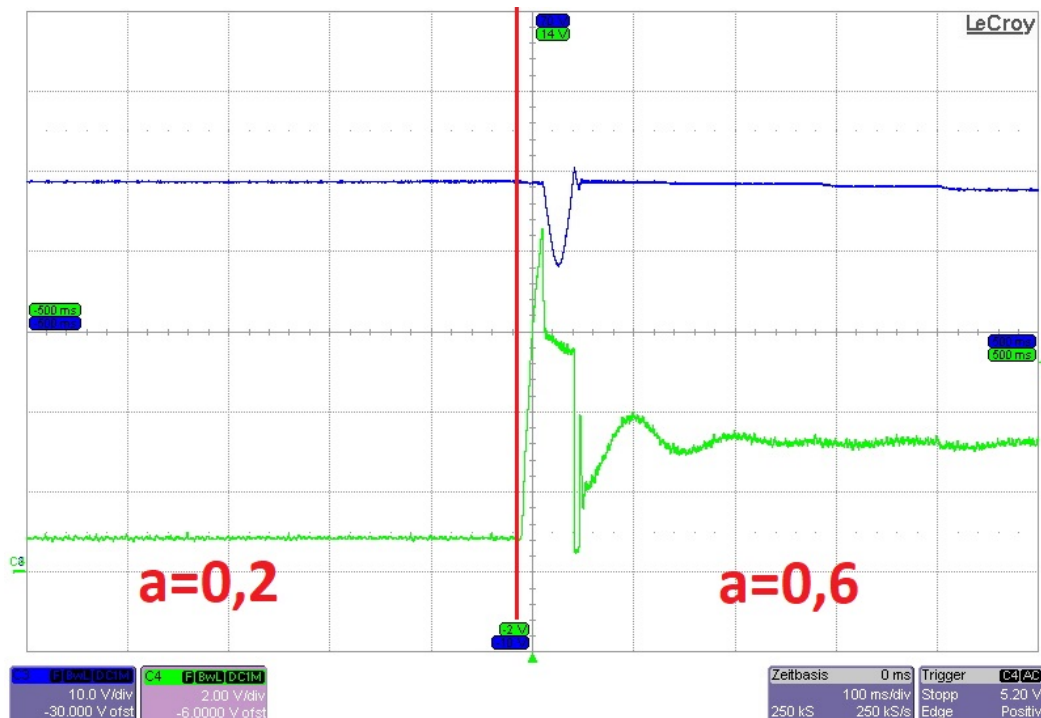


Abbildung 6.8.: Verhalten von Strom (Ch4) und Spannung (Ch3) des Leistungsverstärkers bei einem Sprung des Tastgrads von $a = 0,2$ auf $a = 0,6$

6.4.2.2. Gleichstromsteller-Betrieb

In diesem Versuchsteil sollen die Funktionen des Wechselrichters untersucht werden. Dabei ist der Leistungsverstärker am Eingang des Hochsetzstellers angeschlossen. Der Ausgang des Hochsetzstellers geht auf den Eingang des Wechselrichters und dessen Ausgang auf eine Last von $R_{Last} = 90\Omega$. Der Hochsetzsteller hat dabei ein festes Tastverhältnis und das des Wechselrichters ist variabel. Die vom Hercules simulierte Solarkennlinie von vier Modulen in Reihe bei einer Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ stellt sich dabei in Abhängigkeit vom Tastverhältnis des Wechselrichters auf die folgenden Betriebspunkte ein.

- Tastverhältnis $a = 0$ oder $a = 1$

$$U = 189,4V$$

$$I = 2,07A$$

- Tastverhältnis $a = 0,5$

$$U = 194,4V$$

$$I = 0,05A$$

6.4.2.3. Wechselrichter Betrieb mit Netzeinspeisung

Bei dem Wechselrichterbetrieb mit Netzeinspeisung ist nach dem Leistungsverstärker, der die Solarkennlinie simuliert, der Hochsetzsteller und der Wechselrichter geschaltet, bevor nach dem Wechselrichter und dem Netzfilter die Energie über einen Transformator in das Netz (230V/50Hz) gespeist wird. Dabei stellt der Tastgrad des Hochsetzstellers den Betriebspunkt auf der Solarkennlinie ein. Bei der Simulation von vier Solarmodulen in Reihe und einer Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ ist der Tastgrad des Hochsetzstellers im MPP bei $a_{MPP} = 0,55$. Es stellen sich im MPP folgende Werte ein:

- $U_{DC_{MPP}} = 161,5V$
- $I_{DC_{MPP}} = 5,43A$

Der zeitliche Verlauf des netzseitigen Stroms und die Netzspannung sind in Abbildung 6.9 zu sehen.

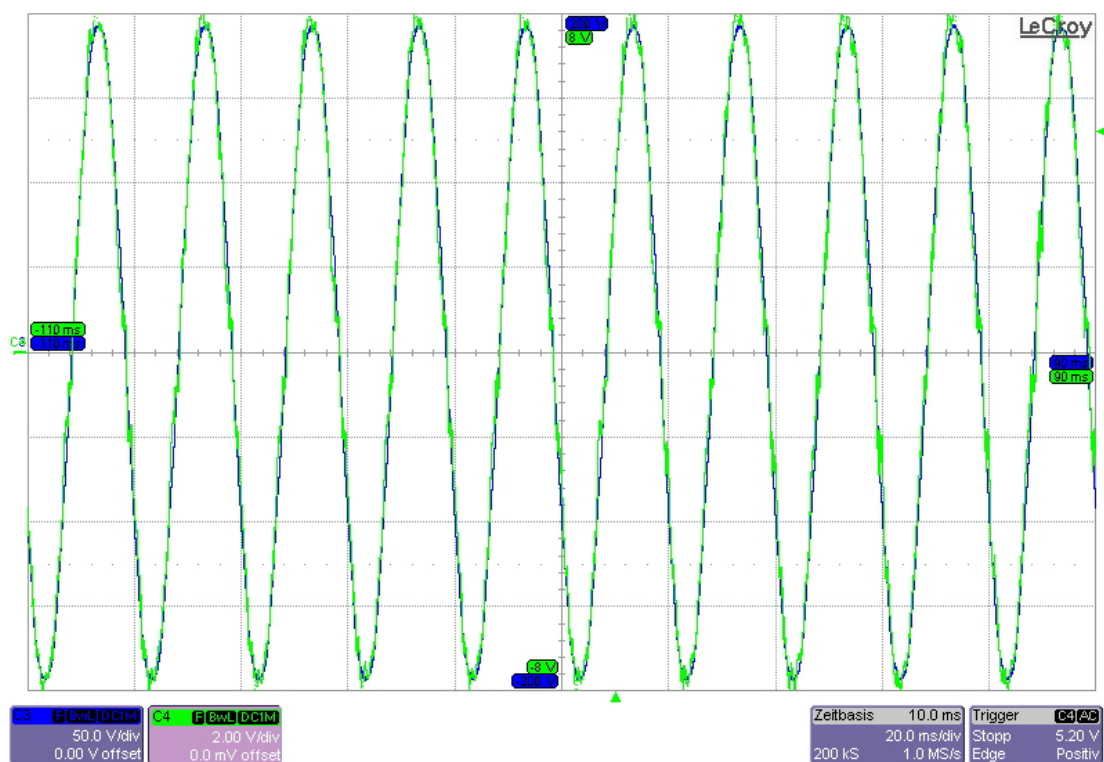


Abbildung 6.9.: Netzspannung (Ch3) und Netzstrom (Ch4) im MPP

In diesem Betrieb läuft das System stabil und der Hercules 5000 kann die Kennlinie simulieren. Es gibt allerdings auch Instabilitäten. Diese können durch Veränderung des Tastgrads

vom Hochsetzsteller provoziert werden. In diesem Fall versucht der Hercules einen Betriebspunkt auf der Kennlinie zu finden. Auf Grund der hohen Stromspitzen bei Veränderungen und der Dynamik des Versuchsaufbaus findet er keinen Betriebspunkt.

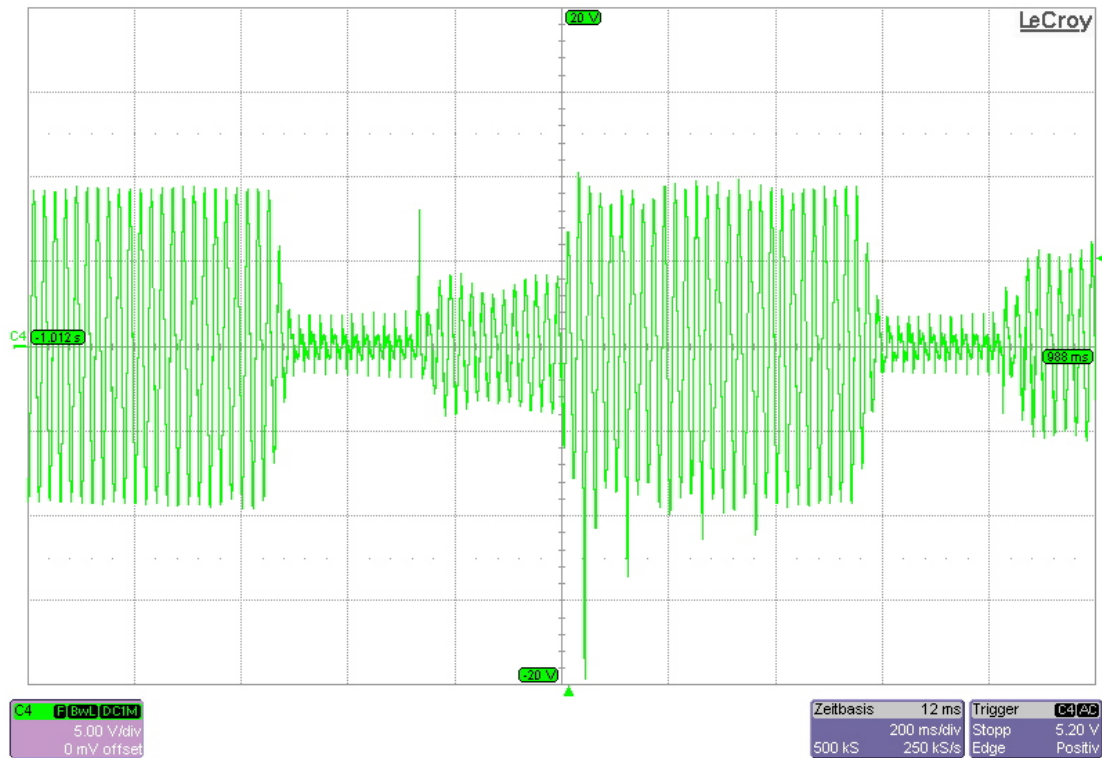


Abbildung 6.10.: Nicht konstanter Netzstrom (Ch 4) während der instabilen Phase

In Abbildung 6.10 ist der in das Netz eingespeiste instabile Strom zu sehen und in Abbildung 6.11 die Spannung und der Strom aus dem Leistungsverstärker. Der Wechselrichter schickt die Energie aus dem Zwischenkreis in das Netz. Durch Veränderung des Tastgrads und die Stromspitzen und Welligkeit des Leistungsverstärkers schwingt sich das System auf. Der Hercules 5000 kann durch seine Trägheit, die bereits in Kapitel 6.4.2.1 erkannt wurde, nicht auf die Dynamik des Systems reagieren.

6.4.3. Zusammenfassung der Tests

Der Leistungsverstärker TET HERCULES 5000 ist für die Simulation von Solarmodulen nur bedingt einsatzfähig. Er kann die Kennlinien in Abhängigkeit der Strahlungsstärke und der Anzahl der in Reihe geschalteten Module simulieren. Jedoch müsste der Versuchsaufbau

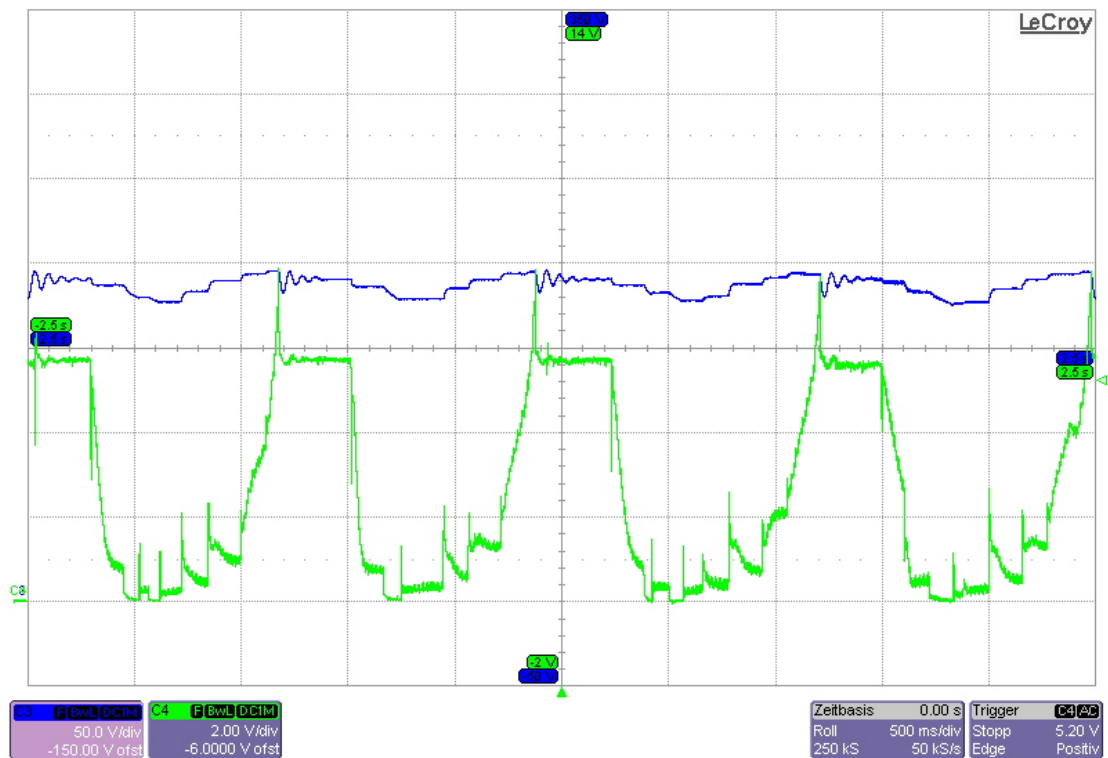


Abbildung 6.11.: Ausgangsstrom (Ch4) und Ausgangsspannung (Ch3) des Hercules während Instabilität

auf die Reaktionsfähigkeit des Leistungsverstärkers angepasst werden. Für den Aufbau des Wechselrichters zur Solargenerator-Netzeinspeisung ist dieser Leistungsverstärker aufgrund seiner Reaktionsfähigkeit nicht geeignet.

7. Versuchsdurchführung und Test

Der Versuchsaufbau wurde anhand der Versuchsbeschreibung, die im Anhang [A.1](#) zu finden ist, getestet. Diese Versuchsdurchführung kann als Musterlösung gesehen werden. Zur Simulation der Solarmodule sowie als Konstantspannungsquelle wird der Leistungsverstärker Delta Elektronik SM660-11 verwendet.

7.1. Hochsetzsteller

Sobald der Leistungsverstärker in den Handbetrieb umgestellt wurde, werden die Eingangsgrößen über die Drehregler eingestellt. Über die Taste on/off gibt der Leistungsverstärker die Größen heraus. Am Schaltschrank wird der Hochsetzsteller verschaltet und der Ausgang des Hochsetzstellers wird über den Schalter K2 auf den Widerstand von 90Ω verschaltet. Das Projekt 'PR_GSR' wird in dem Visualisierungsprogramm 'dSpace Control Desk 5.1' geöffnet, und der Tab 'HSS an R' aktiviert. Über den Button 'Start Measuring' geht das Programm online und die Messung startet. Nun wird über die entsprechenden Bedienelemente das System hochgefahren und sobald dieses hochgefahren ist, wird der Hochsetzsteller aktiviert. Nun lässt sich der Tastgrad des Hochsetzstellers auf die geforderten $a = 0,5$ einstellen. Die Taktfrequenz lässt sich mit dem Oszilloskope messen und beträgt bei $f_{Takt} = 8kHz$ (Abbildung [7.1](#)).

Zur Überprüfung der Funktion des Hochsetzstellers werden die Ausgangsspannung $U_A = 96,5V$ und der Ausgangsstrom $I_A = 1,07A$ mit einem Multimeter gemessen. Die Ausgangsspannung ist ungefähr doppelt so groß wie die Eingangsspannung $U_B = 50V$. Dies soll bei einem Tastgrad von $a = 0,5$ auch sein. Nachfolgend werden die zeitlichen Verläufe der Ausgangsspannung und des Ausgangsstroms aufgenommen (Abbildung [7.2](#)).

Die Ausgangsgrößen sind wie erwartet Gleichstrom und Gleichspannung. Auf dem zeitlichen Verlauf sieht man die Schaltimpulse des Hochsetzstellers. Die Größen von Strom und Spannung an der Drossel $L_{HSS/TSS}$ lassen sich direkt messen (Abbildung [7.3](#)).

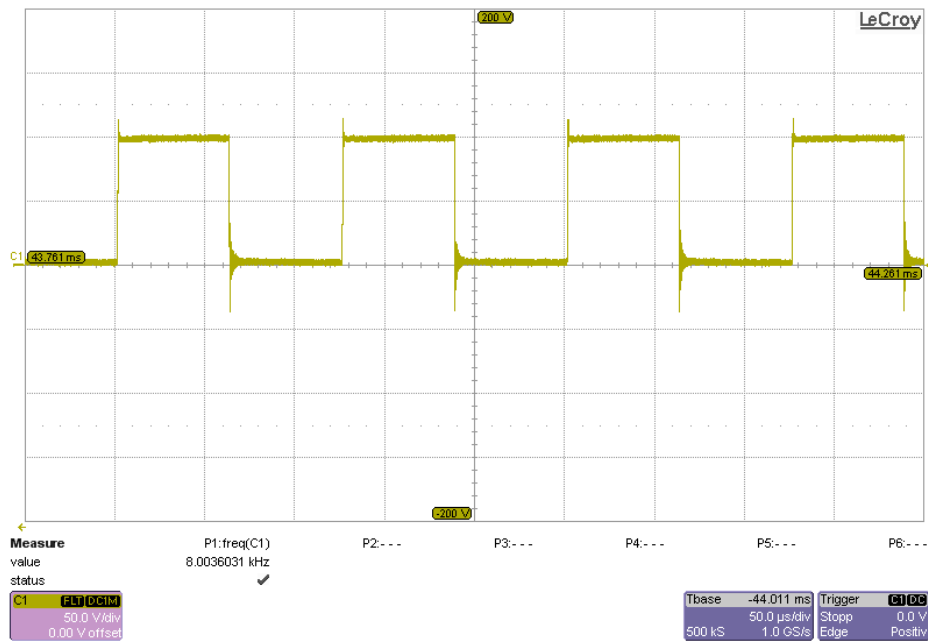


Abbildung 7.1.: Taktfrequenz $f_{Takt} = 8\text{ kHz}$ aus der über dem Schalter liegende Spannung u_S (Ch1)

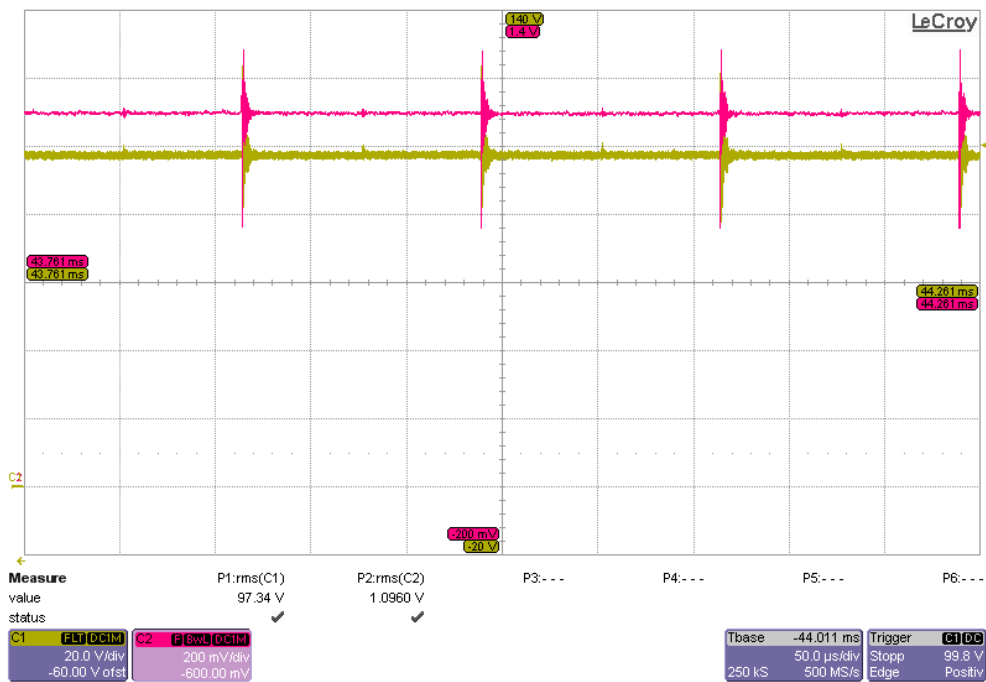


Abbildung 7.2.: Ch1: Ausgangsspannung u_A , Ch2: Ausgangsstrom i_A

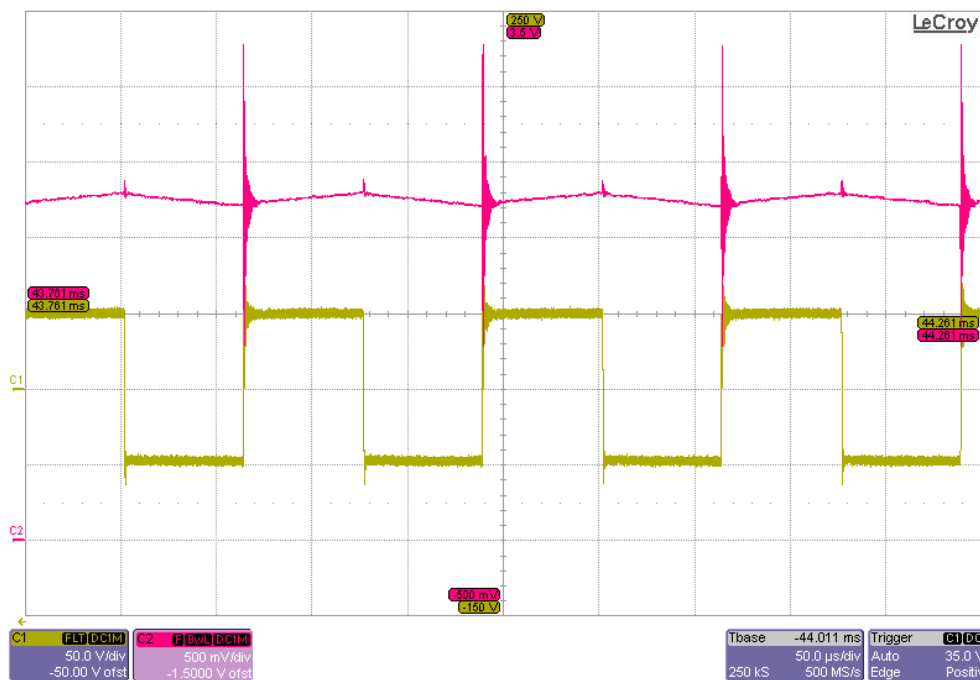


Abbildung 7.3.: Ch1: Spannung an der Drossel u_L , Ch2: Strom durch die Drossel i_L

Zum Zeitpunkt T_{ein} liegt die Spannung an der Drossel bei $u_L = u_B = 50V$. Ist der Schalter S geöffnet, liegt die Spannung an der Drossel während des Zeitpunkts T_{aus} bei

$$U_L = U_B - U_A = 50V - 96,5V = -46,5V. \quad (7.1)$$

An dem zeitlichen Verlauf des Stroms an der Drossel erkennt man sofort, dass es sich um einen nicht lückenden Drosselstrom i_L handelt, da der Strom in den Zeiten von T_{aus} nicht auf $i_L = 0A$ sinkt. Hier ist nun auch gut der typische Stromverlauf an der Drossel des Hochsetzstellers zu erkennen: steigender Strom ($i_L = i_S$) zum Zeit T_{ein} und sinkender Strom ($i_L = i_D$) zum Zeitpunkt T_{aus} .

Anschließend werden die Spannung und der Strom am Schalter S (Abbildung 2.3) gemessen. Der Strom lässt sich aufgrund der Verschaltung nicht direkt messen. Da der Strom über den Schalter S $i_S = i_L - i_D$ ist, führt man die Leitung des Drosselstroms in positiver Richtung und den Strom die Leitung des Stroms der Diode in negativer Richtung durch die Stromzange und erhält dadurch den Strom des Schalters i_S . Die Spannung am Schalter u_S lässt sich direkt messen (Abbildung 7.4).

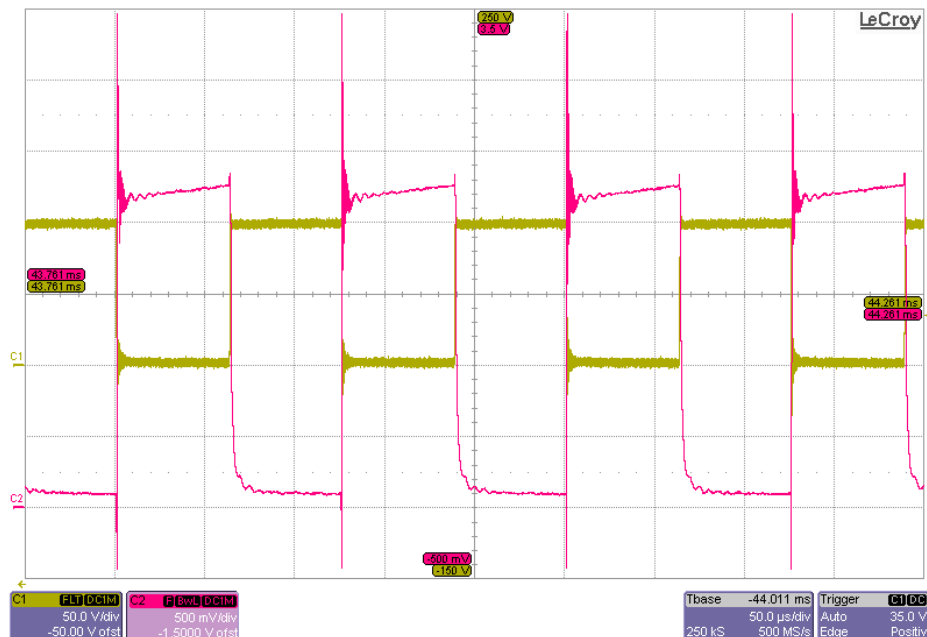


Abbildung 7.4.: Ch1: Spannung am Schalter u_S , Ch2: Strom durch den Schalter i_S

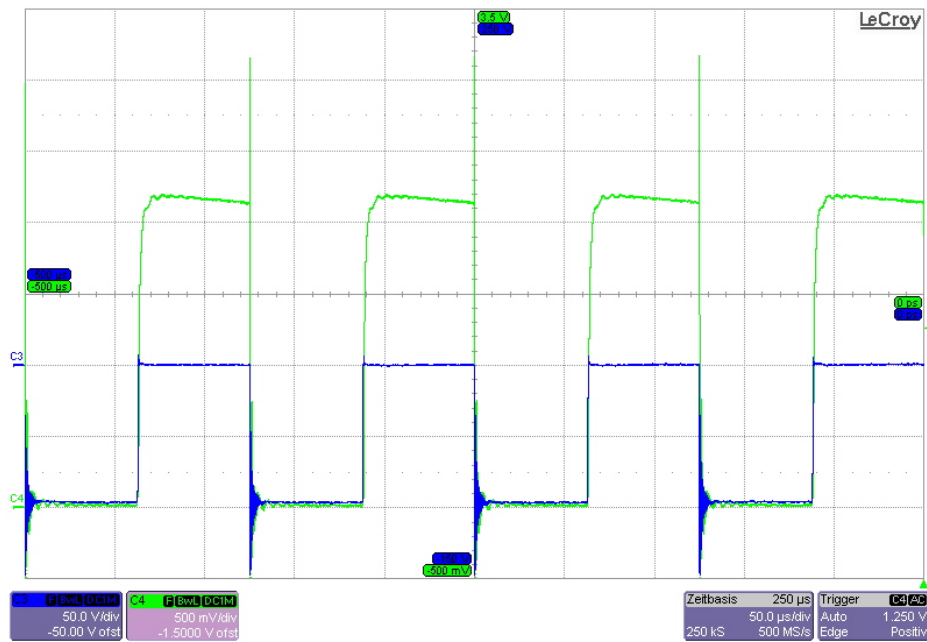
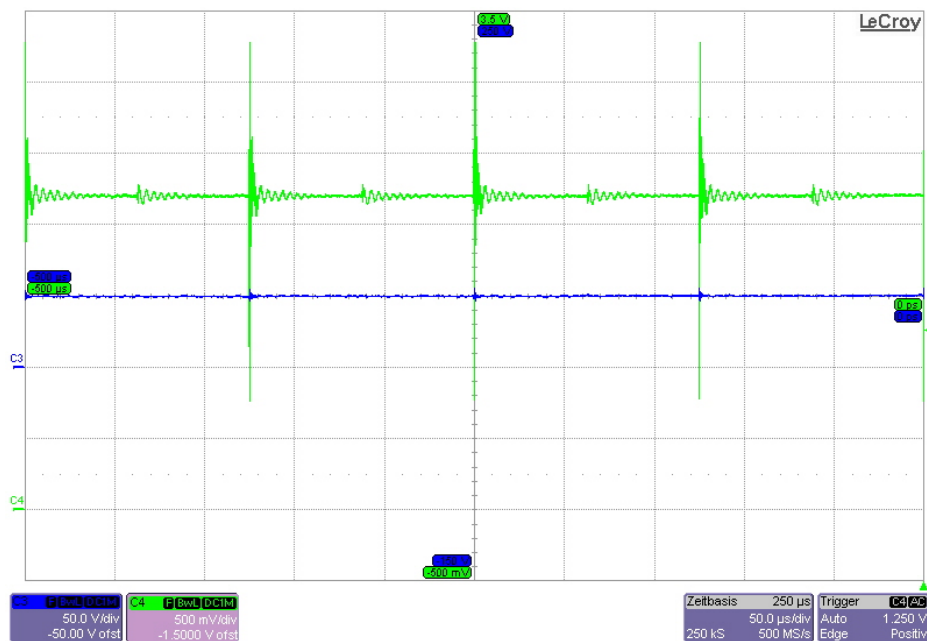
Ist der Schalter geschlossen, ist die Spannung über dem Schalter $u_S \approx 0$, ist er offen, liegt die Spannung am Schalter $u_S = U_A$. Der Strom ist bei geschlossenem Schalter gleich dem Strom über der Drossel und bei offenem Schalter gleich Null. Des Weiteren kann man hier auch die Stromspitzen während der Schaltvorgänge erkennen.

In Abbildung 7.5 ist der Strom durch die Diode und die Spannung an der Diode zu sehen. Ist der Schalter S geschlossen, so sperrt die Diode, da an der Kathode ein höheres Potential ist als an der Anode. So liegt zu diesem Zeitpunkt eine negative Spannung an.

Ist der Schalter S geöffnet sperrt die Diode nicht, die Spannung beträgt $u_D = 0V$. Da der Betriebspunkt des Leistungsverstärkers ist bei

- $U_B = 50V$
- $I_B = 2,21A$

und somit nicht in der Strombegrenzung. Die zeitlichen Verläufe der Eingangsgrößen des Hochsetzstellers sind in Abbildung 7.6 zu sehen.

Abbildung 7.5.: Ch3: Spannung an der Diode u_D , Ch4: Strom durch die Diode i_D Abbildung 7.6.: Ch3: Eingangsspannung des Hochsetzstellers u_B , Ch4: Eingangsstrom Des Hochsetzstellers i_B

7.2. Test der Simulation von Solarkennlinien am Hochsetzsteller

Der Leistungsverstärker Delta Elektronika simuliert das Solarmodul 220 der Firma Sunpower. Die notwendigen Daten des Solarmoduls werden im zugehörigen Simulationsprogramm eingegeben (Abbildung 7.7) [19].

Mit dem Delta Elektronika können die Kennlinien zwar nicht im laufenden Betrieb geändert werden, allerdings können hier die einzelnen Module mit einer eigenen Strahlungsstärke simuliert werden. Hier wird nun die Simulation des Photovoltaikgenerators auf den Hochsetzsteller, dessen Ausgang auf einer Last von $R_{Last} = 90\Omega$ liegt, untersucht. Dies wird zum einen mit einer Reihenschaltung von vier Solarmodulen und einer Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ und zum anderen mit einer Reihenschaltung von vier Solarmodulen bei dem drei Module eine Strahlungsstärke von $E = 1000 \frac{W}{m^2}$ und ein Modul eine Strahlungsstärke von $E = 500 \frac{W}{m^2}$ haben.

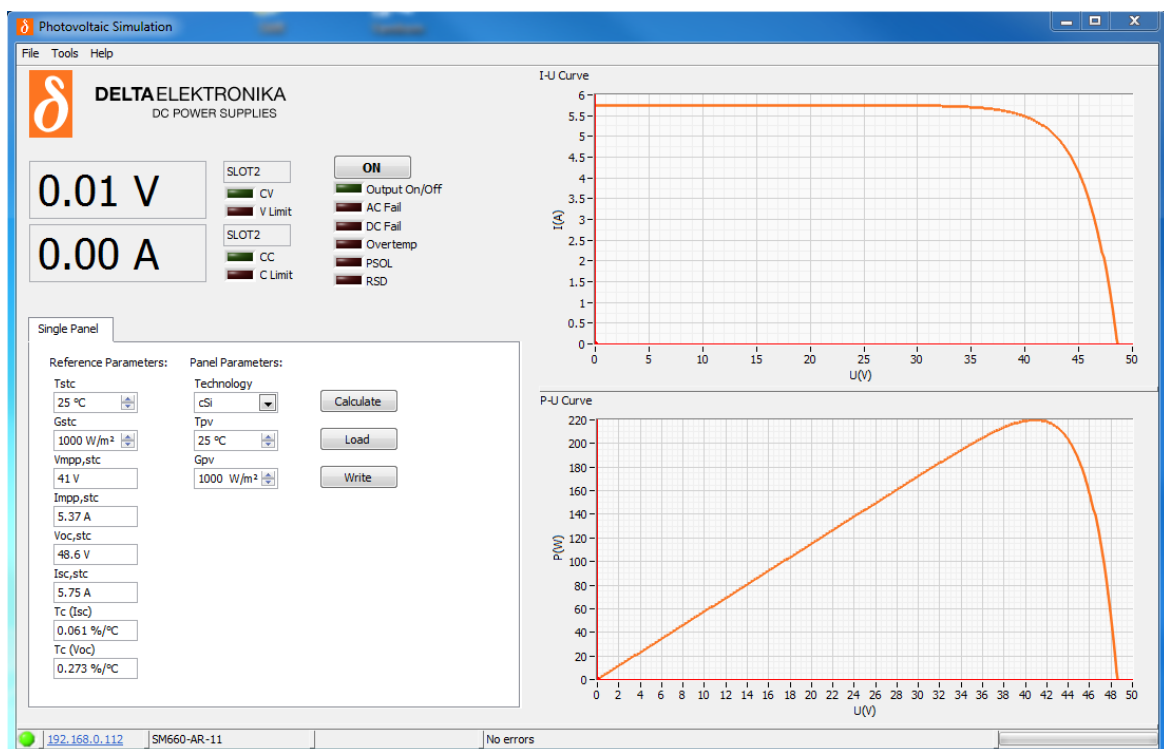


Abbildung 7.7.: Simulationsprogramm zur Einstellung und Steuerung des zu simulierenden Solarmoduls

Um den PV-Generator im Betriebspunkt der maximalen Leistung zu betreiben, wird der Tastgrad des Hochsetzstellers dementsprechend geändert. Dies kann sowohl automatisch, als

auch manuell geschehen. In diesem Beispiel wird der Betriebspunkt manuell in den MPP gefahren. Bei einer Reihenschaltung von vier Modulen mit einer Strahlungsstärke von jeweils $E = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ liegt der MPP bei einem Tastgrad von $a = 0,42$. Ändert man die Strahlungsstärke nun so, dass ein Modul zu 50% abgeschattet wird, Strahlungsstärke von $E = 500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, so liegt der MPP bei einem Tastgrad von $a = 0,49$. Das optimierte automatische MPP-Tracking aus Kapitel 5.2.3 wird nun an diesen Kennlinien getestet. Im ersten Fall wird der Tastgrad bis zum MPP erhöht und schwingt dann um diesen herum. Ist ein Modul 50% abgeschattet, so wird der MPP nicht gefunden, der Betriebspunkt ist am ersten Scheitelpunkt der P-U-Kennlinie. Da die Leistung im zweiten Scheitelpunkt der Kennlinie höher ist, ist dort der MPP. Beim automatischen MPPT wird der Tastgrad erhöht bis die Leistung wieder niedriger wird und da die Leistung nach dem ersten Scheitelpunkt bereits niedriger wird, bleibt er in diesem.

7.3. Solarwechselrichter im Gleichstromsteller-Betrieb

Um die Funktionsweise des einphasigen Wechselrichters zu testen, wird der Wechselrichter anfangs im Gleichstromsteller-Betrieb betrieben. Der Versuchsaufbau wird dazu wie in Abbildung 7.8 aufgebaut. Der PV-Generator simuliert hierbei eine Reihenschaltung von vier So-

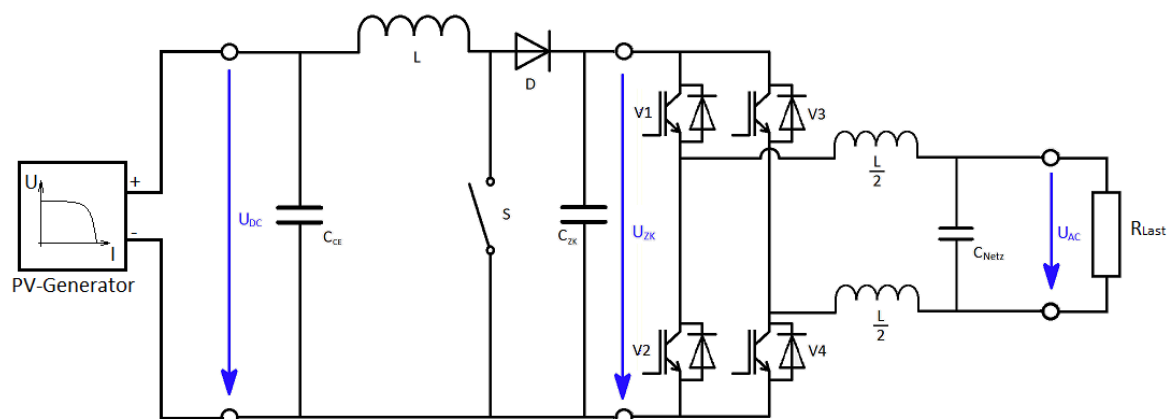


Abbildung 7.8.: Aufbau des Versuchs im Gleichstromsteller-Betrieb

larmodulen mit einer Strahlungsstärke von jeweils $E = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Die Last von $R_{Last} = 90\Omega$ wird am Ausgang des Wechselrichters angeschlossen. Der Tastgrad des Wechselrichters ist die Variable, mit der der Strom und die Spannung an der Last variiert werden kann. Dieser Tastgrad ist zwischen $a = 0$ und $a = 1$ in einer Schrittweite von $\Delta a = 0,05$ frei wählbar. Als Standard ist der Tastgrad von $a = 0,5$ eingestellt.

Ist der Tastgrad $a > 0,5$, so ist die Spannung und der Strom an der Last R_{Last} positiv, da die

Ventile V1 und V4 länger geöffnet sind als die Ventile V2 und V3. Das Schalten der Ventile ist in der Spannung u_{WR} in Abbildung 7.9 zu sehen. Dort ist auch der eingestellte Tastgrad von $a = 0,75$ zu erkennen.

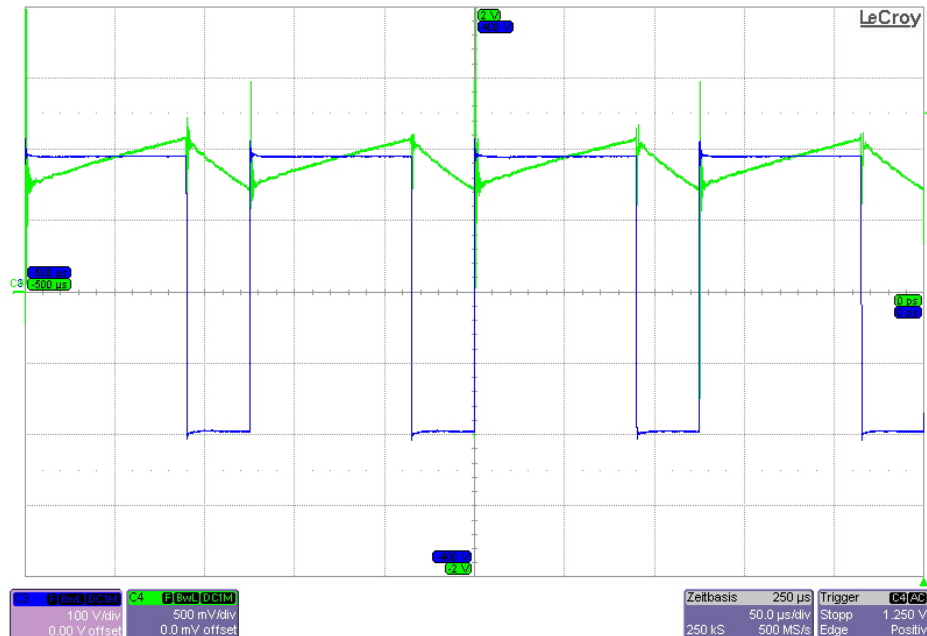


Abbildung 7.9.: Spannung u_{WR} (Ch3) und Strom i_{WR} (Ch4) zwischen Wechselrichter und Filter bei einem Tastgrad von $a = 0,75$

Variiert man den Tastgrad auf $a < 0,5$ so erhält man eine negative Spannung u_{AC} und einen negativen Strom i_{AC} . In diesem Fall sind die Ventile V2 und V3 länger geöffnet als die Ventile V1 und V4. Die Spannung u_{WR} und der Strom i_{WR} sind in Abbildung 7.10 bei einem Tastgrad von $a = 0,25$ zu sehen.

Ist der Tastgrad $a = 0,5$ sind die Ventile V1 und V4 genau so lange geschlossen wie die Ventile V2 und V3. In diesem Fall ist der Strom und die Spannung nach dem Filter $u_{AC} = 0V$ und $i_{AC} = 0A$. In Abbildung 7.11 ist der zeitliche Verlauf von u_{WR} und i_{WR} zu sehen. Außerdem ist dort auch der eingestellte Tastgrad von $a = 0,5$ zu erkennen.

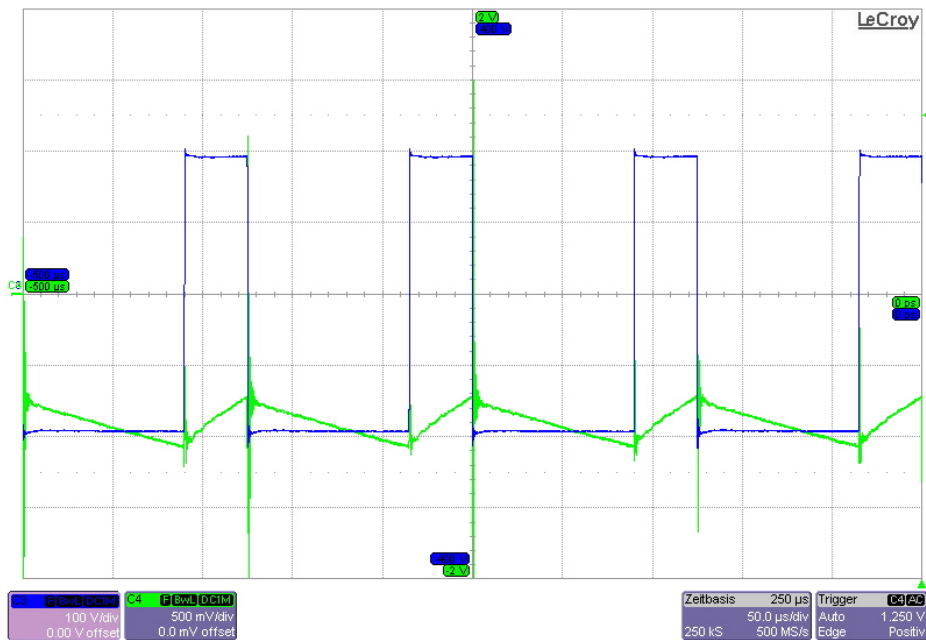


Abbildung 7.10.: Spannung u_{WR} (Ch3) und Strom i_{WR} (Ch4) zwischen Wechselrichter und Filter bei einem Tastgrad von $a = 0,25$

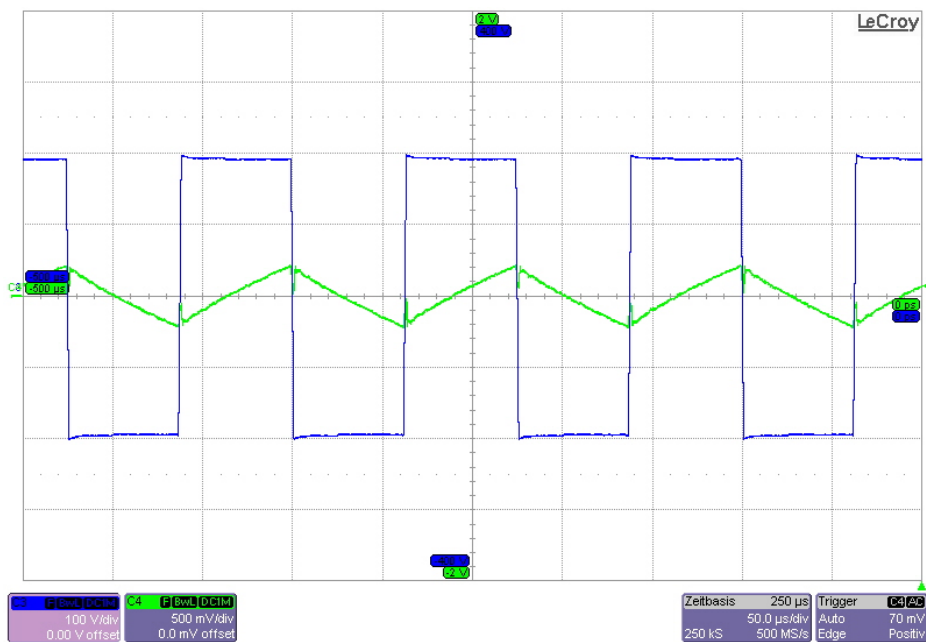


Abbildung 7.11.: Spannung u_{WR} (Ch3) und Strom i_{WR} (Ch4) zwischen Wechselrichter und Filter bei einem Tastgrad von $a = 0,5$

7.4. Solarwechselrichter mit Netzeinspeisung

Der Aufbau wird zu dem in Kapitel 7.3 dahingehend geändert, dass der Ausgang anstelle der Last nun über einen Sicherungsschalter und Transformator mit dem Netz verbunden wird. Im Visualisierungsprogramm wird das zu dem Versuchsaufbau dazugehörige Projekt 'PR_ZSKR' aktiviert. Im Anschluss kann das System gestartet werden. Anschließend lässt sich mit Hilfe des Tastgrads vom Hochsetzsteller der Betriebspunkt auf der Solarkennlinie einstellen. Zudem kann hier der Netzphasenwinkel zwischen -25° und $+25^\circ$ eingestellt werden. Der MPP kann auch hier manuell oder automatisch eingestellt werden. Simuliert der PV-Generator vier Solarmodule mit einer Strahlungsstärke von je $E = 1000 \frac{W}{m^2}$, so ist der Tastgrad des Hochsetzstellers im MPP $a = 0,55$. In Abbildung 7.12 ist die Netzspannung u_{AC} und der in das Netz eingespeisten Strom i_{AC} im MPP zu sehen. In Abbildung 7.13 ist ein Beispiel der Netzspannung u_{AC} und des in das Netz eingespeisten Stroms i_{AC} mit einem Netzphasenwinkel von $+25^\circ$.

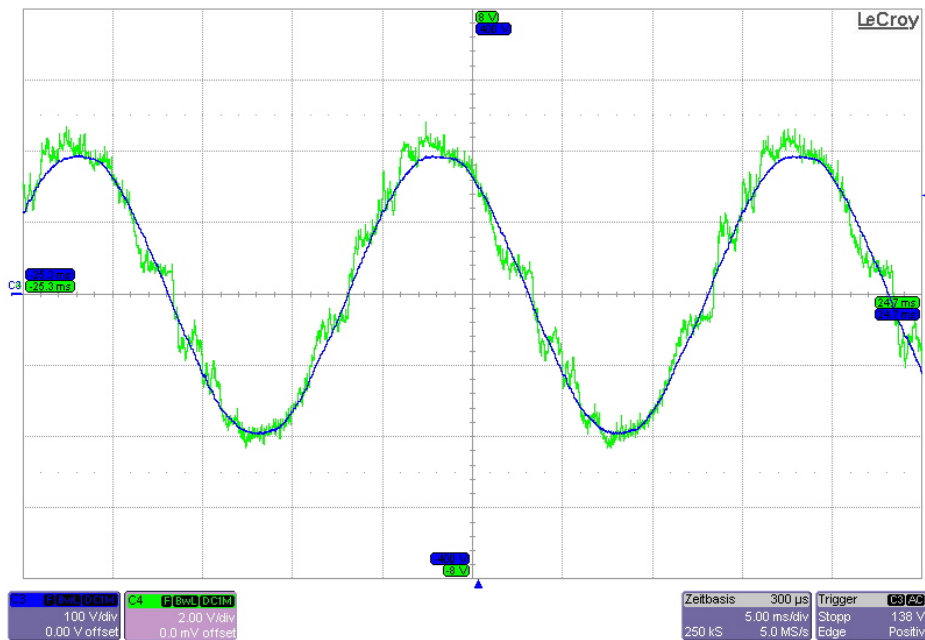


Abbildung 7.12.: Netzspannung u_{AC} (Ch3) und der in das Netz eingespeiste Strom i_{AC} (Ch4) im MPP

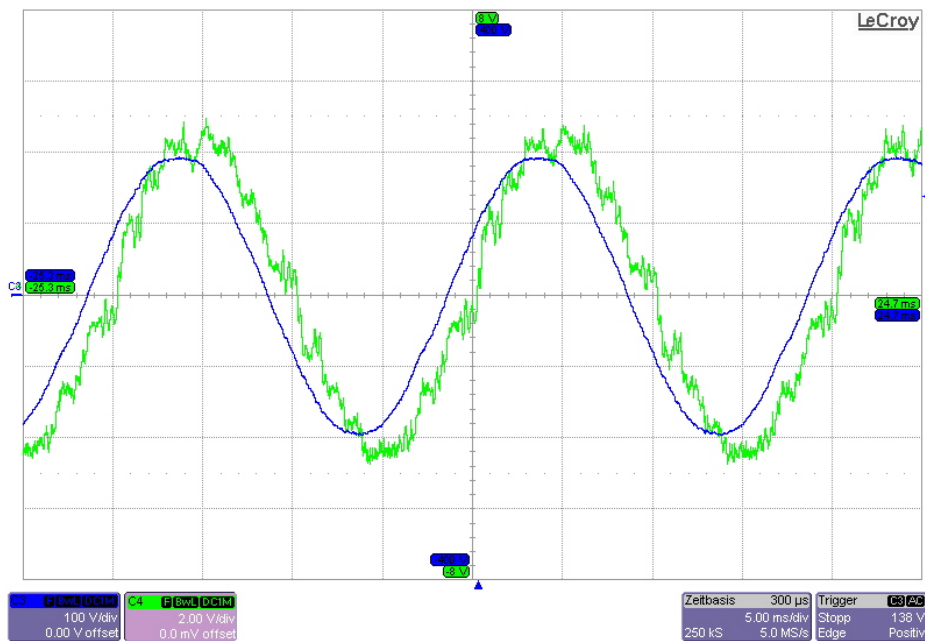


Abbildung 7.13.: Netzspannung u_{AC} (Ch3) und der in das Netz eingespeiste Strom i_{AC} (Ch4) im MPP mit einem Netzphasenwinkel von $+25^\circ$

8. Fazit und Ausblick

Der Versuchsstand des Wechselrichters zur Solargenerator-Netzeinspeisung ist für die Studentinnen und Studenten ein Laborversuch, bei dem sie ihr theoretisches Wissen über die Eigenschaften und die Funktionen von Hochsetzstellern, Wechselrichtern, Photovoltaikanlagen und das Zusammenspiel dieser Komponenten in der praktischen Anwendung erweitern können.

Der in das Netz eingespeiste Strom I_{AC} ist sinusförmig und weist keine Ausreißer auf. Zudem läuft der Versuchsaufbau stabil und fehlerfrei. Allerdings ist der Strom durch das notwendige Herabsenken der Frequenz f_{PWM} von 12kHz auf 8kHz etwas verrauschter. Das automatische Maximum Power Point Tracking wurde verbessert. Es wurde beschleunigt und ist durch die Mittelwertbildung genauer. Das Finden des MPP mittels Such-Schwing-Verfahren zeigte sich hierbei als gute Lösung. Das Regelprogramm wurde optimiert und die Messwerterfassung wurde verbessert.

Die grafische Bedienoberfläche wurde mit dem Programm dSpace ControlDesk gestaltet. Hier sind die für die Steuerung und Überwachung des Versuchsaufbaus erforderlichen Signale und Einstellungen übersichtlich und auf einem Bildschirm zusammengestellt. Das Programm wurde bezüglich anwenderbezogene fehlerhafter Bedienung der Steuerung des Versuchsaufbaus abgeriegelt.

Der zu implementierende Kopierverstärker TET Hercules 5000 ist als PV-Generator zur Netzeinspeisung nicht einsetzbar. Für das dynamische System des Wechselrichters zur Netzeinspeisung reagiert der Kopierverstärker bei Veränderung im System zu langsam, wodurch der Aufbau instabil wird und sich aufschwingt. Er ist für die Simulation eines Solarwechselrichters an einem ohm'schen Widerstand bedingt einsetzbar. Voraussetzung dabei ist das Reduzieren der Geschwindigkeit beim MPP-Tracking.

Der Aufbau eines zweiten Versuchsaufbaus ist in dieser Arbeit nicht realisiert worden. Dies kann in einer weiteren Folgearbeit geschehen. Zur Simulation der Photovoltaikmodule empfiehlt sich die Anschaffung eines zweiten Leistungsverstärkers von Delta Elektronik. Mit der mitgelieferten Software lassen sich Photovoltaikmodule simulieren. Wünschenswert wäre dabei allerdings noch, wenn sich die Kennlinien der Module im laufenden Betrieb ändern lassen würden.

Das Prozessorboard DS1104 stößt bei diesem Versuchsaufbau bereits an die Grenze seiner Kapazität. Von daher empfiehlt es sich für den zweiten Aufbau ein Prozessorboard mit leistungsfähigerer Hardware zu wählen. Im praktischen Aufbau des zweiten Versuchsaufbaus

ist unbedingt darauf zu achten, den Leistungsteil und die Steuerleitungen voneinander zu trennen, um Störungen auf den Steuerleitungen zu vermeiden. Des Weiteren ist es auch ratsam für die Signalleitungen abgeschirmte Leitungen zu nutzen.

Um den Versuchsaufbau mobiler zu gestalten, ist es zu empfehlen, sämtliche Leitungen zum Schaltschrank steckbar zu machen. Für die Verbindung zwischen der dSpace Schnittstelle und dem Schaltschrank ist ein Kabel zu empfehlen, in dem sämtliche Signale und Hilfsspannungen voneinander abgeschirmt liegen.

Literaturverzeichnis

- [1] BRÜGGEMANN, Marco: *Entwicklung und Aufbau eines 3,4kW Wechselrichters zur Solargenerator-Netzeinspeisung*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, 2013
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Bruttostromerzeugung in Deutschland 2016 in TWh*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 01.06.2017. – URL <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/bruttostromerzeugung-in-deutschland.html>
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Erneuerbare Energien auf einen Blick*. 01.06.2017. – URL <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/erneuerbare-energien-auf-einen-blick.html>
- [4] BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V.: *50,2-Hertz-Problem*. 24.06.2017. – URL <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/502-hertz-problem--langversion-de>
- [5] DELTA ELECTRONICA B.V.: *Datenblatt SM330*. 17.06.2017. – URL http://www.schulz-electronic.de/out/media/SM3300_D_E.pdf
- [6] DEUTSCHE UMWELTHILFE: *Aufbau des Stromnetzes*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 09.06.2017. – URL http://www.forum-netzintegration.de/uploads/media/DUH_Kurzinfo_Stromnetzaufbau.pdf
- [7] DIE BUNDESREGIERUNG: *Energiewende im Überblick*. 14.06.2017. – URL <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueberblick.html;jsessionid=00B680C854227CFB1E180ADD53079A98.s2t1>
- [8] DSPACE GMBH: *Firmenprofil*. 08.07.2017. – URL https://www.dspace.com/de/gmb/home/company/company_profile.cfm
- [9] DSPACE GMBH: *R&D controller board hardware installation and configuration for DS1104*. dSpace Catalog, 2009

- [10] FINDER: *Finder Relais Serie 62*. Finder Relays. 21.06.2017. – URL <http://www.finder-relays.net/de/finder-relais-serie-62.pdf>
- [11] PROBST, Uwe: *Leistungselektronik für Bachelors*. Hanser, 2015. – ISBN 978-3-446-44428-7
- [12] RALF KORIES, Heinz Schmidt-Walter: *Taschenbuch der Elektrotechnik*. Verlag Harri Deutsch, 2010. – ISBN 978-3-8171-1858-8
- [13] RÖTHER, Prof. Dr.-Ing. M.: *Vorlesung Regenerative Energien*. Handout 02. Sommersemester 2013
- [14] SEMIKRON: *Datenblatt Board 2s SKYPER 32 R*. 02.07.2017
- [15] SEMIKRON: *Datenblatt SEMISTACK - IGBT*. 02.07.2017
- [16] SEMIKRON: *Datenblatt SEMiX202GB12Vs*. 02.07.2017
- [17] SPRUT: *RS232- Interface*. 03.07.2017. – URL <http://www.sprut.de/electronic/interfaces/rs232/rs232.htm>
- [18] STEFANOWSKI, Benedikt: *Entwicklung und Aufbau eines 1,8 kW-Wechselrichters mit Kaskadenregelung zur Solargenerator-Netzeinspeisung*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Masterarbeit, 2015
- [19] SUNPOWER: *Datenblatt SunPower SPR-220*. 07.07.2017
- [20] TET ELECTRONICS INDUSTRIEALPINE GMBH & Co.KG: *BEDIENUNGSHANDBUCH HERCULES 5 kW*. 28.06.2017. – URL <http://www.tet.de/download/manual/de/HE55BEDH.pdf>
- [21] TET ELECTRONICS INDUSTRIEALPINE GMBH & Co.KG: *BEDIENUNGSHANDBUCH Option 34/1*. 28.06.2017. – URL http://www.tet.de/download/manual/Option%2034_1_01.pdf
- [22] VIKTOR WESSELAK, Sebastian V.: *Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird*. Springer, 2016. – ISBN 978-3-662-48905-5
- [23] WIRTH, Dr. H.: *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Fraunhofer ISE. 09.06.2017. – URL <https://www.ise.fraunhofer.de/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

A. Anhang

Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf DVD und ist einzusehen bei Prof. Dr.-Ing. Michael Röther oder Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel. Nachfolgend ist deren Inhalt zusammengefasst:

- Ausarbeitung
 - Thesis
 - Versuchsbeschreibung
- Datenblätter
- dSpace
 - Matlab Implementierung
 - dSpace ControlDesk Implementierung

Die Versuchsbeschreibung in Anhang [A.1](#) ist im Rahmen dieser Arbeit angepasst worden.

A.1. Versuchsbeschreibung Solarwechselrichter



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Department Informations- und Elektrotechnik

Labor für elektrische Antriebe
und Leistungselektronik

Studiengruppe:	Eingegangen am:	Protokollführer:
Übungstag:		Weitere Teilnehmer:
Professor:		
REP2	Solarwechselrichter	10/2016

1 Einleitung

Zur Einspeisung solarer Energie ins öffentliche Versorgungsnetz (ein- oder dreiphasig) muss der von Photovoltaik- (PV-) Generatoren erzeugte Gleichstrom in Wechselstrom umgeformt werden. Im Rahmen dieses Versuchs wird schrittweise eine derartige Netzeinspeisung aufgebaut und untersucht.

Informieren Sie sich vor der Versuchsdurchführung anhand dieser Versuchsbeschreibung, der Vorlesungsunterlagen sowie einschlägiger Literatur über die Kennlinien und die Verschaltung von PV-Modulen, die Funktionsweise von Hochsetzstellern, einphasigen Wechselrichtern sowie dem PWM-Steuerverfahren (Pulsweitenmodulation). Vor der Versuchsdurchführung werden Sie durch den Professor oder den wissenschaftlichen Mitarbeiter in die Bedienung der Anlage eingewiesen.

2 Versuchsvorbereitung

Im Versuch wird mit einer Simulation das Verhalten eines PV-Generators mit einem Leistungsverstärker nachgebildet. Die Simulation berechnet aus den Datenblattangaben den Verlauf der I-U-Kennlinie und der P-U-Kennlinie des PV-Generators. Das Datenblatt des einzusetzenden PV-Moduls ist im Anhang beigefügt.

Bereiten Sie zur Versuchsdurchführung die I-U-Kennlinie und die P-U-Kennlinie eines PV-Generators bestehend aus der Reihenschaltung aus 4 PV-Modulen mit den Datenblattangaben vor (1000W/m^2 , 25°C). Fertigen Sie auch beide Kennlinien für die 50%ige Abschattung eines PV-Moduls an. Nutzen Sie dazu die Vorlesungsunterlagen.

3 Versuchsdurchführung

Die Spannungsversorgung für den Versuchsaufbau wird mit Hilfe eines programmierbaren Leistungsverstärkers der Firma Delta Electronica bereitgestellt. Die Leistungselektronik des Hochsetzstellers und Wechselrichters befindet sich im Schaltschrank. Die Steuerungs- und Messelektronik ist in einem 19-Zoll-Gehäuse untergebracht. Die eigentlichen Regelungs- und Steuerungsaufgaben übernimmt ein Echtzeit-DSP-Board der Firma dSpace. Einstellungen für die Regelung und Steuerung der gesamten Anlage werden über die dSpace-Software Control Desk am PC vorgenommen.

Für die Simulation des PV-Generators wird die PV-Software von Delta Electronica verwendet. Diese dient auch zur Darstellung des Arbeitspunkts des Hochsetzstellers.



3.1 Hochsetzsteller

PV-Generatoren werden häufig Gleichstromsteller (Tiefsetzsteller, Hochsetzsteller) als MPP-Tracker nachgeschaltet. Das Prinzipschaltbild des Hochsetzstellers sowie Grundlagen hierzu finden Sie im Anhang A1.

Verschalten Sie den Hochsetzsteller wie im Anhang A1 gezeigt an dem Schaltschrank des Solarwechselrichters.

U_B	= 50 V	
I_{Bmax}	= 3 A	(Strombegrenzung)
R_{Last}	= 90 Ω	
a	= 0,5	(Tastverhältnis)

Für die Einstellung der Eingangsgrößen am Leistungsverstärker wird dieser in den Handbetrieb umgestellt:



Dazu wählen Sie mit den Drehreglern und Tasten folgende Menü-Punkte an:

Menu->Configuration->Setup->Recall Setup->setup2

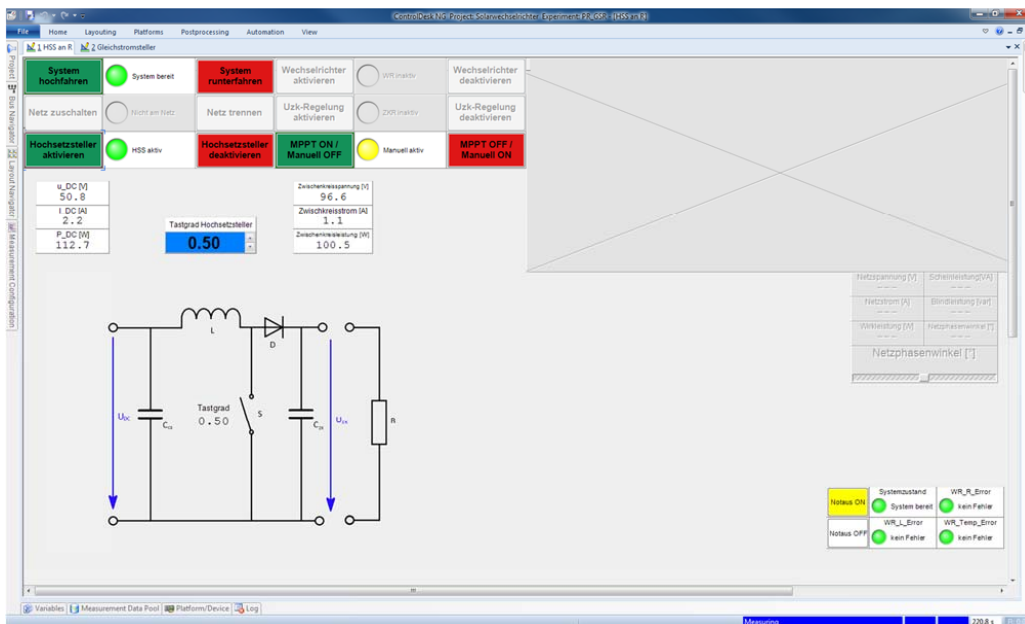
Stellen sie vorgenannte Werte für U_B und I_{Bmax} ein.

Starten Sie am PC das Visualisierungsprogramm „dSpace Control Desk 5.1“, öffnen Sie das Projekt „Solarwechselrichter“ und starten Sie die Messung über:

Home -> Start Measuring



Geben Sie dort das Tastverhältnis vor. Fahren Sie das System hoch und aktivieren Sie den Hochsetzsteller:



Messen Sie mit Hilfe des Oszilloskops die Taktfrequenz f_{Takt} und überprüfen Sie das eingestellte Tastverhältnis a . Zur Überprüfung der Funktion des Hochsetzstellers messen Sie U_A und I_A mit entsprechenden Multimetern sowie nacheinander die zeitlichen Verläufe folgender Größen:

Ausgangsspannung und Ausgangsstrom: U_A, I_A
Spannung und Strom an der Drossel L: U_L, I_L
Spannung und Strom am Schalter S: U_S, I_S
Spannung und Strom an der Diode D: U_D, I_D
Eingangsspannung und Eingangsstrom: U_B, I_B

Bestimmte Größen sind nur indirekt messbar. Überlegen Sie sich dafür geeignete Messszenarien. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den zeitlichen Verläufen im Anhang A1.

3.2 Simulation des PV-Generators

Für die Nachbildung des Verhaltens eines PV-Generators wird die Simulationsumgebung für den Leistungsverstärker verwendet. Mit der Software ist es möglich, aus den Datenblattangaben von PV-Modulen Kennlinien zu modellieren und diese auf dem Leistungsverstärker abzubilden.

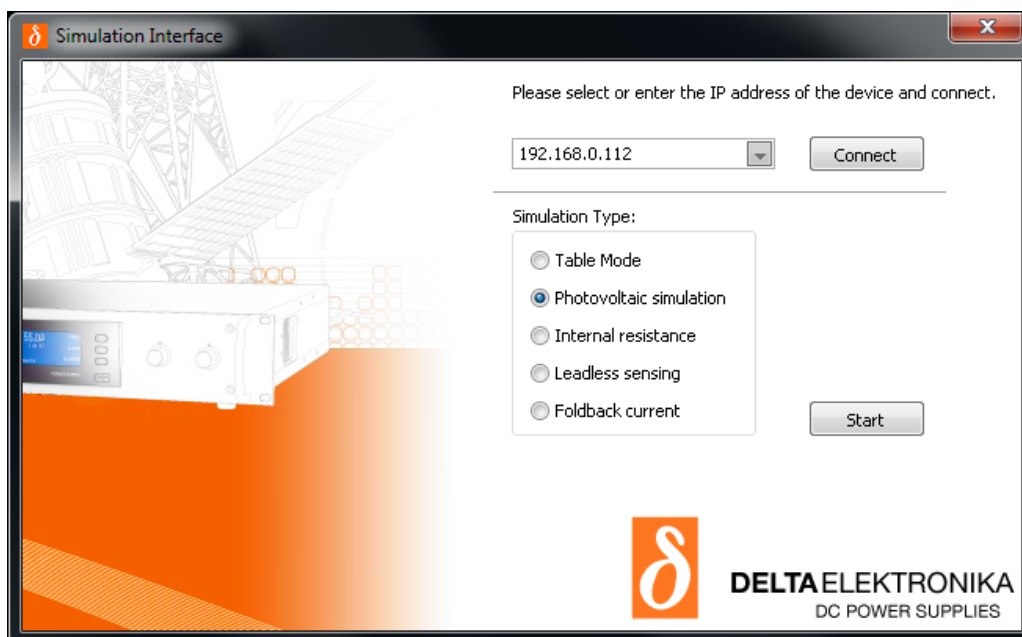


3.2.1 Simulation ohne Abschattung

Wählen Sie mit den Drehreglern und Tasten am Leistungsverstärker folgende Menü-Punkte an:

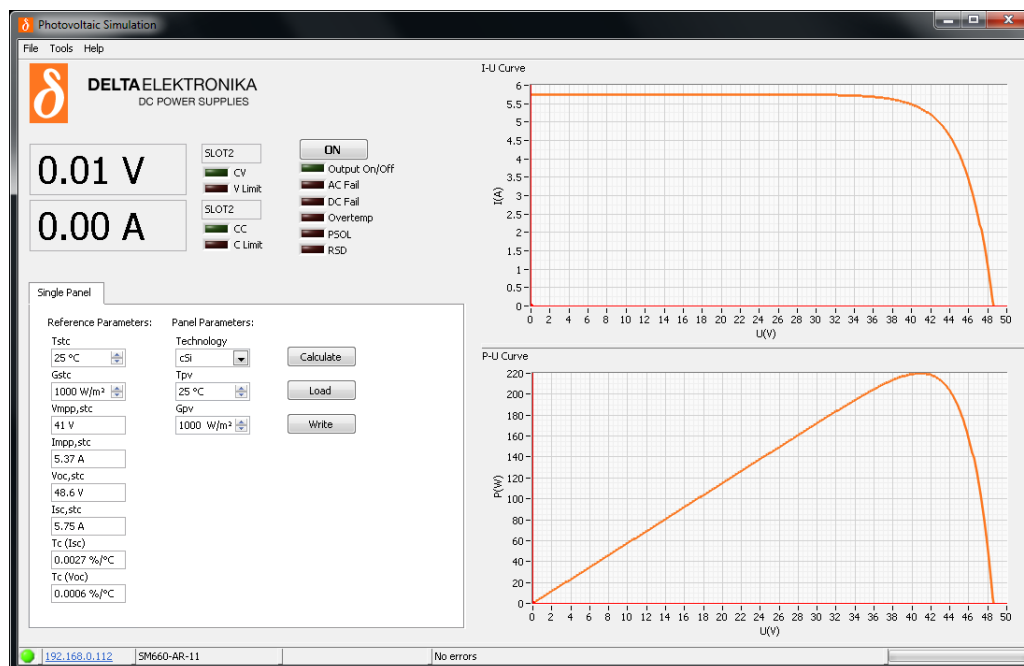
Menu->Configuration->Setup->Recall Setup->setup1

Starten Sie am PC das Programm „Simulation Interface“ und geben Sie folgende IP-Adresse zum Verbinden an: 192.168.0.112:





Wählen Sie die „Photovoltaic simulation“ aus und parametrieren Sie die Simulation mit den Werten aus dem Datenblatt des Solarmoduls 220 der Firma Sunpower im Anhang:



In der Simulation können auch mehrere PV-Module in Reihenschaltung betrachtet werden. Hier soll das Verhalten von in Reihe geschalteten PV-Modulen bei unterschiedlicher Bestrahlung bzw. Abschattung untersucht werden.

Dazu wird in der Menüleiste der Reiter „Tools“ angewählt und im Bereich „Simulation Mode“ die Option „Multiple Panels“ ausgewählt. Dort können bis zu 5 verschiedene Panels unterschiedlich abgeschattet werden. Nun wird eine Reihenschaltung aus insgesamt 4 PV-Modulen erstellt. Dabei wird pro Panel ein PV-Modul verschaltet. Es gelten STC-Bedingungen.

Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den von Ihnen angefertigten Kennlinien des Solargenerators ohne Abschattung.



3.2.2 Simulation mit Abschattung

Panel 1 wird zu 50% abgeschattet. Über die Schaltfläche „Calculate“ werden die neuen Kurven berechnet.

Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den von Ihnen angefertigten Kennlinien des PV-Generators mit 50%iger Abschattung eines PV-Moduls.

3.3 MPP-Tracking

Um dem PV-Generator immer die maximal mögliche Leistung zu entziehen, muss der Generator stets in seinem Punkt maximaler Leistung belastet werden. Aufgabe des MPP-Trackings ist es, das Tastverhältnis des nachgeschalteten Gleichstromstellers entsprechend einzustellen.

Die Untersuchung der Funktion eines MPP-Trackers soll anhand des Hochsetzstellers aus Kapitel 3.1 erfolgen.

3.3.1 Manuelles MPP-Tracking

Stellen Sie für die Simulation aus Kapitel 3.2.1 das Tastverhältnis a des Hochsetzstellers derart ein, dass der PV-Generator die maximal mögliche Leistung abgibt. Überprüfen Sie dies über den angezeigten Arbeitspunkt des Leistungsverstärkers in der Simulation.

Zur Inbetriebnahme des Leistungsverstärkers wird über die Schaltfläche „Calculate“ die Kurve berechnet und mit „Write“ auf den Leistungsverstärker übertragen. Mit dem Button „ON“ werden die Ausgänge freigeschaltet.

Wiederholen Sie das manuelle MPP-Tracking mit der Simulation aus Kapitel 3.2.2.

Dazu wird in der Simulation für mehrere Panels die Kurve mit „Calculate“ berechnet. Anschließend wird auf den Reiter „Data Points“ gewechselt und mit dem Button „Write Table“ die Datenpunkte auf den Leistungsverstärker übertragen.



3.3.2 Automatisches MPP-Tracking nach dem Suchschwingungsverfahren mit Leistungsmessung

Fahren Sie das System hoch, aktivieren Sie den Hochsetzsteller und schalten Sie das MPP-Tracking über die Schaltfläche „MPPT ON / Manuell OFF“ ein.

Überzeugen Sie sich von der Funktion des verwendeten MPP-Trackingverfahrens für beide Simulationen aus Kapitel 3.2 und vergleichen Sie das Ergebnis mit jenem aus Aufgabe 3.3.1. Haben Sie etwas Geduld beim Betrieb mit automatischem MPP-Tracking ☺.

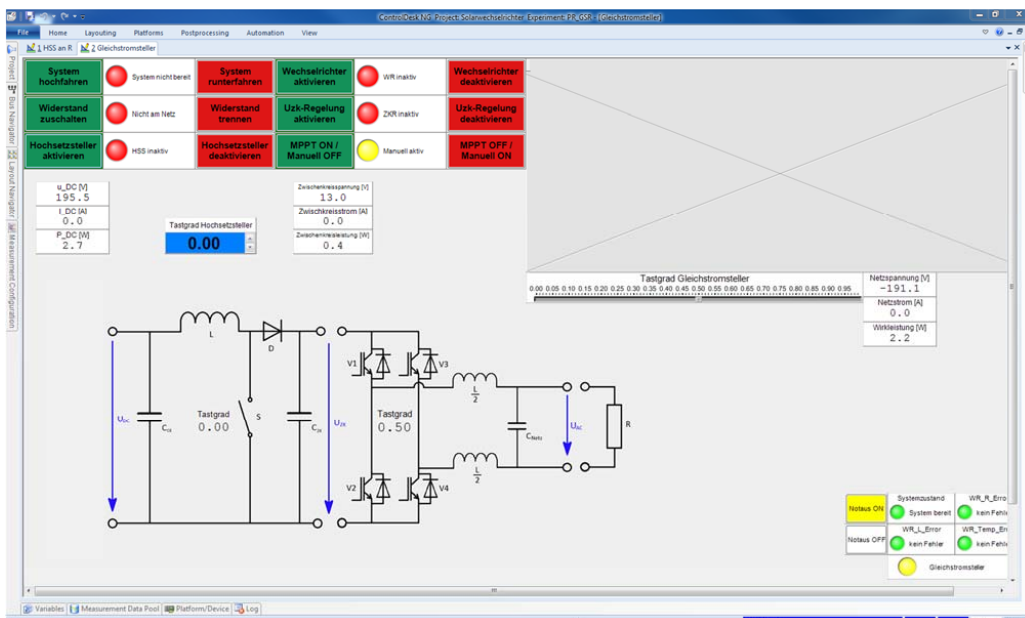
3.4 Solarwechselrichter

Im Folgenden wird die Funktionsweise eines einphasigen Wechselrichters in Brückenschaltung untersucht. Zunächst wird die Energie vom PV-Generator nicht ins Versorgungsnetz eingespeist, sondern in einem ohmschen Verbraucher in Wärme umgesetzt. Anschließend wird eine Netzeinspeisung realisiert.

Das Blockdiagramm des Wechselrichters sowie Grundlagen hierzu finden Sie im Anhang A3. Die Ansteuerung der Leistungsschalter erfolgt intern über das PWM-Steuerverfahren.

3.4.1 Gleichstromsteller-Betrieb

Verschalten Sie die Anlage am Schaltschrank für Gleichstromsteller-Betrieb. Im Visualisierungsprogramm wird der Versuchsaufbau über die Maske des Gleichstromstellers bedient:





Der PV-Generator wird durch eine Reihenschaltung von vier PV-Modulen bei $E = 1000 \text{ W/m}^2$ simuliert. Der nachgeschaltete Hochsetzsteller wird wie in Aufgabe 3.1 aufgebaut. Am Ausgang des Hochsetzstellers wird der Wechselrichter angeschlossen. Am Ausgang des Wechselrichters wird ein Lastwiderstand von $R = 90 \Omega$ angeschlossen.

Fahren Sie das System in folgender Reihenfolge hoch:

System hochfahren -> Widerstand zuschalten -> Hochsetzsteller aktivieren -> Wechselrichter aktivieren

Das System wird in entgegengesetzter Reihenfolge wieder heruntergefahren.

Stellen Sie ein konstantes Tastverhältnis $a = 0,75$ ein. Messen und dokumentieren Sie nacheinander die zeitlichen Verläufe folgender Größen:

Ausgangsspannung und Ausgangsstrom: U_{AC}, I_{AC}

Eingangsspannung und Eingangsstrom: U_{DC}, I_{DC}

Spannung und Strom am Ausgang des Wechselrichters: U_{WR}, I_{WR}

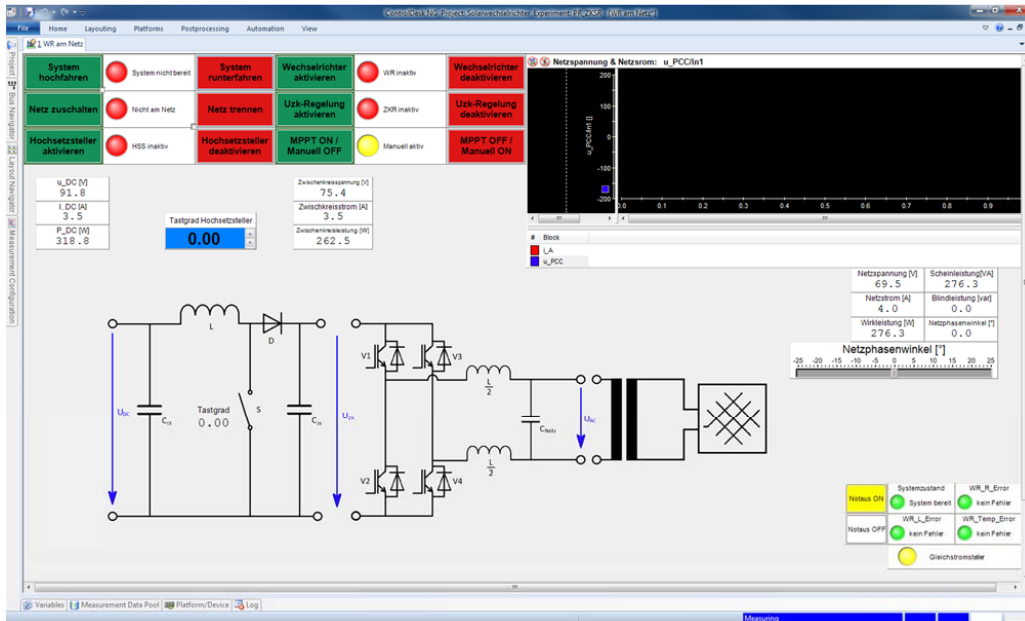
Interpretieren und bewerten Sie die Ergebnisse.

Wiederholen Sie die Aufgabe für ein konstantes Tastverhältnis $a = 0,25$.

3.4.2 Wechselrichter-Betrieb mit Netzeinspeisung

Verschalten Sie die Anlage am Schaltschrank für Wechselrichterbetrieb. Dazu wird der Solarwechselrichter nun über einen Sicherungsschalter und Transformator mit dem Netz verbunden. Der entsprechende Schaltungsaufbau ist aus Anhang A4 zu entnehmen. Achten Sie darauf, dass das System zuvor heruntergefahren ist.

Im Visualisierungsprogramm aktivieren Sie über „Project“ das zugehörige Experiment „PR_ZSKR“ und starten Sie wieder die Messung.



Fahren Sie das System in folgender Reihenfolge hoch:

System hochfahren -> Netz zuschalten -> Hochsetzsteller aktivieren -> Wechselrichter aktivieren -> Uzk-Regelung aktivieren

Das System wird in entgegengesetzter Reihenfolge wieder heruntergefahren.

Betreiben Sie den PV-Generator im MPP. Bei Betrieb mit automatischem MPP-Tracking: Haben Sie etwas Geduld ☺.

Der Schieberegler „Netzphasenwinkel“ kann den Strom im Bereich -25° bis $+25^\circ$ zur Netzspannung verschieben. Für die Vorgabe von Frequenz und Amplitude für die WR-Regelung dient die Netzspannung.

Messen und dokumentieren Sie nacheinander die zeitlichen Verläufe folgender Größen für drei sinnvolle, verschiedene Werte des Netzphasenwinkels:

Ausgangsspannung und Ausgangsstrom: U_{AC} , i_{AC}

Eingangsspannung und Eingangsstrom: U_{DC} , i_{DC}

Spannung und Strom am Ausgang des Wechselrichters: U_{WR} , i_{WR}

Interpretieren und bewerten Sie die Ergebnisse.

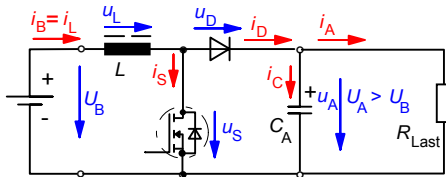
4 Auswertung

Fassen Sie Ihre Ergebnisse aus den Aufgaben der Vorbereitung und der Versuchsdurchführung zusammen und interpretieren Sie diese.



Anhang A1: Hochsetzsteller

Leistungsteil eines Hochsetzstellers mit Feldeffekttransistor, der geregelt einen Ausgangskondensator und die Last mit einer höheren Spannung als die Eingangsspannung speist (es können auch alle anderen ein- und ausschaltbaren Ventile verwendet werden):



An der Induktivität L liegt

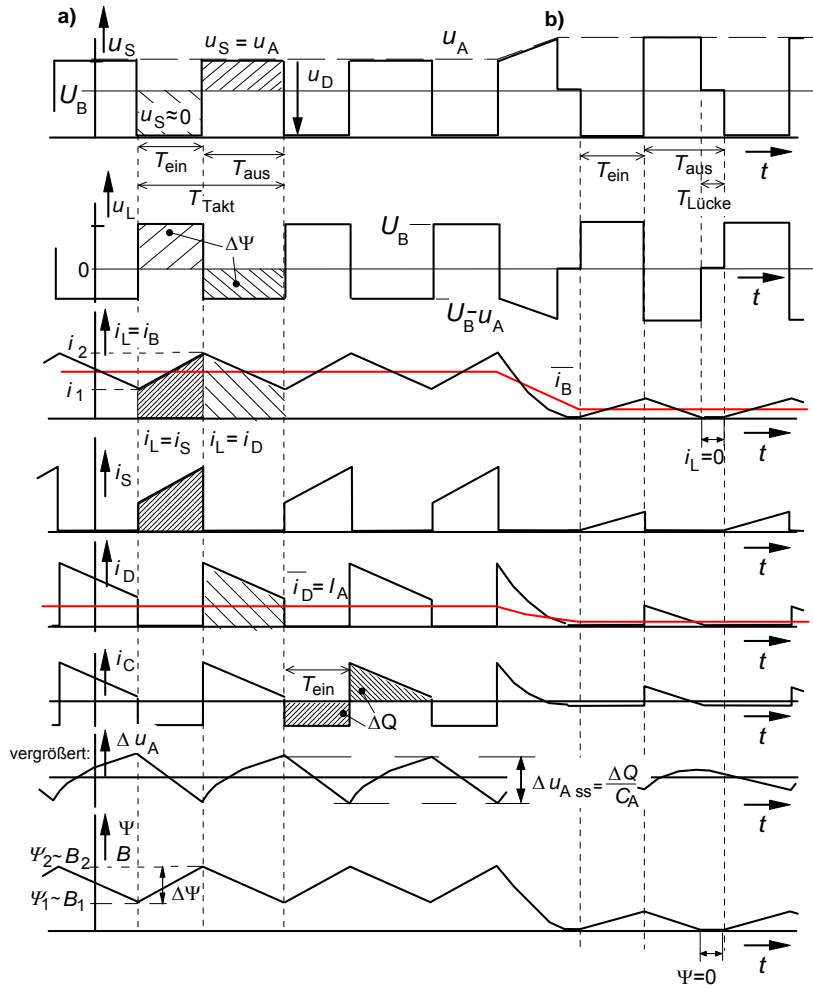
- während der Einschaltzeit T_{ein} des elektronischen Schalters praktisch die volle Eingangsspannung
 $u_L = U_B$ $i_B = i_L = i_S$ $i_D = 0$ $u_D = -u_A$ und
- während der Sperrphase die Spannungsdifferenz zwischen der Ausgangs- und der Eingangsspannung
 $u_L = U_B - u_A$ $i_B = i_L = i_D$ $i_S = 0$ $u_S = u_A$

Steuerungsgleichung:

- Gleiche Spannungszeitflächen an der Speicherdrossel im eingeschwungenen Zustand:
 $\Delta\Psi = U_B \cdot T_{\text{ein}} = (U_A - U_B) \cdot T_{\text{aus}}$ bei nicht lückendem Drosselstrom i_L
 - Damit:
 $U_A = \frac{T_{\text{ein}} + T_{\text{aus}}}{T_{\text{aus}}} \cdot U_B = \frac{T_{\text{Takt}}}{T_{\text{aus}}} \cdot U_B = \frac{1}{1-a} \cdot U_B$ bei nicht lückendem Drosselstrom i_L
- mit Tastverhältnis $a = \frac{T_{\text{ein}}}{T_{\text{ein}} + T_{\text{aus}}} = \frac{T_{\text{ein}}}{T_{\text{Takt}}} = T_{\text{ein}} \cdot f_{\text{Takt}}$



Zeitlicher Verlauf der Spannungen, Ströme und magnetischen Größen für
 a) Nicht lückenden Drosselstrom i_L b) Lückenden Drosselstrom i_L



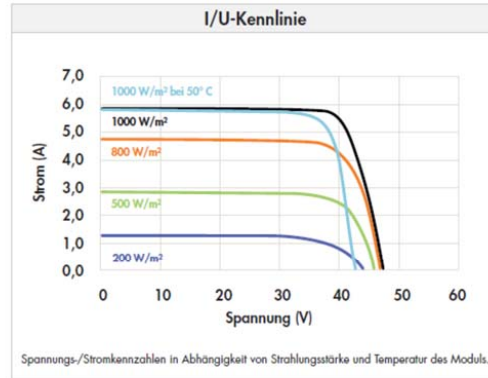
Darin: Flussverketting der Drosselspule: $\Psi = L \cdot i$, d.h. $u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = \frac{d\Psi}{dt}$



Anhang A2: Datenblatt Sunpower PV-Modul 220

Elektrische Eigenschaften		
Bei Standardtestbedingungen [STC]: Einstrahlungsleistung 1000W/m ² , AM 1,5, Zelltemperatur von 25° C.		
Nennleistung (+5/-3%)	P _{nom}	220 W
Spannung im MPP	U _{mpp}	41,0 V
Strom im MPP	I _{mpp}	5,37 A
Leerlaufspannung	U _{oc}	48,6 V
Kurzschlussstrom	I _{sc}	5,75 A
Max. Systemspannung	IEC	1000 V
Temperaturkoeffizienten		
	Leistung	-0,38% / K
	Spannung (V _{oc})	-132,5mV / K
	Strom (I _{sc})	3,5mA / K
NOCT		46° C +/-2° C
Max. Sicherung bei Reihenschaltung		20 A
Max. Rückstrom (bei 3-Modulsträngen)	I _r	14,4 A

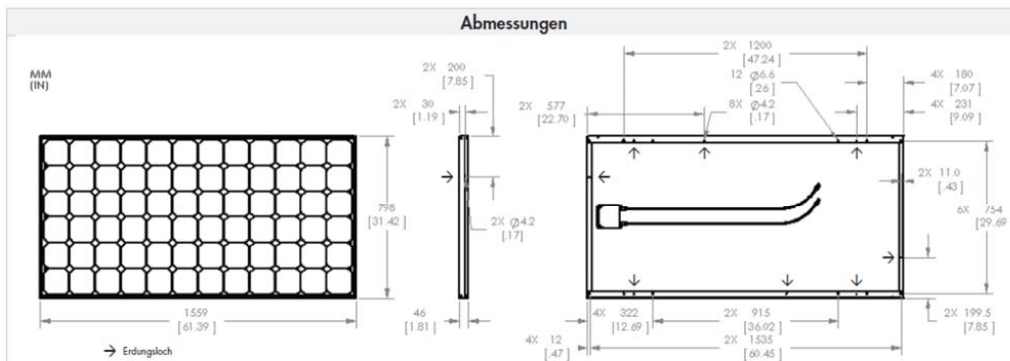
Elektrische Eigenschaften		
Bei typischer Betriebstemperatur (NOCT): Einstrahlungsleistung 800W/m ² , AM 1,5		
Nennleistung	P _{nom}	161 W
Spannung im MPP	U _{mpp}	37,4 V
Strom im MPP	I _{mpp}	4,31 A
Leerlaufspannung	U _{oc}	45,4 V
Kurzschlussstrom	I _{sc}	4,66 A



Geprüfte Betriebsbedingungen	
Temperatur	-40° C bis +85° C
Max. Belastbarkeit	550kg/m ² (5400 Pa) auf der Vorderseite (z.B. Schnee) 245kg/m ² (2400 Pa) auf Vorder- und Rückseite (z.B. Wind)
Schlagfestigkeit	Hagel – 25 mm bei 23 m/s

Garantien und Zertifizierungen	
Garantien	25 Jahre Leistungsgarantie 10 Jahre Produktgarantie
Zertifizierungen	IEC 61215 Ed. 2, IEC 61730 (SCII)

Mechanische Daten			
Solarzellen	72 monokristalline SunPower-Rückseitenkontakt-Solarzellen	Anschlusskabel	1000 mm langes Kabel/MultiContact-Stecker (MC4)
Frontglas	Hochtransparentes gehärtetes Glas	Rahmen	Eloxierte Aluminiumlegierung (schwarz) Typ 6063
Anschlussdose	Schutzklasse IP 65 mit 3 Bypass Dioden 32 x 155 x 128 (mm)	Gewicht	15,0 kg

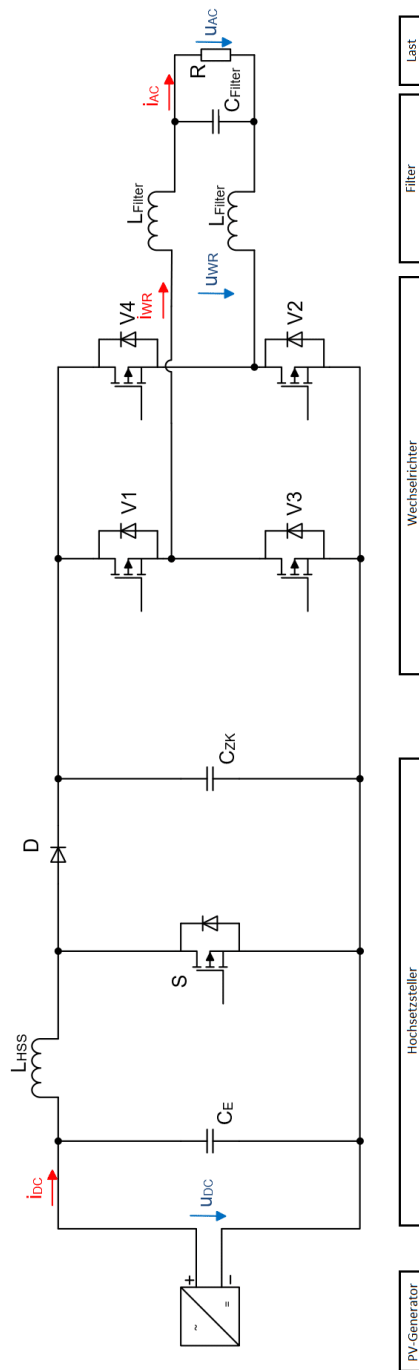


ACHTUNG: VOR BETRIEB DES PRODUKTS BITTE DIE SICHERHEITS- UND INSTALLATIONSHINWEISE BEACHTEN.
Weitere Informationen finden Sie unter: www.sunpower.de

SUNPOWER und das SUNPOWERLogo sind Marken oder eingetragene Marken der SunPower Corporation. © März 2009 SunPower Corporation. Alle Rechte vorbehalten. Wir behalten uns eine kurzfristige Änderung der in diesem Datenblatt aufgeführten Spezifikationen vor.



Anhang A3: Solarwechselrichter mit ohm'scher Last



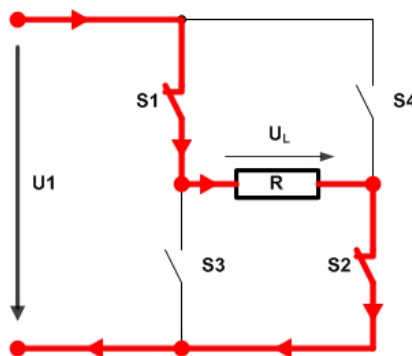


Grundlagen:

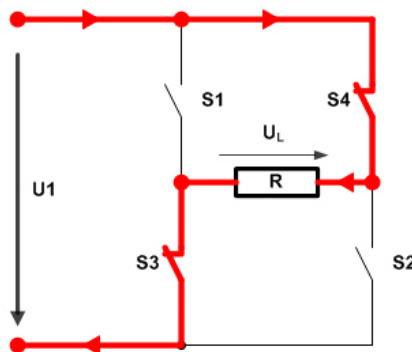
Aufgabe ist, aus der vom PV-Generator erzeugten Gleichspannung unter Einsatz eines Wechselrichters eine Wechselfspannung zu erzeugen. Dabei wird die B2-Brücke des Wechselrichters so angesteuert, dass am Ausgang eine Wechselfspannung mit der gewünschten Amplitude und der gewünschten Frequenz entsteht.

Dies geschieht unter Nutzung der folgenden zwei Schaltzustände:

Im Schaltzustand 1 sind die Schalter S1 und S2 (ein- und ausschaltbare Einwegventile) gleichzeitig eingeschaltet, während die Schalter S3 und S4 ausgeschaltet sind. An der Last entsteht eine positive Spannung ($u_L > 0$). Die Dauer dieses Zustandes bezeichnet man als T_{ein} .



Im Schaltzustand 2 sperren S1 und S2, die Schalter S3 und S4 sind eingeschaltet. An der Last entsteht eine negative Spannung ($u_L < 0$). Die Dauer dieses Zustandes bezeichnet man als T_{aus} .





Wird periodisch zwischen beiden Schaltzuständen gewechselt, entsteht an der Last eine mittlere Spannung U_L , die sich wie folgt berechnen lässt:

$$U_L = U_1 \cdot \frac{T_{\text{ein}} - T_{\text{aus}}}{T_{\text{Takt}}}$$

Mit dem Tastverhältnis: $a = \frac{T_{\text{ein}}}{T_{\text{ein}} + T_{\text{aus}}} = \frac{T_{\text{ein}}}{T_{\text{Takt}}} = T_{\text{ein}} \cdot f_{\text{Takt}}$ gilt:

$a > 0,5$:	$T_{\text{ein}} > T_{\text{aus}}$	$U_L > 0$
$a < 0,5$:	$T_{\text{ein}} < T_{\text{aus}}$	$U_L < 0$
$a = 0,5$:	$T_{\text{ein}} = T_{\text{aus}}$	$U_L = 0$

Wird das Tastverhältnis auf einen festen Wert eingestellt ($a = \text{konst.}$), handelt es sich um Gleichstromsteller-Betrieb.

Wird das Tastverhältnis so gesteuert, dass sich sein Wert symmetrisch und periodisch um den Wert $a = 0,5$ ändert, handelt es sich um Wechselrichter-Betrieb. Am Ausgang des Stellers tritt eine Wechselspannung auf, deren Grundschiwingung $u_{L(1)}(t)$ vom LC-Filter (Tiefpass) durchgelassen wird. Die Amplitude $\hat{u}_{L(1)}$ und Frequenz f_1 der Grundschiwingung $u_{L(1)}(t)$ sind innerhalb ihrer Grenzen frei einstellbar.

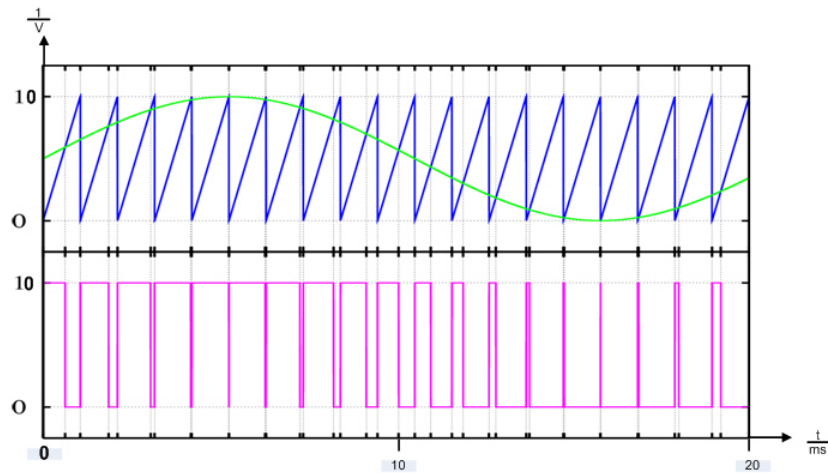
Wie gut die Ausgangsspannung dem vorgegebenen Sollwertverlauf folgt, hängt von der gewählten Taktfrequenz und der Dimensionierung des LC-Filters ab. Je größer der Abstand zwischen f_{Takt} und f_1 gewählt wird, desto besser wird die Taktfrequenz unterdrückt.

Bei Anwendung der Pulsweitenmodulation (PWM) als Steuerverfahren wird die Steuerspannung u_{st} (vorgegebener Sollwert, z.B. sinusförmiger Verlauf mit Frequenz f_1 , im Bild unten grün) mit einer sägezahnförmigen Spannung u_{sz} (Frequenz f_{Takt} , blau) verglichen. Die Steuersignale für die Schalter S1 – S4 ergeben sich dann in einfacher Weise wie folgt:

$u_{\text{st}} < u_{\text{sz}}$:	Schaltzustand 1	S1 und S2 EIN	S3 und S4 AUS
$u_{\text{st}} > u_{\text{sz}}$:	Schaltzustand 2	S1 und S2 AUS	S3 und S4 EIN



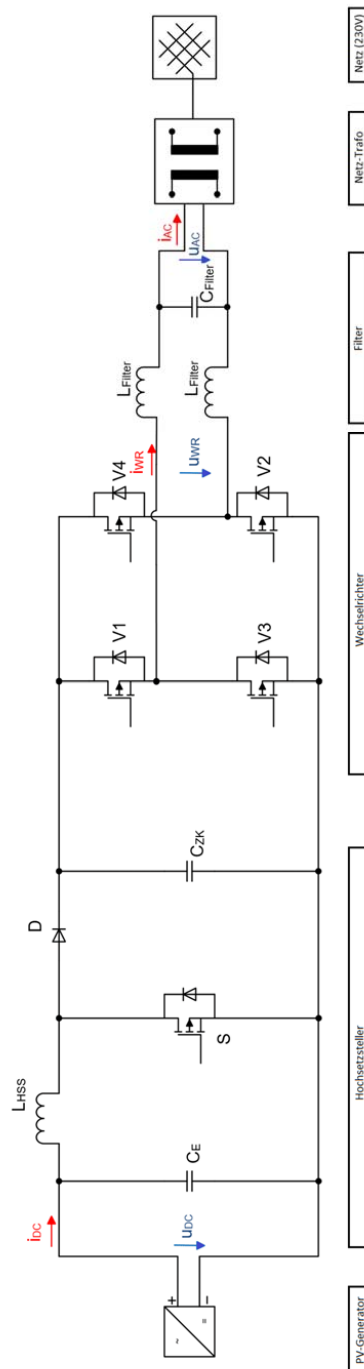
Das rechteckförmige Signal im Bild darunter stellt das Ansteuersignal für die Schalter S1 und S2 dar (EIN = „1“, AUS = „0“). S3 und S4 werden vom invertierten Signal angesteuert.



Die ein- und ausschaltbaren Einwegventile S1 – S4 werden durch Leistungs-IGBTs realisiert.



Anhang A4: Solarwechselrichter mit Netzkopplung



Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 13. Juli 2017

Ort, Datum

Unterschrift