

Diplomarbeit

Rüdiger Nicholas Heidenreich Vasquez

Entwicklung und Aufbau eines Solarwechselrichters
mit MPP- Tracking

Rüdiger Nicholas Heidenreich Vasquez

Entwicklung und Aufbau eines
Solarwechselrichters mit MPP- Tracking

Diplomarbeit eingereicht im Rahmen der Diplomprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
Studienrichtung Kommunikationstechnik
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 10 Mai 2010

Rüdiger Nicholas Heidenreich Vasquez

Thema der Diplomarbeit

Entwicklung und Aufbau eines Solarwechselrichters mit MPP- Tracking

Stichworte

Regenerative Energien, Leistungselektronik, Angewandte Regelungstechnik

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird der Aufbau eines Versuchstands für einen Praktikumsversuch im Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik realisiert und dokumentiert. Es handelt sich dabei um die Realisierung einer Photovoltaikanlage mit der den angehenden Ingenieuren/innen ein Einblick in die Grundlagen der Gewinnung von Solarenergie sowie in die Technik, die zur Realisierung dieser Aufgabe benötigt wird, gegeben wird. Diese Diplomarbeit dient gleichermaßen als Dokumentation sowie Orientierungshilfe bei der Inbetriebnahme und Bedienung des erstellten Aufbaus.

Rüdiger Nicholas Heidenreich Vasquez

Title of the paper

Development and assembling of a solar inverter with MPP- Tracking

Keywords

renewable energy, power electronic, applied automatic control engineering

Abstract

This diploma thesis discusses the assembling of a test rig for a practical test in the laboratory for electrical drives and power electronics. The document includes the development of a photovoltaic system. This system gives the future engineers an insight view of the method of converting sun energy into electrical power and the technology which is used to make this possible. This thesis is also a document and a guide for the commissioning and operation of the assembled photovoltaic system.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Vorwort	5
1. Ziele	6
1.1. Durchzuführende Arbeitsschritte.....	6
1.2. Struktur der zu realisierenden Aufgabe	7
2. Photovoltaikanlagen	8
2.1. Strukturen	8
2.2. Stand der Technik.....	9
3. Der Solargenerator	10
3.1. Eigenschaften eines Solargenerators	11
3.2. Kennlinien des Solargenerators.....	14
3.3. Simulation der Kennlinien.....	17
3.3.1. Der Kopierverstärker.....	17
3.3.2. Schnittstelle und Parameter.....	18
3.3.3. Steuerprogramme des Kopierverstärkers	20
3.3.4. Flussdiagramme	21
3.3.4.1. Hauptprogramm	21
3.3.4.2. Manuelle Steuerung.....	22
3.3.4.3. Solargenerator-Betrieb	23
3.3.5. Programmierung der Kennlinien.....	24
3.3.6. Bedienoberflächen	25
3.3.6.1. Manuelle Steuerung.....	25
3.3.6.2. Solargenerator- Betrieb	26
3.4. Statische Aufnahme der einprogrammierten Kennlinien.....	27
3.4.1. Einstellungen des Solargenerators	27
3.4.2. Aufgenommene Kennlinien	28
4. Messtechnik	29
4.1. Messdatenerfassung mit „NI 6229	29
4.2. Trennverstärker zur Messung am Solargenerator.....	29
5. Anpassungswandler	30
5.1. Einsatz eines Anpassungswandlers	30
5.2. Arbeitsweise des Hochsetzstellers.....	31
5.3. Betriebsarten.....	33
5.3.1. MPP-Tracker.....	33
5.3.1.1. Erläuterung	33
5.3.1.2. Umsetzung und Funktionsweise.....	34
5.3.1.3. Flussdiagramm	37
5.3.1.4. Wahl des Tastverhältnisses Δa	38
5.3.1.5. Aufbau des Versuchs.....	41
5.3.1.6. Bedienoberfläche.....	42
5.3.1.7. Auswertung	43
5.3.1.7.1. MPP-Tracking der simulierten Kennlinien.....	43
5.3.1.7.2. MPP-Tracking eines normalen DC- Netzteils	46

5.3.1.8. Überlegung eines weiteren MPP-Tracking Verfahrens	49
5.3.2. Spannungsregler	50
5.3.2.1. Erläuterung	50
5.3.2.2. Regelung	51
5.3.2.3. Dimensionierung des PI-Reglers	52
5.3.2.4. Bedienoberfläche	55
5.3.2.5. Auswertung	56
6. Anschluss an den Wechselrichter	58
6.1. Inselbetrieb	59
6.1.1. Einstellungen	59
6.1.2. Steuerverfahren	60
6.1.3. Dimensionierung	61
6.2. Netzstromregelung	62
6.3. Bedienoberflächen	63
7. Zusammenfassung	65
Literaturverzeichnis	66
Anhang	67
Erklärung	68

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde im Wintersemester 2010 bei der HAW-Hamburg im Department Informations- und Elektrotechnik, Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik, durchgeführt.

Für die Unterstützung bei der Umsetzung der Arbeit bedanke ich mich herzlich bei meinem Betreuer, Prof. Dr. Ing. Michael Röther, Prof. Dr. Ing. Gustav Vaupel, den Ingenieuren Frank Korpel und Prof. Dr. Ing. Wolfgang Moré für die wertvollen Hinweise zur Umsetzung und Realisierung der Arbeit.

Ich hoffe, dass mit dieser Arbeit eine Dokumentation bereitgestellt wird, die die Inbetriebnahme, Bedienung sowie Erweiterung des erstellten Versuchstands in übersichtlicher Weise ermöglicht.

1. Ziele

1.1. Durchzuführende Arbeitsschritte

Es soll für einen Praktikumsversuch im Labor für elektrische Antriebe und Leistungselektronik mit den zur Verfügung stehenden Komponenten ein Versuchsstand für eine einphasige Photovoltaikanlage aufgebaut werden.

Der Versuchsstand wird modulweise aufgebaut, in Betrieb genommen und getestet. Die Diplomarbeit wird in folgende Schritte unterteilt:

(s. Abb. 1.1)

1. Simulation eines Solargenerators

2. Aufbau, Steuerung und Regelung eines Anpassungswandlers für das MPP-Tracking.

3. Anschluss und Ansteuerung eines Wechselrichters mit Filter + Last

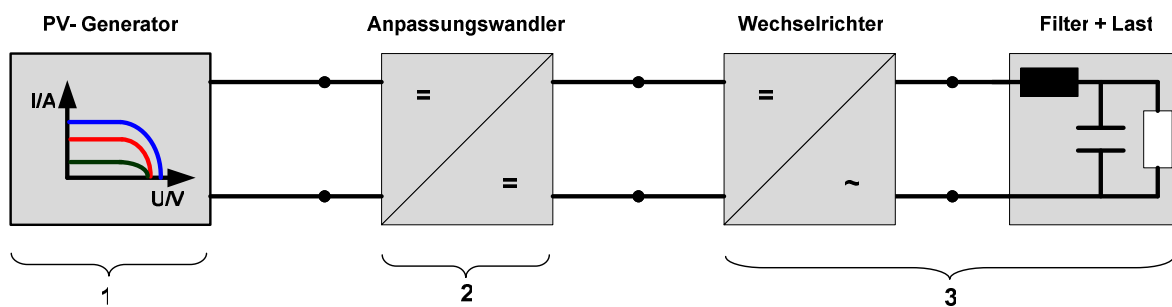


Abb. 1.1: Prinzipschaltbild Photovoltaikanlage

1.2. Struktur der zu realisierenden Aufgabe

Der gesamte Aufbau des Versuches wird im folgenden Bild erklärt.

Der Photovoltaikgenerator wird mit Hilfe eines steuerbaren Netzteils simuliert.

Der Aufbau des Anpassungswandlers, Wechselrichters, Filter + Last werden mit Hilfe von Komponenten der Firma „Leybold“ aufgebaut.

Die Steuerung, Regelung und Messung der einzelnen Komponenten wird anhand eines Computers und der Software „LabView“ realisiert.

Die Schnittstelle zwischen Computer und Aufbau wird von dem Steuergerät „Ni 6229“ der Firma „National Instruments“ realisiert.

Gesteuert wird die Anlage über eine Bedienoberfläche, die im Computer realisiert wurde. (s. Abb. 1.2)

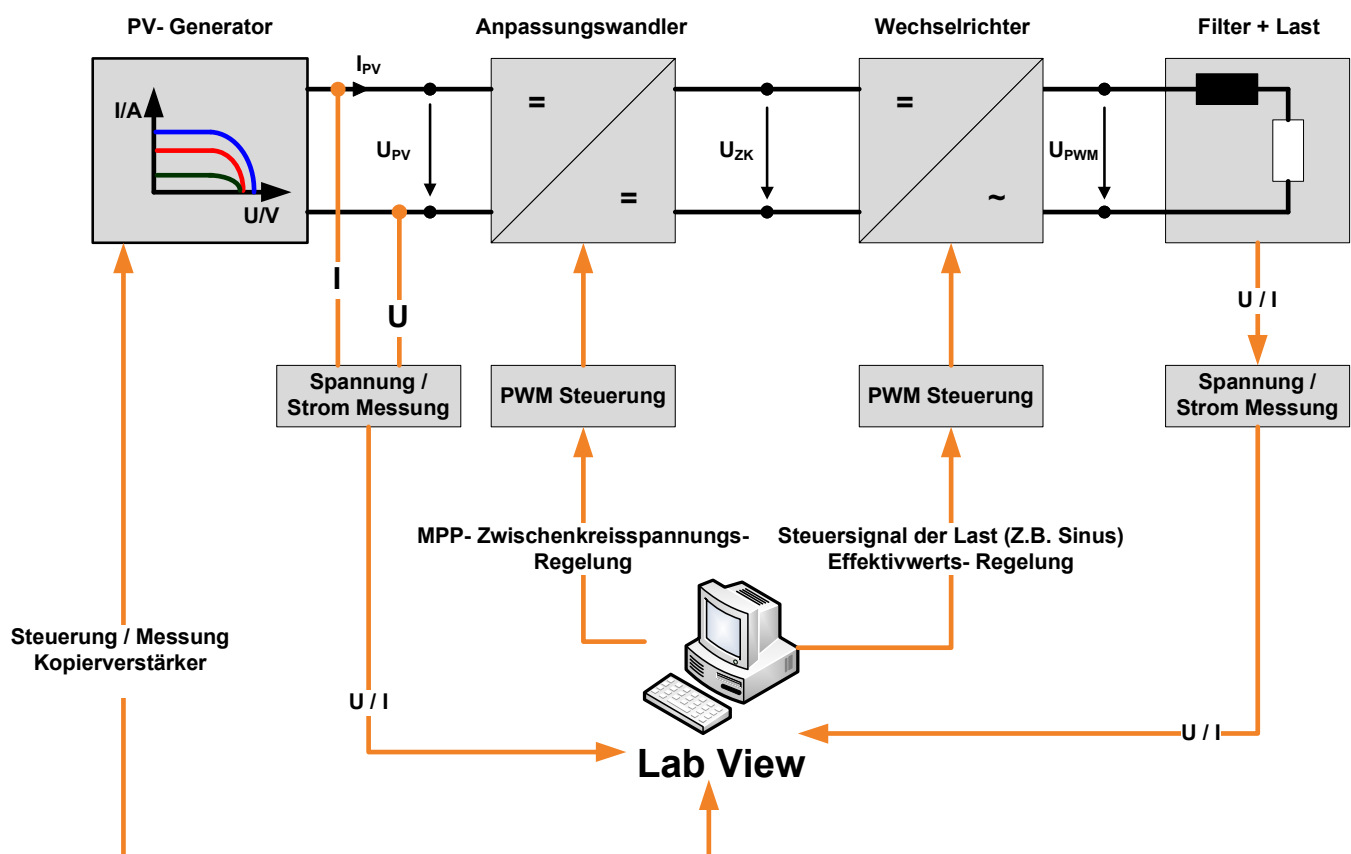


Abb. 1.2: Versuchsaufbau der Diplomarbeit

2. Photovoltaikanlagen

2.1. Strukturen

Photovoltaikanlagen können grundsätzlich nach ihrem Aufbau in zwei Systeme eingeteilt werden.

Inselsysteme:

Inselsysteme arbeiten unabhängig von Stromnetzen und sind in der Lage, mehrere Verbraucher (DC / AC) mit Energie zu versorgen. Um die maximale Leistung aus dem Solargenerator zu gewinnen, wird dieser direkt von einem „MPP-Tracker“ (in der Regel ein Anpassungswandler) angesteuert, der die Module im MPP (Maximum Point of Power) betreibt. Für sonnenarme Zeiten muss der erzeugte Strom zwischengespeichert (Akkumulator) werden (s. Abb. 2.1.a) [1] [2] [9].

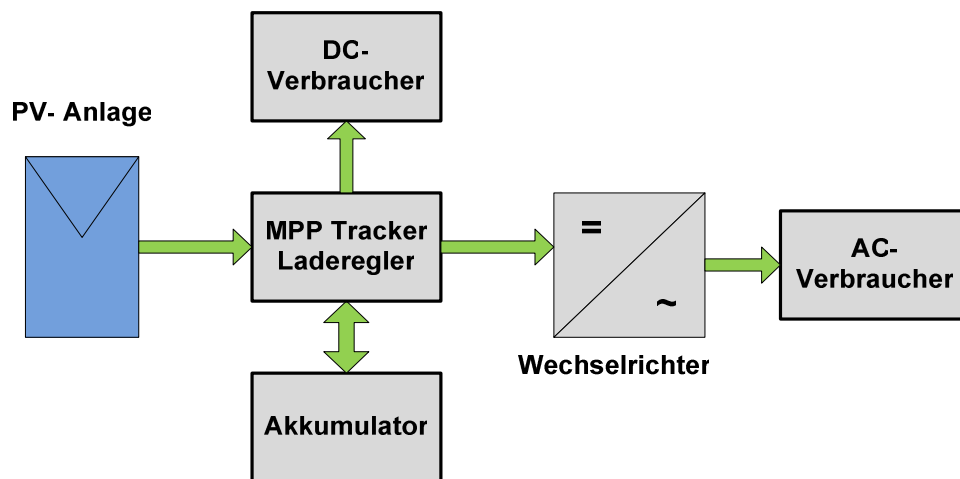


Abb. 2.1.a: PV-Anlage als Inselbetrieb

Netzgekoppelt:

Bei netzgekoppelten Anlagen wird die gewonnene Energie direkt in das Stromnetz eingespeist. Dabei wird die mit dem Generator erzeugte Energie über einen geeigneten Wechselrichter direkt an das Netz gekoppelt. Der Wechselrichter ist neben der synchronen Einspeisung auch für den Betrieb des Solargenerators im MPP zuständig. Bei größeren Leistungen wird zusätzlich ein Anpassungswandler zwischen Wechselrichter und Generator geschaltet der das MPP-Tracking durchführt (s. Abb. 2.1.b) [1] [2] [9].

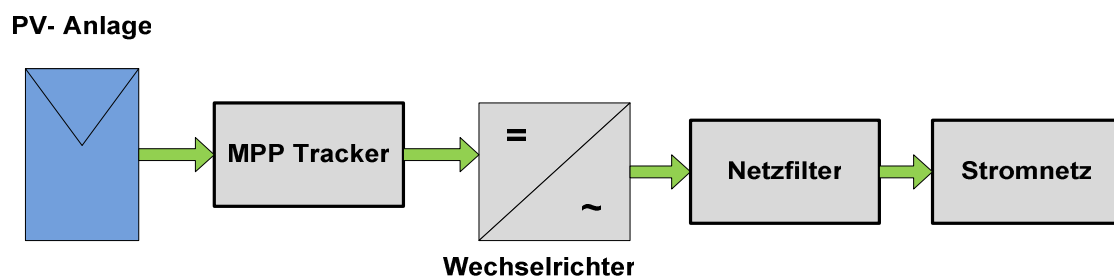


Abb. 2.1.b: Netzgekoppelte PV-Anlage

2.2. Stand der Technik

Eine Photovoltaikanlage, auch Solargenerator genannt, ist eine Energiequelle, welche Sonnenenergie in elektrische Energie umwandelt. Diese direkte Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie erfolgt durch den photovoltaischen Effekt.

Dieser Effekt wird durch großflächige Photodioden hervorgerufen, die nicht als Strahlungsdetektor, sondern als Stromquelle betrieben werden. Die auf die Erde auftreffende Menge an Sonnenenergie wird anhand dieses Effekts direkt umgewandelt.

Fasst man mehrere solcher Solarzellen zusammen, indem man sie in Reihe oder parallel miteinander verschaltet, entstehen die sogenannten Solarmodule. Je nach Verschaltung der Solarzellen addieren sich die Spannungen (Reihenschaltung), und die Ströme bleiben gleich oder die Ströme werden addiert (Parallelschaltung), und die Spannung bleibt gleich.

Je nach gewünschter Leistung werden mehrere solcher Solarmodule zusammengeschaltet und zu einem einzelnen Solargenerator zusammengefasst.

Die Aufgabe der Solarwechselrichter- Technologie ist es, diese Solargeneratoren so zu betreiben, dass die maximale Leistung aus diesem gezogen wird. Dieser Punkt der maximalen Leistung wird als „MPP“ (Maximum Power Point) bezeichnet. Bei wechselnden Umweltbedingungen wie ständiger Änderung der Einstrahlung, Verschattung und Temperatureinflüssen ist das eine schwer zu realisierende Aufgabe.

Eine weitere Aufgabe der Solarwechselrichter besteht darin, die aus den Generatoren entnommene Leistung möglichst mit geringen Verlusten weiteren Anwendungen zur Verfügung zu stellen.

Mit Hilfe verschiedener Technologien werden bereits Wirkungsgrade von über 97% in den Wechselrichtern erreicht.

[1][2][9][11]

3. Der Solargenerator

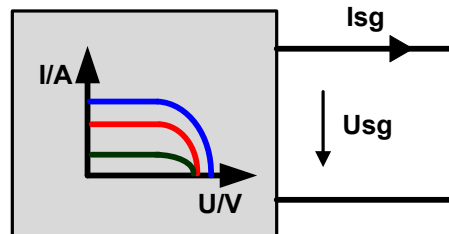


Abb. 3: Der Solargenerator

Ein Solargenerator ist ein Kraftwerk, das mit Hilfe von Solarzellen einen Teil der Sonnenstrahlung in elektrische Energie umwandelt. Um bei der Umsetzung der Arbeit die Photovoltaik möglichst genau erklären zu können wird ein solches Feld aus mehreren Solarmodulen gebraucht. Dies ist aber aus Platz-, Kosten-, Sonneneinstrahlungs- Gründen nicht realisierbar.

Um mit einem realen Solargenerator arbeiten zu können, braucht man mehrere Module, die in Reihe und Parallel geschaltet sind.

Einflüsse wie wechselnde Wetterbedingungen, Temperatur, sonnenlose Tage oder Beschattung (bewölkter Himmel) erlauben es nicht, den Solargenerator in den gewünschten Leistungswerten zu betreiben.

Deshalb wird der Solargenerator in dem Aufbau zur Diplomarbeit mittels des Einsatzes eines steuerbaren Netzteils simuliert. Mit Hilfe von diesem Kopierverstärker soll der gewünschte Solargenerator mit seiner Kennlinie simuliert und nach Wunsch geändert werden.

Dafür müssen zunächst die Eigenschaften eines Solargenerators bekannt sein.

3.1. Eigenschaften eines Solargenerators

Bei Solargeneratoren spielen mehrere verschiedene Faktoren eine wichtige Rolle.

Einfluss der Sonneneinstrahlung auf das Solarmodul

- Der Kurzschlussstrom des Solarmoduls steigt proportional zur Bestrahlungsstärke an.
- Die Leerlaufspannung ist kaum von der Einstrahlungsstärke abhängig. Bei geringer Einstrahlung stellt sie sich bereits ein (keine Last an den Klemmen) und bei Dunkelheit (keine Einstrahlung) sinkt sie auf 0V zurück. Bei steigender Einstrahlung steigt sie um einige wenige mV.
- Im Punkt der maximalen Leistung steigt die abgegebene elektrische Leistung annähernd proportional zur Einstrahlung an.

Einfluss der Temperatur auf das Solarmodul

- Der Kurzschlussstrom steigt bei steigender Temperatur geringfügig an.
- Die Leerlaufspannung fällt mit steigender Temperatur und steigt bei fallender Temperatur an.
- Da die Spannung stärker fällt als der Strom steigt, nimmt die Leistung des Solarmoduls bei steigender Temperatur ab.

Einfluss einer Last auf den Solargenerator

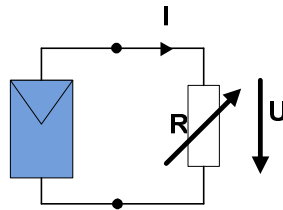


Abb. 3.1.a: Einfluss einer Last auf den Solargenerator

- Wird eine Last an das Solarmodul angeschlossen, so stellen sich Strom, Spannung und Leistung je nach Last ein. Diese Werte sind aber auch von der Strahlungsstärke abhängig und ändern sich dementsprechend.
- Nach dem Ohmschen Gesetz $R(\Omega) = \frac{U(V)}{I(A)}$ ergibt jeder Punkt der Kennlinie einen Widerstandswert. Die Änderung des Widerstandes in Abhängigkeit der Kennlinie verläuft wie unten berechnet nicht linear. Mit steigender Spannung ändert sich der Widerstand geringfügig. Zwischen MPP und Leerlaufspannung ist die Änderung exponentiell. (s. Abb. 3.1.b)

Im Folgenden sind verschiedene Widerstände für unterschiedliche Betriebspunkte berechnet worden:

- $I_K = 5,75A$, $U_K = 0V \rightarrow R1(\Omega) = \frac{0V}{5,75A} = 0\Omega$
- $I = 5,7A$, $U = 20V \rightarrow R2(\Omega) = \frac{20V}{5,75A} = 0,287\Omega$
- $I_{mpp} = 5,37A$, $U_{mpp} = 41,0V \rightarrow R3(\Omega) = \frac{41,0V}{5,37A} = 7,63\Omega$
- $I_L = \sim 0A$, $U_L = 48,6V \rightarrow R4(\Omega) = \frac{48,6V}{0,01A} = 4860\Omega$

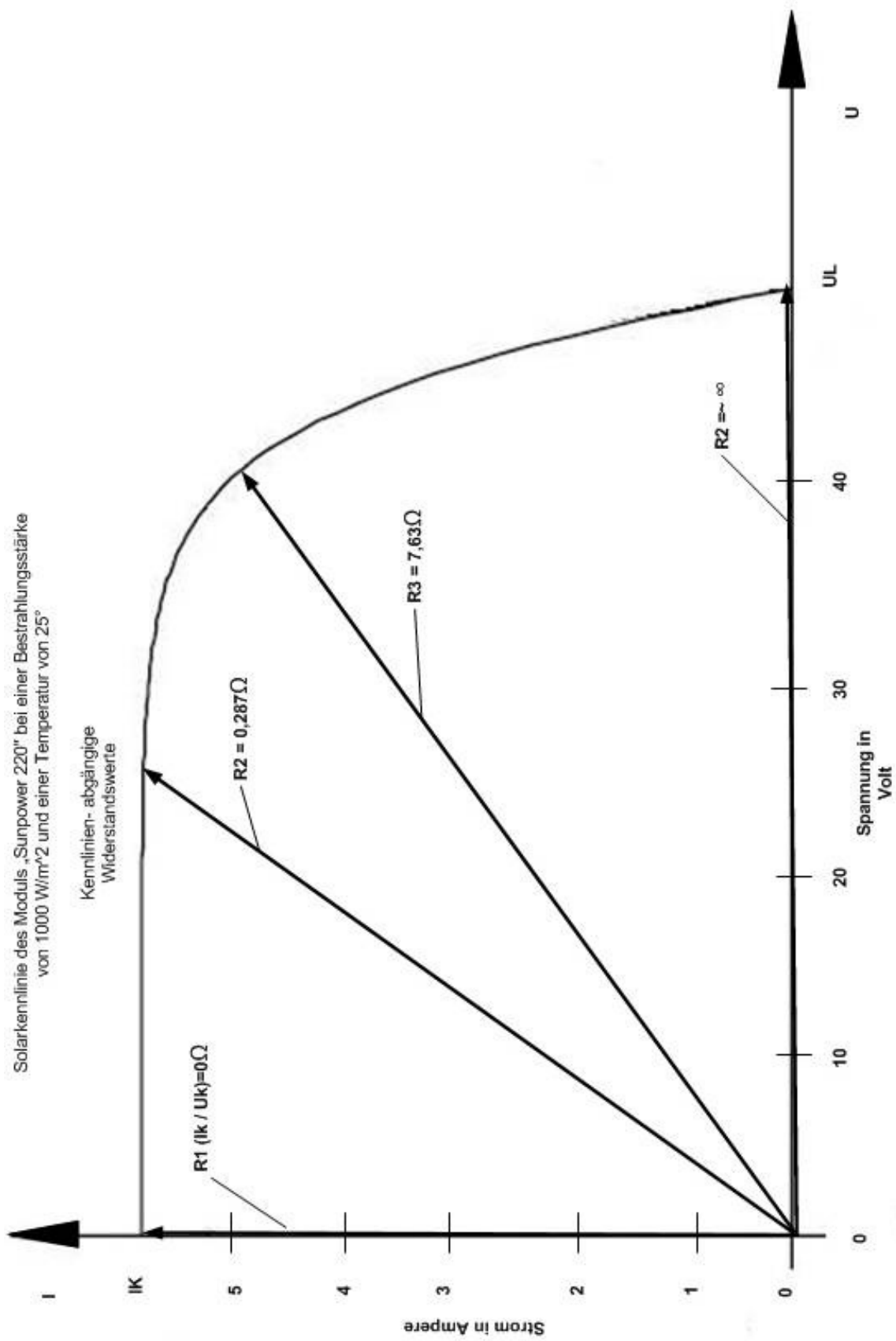


Abb. 3.1.b: Widerstandsgeraden einer Solarkennlinie

3.2. Kennlinien des Solargenerators

Um den Solargenerator möglichst reell simulieren zu können, müssen die Kennlinien eines industriellen Solarmoduls nachgebildet werden. Gewählt wird das Solarmodul der Firma Sunpower, Modell: „Sunpower 220“ (das dazugehörige Datenblatt befindet sich im Anhang).

Im folgenden Bild (3.2.a) sind die Kennlinien dieses Solarmoduls dargestellt

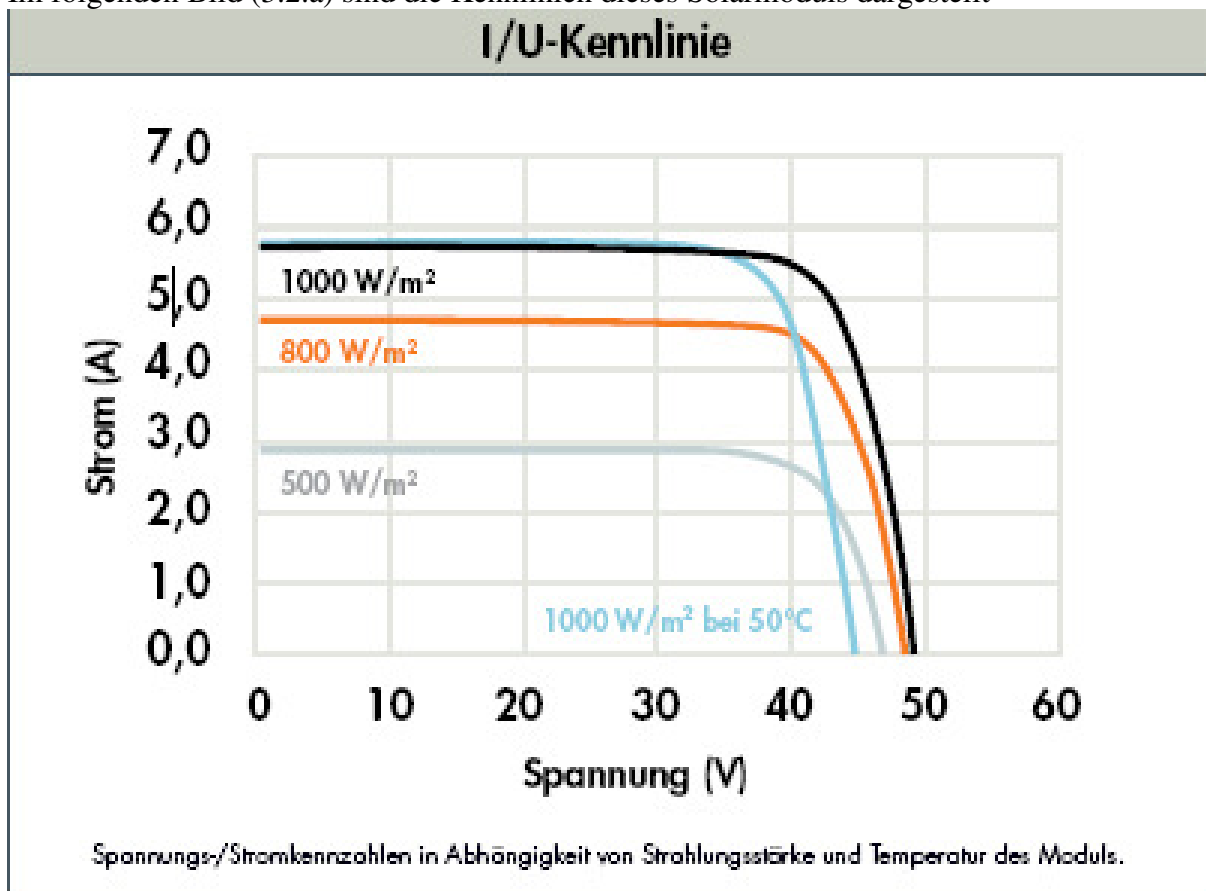


Abb. 3.2.a: I/U Kennlinie der Solarmoduls „Sunpower 220“

Für den Versuchsaufbau werden drei Kennlinien aus dem Datenblatt des Solarmoduls „Sunpower 220“ nachgebildet.

Kennlinie 1:

$$500 \frac{W}{m^2}$$

$$U_L = 45V$$

$$I_K = 2.9A$$

Kennlinie 2:

$$800 \frac{W}{m^2}$$

$$U_L = 46V$$

$$I_K = 4.8A$$

Kennlinie 3:

$$1000 \frac{W}{m^2}$$

$$U_L = 47V$$

$$I_K = 5.9A$$

Alle drei Kennlinien werden aus den angegebenen Zeichnungen im Datenblatt ausgemessen und tabellarisch nachgebildet. Im Tabellenprogramm Excel werden die Kurven eingegeben und so nachgebessert, dass die Kennlinien möglichst genau denen aus dem Datenblatt entsprechen. Anschließend werden diese programmtechnisch in Tabellen hinterlegt. (s. Abb. 3.2.a)

Der Grund für das Nachbilden der Kennlinien ist der, dass die lineare Beziehung zwischen Modulstrom zur Einstrahlungsstärke sich programmtechnisch nicht einfach realisieren lässt. Die Änderung der Leerlaufspannung zur Einstrahlungsstärke lässt sich mit der Formel $U_L = U_{L0} * \frac{\ln E}{\ln E_0} * \{1 + \alpha_{UL} (v - v_0)\}$ berechnen. Diese Formel dient aber nur dazu, die Leerlaufspannung neu zu berechnen. Die Änderung der restlichen Kennlinie des Solargenerators lässt sich so nicht ermitteln (s. Abb. 3.2.b).

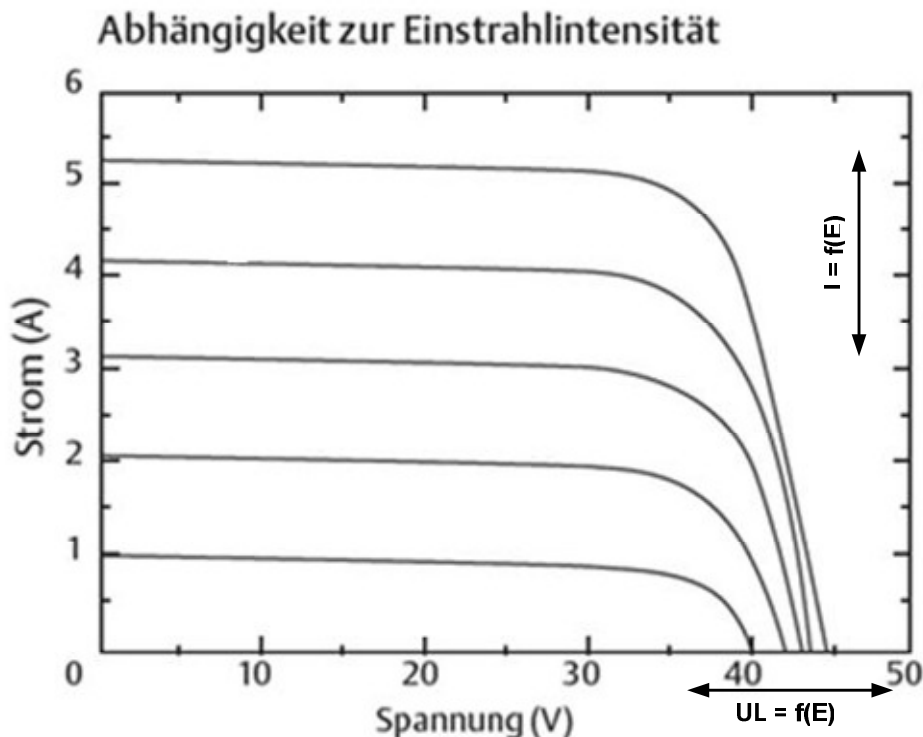


Abb. 3.2.b: Abhängigkeit zur Einstrahlungsintensität

Bild der tabellarisch nachgebildeten Kennlinien (s. Abb. 3.2.c)

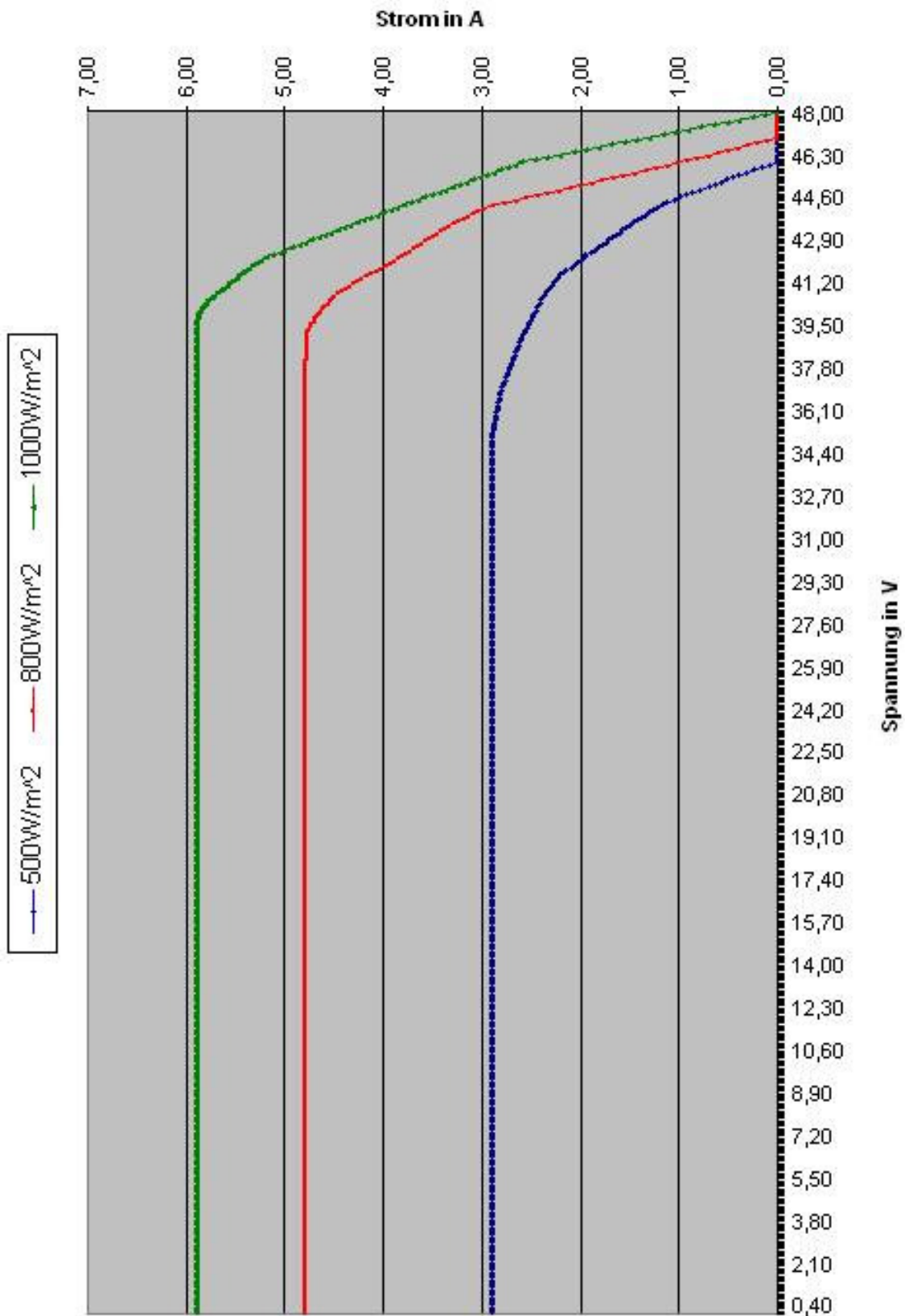


Abb. 3.2.c: Tabellarisch nachgebildete Kennlinien

Die Tabelle ist auf der beigegeführten CD zu finden.

3.3. Simulation der Kennlinien

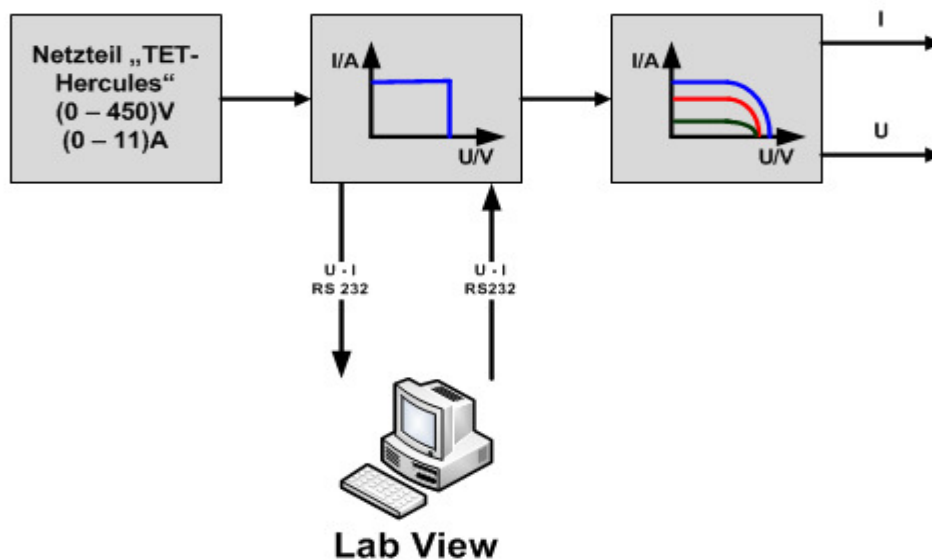


Abb.3.3: Simulation der Kennlinien

Der Vorteil in der Simulation der Kennlinien ist der, dass man unabhängig von den Wetterbedingungen wie Temperatur, Stärke der Einstrahlung oder Beschattung (Wolken), die Modulgröße und momentane Leistung des Solargenerators selbst einstellen kann.

Der Nachteil besteht darin, dass nur eine begrenzte Anzahl von Kennlinien durchfahren werden kann. Der Grund dafür liegt darin, dass die einzelnen Kennlinien bei bestimmten Einstrahlungsstärken tabellarisch hinterlegt wurden und nicht gleichzeitig mit den Änderungen der Einstrahlungsstärken neu berechnet werden.

3.3.1. Der Kopierverstärker

Der vorhandene Kopierverstärker der Firma „TET- Electronics“ Modell „Hercules-5000“, dient dazu diese Aufgabe zu realisieren. Es besteht sowohl die Möglichkeit mittels Softwaresteuerung Spannung und Strom beliebig zu setzen, als auch programmtechnisch eine Kennlinie zu hinterlegen, die mit Hilfe einer veränderlichen Last am Ausgang des Kopierverstärkers durchlaufen werden kann.

3.3.2. Schnittstelle und Parameter

Die Ansteuerung des Kopierverstärkers mittels PC erfolgt mit der Software „LabView“ der Firma National Instruments. Der Grund dafür ist die im Labor bereits vorhandene Software und die Mitlieferung der Treiber für die Steuerung des Kopierverstärkers der Firma „TET-Electronics“.

Schnittstelle:

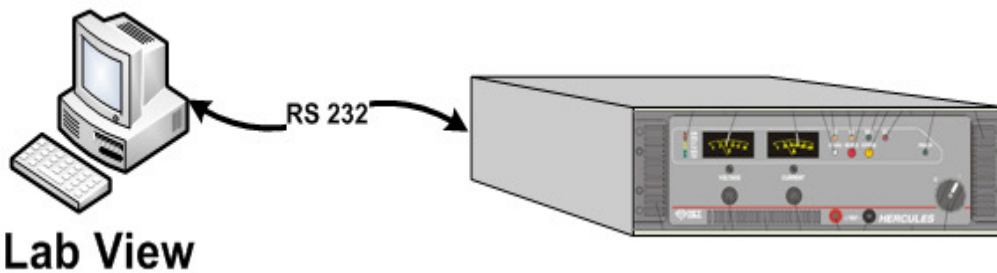


Abb. 3.3.2.a: LabView- Schnittstelle

Die Kommunikation zwischen dem Kopierverstärker und dem PC erfolgt über die im Gerät vorhandene RS232 Schnittstelle.

Bei der seriellen Schnittstelle ist ein Kabel mit folgenden Signalen erforderlich:

- RxD (Receive Data)
- RxD (Transmit Data)
- GND (Ground)

Hierbei handelt es sich um ein handelsübliches 1:1 belegtes RS-232 Schnittstellenkabel. (s. Abb. 3.3.2.b)

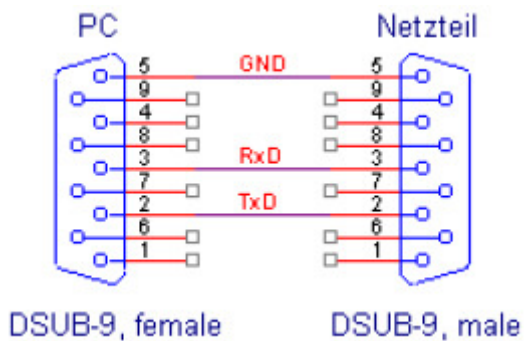


Abb. 3.3.2.b: Schnittstellenkabel

Parameter:

Um die Schnittstellenparameter einzustellen, muss man sie zuerst hardwaremäßig im Kopierverstärker einstellen. Dazu muss auf der Rückseite des Kopierverstärkers die Interfacekarte mit dem Anschluss für den RS232 Port abgeschraubt werden.

Mit dem Jumper J4 lässt sich die Karte auf TET- spezifische Befehle zurücksetzen. Dieser Befehlssatz ist herstellerabhängig und weder konform zu SCPI noch zu IEEE 488.2.

Über dem DIL- Schalter (s. Abb. 3.3.2.c) werden die gewählten Parameter eingestellt (die genauen Einstellungen am Gerät sind im Anhang aufzufinden).

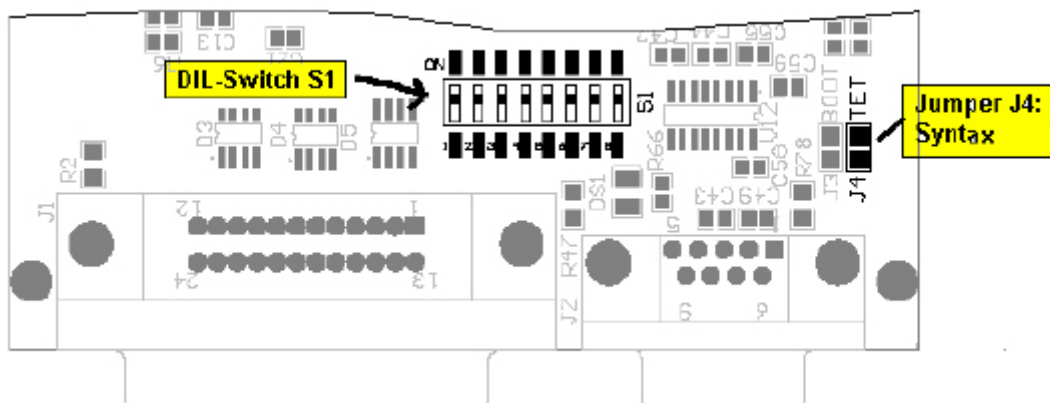


Abb. 3.3.2.c: Einstellung der Schnittstellenparameter

Die Schnittstellenparameter werden wie folgt gewählt:

- Befehlssatz → TET- Befehle
- Baudrate → 115200
- Übertragungsrahmen → 1 Startbit, 8 Datenbits, 1 Stopbit
- Endecode → (CR/LF,CR) vom Terminal

3.3.3. Steuerprogramme des Kopierverstärkers

Um mit dem Kopierverstärker kommunizieren zu können, werden die für „LabView“ mitgelieferten Treiber der Firma „TET- Electronics“ benutzt.

Diese beinhalten sowohl die Initialisierung als auch die fertigen Vi´s (Virtual-Instruments) zum Steuern und Auslesen von Spannung und Strom im Gerät. Die bereits vorhandenen Vi´s werden in die eigens entwickelten Programme integriert.

Es werden für die Ansteuerung zwei Unterprogramme entwickelt.

- Im ersten Unterprogramm besteht die Möglichkeit, die Strombegrenzung und die Ausgangsspannung nach Wunsch zu setzen.
- Im zweiten Unterprogramm wird die Solargenerator-Kennlinie simuliert. Dabei kann für die Simulation zwischen drei Strahlungsstärken gewählt werden. In einer weiteren Option kann die Anzahl der in Reihe geschalteten Module durch eine Eingabe gewählt werden.

Beide Unterprogramme werden von einem Hauptprogramm aufgerufen, das je nach gewähltem Betriebsmodus eins von beiden initialisiert (eine Auflistung und Erklärung der verwendeten Treiber findet man im Ahnhang).

3.3.4. Flussdiagramme

Auf den folgenden Seiten wird die Umsetzung der Programmierung in Flussdiagrammen erklärt.

3.3.4.1. Hauptprogramm

In der folgenden Grafik (Abb. 3.3.4.1) ist das Flussdiagramm des Vi- Hauptprogramms „Quelle“ („Solargenerator“ oder „Manuell“) dargestellt.

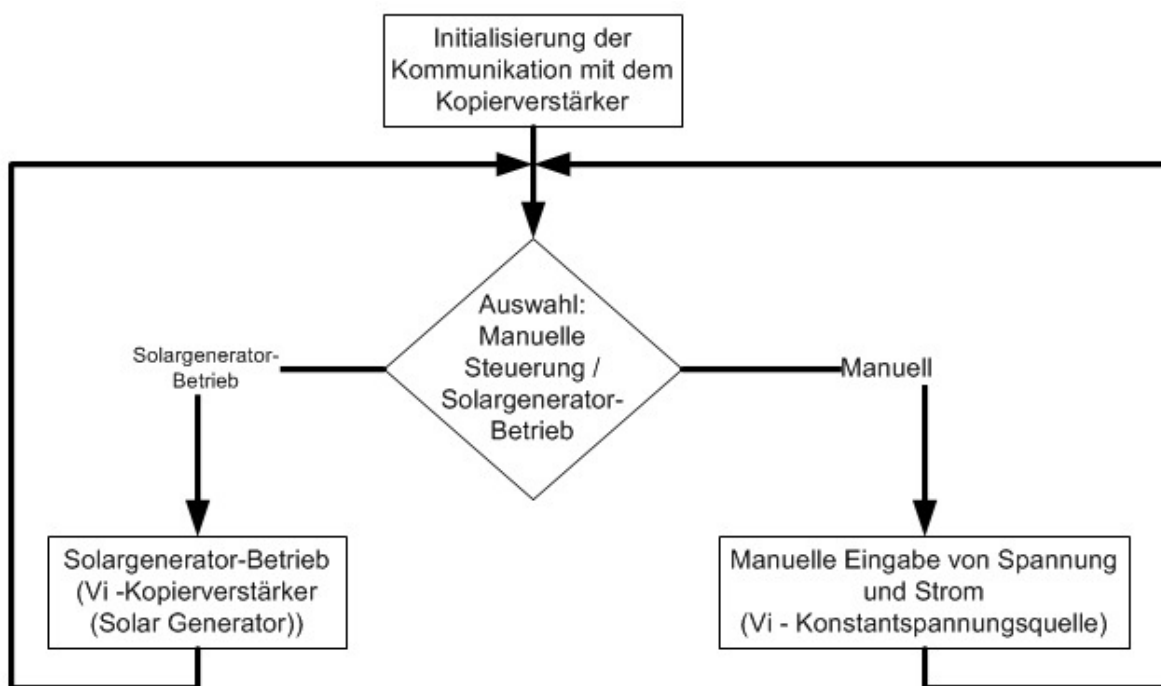


Abb. 3.3.4.1: Flussdiagramm des Hauptprogramms

Es gibt zwei Möglichkeiten den Kopierverstärker anzusteuern:

- Im Solargenerator- Betrieb wird dieser mit Solarmodulverhalten gesteuert.
- Im manuellen Betrieb kann man Spannung und Strom beliebig nach Wunsch einstellen und ändern.

3.3.4.2. Manuelle Steuerung

In der folgenden Grafik (Abb. 3.3.4.2) ist das Flussdiagramm des Vi's „Manuell“ dargestellt.

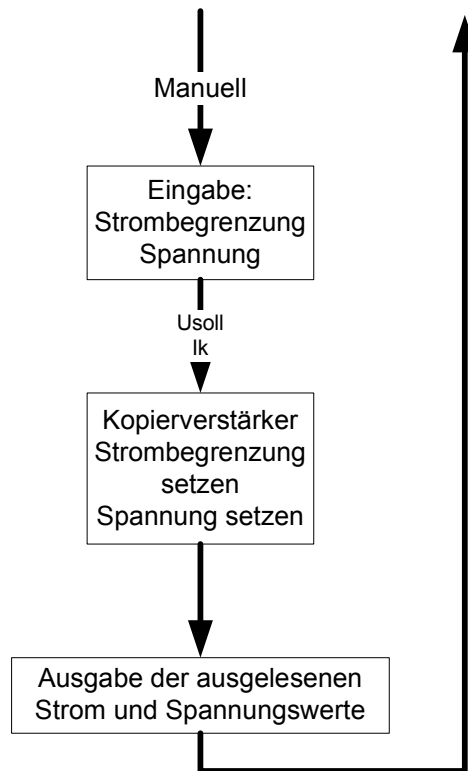


Abb. 3.3.4.2: Flussdiagramm der manuellen Steuerung

Ablauf der manuellen Steuerung:

- Es werden die Strombegrenzung und die Spannung eingegeben.
- Beide Werte werden im Kopierverstärker gesetzt.
- Anschließend werden die aktuelle Spannung und Stromwerte ausgelesen und ausgegeben. Das Programm springt zum Hauptprogramm zurück.

3.3.4.3. Solargenerator-Betrieb

In der folgenden Grafik (Abb. 3.3.4.3) ist das Flussdiagramm des Vi's „Kopierverstärker (Solargenerator- Betrieb)“ dargestellt.

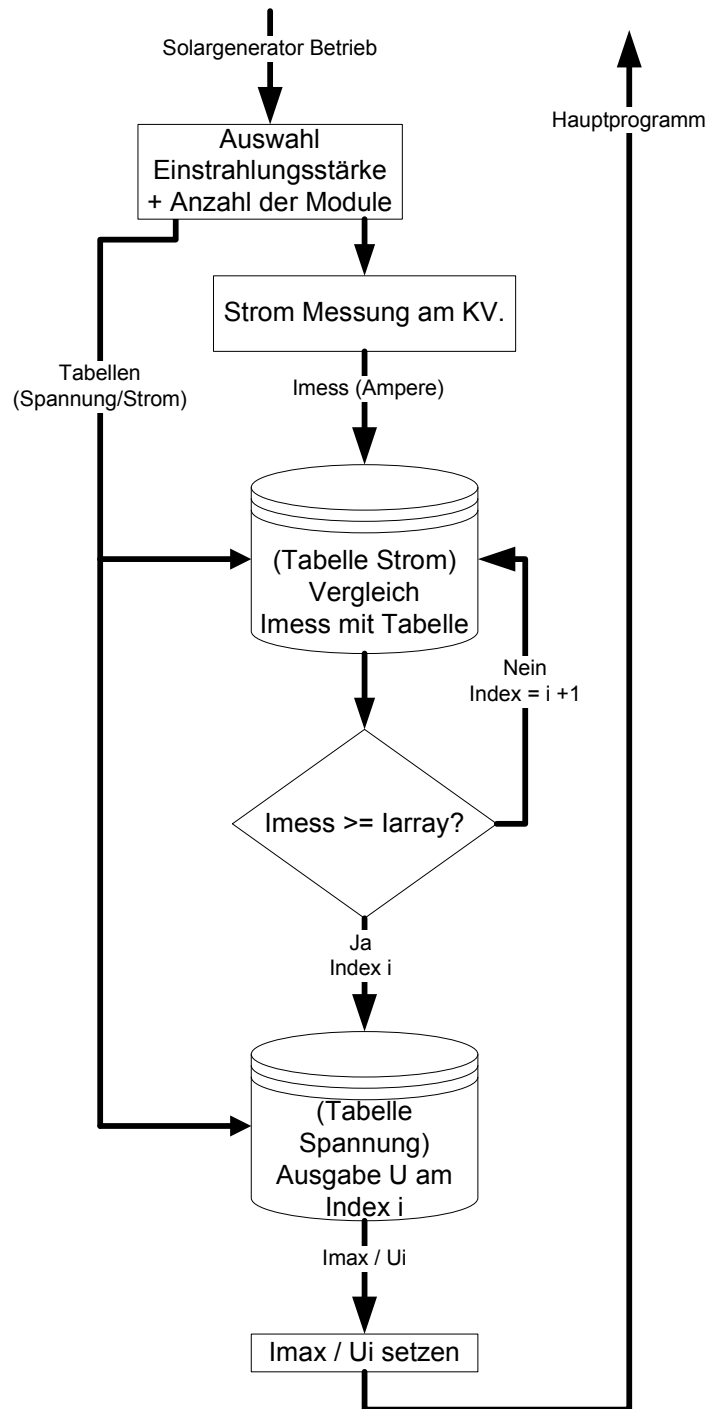


Abb. 3.3.4.3: Flussdiagramm „Kopierverstärker“

Ablauf im Solargenerator- Betrieb:

- Bei der Auswahl einer Strahlungsstärke werden die entsprechenden Tabellen von Strom und Spannung im Programm aufgerufen.
- Am Kopierverstärker wird der aktuelle Stromwert „ I_{mess} “ gemessen.
- I_{mess} wird mit der Stromtabelle verglichen. Wird der dazugehörige Stromwert gefunden, wird der dazugehörige Index i der Tabelle weitergegeben.
- In der Spannungstabelle wird der Spannungswert am Index i gesucht und ausgegeben.
- Am Kopierverstärker werden der maximale Strom und der gefundene Spannungswert gesetzt.

3.3.5. Programmierung der Kennlinien

Die erstellten Tabellen beinhalten die gesamten Kennlinien des Solargenerators. Dabei besitzt jede Strom- Spannung- Tabelle eine unterschiedliche Anzahl an Werten für die Kennlinien, nach denen Strom und Spannung geregelt werden.

Beim Starten des Solargenerator-Betriebs geschieht folgendes:

- Am Ausgang sind ein Strom von 0A und eine Spannung von 0V eingestellt.
- 0A entspricht in den Tabellen der Leerlaufspannung U_{leer} . Es wird der entsprechende Index aus der Stromtabelle ausgegeben ($i = 0$).
- In der Spannungstabelle wird der Wert am Index i ($i = 0$) ausgegeben (U_{leer}).
- Der gefundene Spannungswert und der Maximalstrom der Kennlinie werden am Kopierverstärker gesetzt.
- Wird die Last stark verringert, wird der Kopierverstärker in der Strombegrenzung gefahren. So entsteht der lineare Teil der Kennlinie (zwischen Kurzschlussstrom und MPP).

3.3.6. Bedienoberflächen

Die Bedienung des steuerbaren Netzteils erfolgt über die Bedienkonsole im Computer.

3.3.6.1. Manuelle Steuerung

Im folgenden Bild (Abb. 3.3.6.1) ist die manuelle Steuerung mit der dazugehörigen Erklärung dargestellt.

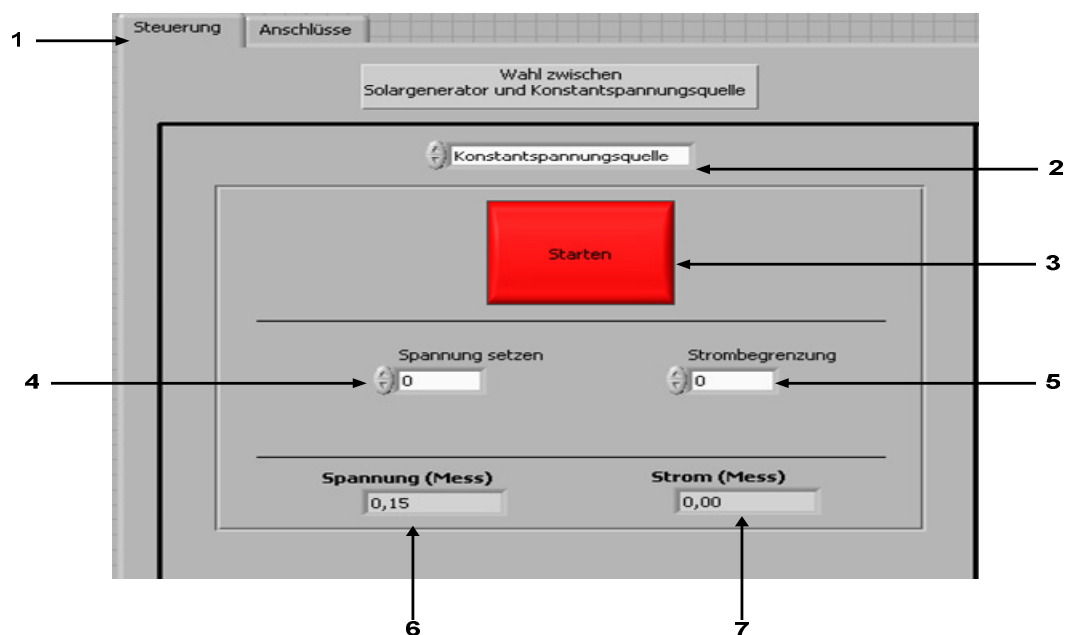


Abb. 3.3.6.1: Bedienoberfläche „Manuelle Steuerung“

Erläuterung:

1. Frontseite der Bedienkonsole
2. Wahl zwischen den Betriebsarten beim „Klicken“ mit der Maus auf der Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen.
3. Startet den Betrieb, bzw. gibt die Spannungen und Ströme aus.
(Rot → Spannung und Strom am Ausgang auf 0 gesetzt)
(Grün → Spannung und Strom am Ausgang frei gegeben)
4. Eingabe der Ausgangsspannung (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)
5. Eingabe der Strombegrenzung (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)
6. Anzeige der aktuellen Spannung am Ausgang des Kopierverstärkers
7. Anzeige des aktuellen Stroms am Ausgang des Kopierverstärkers

3.3.6.2. Solargenerator- Betrieb

Im folgenden Bild (Abb. 3.3.6.2) ist die manuelle Steuerung mit der dazugehörigen Erklärung dargestellt.

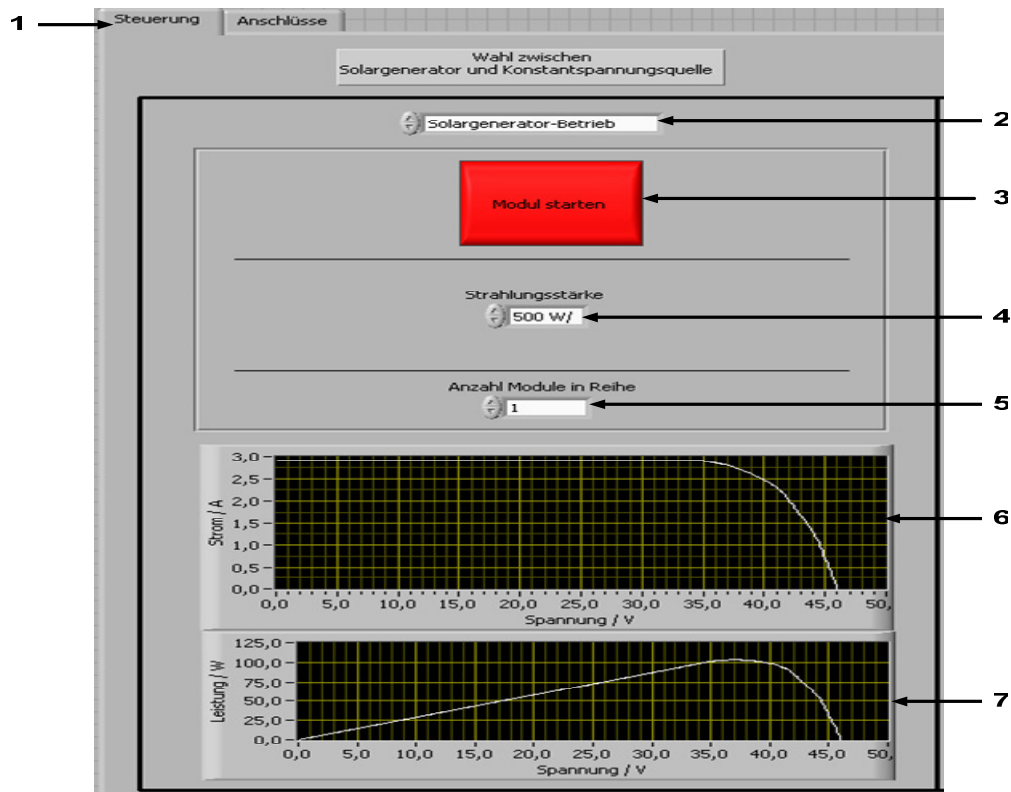


Abb. 3.3.6.2: Solargenerator Betrieb

Erläuterung:

1. Frontseite der Bedienkonsole
2. Wahl zwischen den Betriebsarten. Beim „Klicken“ mit der Maus auf der Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen.
3. Startet den Betrieb, bzw. gibt die Spannungen und Ströme aus.
(Rot → Spannung und Strom am Ausgang auf 0 gesetzt)
(Grün → Spannung und Strom am Ausgang frei gegeben)
4. Wahl der hinterlegten Kennlinien
5. Wahl der in Reihe geschalteten Module (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)
6. Anzeige der hinterlegten (simulierten) Kennlinie
7. Anzeige der Leistungskurve der hinterlegten (simulierten) Kennlinie

3.4. Statische Aufnahme der einprogrammierten Kennlinien

Aufgrund der hohen Ströme (bis zu 6A) die der Solargenerator liefert, kann die Solarkennlinie nicht mit einem herkömmlichen veränderlichen Leistungswiderstand aufgenommen werden, da diese mit maximal 2,5A belastet werden darf.

Die Aufnahme der Kennlinie wird mit Hilfe eines Hochsetzstellers realisiert. Dieser wird an seinem Ausgang mit einem Stufen-Leistungswiderstand (90 Ohm/20A) abgeschlossen und über das Tastverhältnis „a“ angesteuert. Die Eingangsimpedanz, mit der der Solargenerator belastet wird, kann so manuell verändert werden (der genaue Aufbau ist im Anhang dokumentiert).

Im Kapitel 5 wird der Hochsetzsteller genauer erläutert.

3.4.1. Einstellungen des Solargenerators

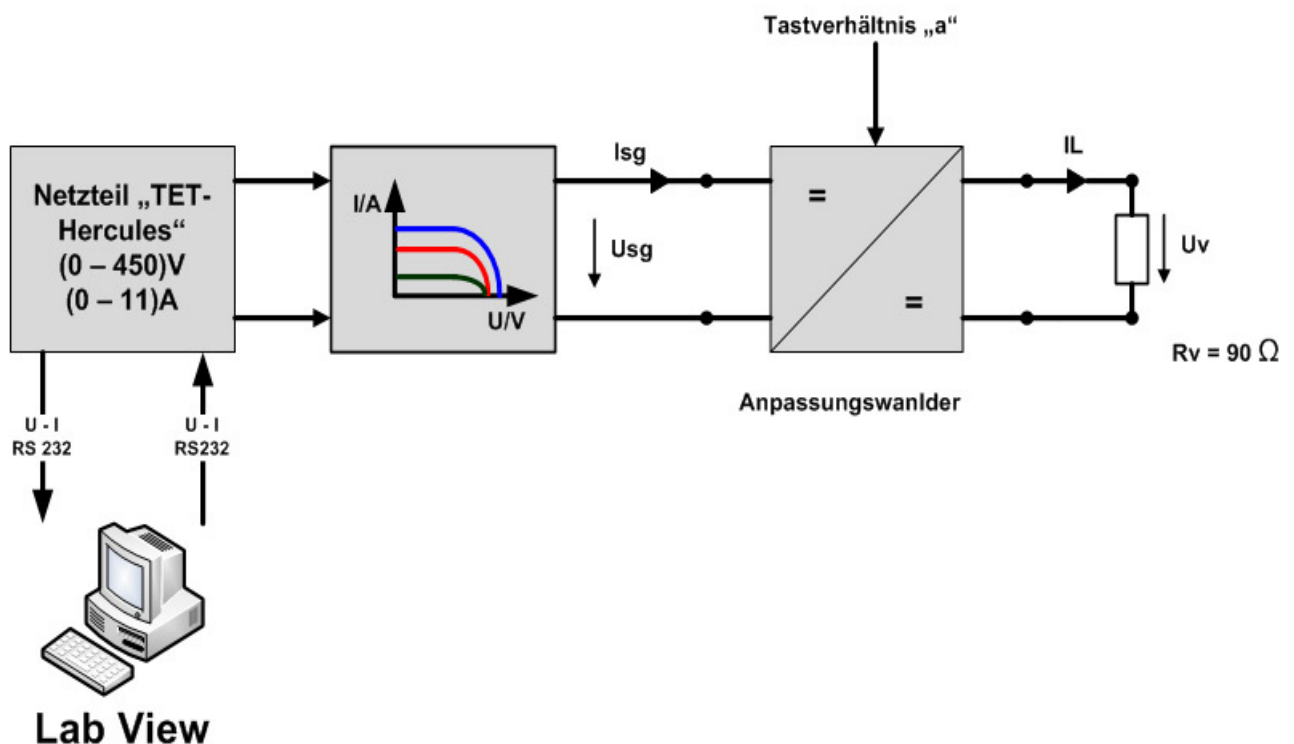


Abb. 3.4.1: Einstellungen des Solargenerators

Abschlusswiderstand: → 90 Ohm
Steuerung des Tastverhältnis „a“ → über die Bedienkonsole (s. Kapitel 5.3.1.4)

Es werden alle drei einprogrammierten Kennlinien statisch aufgenommen und tabellarisch eingetragen. (s. Kapitel 3.4.2)

3.4.2. Aufgenommene Kennlinien

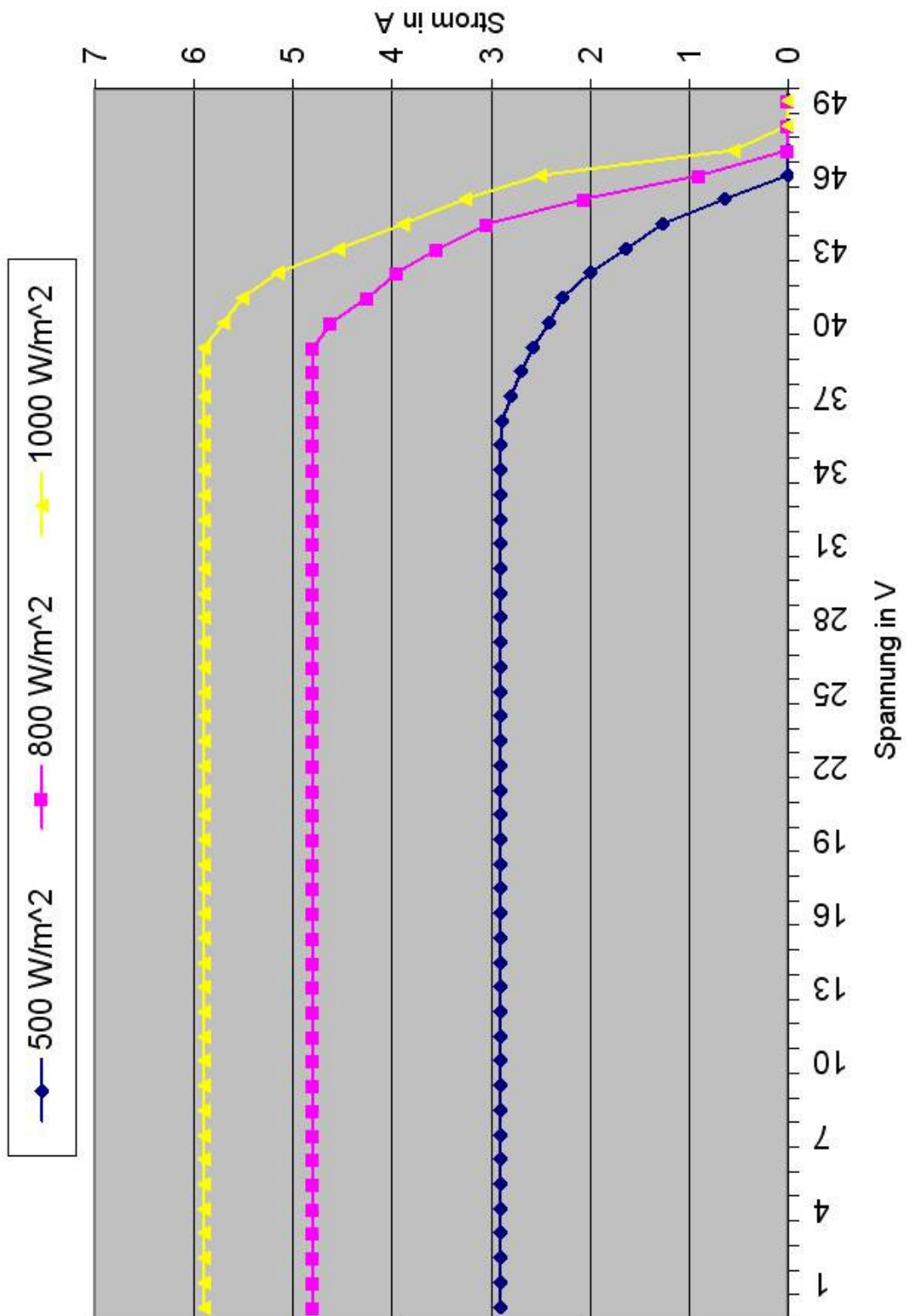


Abb. 3.4.2: Statisch aufgenommene Kennlinien

4. Messtechnik

Für die Messungen und Regelung am Versuchsstand stehen im Labor folgende Messgeräte zur Verfügung.

4.1. Messdatenerfassung mit „NI 6229

Messungen mit der Mess/Steuer- Karte der Firma „National Instruments“ werden nicht in Echtzeit durchgeführt.

Um einen Signal zu messen muss programmtechnisch (im PC) wie folgt vorgegangen werden:

Es wird ein Kanal definiert, mit dem die Messung realisiert werden soll. Programmtechnisch werden die Anzahl der Werte und die Abtastrate, mit der die Werte aufgenommen werden festgelegt. Das Programm sendet die Aufgabe an die Mess/Steuerkarte. Nach der Realisierung der Messung wird ein Packet mit den gemessenen Daten an den PC zur Weiterverarbeitung zurückgeschickt.

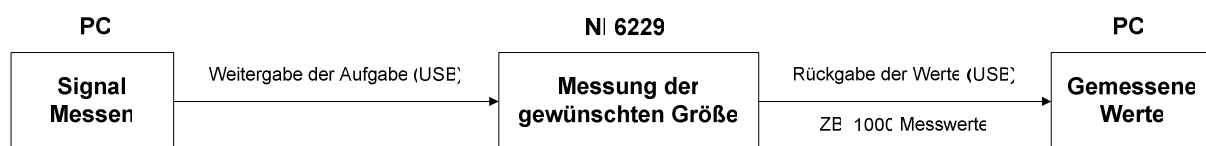


Abb. 4.1: Messwerterfassung mit LabView

Programmtechnisch müssen mindestens 2 Messwerte angegeben werden bei einer maximalen Abtastrate von 10 KHz.

Vom Augenblick, in dem der Messbefehl erfolgt, bis zum Augenblick, in dem die Daten im PC vorhanden sind, kann bei der schnellsten Einstellung zwischen 25ms und 35ms vergehen. Daher ist das Gerät nicht für die Regelung von Wechselgrößen wie z.B. Netzstromregelung geeignet, da es sich nicht um ein Echtzeitsystem handelt.

4.2. Trennverstärker zur Messung am Solargenerator

Für die Messung am Solargenerator wird zum Schutz der Mess/Steuer- Karte „NI 6229“ ein Trennverstärker eingesetzt. Das Gerät besitzt zwei Eingänge für Spannungsmessungen und zwei Eingänge für Strommessungen. Das Übersetzungsverhältnis sieht wie folgt aus:

Eingang Spannungsmessung → 1:100 → Ausgang Spannungsmessung
Eingang Strommessung → 1:1 → Ausgang Strommessung

Der Verschaltungsplan ist im Anhang zu finden.

5. Anpassungswandler

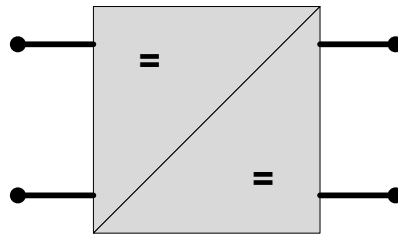


Abb. 5.a: Der Anpassungswandler

Der Solargenerator soll zu jedem Zeitpunkt so betrieben werden, dass aus diesem die maximale Leistung abgenommen wird. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Kennlinie des Solargenerators von der Kennlinie des Verbrauchers getrennt werden.

Um diese Aufgabe möglichst verlustfrei realisieren zu können, ist der Einsatz eines Anpassungswandlers erforderlich. (s. Abb. 5.b)

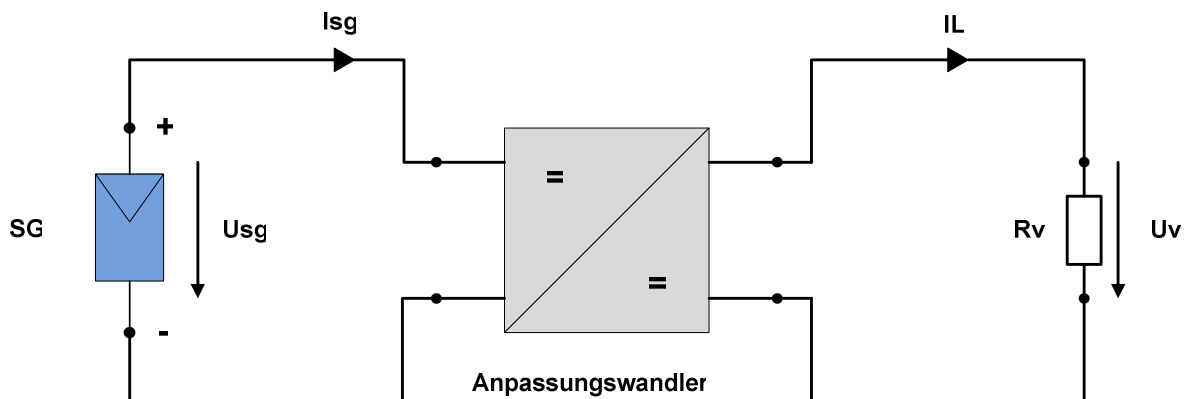


Abb. 5.b: Anpassungswandler

5.1. Einsatz eines Anpassungswandlers

Auf der Eingangsseite sorgt die Regelung des Anpassungswandlers dafür, dass der Solargenerator immer mit dem richtigen Abschlusswiderstand belastet wird (Eingangsimpedanz des Wandlers), so dass dieser immer im MPP betrieben wird.

Auf der Ausgangsseite erfüllt der Anpassungswandler die Bedingungen des Verbrauchers. Das bedeutet, dem angeschlossenen Verbraucher liefert er den optimalen Strom, welcher vom Verbraucher bei entsprechender Klemmenspannung selbst bestimmt wird.

5.2. Arbeitsweise des Hochsetzstellers

Die Arbeitsweise des Hochsetzstellers wird anhand der Zeichnung erklärt:

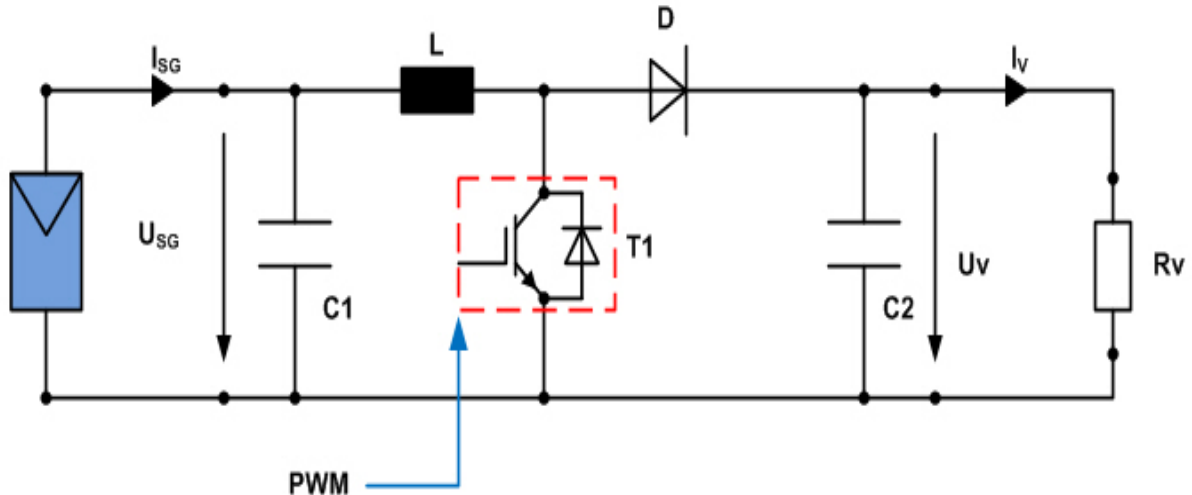


Abb. 5.2.a: Arbeitsweise eines Hochsetzstellers

Bei der Arbeitsweise des Hochsetzstellers kann zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

Schalter T1 (rot) geschaltet:

Bei geschlossenem Schalter (Transistor leitet), fällt die gesamte Spannung U_{SG} an der Induktivität L ab. Dabei fließt ein Strom $I_L = I_{SG}$, der aufgrund der Drossel L linear ansteigt. Während dieser Phase wird Energie in die Induktivität geladen [3] [4].

Schalter T1 (rot) gesperrt:

Bei geöffnetem Schalter (Transistor sperrt), versucht die Induktivität den Stromfluss I_L aufrechtzuerhalten. Die Spannung an ihrem sekundären Ende steigt sehr schnell an, bis sie die am Kondensator anliegende Spannung U_V übersteigt und die Diode öffnet. Der Strom fließt im ersten Moment unverändert weiter und lädt den Kondensator weiter auf. Die Energie wird so an den Ausgang der Schaltung weitergegeben, indem es den Strom über die Diode in den Ladekondensator und zur Last treibt. Dabei werden die Spannungswerte addiert und somit erfolgt am Ausgang eine Spannungserhöhung des Eingangs, die sich wie folgt berechnen lässt [3] [4]:

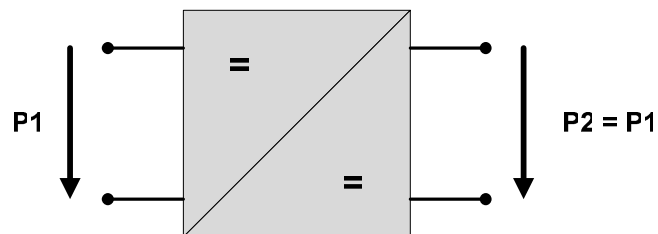
$$U_V = U_{SG} * \frac{1}{1-a} \quad \rightarrow \quad a = \frac{T_{ein}}{T_{Takt}}$$

Der Hochsetzsteller stellt am Ausgang eine Spannung zur Verfügung, die größer oder mindestens so groß wie die Eingangsspannung ist. Durch die eingesetzten Bauelemente sind die Verluste an der Schaltung minimal, so dass Wirkungsgrade von bis zu 98% erreicht werden können.

Durch diese Eigenschaft findet sich am Ausgang der Schaltung annähernd dieselbe Leistung wie am Eingang wieder [3] [4].

Auf diese Weise kann annähernd die maximale Leistung des Solargenerators übertragen werden.

(s. Abb. 5.2.b)



Anpassungswandler

Abb. 5.2.b: Leistungsübertragung am Anpassungswandler

5.3. Betriebsarten

Es werden zwei Möglichkeiten vorgestellt, den Hochsetzsteller zu betreiben

- Betrieb als MPP-Tracker
- Betrieb als Spannungsregler

5.3.1. MPP-Tracker

5.3.1.1. Erläuterung

Um den Solargenerator optimal auszunutzen, ist es erforderlich, diesen im Punkt seiner maximalen Leistung zu betreiben.

Die Leistung am Solargenerator berechnet sich aus $P_{SG} = U_{SG} * I_{SG}$.

Wenn man für jeden Punkt der Kennlinie die Leistung berechnet, erhält man die Kurve $P_{SG} = f\{U\}$. Bei Leerlauf und Kurzschluss gibt der Solargenerator keine Leistung ab. In einem bestimmten Punkt, der mit MPP (Maximum Power Point) bezeichnet wird, wird die von dem Solargenerator abgegebene Leistung maximal und erreicht den Wert $P_{max} = P_{MPP}$ (s. Abb. 5.3.1.1) [1].

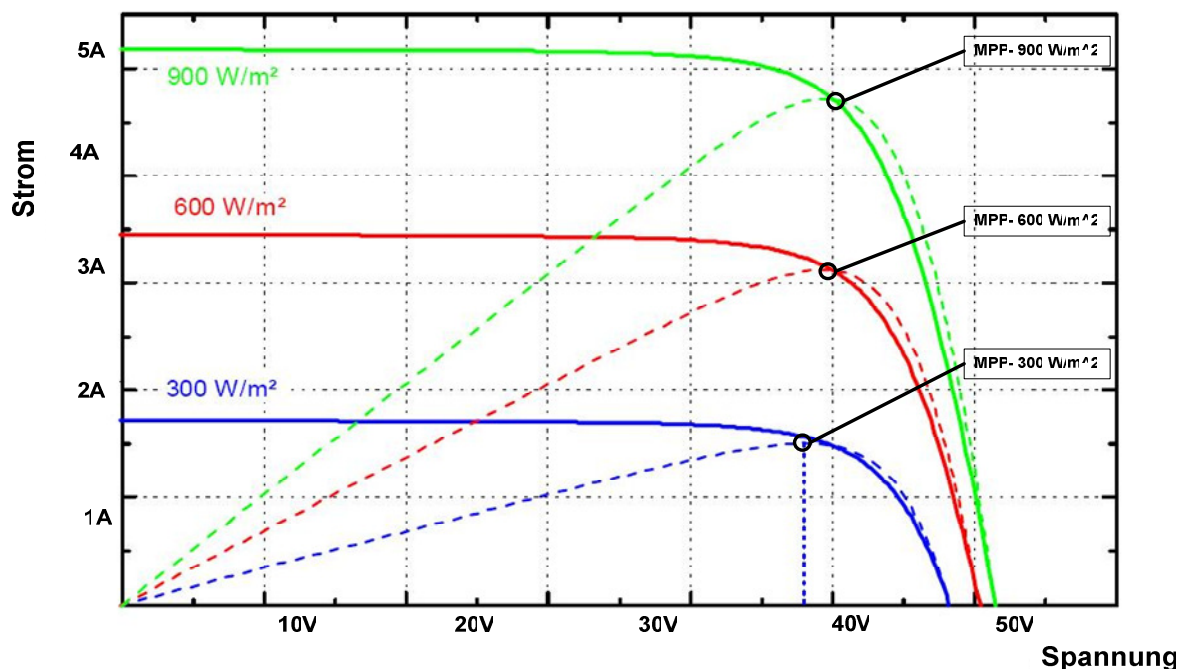


Abb. 5.3.1.1: Kennlinien mit MPP- Punkten

5.3.1.2. Umsetzung und Funktionsweise

Durch seine Funktionsweise kann der Hochsetzsteller (Anpassungswandler) als elektronische Last betrachtet werden. Durch Änderung des Tastverhältnisses „a“ kann der Hochsetzsteller sowohl eine sehr hohe, als auch eine sehr niedrige Eingangsimpedanz aufweisen.

Beträgt das Tastverhältnis $a = 0$ bedeutet das, dass der Schalter durchgehend gesperrt ist.

$$U_{SG} = U_V * (1 - a) \rightarrow a = 0 \rightarrow T_{ein} = 0$$

$$U_{SG} = U_V$$

$$I_{SG} = \frac{I_V}{(1 - a)} = I_V$$

Je nachdem wie groß die Last am Ausgang der Schaltung ist, fließt ein Strom I_V und es stellt sich eine Spannung U_V ein. Ist die Last so groß, dass I_V nahezu 0A beträgt, so befindet sich der Solargenerator fast im Leerlauf (s. Abb. 5.3.1.2.a).

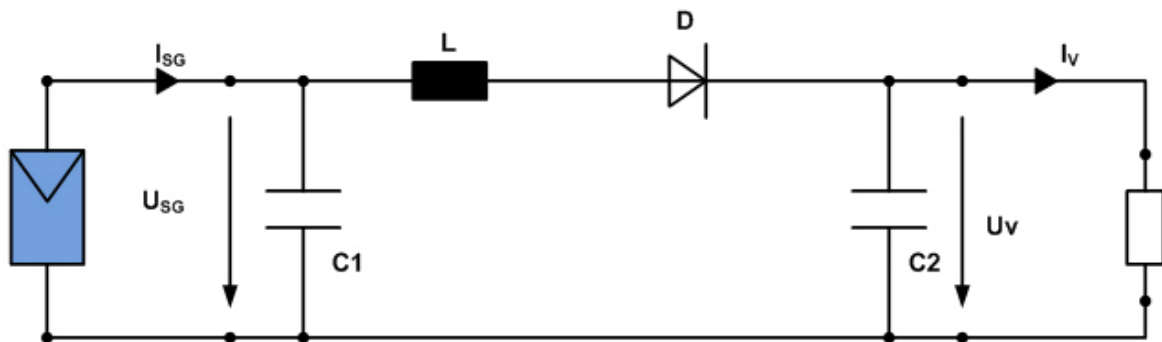


Abb. 5.3.1.2.a: Hochsetzsteller bei geöffnetem Schalter

Beträgt das Tastverhältnis $a=1$ bedeutet das, dass der Schalter sich durchgehend im leitenden Zustand befindet.

$$U_{SG} = U_V * (1-a) \rightarrow a=1 \rightarrow T_{ein} = 1$$

$$U_{SG} = 0$$

Ist die Spannung am Generator „0V“, so wird aus diesem der maximale Strom gezogen $I_{\max SG}$.

Der Strom fließt jetzt über den Schalter. Da es sich um eine Gleichspannung handelt, ist der Widerstand der Drossel sehr gering. Über diesem fällt aber immerhin noch eine geringe Spannung ab, so dass der Solargenerator sich fast im Kurzschluss befindet (s. Abb. 5.3.1.2.b).

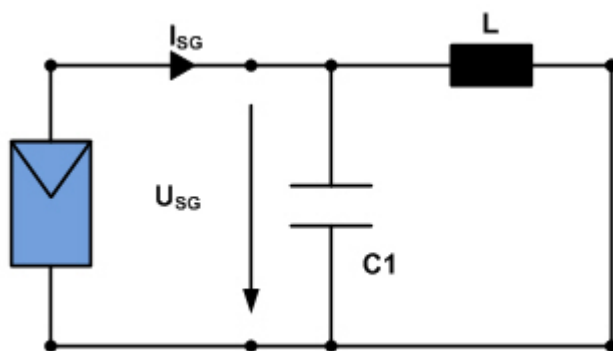


Abb. 5.3.1.2.b: Hochsetzsteller bei geschlossenem Schalter

- Um den MPP im Solargenerator zu finden, wird das Tastverhältnis „a“ am Anpassungswandler im Bereich von 0 bis 1 angesteuert. Dabei ändert sich die Eingangsimpedanz, und die Kennlinie kann fast vollständig durchfahren werden.
- Um den Solargenerator im Leerlauf betreiben zu können, muss die Zuleitung zum Generator getrennt werden. Dieser Punkt kann alleine durch Ansteuern des Anpassungswandlers nicht erreicht werden, da hier immer ein Strom fließen wird.
- Um den Solargenerator im Kurzschluss zu betreiben, müssten beide Klemmen am Generator miteinander verbunden werden. Sperrt der Schalter, so fließt ein Gleichstrom durch die Drossel. Diese weist einen sehr kleinen Gleichspannungswiderstand auf.

Um den MPP zu finden, wird der Anpassungswandler wie folgt angesteuert:

- Die Leistung am Solargenerator $P_{SG} = U_{SG} * I_{SG}$ wird gemessen und in P1 gespeichert.
- Das Tastverhältnis am Anpassungswandler wird um Δa erhöht -startend von $a = 0$.
- Die Leistung am Solargenerator $P_{SG} = U_{SG} * I_{SG}$ wird erneut gemessen und in P2 gespeichert.
- Ist der neue Leistungswert ($P2 > P1$)? Wenn ja, wird die der Leistungswert P2 in P1 gespeichert und das Tastverhältnis „a“ um einen weiteren Δa erhöht.
- Ist dagegen die neue Leistung ($P2 < P1$)? Dann wird das Tastverhältnis um Δa verringert und P2 in P1 gespeichert.

Dieses Verfahren für das MPP-Tracking ist auch unter dem Suchschwingverfahren bekannt (s. Abb. 5.3.1.3) [12] [13].

5.3.1.3. Flussdiagramm

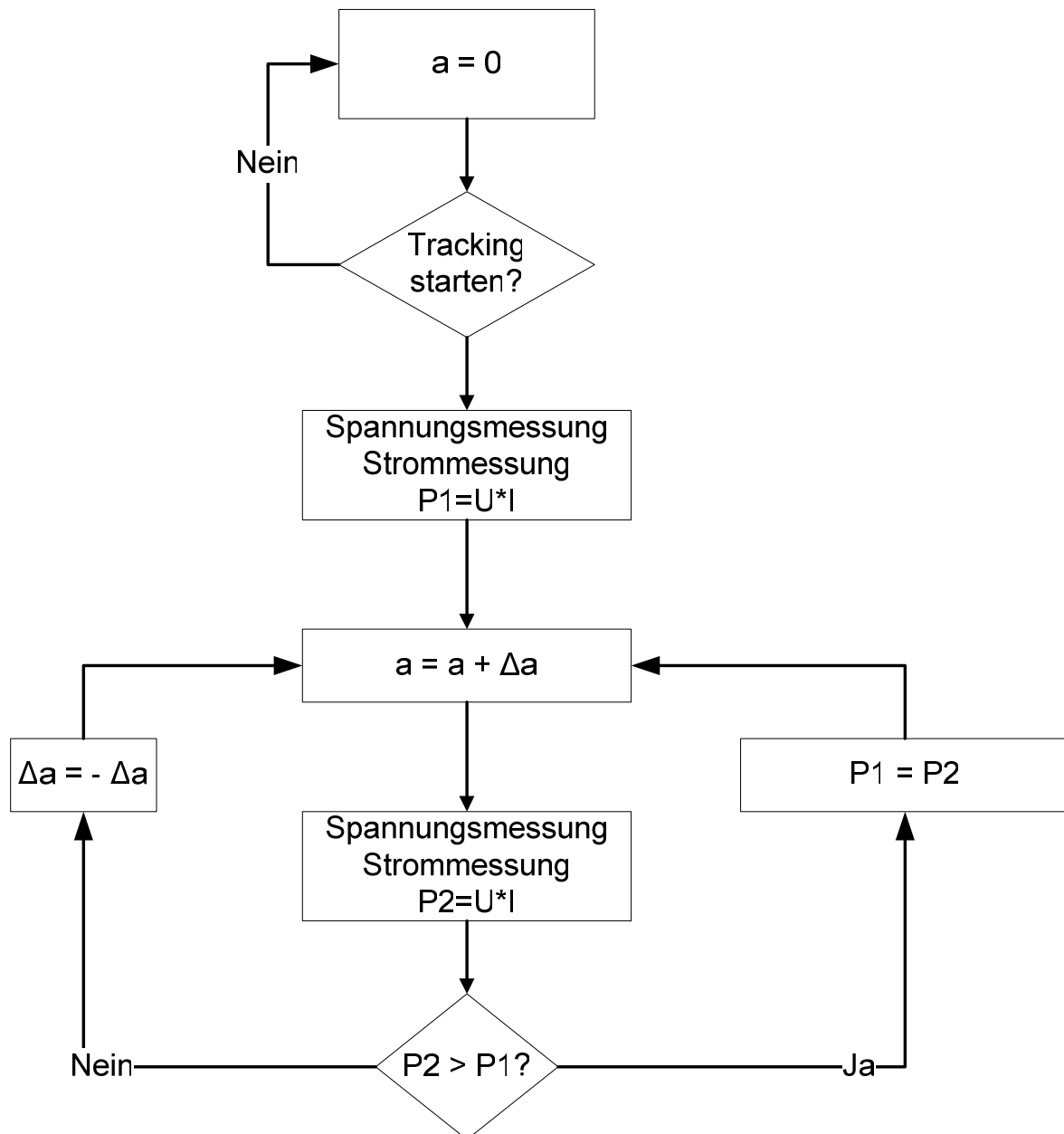


Abb. 5.3.1.3: Flussdiagramm des MPP-Trackers

5.3.1.4. Wahl des Tastverhältnisses Δa

Die Tastverhältnisbreite Δa kann manuell gesteuert werden um den Einfluss auf die Leistungsänderung näher betrachten zu können (s. Abb. 5.3.1.4.a).

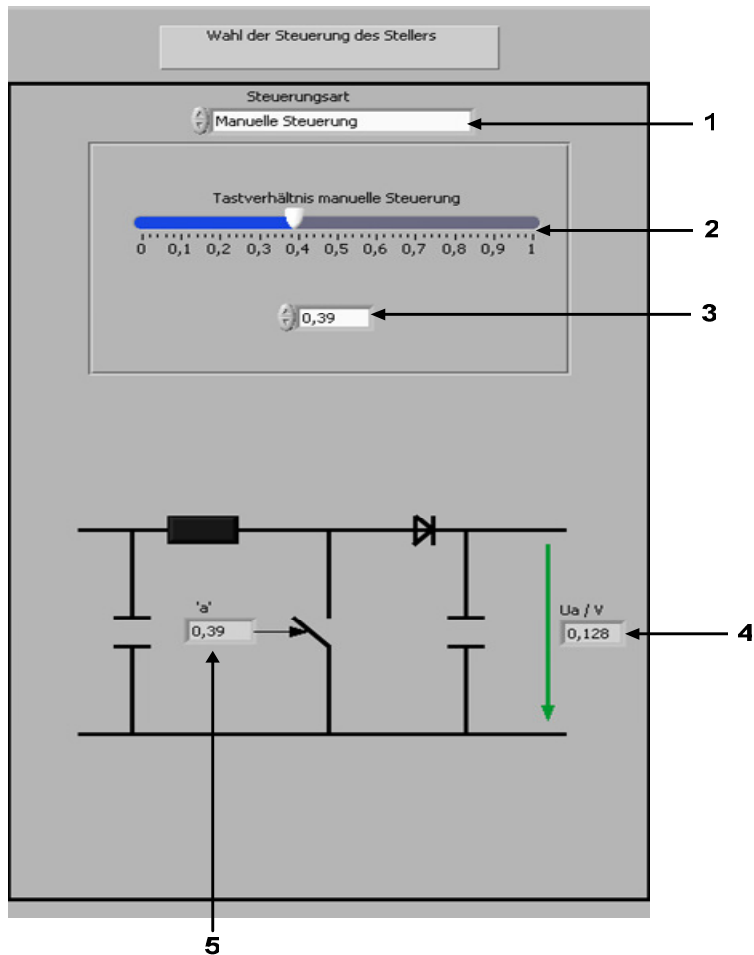


Abb. 5.3.1.4.a: Manuelle Steuerung des Tastverhältnisses

1. Wahl zwischen den Betriebsarten: Beim „Klicken“ mit der Maus auf der Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen.
2. Schieberegler zur Änderung des Tastverhältnisses: Punkt 2 und 3 beeinflussen sich gegenseitig.
3. Eingabe des zu setzenden Tastverhältnisses (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)
4. Anzeige der momentanen Ausgangsspannung U_a am Hochsetzsteller
5. Anzeige des momentanen Tastverhältnisses am IGBT des Hochsetzstellers

Einstellungen:

Der Aufbau erfolgt wie im Kapitel 3.4.1.

Die Änderung und Größe des Tastverhältnisses erfolgte durch manuelle Eingabe.

(s. Abb. 5.3.1.4.a)

Man entschied sich für folge Schrittweiten des Tastverhältnisses:

Größe Schrittweite:

Startend bei $a = 0,3$

Schrittweite $\Delta a = 0,01$

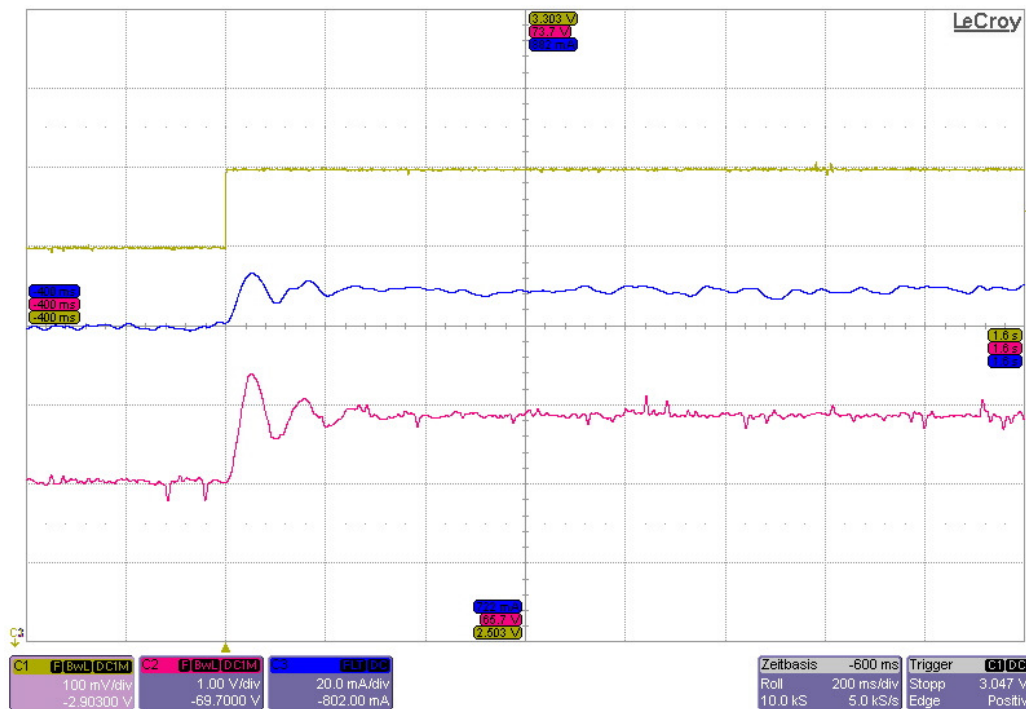


Abb. 5.3.1.4.b: Sprungantwort bei Änderung des Tastverhältnisses von 0.3 auf 0.31

Kanal C1 (gelb) Tastverhältnis „a“ 100mV/Div

Zeitbasis: 200ms/Div

Kanal C2 (rot) Spannung U_a 1V/Div

Kanal C3 (blau) Strom I_a 20mA/Div

Anhand der Aufzeichnung ist beim Sprung eine Strom und Spannungsänderung am Ausgang des Stellers bemerkbar. Die Spannungsänderung beträgt ca. 0,9V, beim Strom sind es ca. 10mA. Das ergibt eine Leistungsänderung von ca. $9\text{mW}/\Delta a = 0.01$.

Eine größere Schrittweite würde über den MPP hinauschießen und das Finden dieses Punktes langsamer und schwieriger gestalten. Zu beachten ist, dass sich der Einfluss der Schrittweite mit Verringerung der Spannung (Kennlinie des Solargenerators) vergrößert. In der Nähe des „MPP“ ändern sich Strom und Spannung in größeren Schritten (s. Kapitel 3.1), was zu einer größeren Änderung der Leistung führen würde.

Um große Strom-, Spannungs- bzw. Leistungssprünge in der Nähe des MPP zu verhindern wird Δa in der Nähe des MPP verringert

Kleinere Schrittweite:

Startend bei $a = 0,3$

Schrittweite $\Delta a = 0,004$

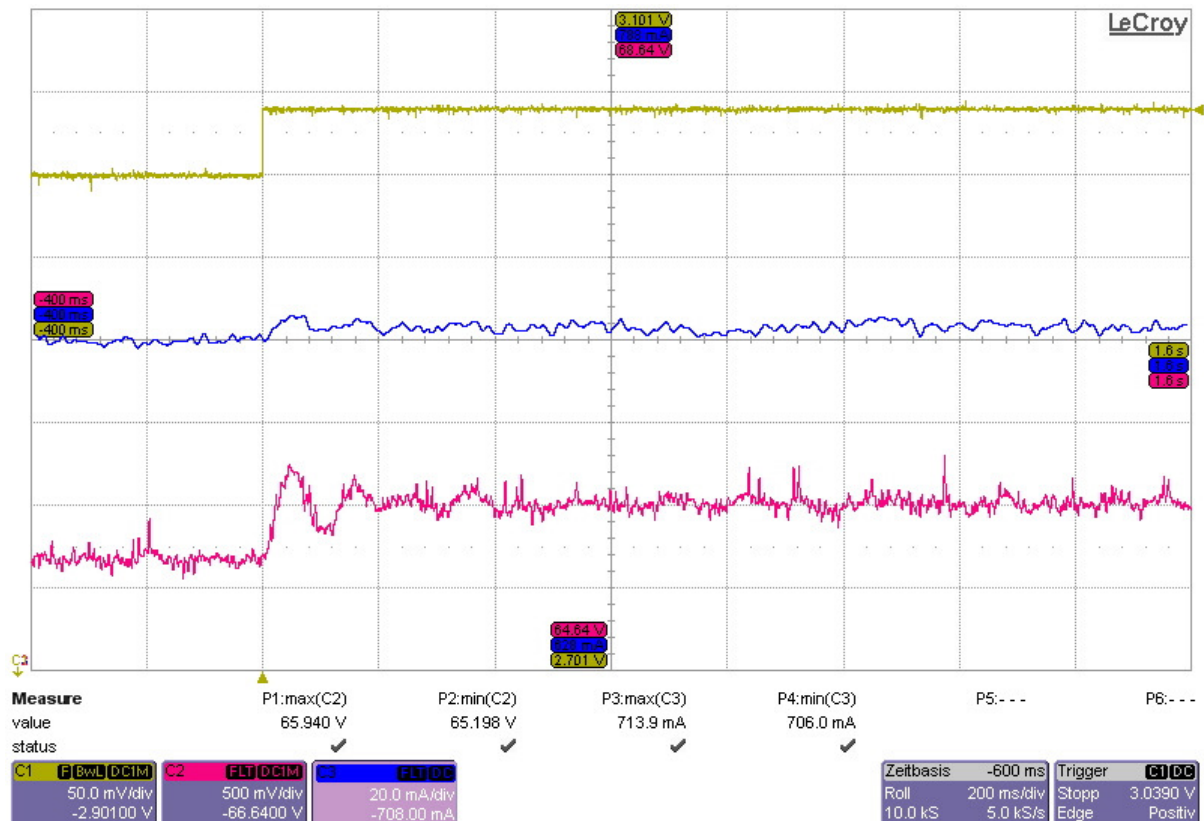


Abb. 5.3.1.4.c: Sprungantwort bei Änderung des Tastverhältnisses von 0.3 auf 0.304

Kanal C1 (gelb) Tastverhältnis „a“ 50mV/Div Zeitbasis: 200ms/Div
 Kanal C2 (rot) Spannung U_a 500mV/Div
 Kanal C3 (blau) Strom I_a 20mA/Div

Bei einer kleineren Schrittweite ist anhand der Aufzeichnung zu sehen, dass der Einfluss auf Strom und Spannung minimal erfolgt, aber noch groß genug ist, um die Änderung messtechnisch zu erfassen.

Die Spannungsänderung beträgt ca. 300mV, beim Strom sind es ca. 5mA. Das ergibt eine Leistungsänderung von ca. 1,5mW.

Eine noch kleinere Änderung würde messtechnisch aufgrund der unregelmäßigen Strom-Spannungs- Verläufe messtechnisch nicht zu erfassen sein.

5.3.1.5. Aufbau des Versuchs

Um den MPP-Tracker zu testen wird der Versuch wie in Kapitel 3.4.1 aufgebaut
Ein detaillierter Aufbau ist im Anhang zu finden.

Einstellungen:

Abschlusswiderstand: → 90 Ohm
Steuerung des Tastverhältnis „a“: → über die Bedienkonsole
(s. Kapitel 5.3.1.6)

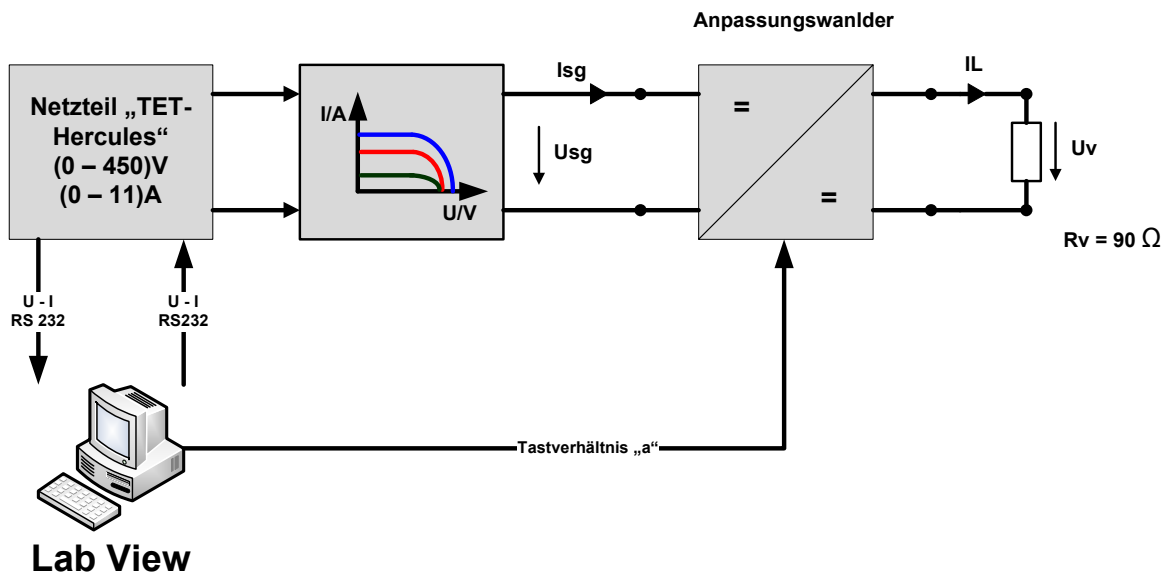


Abb. 5.3.1.5: Versuchsaufbau für das MPP-Tracking

5.3.1.6. Bedienoberfläche

Um das MPP-Tracking- Verfahren zu starten wird der mittlere Teil der Bedienkonsole gebraucht (s. Abb. 5.3.1.6).

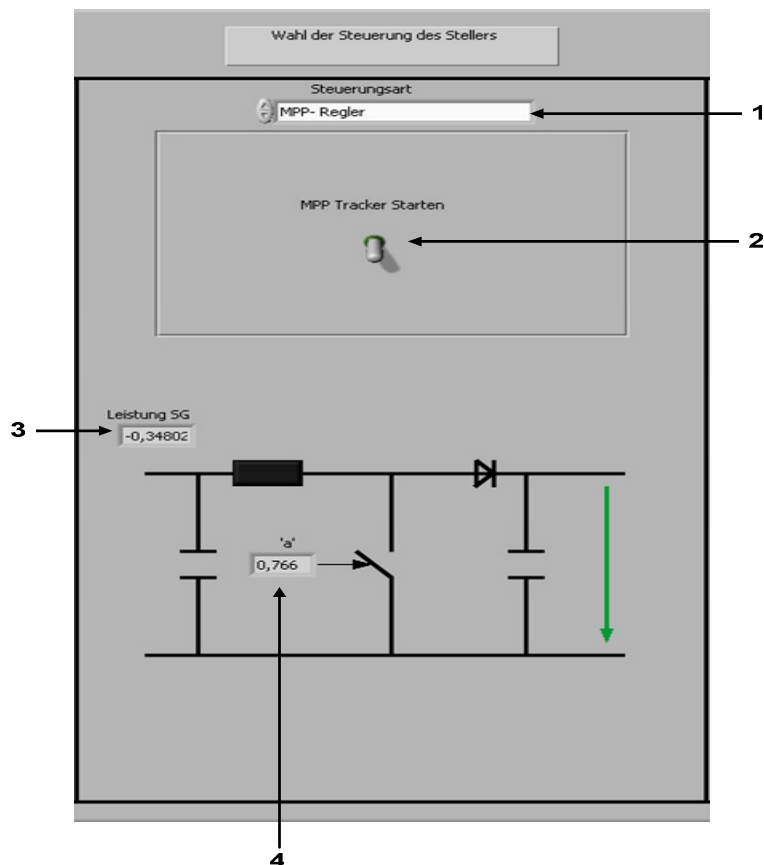


Abb. 5.3.1.6: Steuerung der MPP- Regelung mit LabView

Erläuterung:

1. Wahl zwischen den Betriebsarten: Beim „Klicken“ mit der Maus auf die Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen.
2. Schalter zum Schalten des Tracking Vorgangs.
Schalter zeigt nach unten → Tracking beendet (Tastverhältnis $a=0$)
Schalter zeigt nach oben → Tracking gestartet bzw. läuft
3. Anzeige der Eingangsleistung. „Leistung SG“ entspricht der Leistung der Quelle- in diesem Fall die des Solargenerators.
4. Anzeige des momentanen Tastverhältnisses am IGBT des Hochsetzstellers

5.3.1.7. Auswertung

5.3.1.7.1. MPP-Tracking der simulierten Kennlinien

Beim Testen des MPP-Tracking Verfahren wird der „MPP“ aller simulierten Kennlinien erfolgreich gefunden.

Es wird beim MPP-Tracking festgestellt, dass bei der $800 \frac{W}{m^2}$ und der $1000 \frac{W}{m^2}$ Kennlinie Stromspitzen auftreten. (s. Abb. 5.3.1.7.1.a und Abb. 5.3.1.7.1.b)

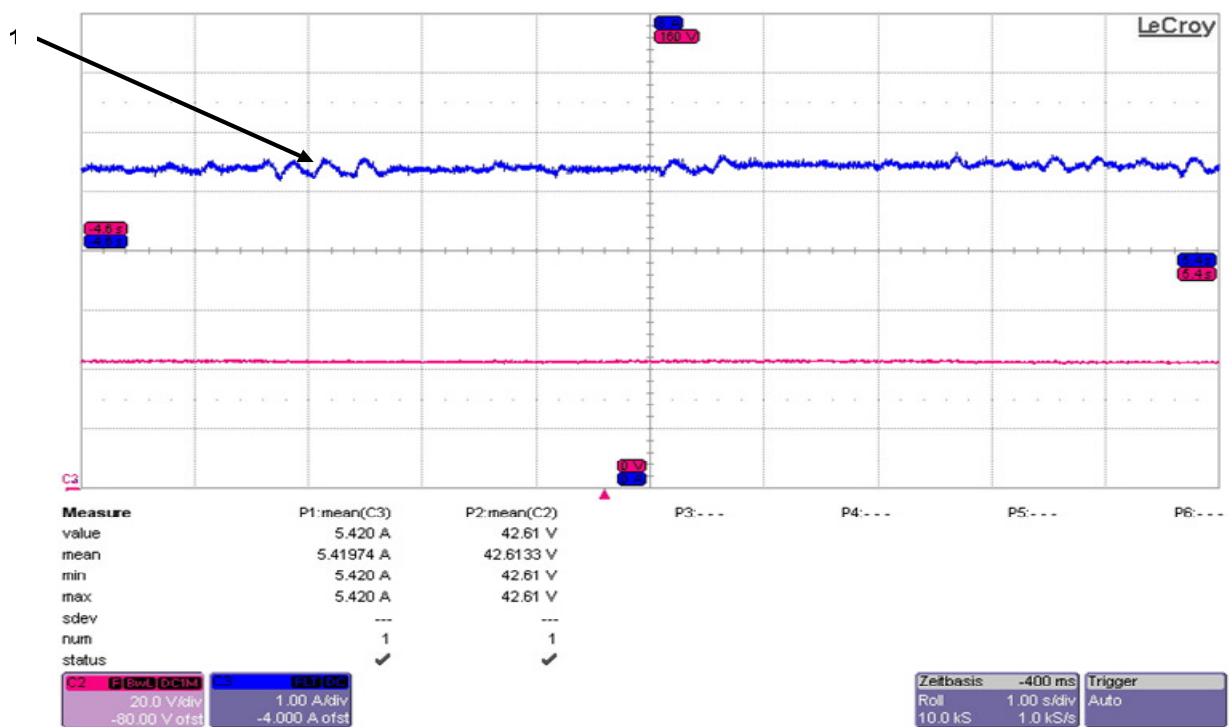


Abb. 5.3.1.7.1.a: MPP der $1000 \frac{W}{m^2}$ Kennlinie

Kanal C2 (Rot) Spannung am Kopierverstärker 20V/Div Zeitbasis: 1s/Div
 Kanal C3 (Blau) Strom I_a 1A/Div

1. Die gekennzeichnete Stromspitze betragen eine Stromänderung von ca. $\Delta I=0,5A$

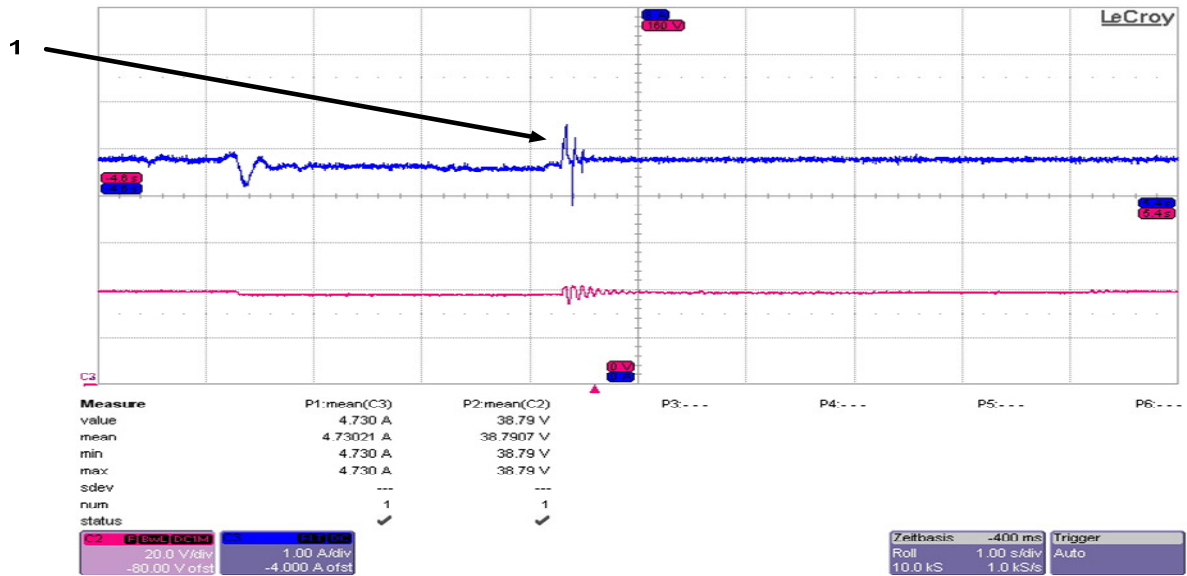


Abb. 5.3.1.7.1.b: MPP der $800 \frac{W}{m^2}$ Kennlinie

Kanal C2 (Rot) Spannung am Kopierverstärker 20V/Div Zeitbasis: 1s/Div
 Kanal C3 (Blau) Strom I_a 1A/Div

1. Die gekennzeichnete Stromspitze beträgt eine Stromänderung von ca. $\Delta I=1A$

Beim MPP-Tracking der $500 \frac{W}{m^2}$ Kennlinie dagegen bleiben diese Stromspitzen aus

(s. Abb. 5.3.1.7.1.c).

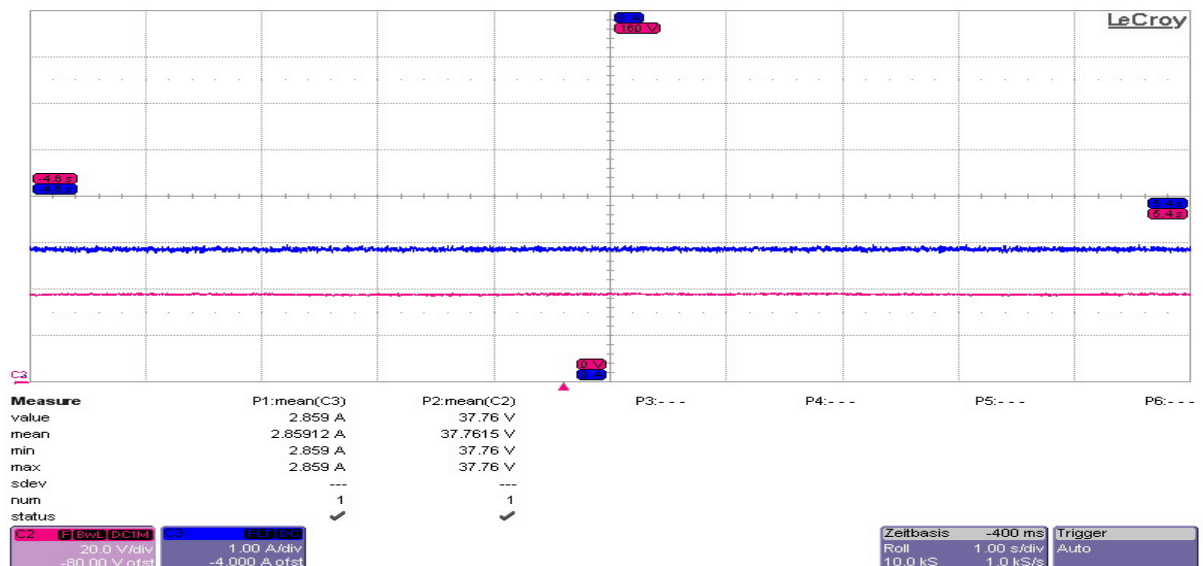


Abb. 5.3.1.7.1.c: MPP der $500 \frac{W}{m^2}$ Kennlinie

Kanal C2 (Rot) Spannung am Kopierverstärker 20V/Div Zeitbasis: 1s/Div
 Kanal C3 (Blau) Strom I_a 1A/Div

Vermutet wird, dass die Strom- und Spannungsspitzen aufgrund unstetiger Übergänge in den hinterlegten Kennlinien entstehen. Der Übergang in die Strombegrenzung erfolgt bei der 800ter und 100er Kennlinien abrupter als bei der 500ter Kennlinie. Um diese These zu testen, wird die 500ter Kennlinie in der Einstrahlungsstärke beeinflusst. Der Kurzschlussstrom wird zusammen mit der Einstrahlungsstärke angehoben. Die Leerlaufspannung bleibt dabei unverändert. Bei einer Erhöhung auf 800 bzw. $1000 \frac{W}{m^2}$ bleiben die Stromspitzen aus (s. Abb. 5.3.1.7.1.d und Abb. 5.3.1.7.1.e).

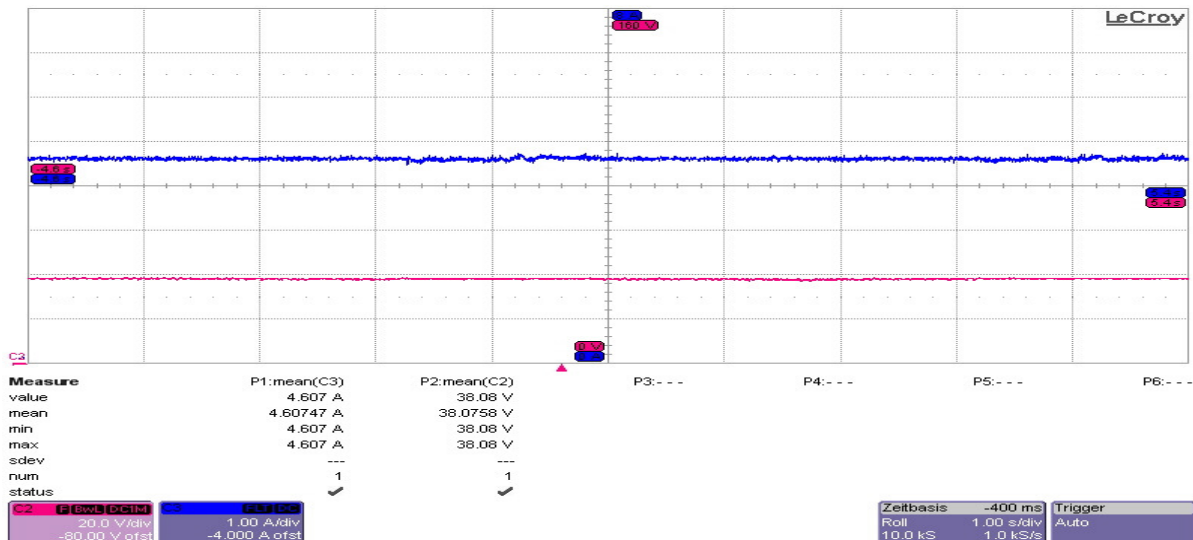


Abb. 5.3.1.7.1.d: Veränderte $500 \frac{W}{m^2}$ Kennlinie auf $800 \frac{W}{m^2}$

Kanal C2 (Rot) Spannung am Kopierverstärker 20V/Div Zeitbasis: 1s/Div
 Kanal C3 (Blau) Strom I_a 1A/Div

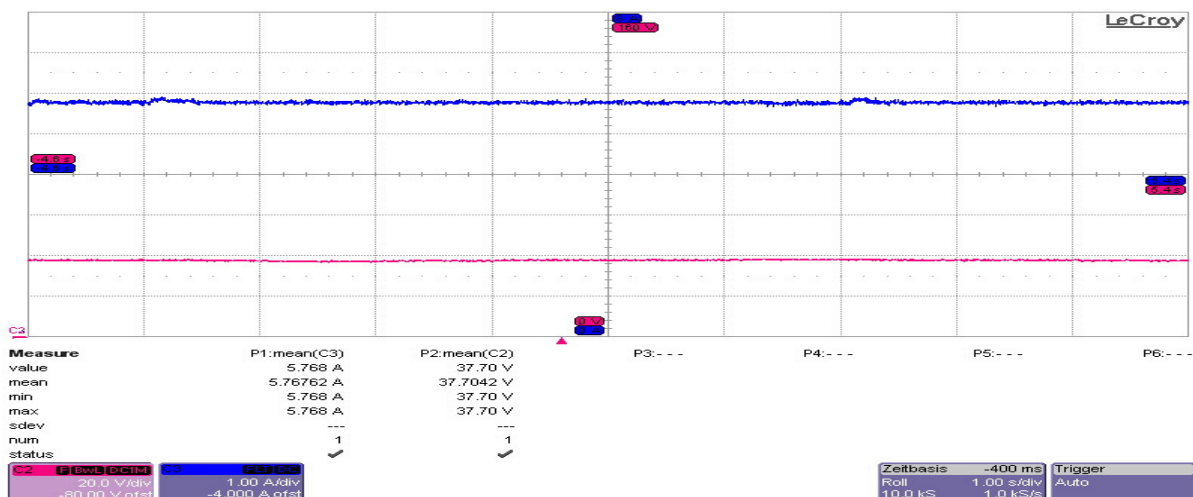


Abb. 5.3.1.7.1.e: Veränderte $500 \frac{W}{m^2}$ Kennlinie auf $1000 \frac{W}{m^2}$

Kanal C2 (Rot) Spannung am Kopierverstärker 20V/Div Zeitbasis: 1s/Div
 Kanal C3 (Blau) Strom I_a 1A/Div

5.3.1.7.2. MPP-Tracking eines normalen DC- Netzteils

In diesem Schritt wird der Kopierverstärker am Eingang des Anpassungswandlers als normale DC- Spannungsquelle betrieben. Im manuellen Betrieb (s. Kapitel 3.3.6.1) besteht die Möglichkeit, Strombegrenzung und Ausgangsspannung festzulegen. Die Kennlinie des DC- Spannungsnetzteils (Abb. 5.3.1.7.2.a) besitzt am MPP einen starken Knickpunkt.

Ziel ist, dass der MPP-Tracker diesen MPP findet und nicht zu stark über diesen hinausregelt.

Folgende drei Kennlinien wurden getestet:

1. Strombegrenzung $I_{\max} = 2A$
Ausgangsspannung $U_{\max} = 40V$
2. Strombegrenzung $I_{\max} = 3A$
Ausgangsspannung $U_{\max} = 40V$
3. Strombegrenzung $I_{\max} = 1,5A$
Ausgangsspannung $U_{\max} = 50V$

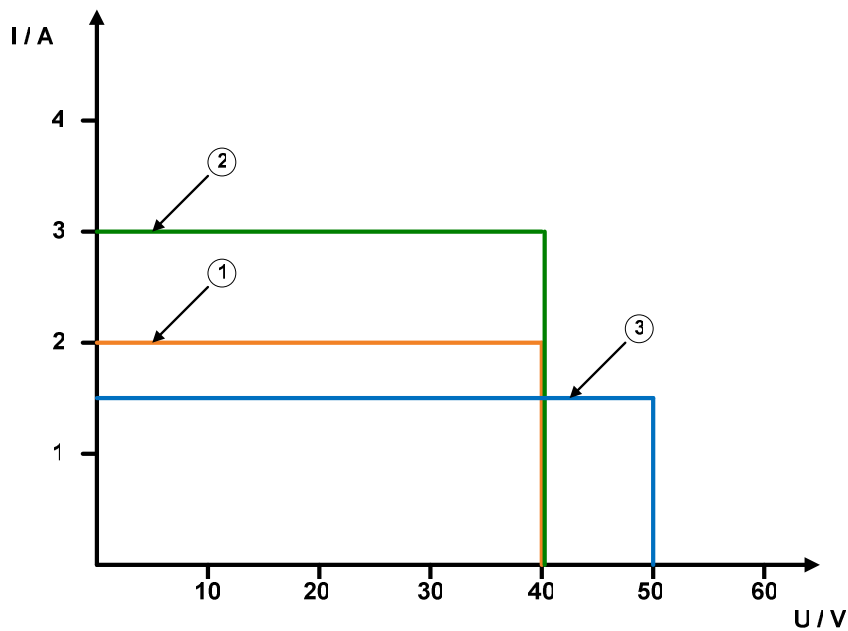


Abb. 5.3.1.7.2.a: Verwendete Netzteilkennlinien für MPP-Tracking test

Ergebnisse:

Die folgenden Aufnahmen zeigen den gefundenen MPP der jeweiligen Kennlinien.

Für alle drei Aufnahmen gilt:

Kanal C1 (gelb): Tastverhältnis „a“

50mV/Div Zeitbasis: 1s/Div

Kanal C2 (rot): Ausgangsspannung U_Q am Netzteil

1V/Div

Kanal C3 (blau): Ausgangsstrom I_Q am Netzteil

50mA/Div

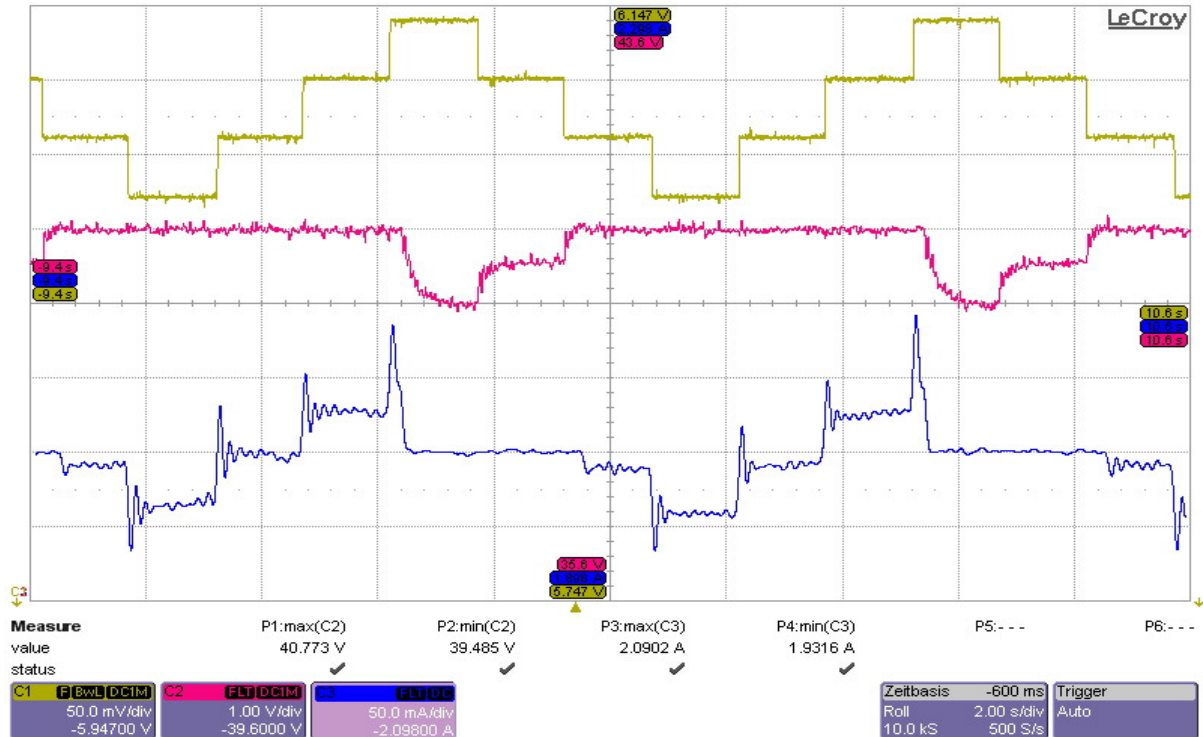


Abb. 5.3.1.7.2.b: MPP- der 1 Kennlinie

Kanal C1 (gelb): Unterste Grenze: 5,7V

Kanal C2 (rot): Unterste Grenze: 35V

Kanal C1 (blau): Unterste Grenze: 1,9A

Bei der ersten Kennlinie befindet sich der MPP bei $I_{\max} = 2A$ und $U_{\max} = 40V$

Die Aufnahme ist wie folgt zu interpretieren:

- Bei steigendem Tastverhältnis (Maximum des gelben Signals) wird das Netzteil in die Strombegrenzung gefahren. Die Spannung bricht zusammen während der Strom konstant gehalten wird.
- Bei diesem Vorgang sinkt die Leistung $P=U \cdot I$, und der MPP-Tracker fängt an, in die entgegengesetzte Richtung zu regeln.
- Sobald das Netzteil sich nicht mehr in der Strombegrenzung befindet, stabilisiert sich die Spannung. Bei einem zu niedrigem Tastverhältnis (Minimum des gelben Signals) fängt der Strom an zu sinken, und die Leistung sinkt. Das ist der Punkt an dem der MPP-Tracker seine Regelrichtung ändert.
- Dasselbe Verhalten ist bei den folgenden Kennlinien ebenfalls festzustellen.

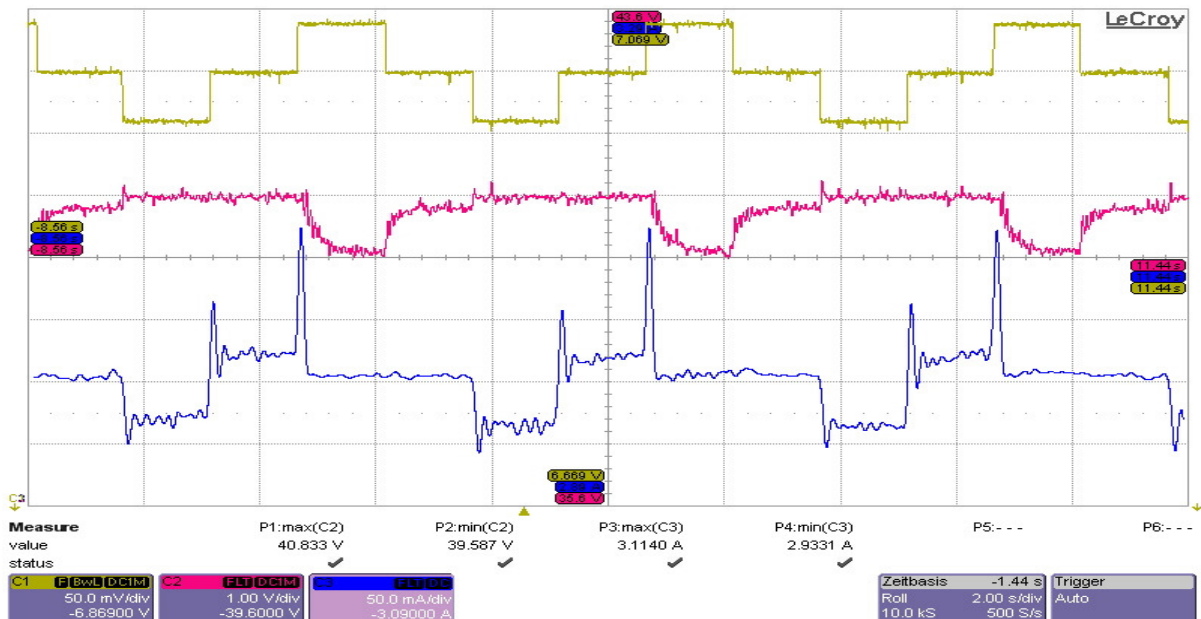


Abb. 5.3.1.7.2.c: MPP- der zweiten Kennlinie $I_{\max}=3A$ und $U_{\max}=40V$

Kanal C1 (gelb): Unterste Grenze: 6,6V

Kanal C2 (rot): Unterste Grenze: 35V

Kanal C1 (blau): Unterste Grenze: 2,8A

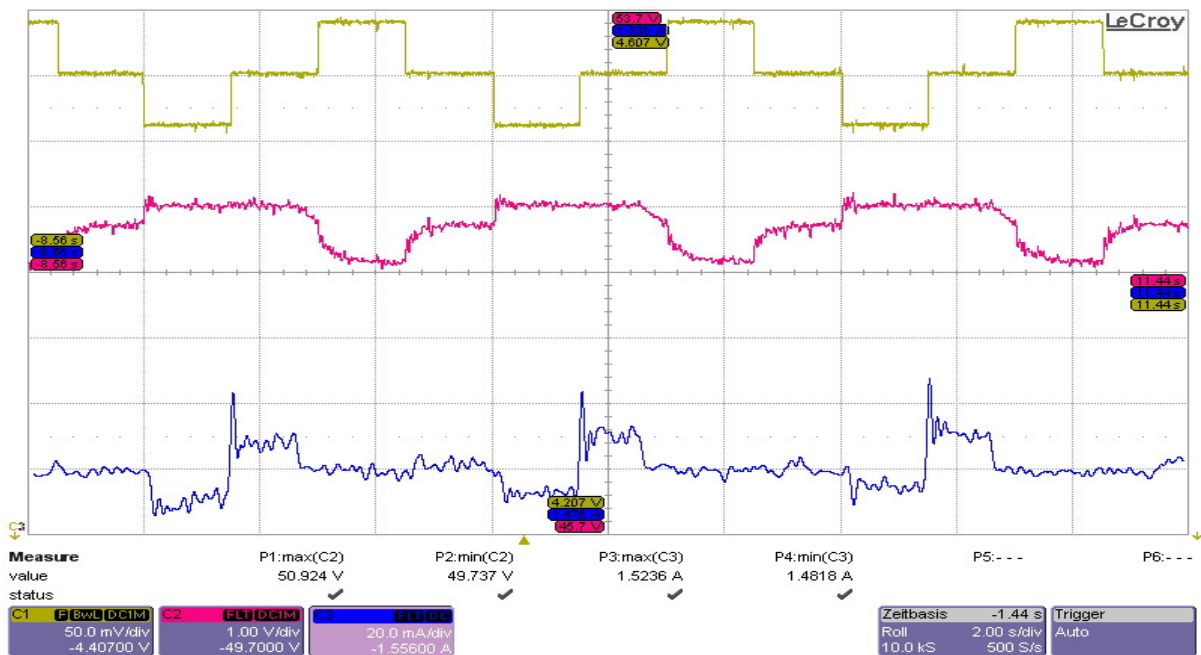


Abb. 5.3.1.7.2.d: MPP- der dritten Kennlinie $I_{\max}=1,5A$ und $U_{\max}=50V$

Kanal C1 (gelb): Unterste Grenze: 4,2V

Kanal C2 (rot): Unterste Grenze: 45V

Kanal C1 (blau): Unterste Grenze: 1,4A

Aufgrund dieses Schwingens um den „MPP“ (Suchschwingverfahren) ist der Regler in der Lage, Änderungen an der Quelle zu erkennen und den neuen „MPP“ zu finden.

5.3.1.8. Überlegung eines weiteren MPP-Tracking Verfahrens

Eine Möglichkeit der Realisierung eines MPP-Tracking wird wie folgt erläutert:

- Der Anpassungswandler wird als Spannungsregler eingesetzt. Dieser soll die Spannung vor der B2- Brücke durch Regelung konstant halten.
- Die B2 Brücke wird als Stromregler eingesetzt. Dies wird erreicht indem man das Vorgabesignal (Sinus) der B2- Brücke durch Änderung des Tastverhältnis „a“ in der Amplitude verändert.

Die Kombination beider- Regelstrukturen ermöglicht es, ebenfalls den „MPP“ zu finden. Dieses Verfahren erfordert jedoch, dass der Stromregler schneller als der Spannungsregler arbeitet.

Beim MPP-Tracking (s. Kapitel 5.3.1.2) handelt es sich um das Suchschwingverfahren. Sobald die Brücke das Tastverhältnis „a“ erhöht und über den MPP hinüberregelt, nimmt die Leistung am Solargenerator ab.

Der Spannungsregler versucht die Zwischenkreisspannung U_{ZK} konstant zu halten und dabei die nötige Leistung aufzubringen. Da aber nicht mehr Leistung abgegeben werden kann als gefordert, muss der Stromregler schnellstmöglich zurückregeln. Ist dies nicht der Fall, fängt der Spannungsregler an, das Tastverhältnis für den Anpassungswandler zu erhöhen um die Leistung zu kompensieren und beginnt zu schwingen.

5.3.2. Spannungsregler

5.3.2.1. Erläuterung

Bei Inselanlagen ist es üblich, dass Verbraucher angeschlossen werden, die einen konstanten Spannungswert benötigen um arbeiten zu können. Hierbei kann es sich um eine Gleich- oder Wechselspannung handeln.

Die Ausgangsspannung vom Anpassungswandler wird mittels einer geschlossenen Regelschleife konstant gehalten. Der Regelkreis hat dabei die Aufgabe, sowohl Schwankungen auf der Eingangsseite als auch Änderungen des Laststromes auszuregeln.

Bei einer konstanten Ausgangsspannung legt der Verbraucher den Strom fest. Dabei muss einseitig der Solargenerator so dimensioniert sein, dass er in der Lage ist die nötige Leistung abzugeben.

5.3.2.2. Regelung

Die Regelung des Anpassungswandlers wird anhand der Zeichnung erklärt (s. Abb. 5.3.2.2).

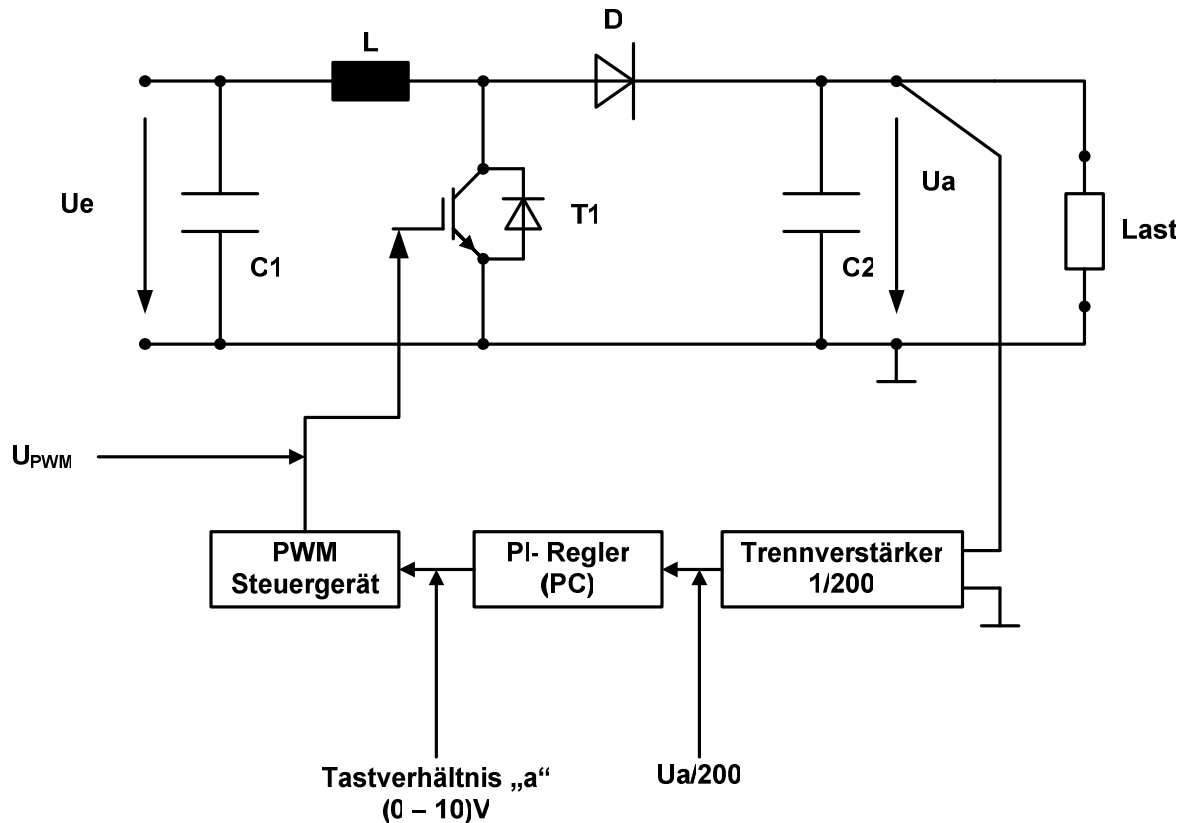


Abb. 5.3.2.2: Regelung des Anpassungswandlers

Die Ausgangsspannung U_a wird über den Trennverstärker gemessen und an den Computer weitergegeben.

Im PC wird U_a mit der Referenzspannung U_{ref} verglichen und über einen programmierten PI-Regler verstärkt. Die Ausgangsspannung des PI-Reglers (neues Tastverhältnis „a“) wird in die pulswidenmodulierte Spannung U_{PWM} umgewandelt. Diese wiederum steuert den Transistor T1 an.

Regelmechanismus:

Wird die Ausgangsspannung U_a zu klein (kleiner als die Referenzspannung U_{ref}), läuft infolge dessen die Ausgangsspannung des PI-Reglers (Tastverhältnis „a“) hoch.

Dadurch wird das Tastverhältnis der Steuerspannung U_{PWM} $\left(\frac{t_{an}}{T_{Tackt}}\right)$ ebenfalls größer, und zwar solange bis $U_a = U_{ref}$ ist [3].

5.3.2.3. Dimensionierung des PI-Reglers

Für die Dimensionierung des PI-Reglers wird die Sprungantwort des Systems aufgenommen.

Einstellungen:

Strombegrenzung I_{\max} : 6A
 Ausgangsspannung U_{\max} : 50V
 Abschlusswiderstand R_L : 90 Ω

Sprung: $a=0 \rightarrow a=0,4$

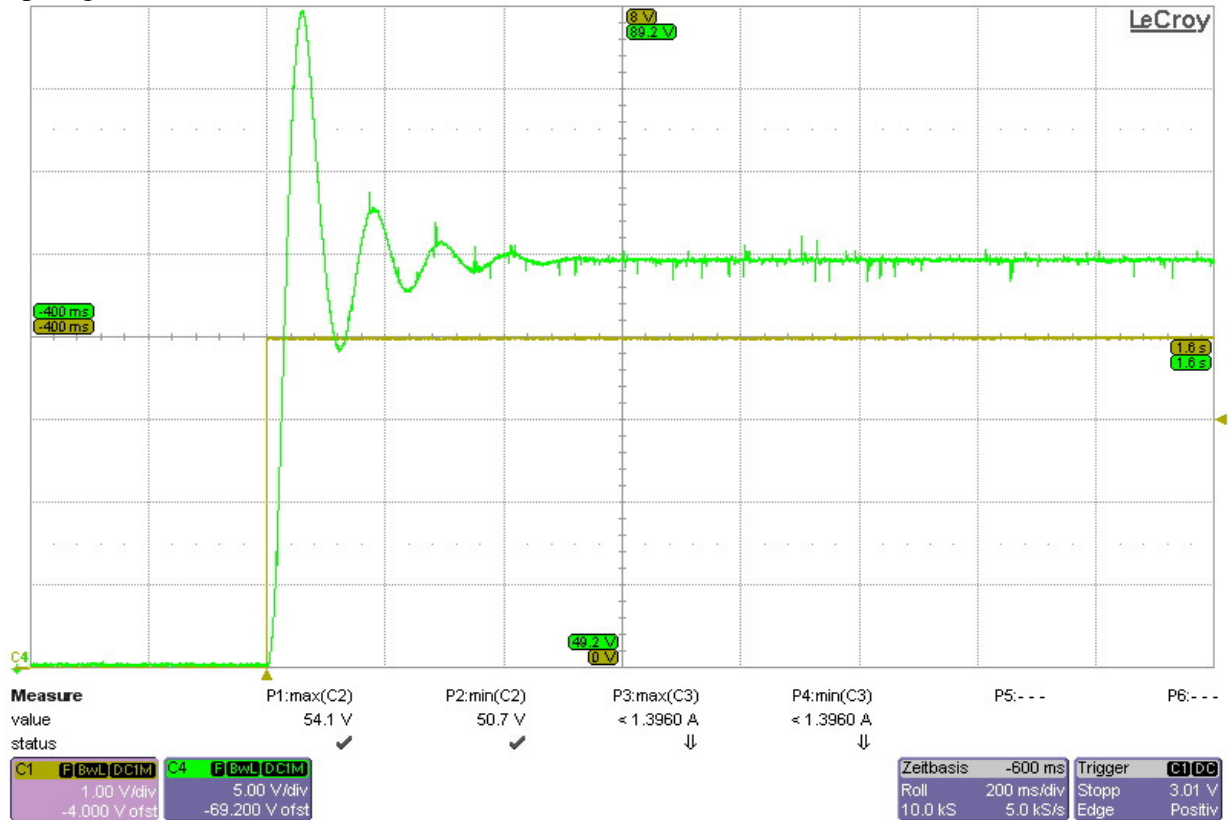


Abb. 5.3.2.3.a: Sprungantwort des Systems (Anpassungswandler)

Kanal C1 (gelb): Tastverhältnis „a“ 1V/Div Zeitbasis: 200ms/Div

Kanal C4 (grün): Ausgangsspannung U_a 5V/Div

Anhand des Einschwingvorgangs ist deutlich zu erkennen, dass es sich um eine „PT-2“ Strecke handelt. Die Sprungantwort schwingt sich bei einem Wert von ca. 83 Volt sinusförmig ein.

Die Strecke kann nach dem „Chien- Hrones- Reswick- Verfahren“ geregelt werden [5], [6].

Für die Kennwerte der Regelstrecke werden die Ersatzkennwerte Verzugszeit T_U , Ausgleichzeit T_G und die Verstärkung K_{PS} ermittelt (s. Abb. 5.3.2.3.b).

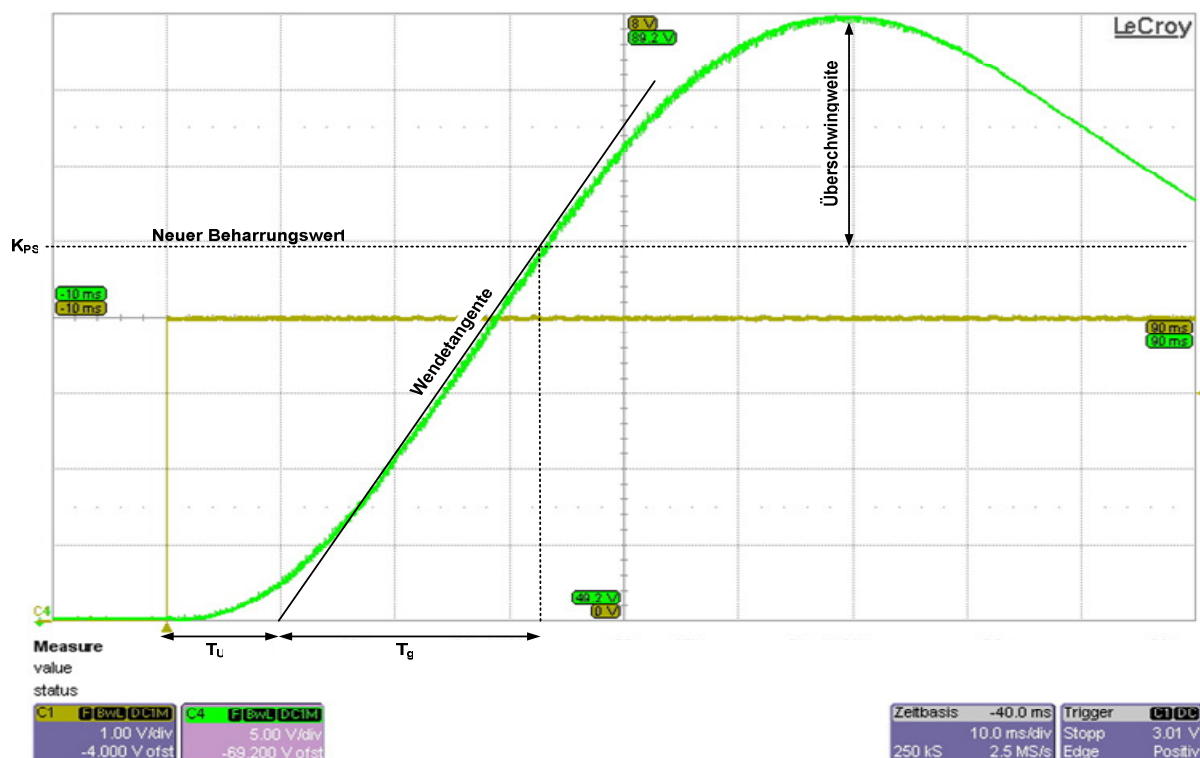


Abb. 5.3.2.3.b: Analyse der Sprungantwort

Kanal C1 (gelb): Tastverhältnis „a“ 1V/Div
 Kanal C4 (grün): Ausgangsspannung U_a 5V/Div

Zeitbasis: 10ms/Div

Berechnung der Regelparameter:

Verzugszeit T_U : 10ms
 Ausgleichzeit T_G : 23ms

$$K_{PS} = \frac{(83V - 49V)}{(4V - 0V)} = 8,5$$

$$\ddot{u} = \frac{89V}{83V} * 100\% = 7,2\%$$

PI-Regler bei schwingendem Übergangsverhalten:

$$K_{PR} = 0,35 * \frac{T_G}{K_{PS} * T_U} \quad T_N = 1,2 T_G$$

$$U_{stell}(t) = K_{PR} \left(\frac{1}{T_N} \int e(t) dt + e(t) \right)$$

In der Standardform sieht der Regelkreis wie folgt aus:

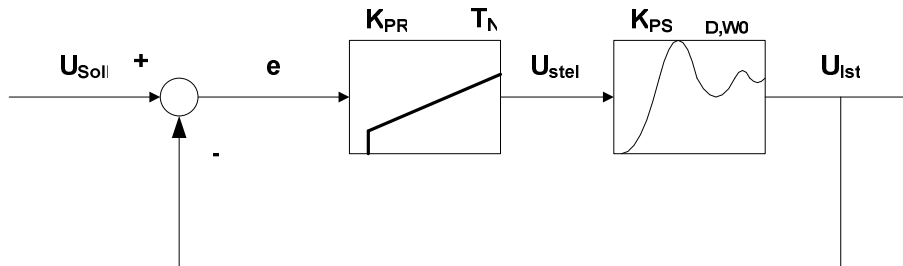


Abb. 5.3.2.3.c: Regelkreis zur Spannungsregelung am Hochsetzsteller

Damit die Spannungsregelung funktioniert, muss diese durch ein Echtzeitsystem betrieben werden. Wegen der verwendeten Technik im Labor treten viele Totzeiten auf, die dazu führen, dass das Systems nicht schnell genug reagiert.

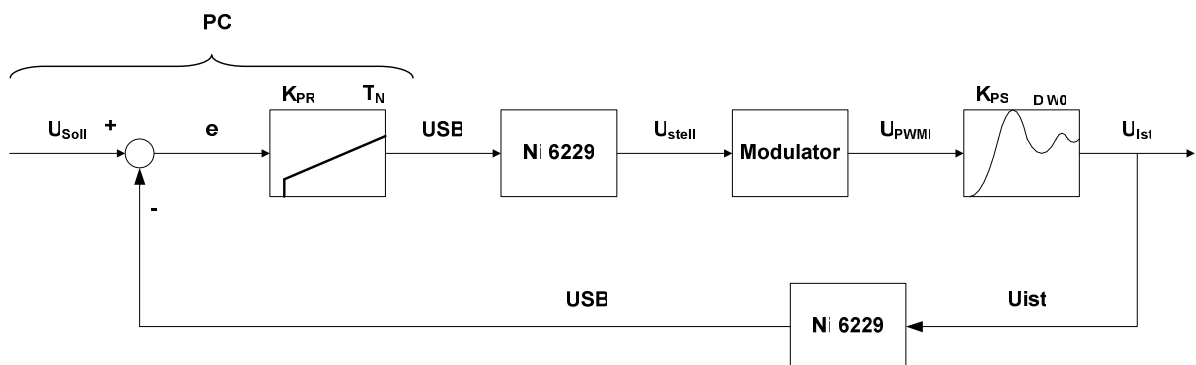


Abb. 5.3.2.3.d: Regelkreis mit vorhandener Technik im Labor

Die folgenden Verzögerungszeiten sind aufgrund des Systems nicht ermittelbar, da diese dauernd variieren können.

- PC → Das „Windows Betriebssystem“ arbeitet nicht deterministisch
- Ni 6229 → Die USB Verbindung zum Mess/Steuermodul ist nur in Datenpaketen möglich und nicht echtzeitfähig

5.3.2.4. Bedienoberfläche

Um die Regelung der Ausgangsspannung zu starten wird der mittlere Teil der Bedienkonsole benötigt (s. Abb. 5.3.2.4).

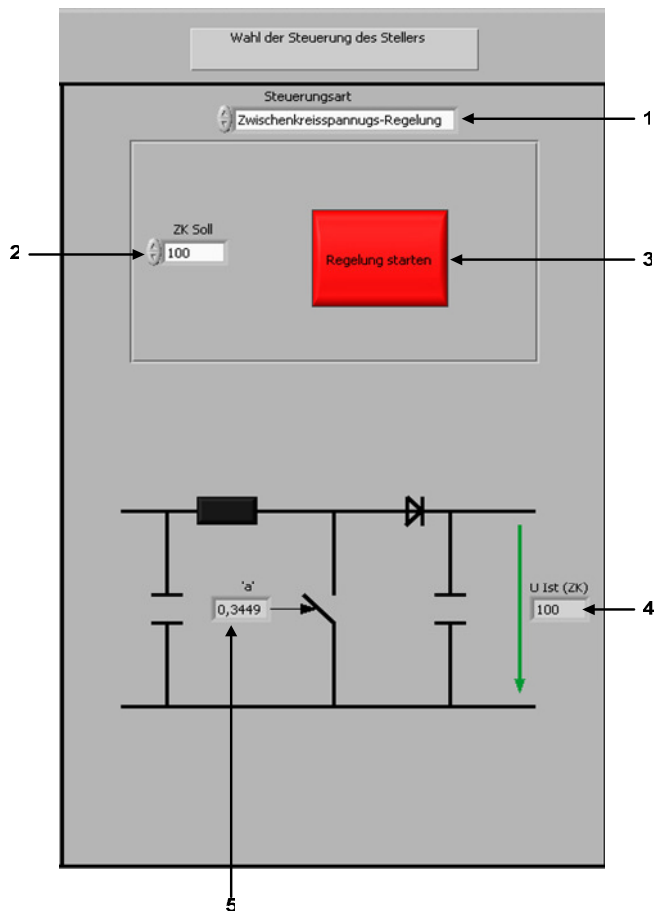


Abb. 5.3.2.4: Bedienkonsole Spannungsregelung

1. Wahl zwischen den Betriebsarten. Beim „Klicken“ mit der Maus auf die Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen.
2. Eingabe des Sollwerts der Ausgangsspannung (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)
3. Startet die Regelung der Ausgangsspannung
(Rot → Regelung ausgeschaltet)
(Grün → Regelung gestartet)
4. Anzeige der Ausgangsspannung in Volt
5. Anzeige des momentanen Tastverhältnisses am Hochsetzsteller

5.3.2.5. Auswertung

Um die Funktionalität des Reglers zu verifizieren wird, ein Sprung auf den Eingang des Anpassungswandlers gegeben und die Antwort des Systems aufgenommen.

Einstellungen:

Der Aufbau wird wie in Kapitel 3.4.1 aufgebaut

Eingangsspannung U_Q : 50V
 Abschlusswiderstand R_L : 90 Ohm

Für die Spannungsänderung wird die Eingangsspannung „ U_Q “ von 50V sprunghaft auf 60V geändert (S. Abb. 5.3.2.5).

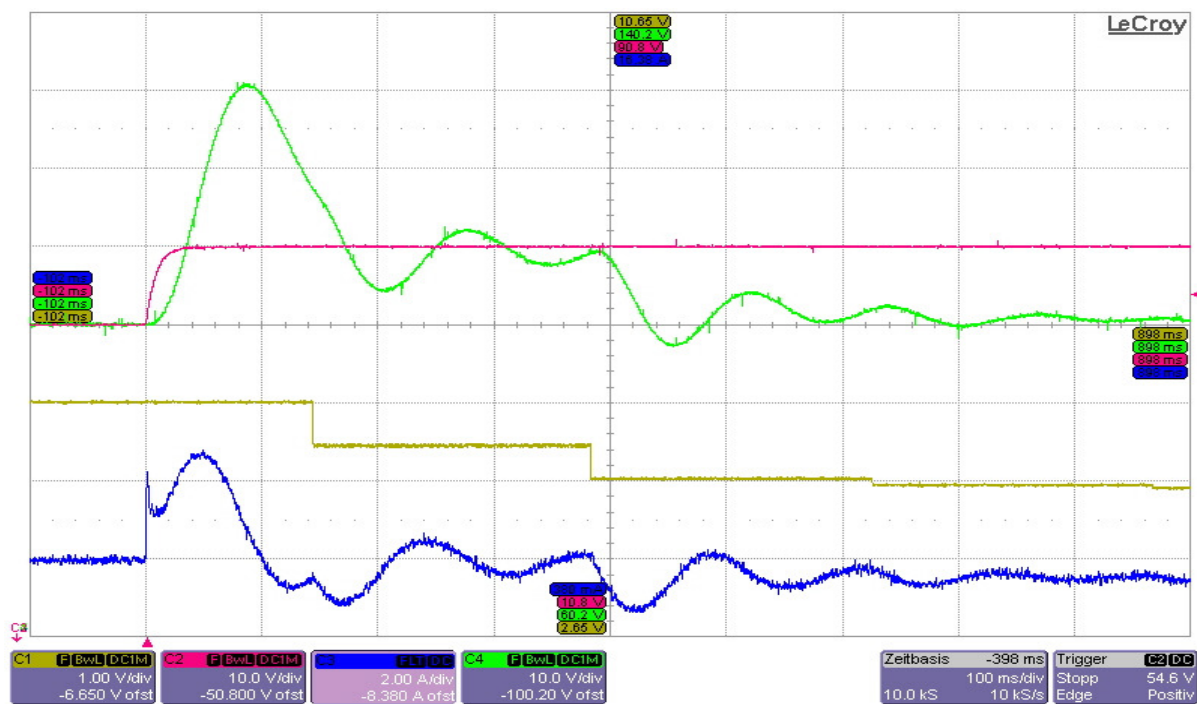


Abb. 5.3.2.5: Sprungantwort im geschlossenen Regelkreis

Kanal C1 (gelb):	Tastverhältnis „a“	1V/Div	Zeitbasis: 100ms/Div
Kanal C2 (rot):	Eingangsspannung U_Q	10V/Div	
Kanal C3 (blau):	Strom I_a	2A/Div	
Kanal C4 (grün):	Ausgangsspannung U_a	10V/Div	

Anhand von C1 „Tastverhältnis“ (gelb) ist deutlich zu erkennen, dass das System zu langsam für eine Regelung ist (kein Echtzeitsystem s. Kapitel 4). Trotzdem schafft es die Regelung, die Spannungsänderung am Ausgang innerhalb von ca. 900ms bis 1000ms auszuregulieren. Anhand der Aufnahme ist deutlich die Verzögerungszeit zu erkennen, mit der das System arbeitet (gelbes Signal).

Zwischen jeder Messung der Ausgangsspannung, Berechnung des Tastverhältnisses im PC und einer Änderung am Steuergerät vergehen ca. 220ms.

Um die Richtigkeit der Regelung zu testen wird folgender Test durchgeführt:

Der Versuchsaufbau bleibt unverändert.

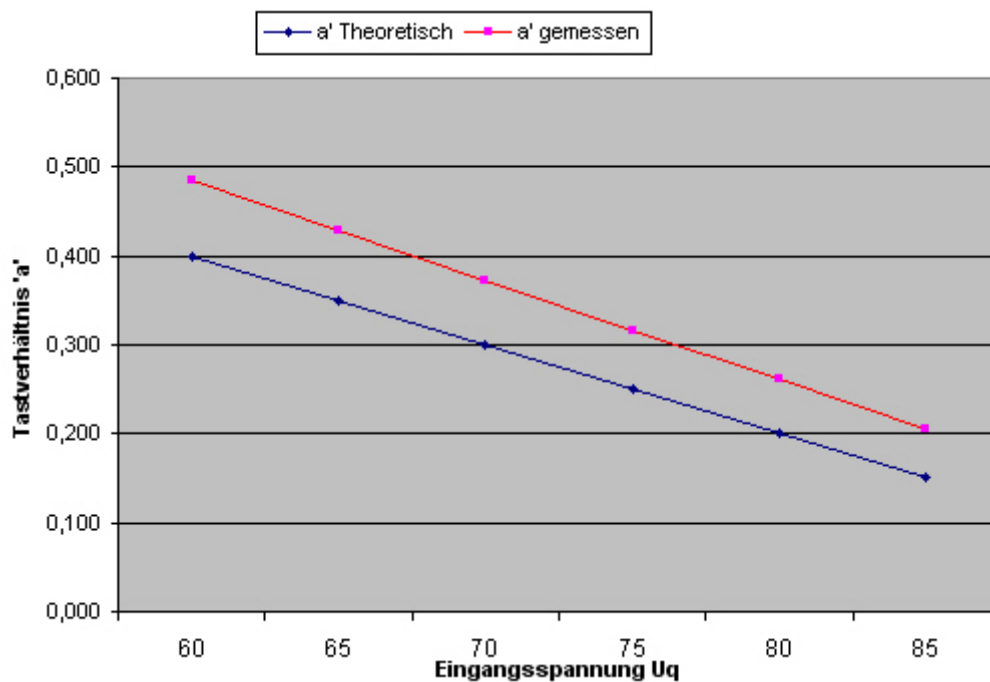
Die Eingangsspannung wird in 5V Schritten von 60V auf 85V manuell geändert.

Es wird das entsprechende Tastverhältnis theoretisch berechnet und mit dem gemessenen verglichen:

Theoretische Berechnung:

$$a = 1 - \frac{U_Q}{U_{Soll}} \rightarrow U_{Soll} = 100V$$

Eingangsspannung U_Q	a' Theoretisch	a' Gemessen
60V	0,400000	0,484000
65V	0,350000	0,428000
70V	0,300000	0,372000
75V	0,250000	0,316000
80V	0,200000	0,261000
85V	0,150000	0,206000



Die Abweichungen zur theoretischen Berechnung kann man mit der Ungenauigkeit, mit der der Modulator die gesetzten Signale umsetzt, erklärt werden.

6. Anschluss an den Wechselrichter

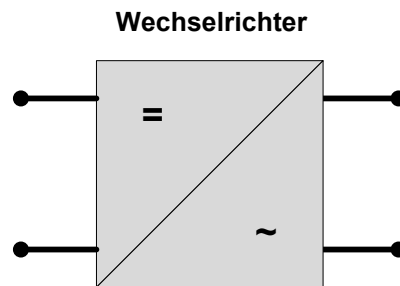


Abb. 6.a: Der Wechselrichter

In Gebieten mit einer ausgebauten öffentlichen Stromversorgung wird bei mittleren und größeren Anlagen die gewonnene Energie direkt in das Netz gespeist. Dieses geschieht, indem man die Photovoltaikanlage über einen geeigneten Wechselrichter an das Stromnetz koppelt.

In der Studienarbeit „Aufbau, Inbetriebnahme und Test eines Wechselrichters mit Leybold-Komponenten“ wurde bereits ein solcher Wechselrichter aufgebaut und steht dem Aufbau der Photovoltaik-Anlage zur Verfügung.

Der neue Aufbau (s. Kapitel 3 und 5) wird an den vorhandenen Wechselrichter angeschlossen und getestet. Da am Ausgang des Wechselrichters eine PWM Spannung erzeugt wird, muss diese durch einen geeigneten Filter geglättet werden. Abgeschlossen wird der ganze Aufbau mit einem Leistungswiderstand, der den Verbraucher simuliert (s. Abb. 6.b).

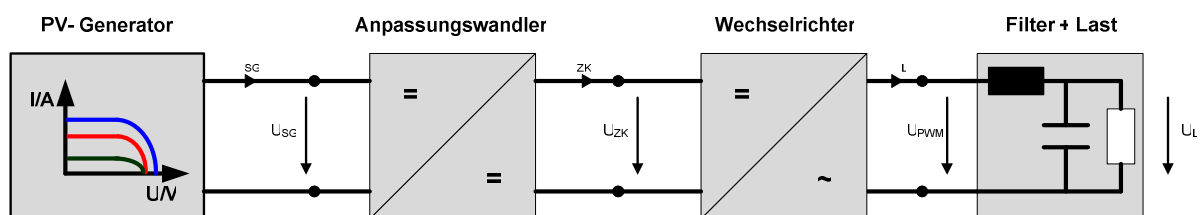


Abb. 6.b: Kette des gesamten Aufbaus

6.1. Inselbetrieb

Die einzelnen Komponenten werden wie im „Abb. 6.b“ miteinander verbunden. Der gesamte Aufbau wird als Inselbetrieb gefahren, da dieser über einen Leistungswiderstand abgeschlossen und nicht an das Stromnetz gekoppelt ist.

6.1.1. Einstellungen

Solargenerator:

Auf der Generatorseite (Kopierverstärker) kann zwischen den drei hinterlegten Kennlinien gewechselt werden. Wichtig ist dabei zu beachten, dass ausreichend Leistung für die Last zur Verfügung gestellt wird (Bedienung- s. Kapitel 3.3.6.2).

Anpassungswandler:

Der Anpassungswandler wird als Zwischenkreisspannungsregler betrieben. Die Spannung UZK wird zwischen „Hochsetzsteller“ und „Wechselrichter“ konstant gehalten (Bedienung- s. Kapitel 5.3.2.4).

Wechselrichter:

Der Wechselrichter wird ebenfalls von der Bedienkonsole aus gesteuert. Die Ausgangsspannung wird mittels eines Vorgabesignals gestellt, was von der Bedienkonsole aus gesteuert werden kann; Standard: Sinus / 50Hz (s. Kapitel 6.3).

Filter:

Beim Filter handelt es sich um ein LC-Glied. Dieses wurde mit den vorhandenen Komponenten im Labor zusammengestellt und besteht aus folgenden Werten:

Kapazität C_a :	2000 μF
Induktivität L_a :	50 mH
Abschlusswiderstand:	90 Ω

Ein detaillierter Aufbau der Schaltung ist im Anhang zu finden

6.1.2. Steuerverfahren

Bei der Steuerung des Wechselrichters geht es darum, die Ausgangsspannung U_{List} möglichst genau einem vorgegebenen Sollwert U_{LSoll} folgen zu lassen (s. Abb. 6.1.2).

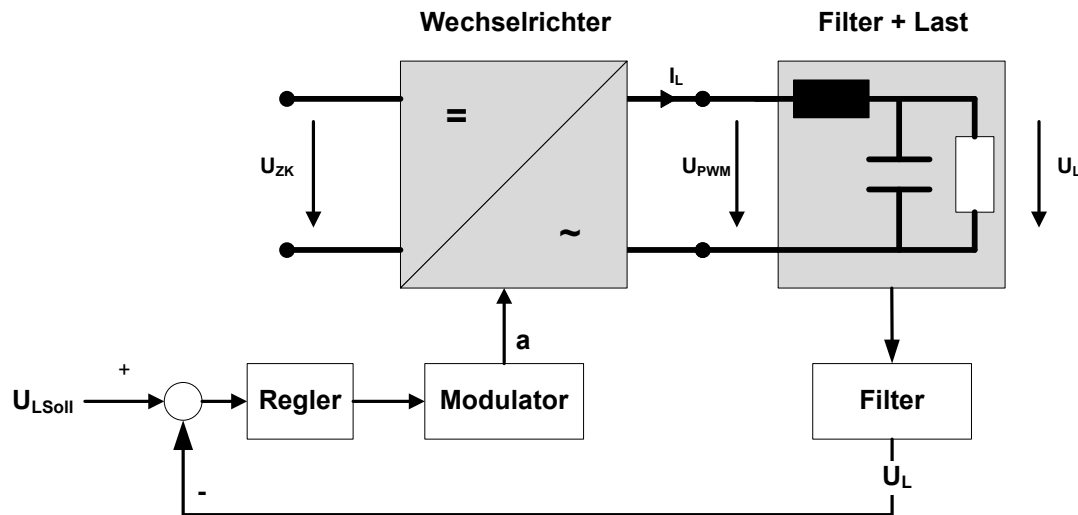


Abb. 6.1.2: Steuerverfahren des Wechselrichters

Wegen der Form von U_{PWM} erfolgt die Erfassung der Ausgangsspannung U_{List} über dessen kurzzeitigen Mittelwert \bar{U}_{List} . Der kurzzeitige Mittelwert entspricht annäherungsweise der Grundschwingung der gemessenen Größe, da über ein vollständiges Taktintervall gemittelt wird.

$$\bar{U}_{List} = \frac{1}{T_{Tackt}} \int_{t - \frac{T_{Tackt}}{2}}^{t + \frac{T_{Tackt}}{2}} U_{List}(\tau) d\tau$$

Bei einer Taktfrequenz von 10Khz entspricht das einem Zeitraum von 100 μ s für die Ermittlung von \bar{U}_{List} [8].

Dies ist aufgrund der langsamen Messdatenerfassungskarte „NI 6229“ von National Instruments“ nicht möglich (s. Kapitel 4).

6.1.3. Dimensionierung

Wird die Brücke mit einem Steuersignal, z.B. einem Sinus-Signal mit einer Frequenz von 50Hz, betrieben, entsteht an der Induktivität eine Impedanz, die sich wie folgt berechnen lässt:

$$Z_L = \omega L = 2 * \pi * f * L \quad \rightarrow \quad Z_L = 2 * \pi * 50Hz * 50mH$$
$$Z_L = 15,708\Omega$$

Aufgrund der Größe der Drossel entsteht über dieser ein Spannungsabfall und somit unerwünschte Verluste am Wechselrichter. Um dieses zu vermeiden, besteht die Möglichkeit die Drossel wie folgt zu dimensionieren:

Nach „VDE 160 5.3.1, soll der Spannungsabfall an der „Netzdrossel“ U_K (minimale Kurzschlussspannung) 4% betragen.

Die minimale Kurzschlussspannung U_K lässt sich wie folgt berechnen:

$$\frac{U_K}{U_{Netz}} = 4\% \quad \rightarrow \quad U_K = \frac{4}{100} * U_{Netz} = \frac{4}{100} * 230V = 9,2V$$

Für die Drossel gilt:

$$XL = \omega * L = 2 * \pi * f_{Netz} * L$$

Für einphasige Netzdrosseln:

$$U_K = I_N * X_L$$

Daraus folgt:

$$\frac{U_K}{I_N} = 2 * \pi * f * L \quad \rightarrow \quad L = \frac{U_K}{I_N} * \frac{1}{2 * \pi * f}$$

$$L = \frac{9,2V}{16A} * \frac{1}{2 * \pi * 50Hz} = 1,83mH$$

6.2. Netzstromregelung

Das Ziel der Netzstromregelung besteht darin, einen zur Netzspannung synchron laufenden Strom zu erzeugen um eine Einspeisung in das Stromnetz zu ermöglichen. Die Regelung des Stromes wird anhand von Abb. 5.2 erläutert.

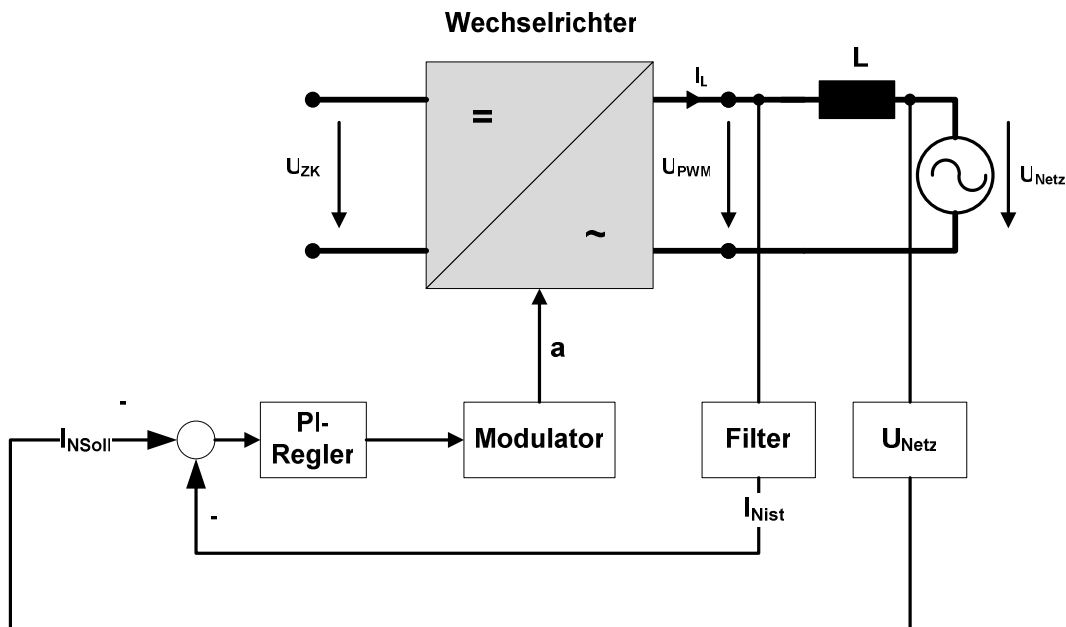


Abb.6.2: Netzstromregelung

Um den Strom synchron zur Netzspannung laufen zu lassen, muss der Momentanwert von U_{Netz} erfasst werden. Gleichzeitig wird der Momentanwert des erzeugten Stromes I_{Netz} gemessen. Beide gemessenen Momentanwerte werden miteinander verglichen und an einen PI-Regler weitergegeben. So wird eine Abweichung der erzeugten Stromkurve von der Netzspannung nachgeregelt, indem der PI-Regler das Tastverhältnis „a“ nach der Netzspannung nachregelt [8].

Die Netzstromregelung ist in dem Versuchsaufbau im Rahmen der Diplomarbeit nicht möglich, da die Messdatenerfassung des Messgerätes „NI 6229“ zu langsam erfolgt. Um eine Netzstromregelung realisieren zu können, muss ein „Echtzeitsystem“ eingesetzt werden (s. Kapitel 4.1).

6.3. Bedienoberflächen

Für die Steuerung des Wechselrichters wird der rechte Teil der Konsole verwendet.

Betrieb als Gleichstromsteller:

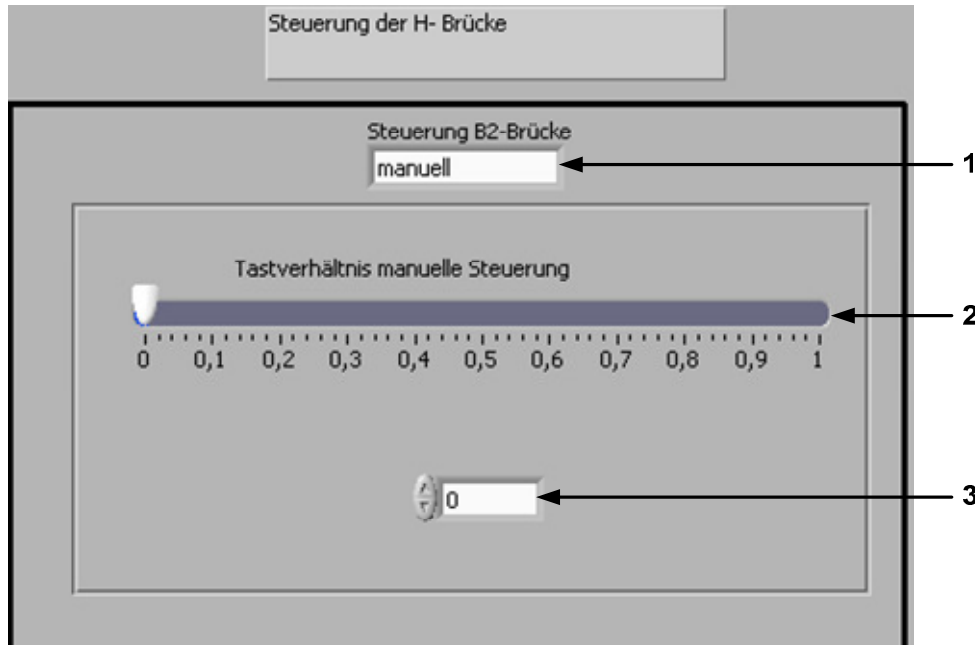


Abb. 6.3.a: Bedienoberfläche, Betrieb als Gleichstromsteller

1. Wahl zwischen den Betriebsarten: Beim „Klicken“ mit der Maus auf die Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen.
2. Schieberegler zur Änderung des Tastverhältnisses. Punkt 2 und 3 beeinflussen sich gegenseitig.
3. Eingabe des zu setzenden Tastverhältnisses (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)

Betrieb als Wechselstromsteller:

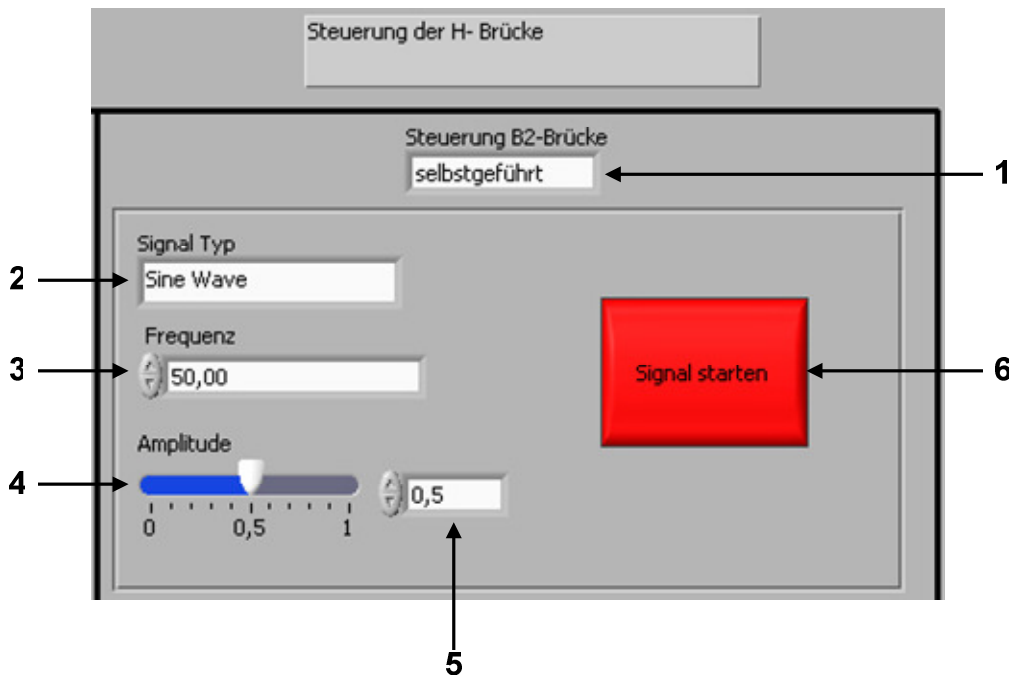


Abb. 6.3.b: Bedienoberfläche, Betrieb als Wechselstromsteller

1. Wahl zwischen den Betriebsarten: Beim „Klicken“ mit der Maus auf der Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen („selbstgeführt“).
2. Auswahl der zu erzeugenden Kurvenform. Beim „Klicken“ mit der Maus auf der Oberfläche erscheinen die Wahl- Optionen.
3. Eingabe der Frequenz des Steuersignals (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)
4. Schieberegler zur Änderung der Amplitude des Steuersignals Punkt 4 und 5 beeinflussen sich gegenseitig.
5. Eingabe der zu setzende Amplitude des Steuersignals (Eingabe durch Tastatur oder die Inkrement / Dekrement Pfeile)
6. Starten des Steuersignals
(Rot → Regelung ausgeschaltet)
(Grün → Regelung gestartet)

7. Zusammenfassung

Das Ziel, eine Photovoltaikanlage für die Ausbildung zukünftiger Ingenieure/innen in ihrer Grundkonfiguration zu entwickeln, aufzubauen und zu testen, wurde mit dem Abschluss der Diplomarbeit erreicht. Dieser Aufbau ist in seiner Grundkonfiguration erstellt und in Betrieb genommen worden und kann nach Bedarf in seiner Hard- und Software modifiziert werden.

Der Aufbau an sich bietet die Möglichkeit, einen Einblick in das Thema der Photovoltaik und Wissen über die Grundlagen dieser Methode der Energiegewinnung zu erlangen. Durch die Dokumentation der gesamten Arbeit ist die Flexibilität gegeben, den Versuchsaufbau variieren und je nach Wunsch und Bedarf erweitern zu können.

Diese Arbeit hat selbstverständlich auch mir persönlich geholfen, mich in dem Bereich der Photovoltaik so zu vertiefen, dass ich auch dieses Wissen zukünftig weiterhin umsetzen und erweitern kann.

Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.srt.tu-darmstadt.de/fileadmin/general/publicat/heag.pdf>
- [2] http://www.et-inf.fho-emden.de/~elmalab/PV_Solar/download/PV_Solar_3.pdf
- [3] Taschenbuch der Elektrotechnik, Kories / Schmidt-Walter, ISBN 978-3-8171-1830-4
- [4] Schaltnetzteile in der Praxis, Otmar Kilgenstein, ISBN 3-8023-0727-5
- [5] Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure, F. Tröster, ISBN 3-486-25044-2
- [6] Taschenbuch der Regelungstechnik, Lutz Wendt, ISBN 3-8171-1705-1
- [7] Regelungstechnik 1, G.Schulz, ISBN 3-486-27378-7
- [8] Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter, Felix Jenni / Dieter Wüest, ISBN 3-7281-2141
- [9] Photovoltaische Anlagen, DGS
- [10] Einführung in LabView, Wolfgang Georgi / Ergun Metin, ISBN 3-446-40899-9
- [11] <http://www.voltwerk.de/Strangwechselrichter.5.0.html?&L=1>
- [12] <http://bayern-innovativ.de/ib/site/documents/media/7023c9be-d3ca-90cd-1f35-3556519e0d7c.pdf/05mueller-vortrag-cluster-v1.pdf>
- [13] http://www.lti.uni-karlsruhe.de/rd_download/Solarenergie_2008014_Photovoltaische_Systeme_III.pdf

Anhang

Die folgenden Anhänge befinden sich am Ende der Diplomarbeit sowie in digitaler Form auf der beigelegten CD:

[1] Aufbau der verwendeten Schaltungen

[2] Anleitung der Versuche und Musterprotokoll

[3] Datenblatt Sunpower 220

[4] Beschreibung der erstellten Programme

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift