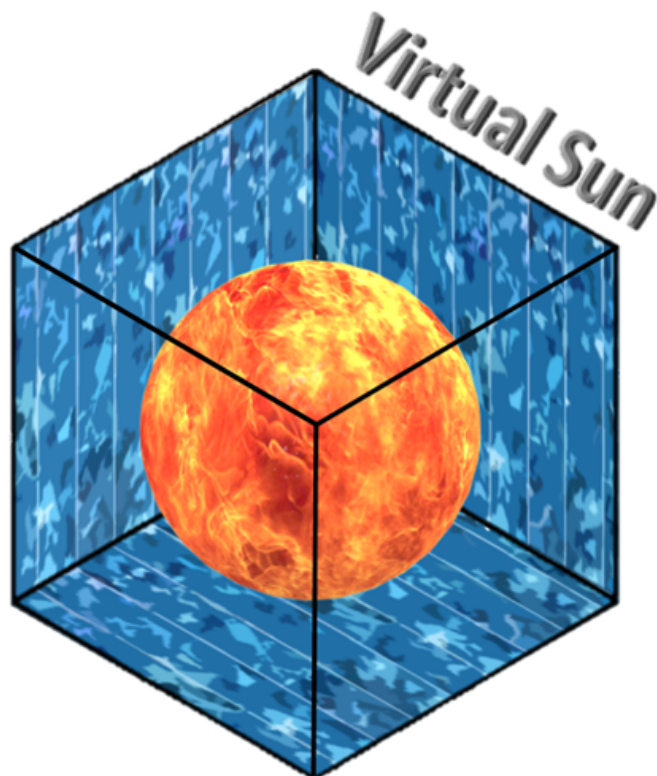


Fachbericht Virtual Sun

HS15 Pro3E Team 3

Windisch, 23. November 2015



AUFTRAGGEBER:	HANS GYSIN
BETREUER:	MATTHIAS MEIER (CONTROLLERPROGRAMMIERUNG) PETER GANZMANN (ANALOGTECHNIK) BONNIE DOMENGHINO (ENGLISCH) ANITA GERTISER (KOMMUNIKATION)
GRUPPE:	HS15 PRO3E TEAM 3
TEAMMITGLIEDER:	SIMONETTA STURM (PROJEKTLIMITERIN) YANICK FREI (DA KING IN DA HOUSE) CLAUDIUS JÖRG (SEÑOR LÖTCHOLBE)
STUDIENGANG:	ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

Auftrag / Lastenheft

Windisch, 17.9.15

PV-Modul Simulator

Anlass:

Für das Projekt P4 im nächsten Semester ist die Entwicklung eines Überwachungsgerätes für Photovoltaik-Module (PV-Module) vorgesehen. Um dieses Überwachungsgerät im Labor testen zu können, soll in diesem Semester als P3 Arbeit ein PV-Modul Simulator entwickelt und als Laborgerät aufgebaut werden. Dieser Simulator dient als Labor-Netzgerät mit der Charakteristik eines PV-Moduls und muss die unten aufgeführten Eigenschaften (Anforderungen) aufweisen.

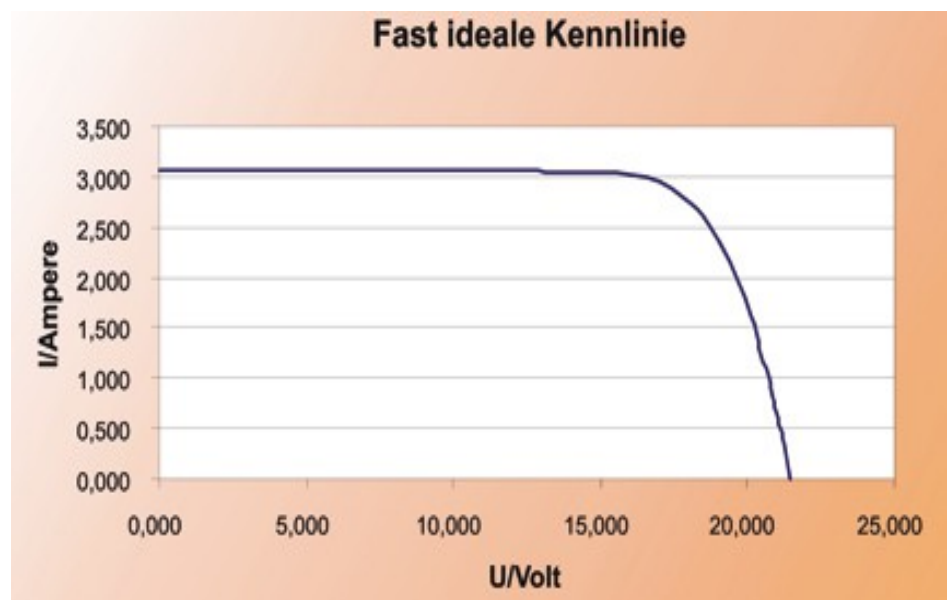
Aufgabe:

Sie sollen ein kompaktes Gerät herstellen, welches im Labor als Speise- bzw. Testgerät eingesetzt werden kann und die Eigenschaften eines PV-Moduls aufweist. Wie bei einer Photovoltaik-Anlage, bei der mehrere Module in Serie zu einem String zusammengeschaltet werden, soll auch Ihr Gerät mit den Geräten anderer Gruppen in Serie geschaltet werden können und so eine ganze PV-Anlage bzw. einen String einer Anlage simulieren können.

Anforderungen:

- Standard-Elektronik für den Betrieb in Laborumgebung, kompaktes "Laborgehäuse"
- Komponentenkosten max. ca. CHF 200.-
- Betrieb ab Netz mit einem käuflichen Speisegerät (eingebaut oder als Kabelnetzgerät) für die Realisierung der Zwischenkreis-DC-Spannung
- Anschluss der Last über zwei Laborbuchsen (+/-) in der Front des Gerätes
- Bedien- und Anzeigeelemente sind "frei" definier- bzw. realisierbar
- Kennlinie in Microcontroller einprogrammiert
- Funktionsprinzip als Schaltregler (keine Längswiderstände / keine unnötigen Verluste)
- Kennlinie des PV-Moduls nebenan ist zu realisieren.

Die Graphik zeigt die Kennlinie bei einer Einstrahlung von 100%.
(Der Kurzschlussstrom ist ca. proportional zur Einstrahlung)



- Die Einstrahlung muss von ca. 20% bis 100% einstellbar sein
- Die Genauigkeit von Strom und Spannung (Rippel) sollte besser +/- 5% sein
- Serieschaltung mit weiteren Geräten muss möglich sein (keine Potenzialbindungen)
- Wirkungsgrad und Kennlinie des Gerätes müssen gemessen und dokumentiert werden.

Wunschziele:

- Kennlinien eines verschmutzten und eines teilabgeschatteten Moduls einprogrammiert
- Kennlinien eines defekten (Zellendefekt) Moduls einprogrammiert

Viel Erfolg ! Auftraggeber: Hans Gysin Fachcoaches: Matthias Meier und Peter Ganzmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Solarzellen	3
2.2	Mathematik	4
2.2.1	Berechnung der Solarzellenkennlinie	4
2.2.2	Anpassung der Kennlinie bei verschiedenen Bestrahlungsstärken	4
3	Hardware	6
3.1	Controller	6
3.2	Messschaltung	7
3.2.1	Spannungsmessung	7
3.2.2	Strommessung	8
3.3	Regler	10
3.4	Bedienung	11
4	Software	12
4.1	Regelung	12
4.2	Bedienung	13
5	Validierung	14
5.1	Hardware	14
5.2	Software	15
6	Schlusswort	16
A	Verifizierung Messaufbau	17
A.1	Spannungsmessung	17
A.2	Strommessung	17

1 Einleitung

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Solarzellen

2.2 Mathematik

2.2.1 Berechnung der Solarzellenkennlinie

Gemäss [?] lässt sich die Kennlinie der Solarzelle aus folgenden Parametern berechnen:

$$I_{SC} = 3.09A$$

$$U_{OC} = 22.0V$$

$$I_{Pmax} = 2.90A$$

$$U_{Pmax} = 18.0V$$

Mit diesen Werten können die weiteren Parameter M (Steigung im Leerlaufpunkt), R_{Pv} (Solarzellenwiderstand), U_T (Temperaturspannung) I_0 (Sperrstrom) und I_{Ph} (Photostrom) berechnet werden:

$$M = \frac{U_{OC}}{I_{SC}} \cdot \left(-5.411 \cdot \frac{I_{Pmax} \cdot U_{Pmax}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} + 6.450 \cdot \frac{U_{Pmax}}{U_{OC}} + 3.417 \cdot \frac{I_{Pmax}}{I_{SC}} - 4.422 \right) \quad (1)$$

$$= -0.6607$$

$$R_{Pv} = -M \cdot \frac{I_{SC}}{I_{Pmax}} + \frac{U_{Pmax}}{I_{Pmax}} \cdot \left(1 - \frac{I_{SC}}{I_{Pmax}} \right) = 0.2973\Omega \quad (2)$$

$$U_T = -(M + R_{Pv}) \cdot I_{SC} = 1.1228V \quad (3)$$

$$I_0 = I_{SC} \cdot e^{\frac{U_{OC}}{U_T}} = 9.5637nA \quad (4)$$

$$I_{Ph} = I_{SC} = 3.09A \quad (5)$$

Mit den Werten von (1) bis (5) kann nun mit folgender Formel die Kennlinie der Solarzelle berechnet werden:

$$U(I) = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_{Ph} - I + I_0}{I_0} \right) - I \cdot R_{Pv} \quad (6)$$

Die Kennlinie, welche in Abbildung 1 dargestellt ist, wurde aus (6) mittels Matlab erzeugt. Dazu wurde die Spannung U auf die x-Achse und der Strom I auf die y-Achse aufgetragen. Abbildung 2 zeigt zum Vergleich die vom Auftraggeber geforderte Kennlinie. Da zwischen den beiden Kennlinien keine Unterschiede bemerkbar sind, wird (6) als gültig betrachtet.

2.2.2 Anpassung der Kennlinie bei verschiedenen Bestrahlungsstärken

Gemäss dem Lastenheft soll es ausserdem möglich sein, die Bestrahlungsstärke in einem Wertebereich von 20% bis 100% einstellen zu können. Bei Abnahme der Bestrahlung verschiebt sich die Kennlinie nach unten, sodass der Stromwert folgendermassen angepasst werden muss:

$$I_{neu} = I + \frac{100 - [\text{Bestrahlungsstärke in Prozent}]}{100} \cdot I_{SC} \quad (7)$$

Beispielhaft wurden mittels Matlab zwei zusätzliche Kennlinien für 60% und 20% dargestellt, zu sehen in Abbildung 3. Die beiden Kennlinien bei verringerter Bestrahlungsstärke verhalten sich bei $I_{neu} > I_{SC}$ unerwünscht, im Programm selbst wird dies jedoch mittels einer if-Prüfung verhindert.

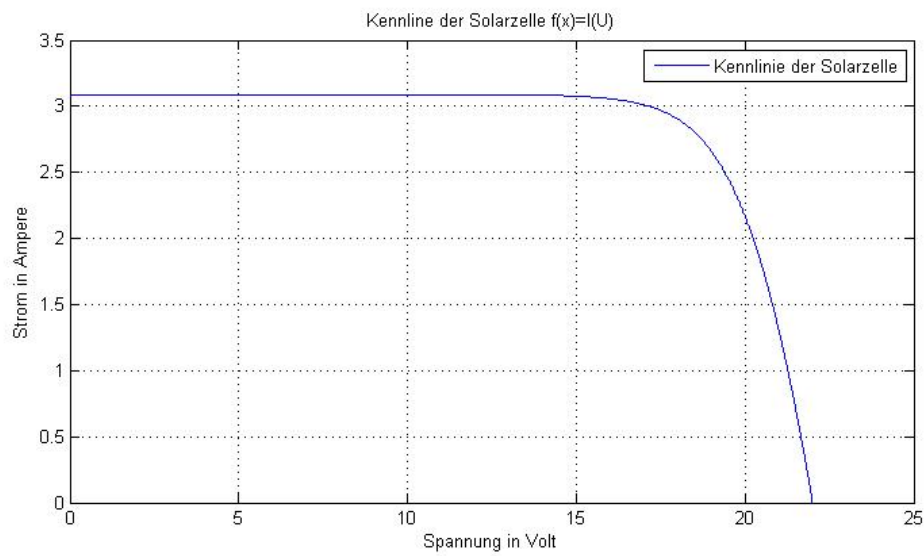


Abbildung 1: Die Kennlinie, welche mittels der Formeln ermittelt wurde.

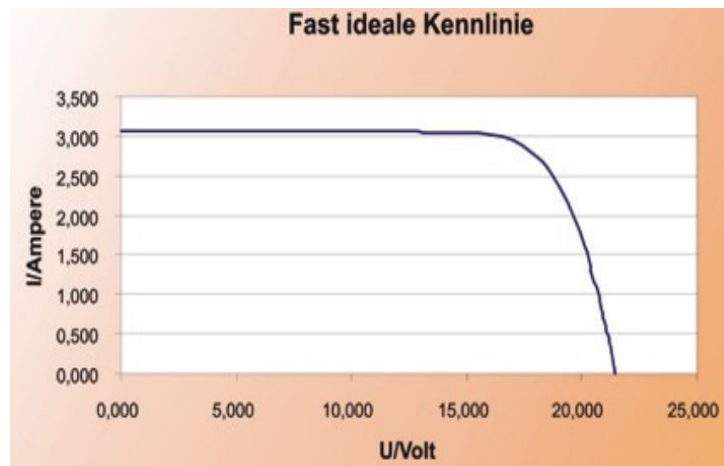


Abbildung 2: Die Kennlinie, welche mittels der Formeln ermittelt wurde.

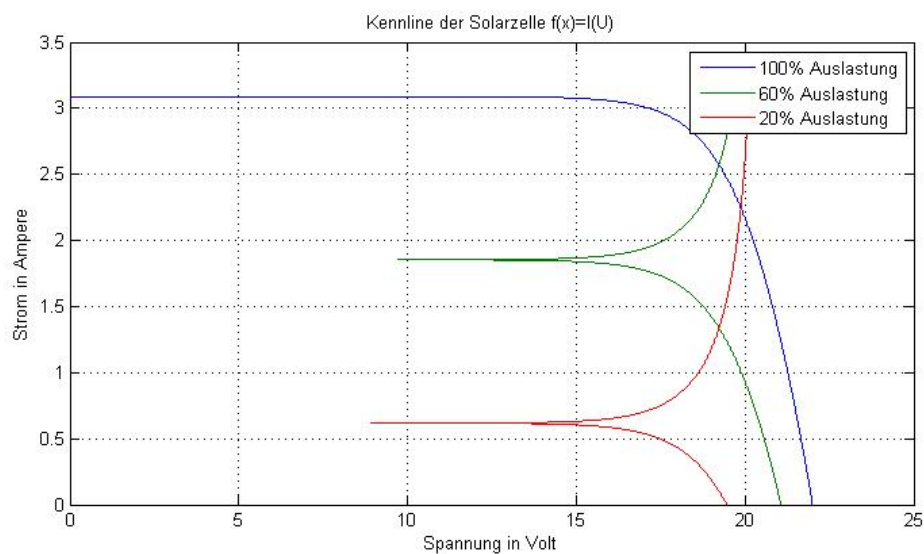


Abbildung 3: Verhalten der Kennlinie bei verschiedenen Bestrahlungsstärken.

3 Hardware

3.1 Controller

3.2 Messschaltung

Um die Ausgangskennlinie regeln zu können, müssen die Ausgangsgrößen Spannung (in der Software als *istU* bezeichnet) und Strom (in der Software als *istI* bezeichnet) bekannt sein. Die Eingänge des Mikrocontrollers können aber nur Spannungen im Bereich zwischen 0V und 5V mit einer Genauigkeit von 10bit messen. Folglich wird eine Schaltung benötigt, welchen den Spannungsbereich 0V bis 24V und den Strombereich 0A bis 3.5A jeweils auf den Spannungsbereich zwischen 0V und 5V anpassen. Im folgenden Abschnitt wird genauer auf diese Schaltung eingegangen, welche in Abbildung 4 dargestellt ist.

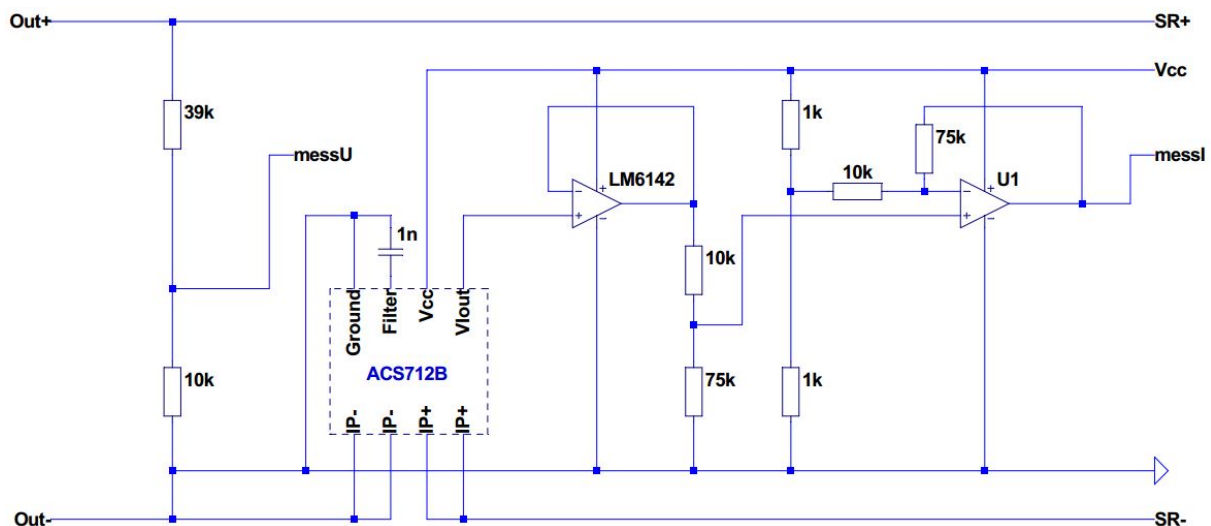


Abbildung 4: Die komplette Messschaltung.

3.2.1 Spannungsmessung

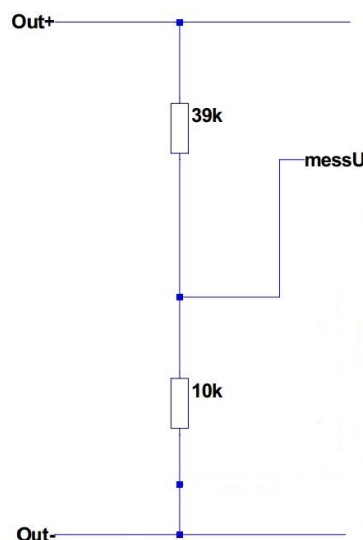


Abbildung 5: Die Messschaltung zur Spannungsmessung.

Um die Spannung am Ausgang messen zu können, wird ein Spannungsteiler benötigt. Im einfachsten Fall kann ein Spannungsteiler aus zwei Widerständen bestehen, Abbildung 5 zeigt diesen Spannungsteiler.

Die Spannung $messU$ berechnet sich nach folgender Formel:

$$messU = \frac{\Delta U \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{([Out+] - [Out-]) \cdot 10k\Omega}{39k\Omega + 10k\Omega} \quad (8)$$

Die beiden Widerstände sollten dabei folgende Bedingungen erfüllen:

- Da innerhalb der Messschaltung selbst eine Spannung abfallen kann ist es wichtig, die Spannungsmessung möglichst nahe am Ausgang vorzunehmen.
- Um bei 24V Ausgangsspannung am Ausgang des Spannungsteiler 5V zu erhalten, sollte das Verhältnis der Widerstände ungefähr $\frac{R_1}{R_2} = 3.8$ betragen.
- Die Widerstände sollten nicht zu klein dimensioniert werden, um die Schaltung nicht zu belasten.
- Die Widerstände sollten nicht zu gross dimensioniert werden, sodass der Eingang des Mikrocontrollers die Messung nicht verfälscht.

Aus diesem Grund wurde $R_1 = 39k\Omega$ und $R_2 = 10k\Omega$ gewählt. Damit die Messung reproduzierbar gestaltet werden kann, wurden Metallschichtwiderstände mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ verwendet. Die Genauigkeit der Schaltung wurde ausserdem mit einer Messreihe [Verweis auf Anhang](#) verifiziert.

3.2.2 Strommessung

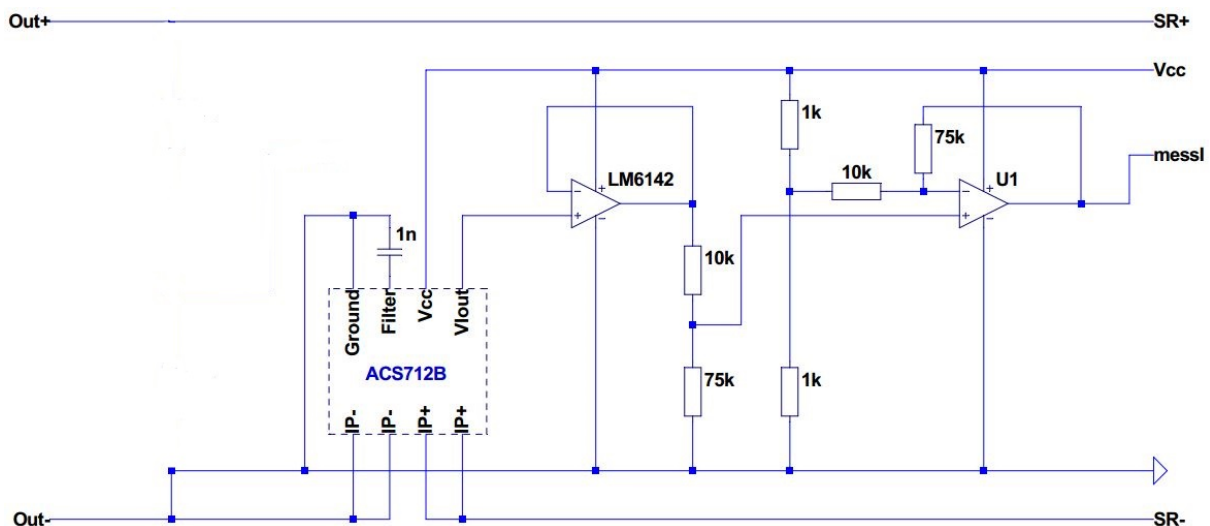


Abbildung 6: Die Messschaltung zur Strommessung.

Die Messung des Stromes wird oftmals mit einem Shuntwiderstand bestimmt, über dem der Spannungsabfall gemessen wird. Da dies jedoch zwangsläufig mit Verlusten verbunden ist und ausserdem die Ausgangsspannung abhängig vom Strom verfälscht, wurde ein Hallensensor gewählt, der diese Nachteile nicht besitzt. Hallensoren liefern eine Ausgangsspannung, die proportional zum Produkt aus magnetischer Feldstärke und Strom ist. Da die magnetische Feldstärke konstant ist, ist die Ausgangsspannung proportional zum Strom.

Der ACS712B von Allegro MicroSystems besitzt eine Sensitivität von 185mV/A sowie einen Spannungsoffset von $V_{cc}/2$. Diese Spannung wird, da der Ausgangswiderstand des ACS712B mit mindestens 4.7kΩ eher hoch ist, zuerst in einer Impedanzwandlerschaltung mit einem Operationsverstärker niederohmig gemacht. Bei einem Strombereich von 0A bis 3.5A wird dabei lediglich ein Spannungsbereich von 2.5V bis 3.15V ausgenutzt. Aus diesem Grund wird die Ausgangsspannung des ACS712B zuerst mit einer Subtraktionsschaltung vom Offset bereinigt, wodurch ein Spannungsbereich von 0V bis 0.65V entsteht. Anschliessend wird diese Spannung um den Faktor 7.5 verstärkt, sodass der Spannungsbereich des

Einganges des Mikrocontrollers voll ausgenutzt werden kann. Das Bereinigen vom Offset und die Spannungsverstärkung kann mit einem einzigen Operationsverstärker umgesetzt werden. Die Widerstandswerte sollten dabei nicht zu klein sein, damit die Ausgänge nicht zu sehr von den Widerständen belastet werden. Die Widerstandswerte sollten aber auch nicht zu gross sein, sodass die Schaltung genügend Strom für die Eingänge der Operationsverstärker beziehungsweise des Mikrocontrollers liefern kann. Die theoretischen Grundlagen zu den Operationsverstärkerschaltungen können in [?] nachgelesen werden.

Für diese Anpassung des Messresultates werden zwei Operationsverstärker benötigt. Die Auswahl des Operationsverstärkers erfolge nach folgenden Kriterien:

- Nach Möglichkeit sollten beide Operationsverstärker in einem Gehäuse verbaut sein.
- Der Operationsverstärker sollte mit einer einseitigen Speisung von 5V betrieben werden können.
- Die Ausgangsspannung des Operationsverstärker sollte den kompletten Bereich von 0V bis 5V ausnützen können, aus diesem Grund sollte ein Rail-To-Rail Design verwendet werden.

Aus diesen Gründen wurde das Modell LM6142BIN von National Semiconductor gewählt. Die Genauigkeit der Schaltung wurde ausserdem mit einer Messreihe **Verweis auf Anhang** verifiziert.

3.3 Regler

3.4 Bedienung

4 Software

4.1 Regelung

Die Software zur Regelung beinhaltet zwei Integer-Arrays, *sauber*[] und *verschmutzt*[], welche mittels der Headerdatei *LookUpTable.h* geladen werden. In diesen beiden Arrays sind die Spannungswerte in Millivolt für die saubere und die schmutzige Solarzelle hinterlegt, jeweils ein Wert alle 10 Milliampere. Der Index entspricht dabei dem jeweiligen Stromwert geteilt durch 10.

Die Werte dazu wurden mittels eines Matlab-Files erstellt, das im Anhang angehängt ist. Die Werte entsprechen dabei der in Formel (6) berechneten Kennlinie.

Im Programm selbst gibt es die Integer *prozent*, welche die aktuelle Bestrahlungsstärke darstellt, und *regelwert*, welcher angibt, wie stark der Regler korrigieren soll.

In der Funktion *main* existieren ausserdem die Integer *messU* für die gemessene Spannung am Spannungsteiler, *istU* für die berechnete Ausgangsspannung, *sollU* für den zum Stromwert passenden Spannungswert, *messI* für die gemessene Spannung am Eingang des Controllers für die Strommessung und *istI*, worin der berechnete Ausgangsstrom gespeichert ist. Sämtliche Variablen repräsentieren dabei die Werte in Millivolt bzw. Milliampere.

Zur Realisierung der Umschaltung zwischen *sauber* und *verschmutzt* ist ausserdem noch der Integer *modus* vorhanden. Dieser kann die beiden Zustände *MODUSSAUBER* (entsprechend einer 1) und *MODUSVERSCHMUTZT* (entsprechend einer 0) annehmen.

Die Routine zur Regelung wird mittels einem Vergleich ausgeführt, welcher sich alle 1ms (eventuell nachträglich anpassen) wiederholt. Dabei werden zuerst aus den gemessenen Werten *messU* und *messI* die aktuellen Werte am Ausgang des Gerätes *istU* und *istI* berechnet.

Anschliessend wird der Wert *istI* mit der Beleuchtungsstärke *prozent* verrechnet, um die Kennlinie entsprechend zu verschieben. Wie das genau funktioniert ist im Kapitel [Verweis auf Matheteil](#) ausführlich beschrieben.

Der so erhaltene Wert muss nun auf dem Wertebereich der *LookUpTable.h* abgeglichen werden. Dazu werden zu grosse oder zu kleine Werte auf den Maximal- beziehungsweise Minimalwert korrigiert und anschliessend die Genauigkeit auf 10 Milliampere angepasst.

Das Programm prüft nun, ob in der Variabel *modus* der Wert *SAUBER* oder *VERSCHMUTZT* hinterlegt ist. Je nachdem welcher Modus gewählt ist wird der Referenzwert für *sollU* aus dem Array *sauber*[] oder *verschmutzt*[] geladen. Die Indexposition entspricht dabei dem oben angepassten Wert des Stromes *istI*. Der Spannungswert von *sollU* entspricht nun der Spannung, welche bei diesem Strom gemäss der Formel (6) auftreten sollte.

Der aktuelle Spannungswert am Ausgang *istU* wird nun mit dem Referenzwert *sollU* verglichen. Falls *istU* grösser als *sollU* ist, wird *regelwert* negativ. Um die Regelung genauer zu gestalten, sind für *regelwert* zwei mögliche negative Werte möglich: -1 für ein langsames verringern der Spannung und -2 für ein schnelles verringern der Spannung. Zu diesem Zweck wird ein neuer Integer *differenz* erstellt, welcher die Differenz zwischen *istU* und *sollU* beinhaltet. Falls diese Differenz grösser als 200 Millivolt ist, wird die Spannung schnell verringert, also wird für *regelwert* der Wert -2 gesetzt. Falls dies nicht der Fall ist, wird für *regelwert* der Wert -1 gesetzt.

Falls *sollU* grösser als *istU* ist, wird für *regelwert* ein positiver Wert gesetzt, der ebenfalls zwei Abstufungen kennt. Dies funktioniert jedoch gleich wie bei negativen Werten von *regelwert*.

Falls *sollU* und *istU* den selben Wert haben wird für *regelwert* eine 0 gesetzt. Das bedeutet, dass der Regler selbst nicht verändert werden soll.

Ergänzen um Teil zur Ansteuerung des Reglers (Sturm)

4.2 Bedienung

5 Validierung

5.1 Hardware

5.2 Software

6 Schlusswort

A Verifizierung Messaufbau

A.1 Spannungsmessung

Die Spannung wird mittels eines Spannungsteilers aus zwei Widerstände bemessen. Die Toleranz beider Widerstände beträgt $\pm 1\%$, im schlechtesten Fall ist ein Widerstand am oberen Ende der Toleranz, der andere am unteren Ende (beispielsweise $39.39k\Omega$ und $9.9k\Omega$ anstelle von $39k\Omega$ und $10k\Omega$). Der maximal mögliche Fehler beträgt damit 2.02% .

Um diesen Fehler auszuschliessen, wurde die Spannung am Ausgang des Spannungsteilers bei der grössten und der kleinsten möglichen Ausgangsspannung gemessen und die Differenz als $+101.8mV$ pro $0.5V$ Ausgangsspannungserhöhung bestimmt. Mit den in Tabelle 1 folgenden Messreihe wurde die Genauigkeit dieser Schaltung verifiziert. Die Werte über $14.0V$ dienen dabei nur noch zur Kontrolle, ob die Genauigkeit auch bei höheren Spannungen noch vorhanden ist. Die Fehler sind sehr klein und gleichen sich zumeist aus. Ausserdem sind die Fehler jeweils deutlich kleiner als die Auflösung des AD-Wandlers des Mikrocontrollers. Die Ausgangsspannung beträgt gemäss obiger Messreihe: $U = messU \cdot 4.912$

$$U = \text{Messwert} \cdot 4.912 \quad (9)$$

Für die Software, in welcher alle Werte in Millivolt betrachtet werden, wird $istU$ mit Formel 9 folgendermassen bestimmt:

$$istU = messU \cdot \frac{614}{125} \quad (10)$$

A.2 Strommessung

Die Strommessung beinhaltet Widerstände, Operationsverstärker sowie einen Hallsensor, die allesamt Toleranzen unterworfen sind. Am kritischsten ist dabei sicherlich der Spannungsteiler aus $2 \times 1k\Omega$, der für die Subtraktionsschaltung benötigt wird. Bei einer Toleranz von 1% kann die Spannung dabei $2.5V \pm 50.5mV$ betragen. Diese Spannungsdifferenz wird jedoch ebenfalls um den Faktor 7.5 verstärkt, wodurch der maximale Fehler bereits $378.8mV$ beträgt, was bei 10bit Auflösung des AD-Wandlers durchaus relevant ist.

Aus diesem Grund wurde eine Messreihe durchgeführt. Dabei wurde die Spannung am Ausgang der Messschaltung zuerst bei minimalem und anschliessend bei maximalem Strom der verfügbaren Stromquelle gemessen. Pro $0.1A$ mehr Ausgangsstrom sollte die Spannung $messI$ gemäss dieser Messung um $141mV$ zunehmen, ausserdem ist ein Offset von $247mV$ vorhanden. Diese Werte wurden bis zu einem Maximalstrom von $2.8A$ in Tabelle 2 ermittelt. Die Fehler sind ungefähr gleichmässig verteilt und können mit der Ungenauigkeit der verwendeten Stromquelle erklärt werden. Jedoch sind sie deutlich grösser als beim Spannungsteiler, jedoch noch weit unterhalb der geforderten Genauigkeit. Der Ausgangsstrom beträgt gemäss obiger Messreihe:

$$I = \frac{\text{Messwert} - 0.247V}{1.41} \quad (11)$$

Für die Software, in welcher alle Werte in Millivolt und Milliampere betrachtet werden, wird $istI$ mit Formel 11 folgendermassen bestimmt

$$istI = (messI - 247mV) \cdot \frac{100}{141} \quad (12)$$

Ausgangsspannung	Messwert $_{messU}$	Differenz	Fehler
0.0V	0mV	-	0.0mV
0.5V	102mV	102mV	+0.2mV
1.0V	204mV	102mV	+0.2mV
1.5V	306mV	102mV	+0.2mV
2.0V	408mV	102mV	+0.2mV
2.5V	509mV	101mV	-0.8mV
3.0V	611mV	102mV	+0.2mV
3.5V	713mV	102mV	+0.2mV
4.0V	815mV	102mV	+0.2mV
4.5V	916mV	101mV	-0.8mV
5.0V	1018mV	102mV	+0.2mV
5.5V	1120mV	102mV	+0.2mV
6.0V	1222mV	102mV	+0.2mV
6.5V	1324mV	102mV	+0.2mV
7.0V	1425mV	101mV	-0.8mV
7.5V	1526mV	101mV	-0.8mV
8.0V	1628mV	102mV	+0.2mV
8.5V	1731mV	103mV	+1.2mV
9.0V	1833mV	102mV	+0.2mV
9.5V	1935mV	102mV	+0.2mV
10.0V	2036mV	101mV	-0.8mV
10.5V	2138mV	102mV	+0.2mV
11.0V	2240mV	102mV	+0.2mV
11.5V	2342mV	102mV	+0.2mV
12.0V	2444mV	102mV	+0.2mV
12.5V	2545mV	101mV	-0.8mV
13.0V	2647mV	102mV	+0.2mV
13.5V	2749mV	102mV	+0.2mV
14.0V	2851mV	102mV	+0.2mV
18.0V	3665mV	-	+0.2mV
20.0V	4073mV	-	-1.0mV
21.0V	4276mV	-	+0.4mV
22.0V	4479mV	-	-0.2mV

Tabelle 1: Verifizierung der Messwerte $_{messU}$ des Spannungsteilers.

Ausgangsstrom	Messwert $messI$	Differenz	Fehler
0.0A	247mV	-	247mV
0.1A	390mV	143mV	+2mV
0.2A	531mV	141mV	0mV
0.3A	668mV	137mV	-4mV
0.4A	807mV	139mV	-2mV
0.5A	947mV	140mV	-1mV
0.6A	1080mV	133mV	-8mV
0.7A	1227mV	137mV	-4mV
0.8A	1371mV	144mV	+3mV
0.9A	1516mV	145mV	+4mV
1.0A	1657mV	141mV	0mV
1.1A	1800mV	143mV	+2mV
1.2A	1942mV	142mV	+1mV
1.3A	2080mV	138mV	-3mV
1.4A	2223mV	143mV	+2mV
1.5A	2370mV	137mV	-4mV
1.6A	2509mV	139mV	-2mV
1.7A	2641mV	132mV	-9mV
1.8A	2795mV	144mV	+3mV
1.9A	2936mV	141mV	0mV
2.0A	3075mV	139mV	-2mV
2.1A	3220mV	145mV	+4mV
2.2A	3357mV	137mV	-4mV
2.3A	3490mV	133mV	-8mV
2.4A	3630mV	140mV	-1mV
2.5A	3778mV	148mV	+7mV
2.6A	3922mV	144mV	+3mV
2.7A	4070mV	148mV	+7mV
2.8A	4209mV	139mV	-2mV

Tabelle 2: Verifizierung der Messwerte $messI$ der Strommessung.