



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorarbeit

Tom Petzold

Aufbau, Erweiterung und Optimierung eines  
Sonnensimulators zur Untersuchung von  
Photovoltaik-Modulen

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Informations- und  
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Information and  
Electrical Engineering*

Tom Petzold

Aufbau, Erweiterung und Optimierung eines  
Sonnensimulators zur Untersuchung von  
Photovoltaik-Modulen

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. Ingo Winzenick

Abgegeben am 27. Februar 2018

**Tom Petzold**

**Thema der Bachelorthesis**

Aufbau, Erweiterung und Optimierung eines Sonnensimulators zur Untersuchung von Photovoltaik-Modulen

**Stichworte**

Photovoltaik, Versuchsstand, Laborversuch, Photovoltaik-Modul, Sonnensimulator

**Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit wird der existierende Photovoltaik-Versuchsstand für den Laborversuch „Photovoltaik“ optimiert, erweitert und schließlich aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit der Entwicklungsumgebung LabView von national instruments wird ein Programm entworfen, mit dem die Modulkennlinien erfasst und visualisiert werden. Die Ursache der vorhandenen Messwertdrift des Stromwertes wird gesucht, bewertet und beseitigt. Zudem wird ein neues Lampenfeld und eine neue PV-Modulhalterung konstruiert, sowie geeignete PV-Module beschafft.

**Tom Petzold**

**Title of the paper**

Construction, extension and optimization of a sun simulator for analysing photovoltaic modules.

**Keywords**

Photovoltaic, test stand, laboratory test, photovoltaic module, sun simulator

**Abstract**

In this thesis the existing photovoltaic teststand will be optimized, expanded, built up and put into operation. With the developing environment LabView by national instruments will be created a program for recording characteristic curves of photovoltaic modules and visualizing the results. The cause of measurement drift at the current value will be eliminated. Additionally a new light field, a new holder for the modules will be constructed and new photovoltaic modules will be procured.

Phantasie ist wichtiger als Wissen.

Wissen ist begrenzt, Phantasie aber umfasst die ganze Welt.

Albert Einstein (1879 - 1955)

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während der Studienzeit und während der Umsetzung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst bedanke ich mich bei meiner Frau, die mir während des gesamten Studiums mit Rat und Tat zur Seite stand. Sie hat mir in Etappen, die von knapper Zeit und Stress geprägt waren, den Rücken freigehalten und den Haushalt mit zwei Kindern um mein Studium und die Bachelorarbeit herum organisiert.

Als zweites danke ich meiner Tochter und meinem Sohn, die mich mit ihrer Lebensfreude und ihrem kindlichen Eifer zum Lachen gebracht und mir Kraft gegeben haben.

Weiter möchte ich meinem Erstprüfer und Aufgabensteller Herrn Prof. Dr.-Ing. Röther für diese Herausforderung danken, an der ich mich messen und bei der ich außerordentlich viel lernen konnte.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Ingo Winzenick für die freundliche Übernahme der Zweitprüfung dieser Arbeit.

Bei Herrn Korpel bedanke ich mich dafür, dass er mir mit Werkzeug, Messgeräten und praktischen Hinweisen zur Seite stand.

Auch bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Zentralen Laborwerkstatt der HAW, da die Umsetzung einiger mechanischer Elemente ohne deren Unterstützung so nicht möglich gewesen wäre. Ich möchte Bernd Bethke danken, der mich besonders in der Anfangszeit der Arbeit mit seinem Fachwissen unterstützt hat.

Abschließend geht ein besonderer Dank an das Unternehmen J.Schwarz GmbH in Bünde, das mir freundlicherweise die in dieser Arbeit verwendeten High-Airflow-Filtermatten zu Verfügung gestellt hat.

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis . . . . .	8
Symbolverzeichnis . . . . .	9
Abbildungsverzeichnis . . . . .	10
Tabellenverzeichnis . . . . .	12
<b>1. Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2. Zusammenfassung der Bachelorarbeit von Pagel (Pagel, 2016 [1])</b>	<b>15</b>
2.1. Mechanischer Grundaufbau . . . . .	15
2.2. Elektrische Konstruktion . . . . .	15
2.3. PV-Modulhalterung . . . . .	16
2.4. Belüftungskonzept . . . . .	17
2.5. Elektronik . . . . .	18
<b>3. Analyse des bestehenden Aufbaus</b>	<b>19</b>
3.1. Mechanischer Grundaufbau . . . . .	19
3.2. Lampenfeld . . . . .	19
3.3. PV-Modulhalterung . . . . .	20
3.4. Schaltschrank . . . . .	21
3.5. Fronttür . . . . .	22
3.6. Elektronikkammer . . . . .	23
<b>4. Erweiterung und Optimierung</b>	<b>24</b>
4.1. Mechanischer Grundaufbau und Lampenfeldaufhängung . . . . .	24
4.2. Lampenfeld . . . . .	26
4.3. PV-Modulhalterung . . . . .	28
4.4. Reduzierung der Lüftergeräusche . . . . .	31
4.5. 3M™High Air Flow (HAF) Luftfiltermedium . . . . .	32
4.6. Platine zur Messwertskalierung . . . . .	32
4.6.1. Die Drift des Strommesswertes . . . . .	32
4.6.2. Erarbeitung einer Lösung . . . . .	39
4.6.3. Funktionsprinzip einer Bandabstandsreferenzspannungsquelle (Jürgen Gutekunst et al. [2]) . . . . .	42
4.6.4. Testschaltung . . . . .	44
4.6.5. Ursache des falschen Vorzeichens der Leistungskurve . . . . .	44
4.7. Platine zur Kennlinienerzeugung . . . . .	44
4.8. Die Gleichrichterplatine . . . . .	46
4.9. Die neuen Photovoltaik-Module . . . . .	46
4.10. Visualisierung mit LabView . . . . .	47

4.10.1. Ein erster Entwurf . . . . .	47
4.10.2. Spezifizierung des Programmentwurfs . . . . .	47
<b>5. Aufbau und Inbetriebnahme</b>	<b>52</b>
5.1. Mechanischer Grundaufbau . . . . .	52
5.2. Lampenfeld . . . . .	52
5.3. PV-Modulhalterung . . . . .	52
5.4. Platinen . . . . .	53
5.5. Inbetriebnahme nach DIN VDE 0701/0702 . . . . .	53
5.6. Inbetriebnahme der SIEMENS LOGO! . . . . .	53
5.7. Einstellung des Leistungsverstärkers . . . . .	53
<b>6. Messungen</b>	<b>54</b>
6.1. Messung unter Verwendung der Schaltnetzteile . . . . .	54
6.2. Messreihe zur Messwertdrift . . . . .	56
6.3. Monokristallines Modul JWS 1086 . . . . .	57
6.3.1. Hellkennlinie . . . . .	57
6.3.2. Dunkelkennlinie . . . . .	57
6.3.3. Unterschiedliche Bestrahlungsstärken . . . . .	57
6.3.4. Abschattung . . . . .	58
6.3.5. Unterschiedliche Einstrahlungswinkel . . . . .	58
6.3.6. Unterschiedliche Modultemperaturen . . . . .	58
6.4. Polykristallines Modul JWS 1201 . . . . .	59
6.4.1. Hellkennlinie . . . . .	59
6.4.2. Dunkelkennlinie . . . . .	59
6.4.3. Unterschiedliche Bestrahlungsstärken . . . . .	60
6.4.4. Abschattung . . . . .	60
6.4.5. Unterschiedliche Einstrahlungswinkel . . . . .	60
6.4.6. Unterschiedliche Modultemperaturen . . . . .	60
6.5. Vergleichsmessung der Geräuscentwicklung . . . . .	61
<b>7. Beurteilung Versuchsstand</b>	<b>63</b>
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>65</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>66</b>
A.1. Bedienoberfläche des LabView-Programms . . . . .	72
A.2. Anleitung für den Laborversuch . . . . .	75
A.3. Anleitung für das dauerhafte Speichern von Messungen . . . . .	76
A.4. Zusammenfassung der Modulparameter beider Module . . . . .	91
A.5. Messungen zur Spannungsgleichrichtung) . . . . .	93

## Abkürzungsverzeichnis

BNC Bayonet Neill Concelman (Hochfrequenzanschluss mit Bayonett-Verschluss)

DAQ Data Aquisition

PV Photovoltaik

VI Virtuelles Instrument



## Symbolverzeichnis

$I_K$	Kurzschlussstrom
$U_0$	Leerlaufspannung
$P_{MPP}$	Punkt der maximalen Leistung, auch Nennleistung eines PV-Moduls in Wp
$I_{MPP}$	Strom im Punkt der maximalen Leistung
$U_{MPP}$	Spannung im Punkt der maximalen Leistung
$U_K$	Spannung die an PV-Modul angelegt werden muss damit $I_K$ fließt
$U_{DS_{Modul}}$	Durchlassspannung des PV-Moduls
$U_{DS_{Zelle}}$	Durchlassspannung einer einzelnen Solarzelle
N	Anzahl der Solarzellen in einem PV-Modul
$\vartheta$	Temperatur
$I_{Krel_{X^\circ C}}$	Kurzschlussstrom bei $X^\circ C$ bezogen auf den Wert bei $25^\circ C$

## Abbildungsverzeichnis

2.1. Von Pagel entworfenes Belüftungskonzept . . . . .	17
3.1. Bestehendes Lampenfeld . . . . .	19
3.2. Bestehende Modulkammer . . . . .	21
3.3. Bestehender Schaltschrank . . . . .	22
3.4. Vorderseite des Simulators . . . . .	23
4.1. Schnellspanverbinder 0° . . . . .	25
4.2. Zentralverbindungssatz . . . . .	26
4.3. Entwurf des neuen Leuchtmittelmoduls . . . . .	28
4.4. Erster Entwurf des Klemmsystems . . . . .	30
4.5. Ausschnitt aus dem Schaltplan der Arbeit Pagel . . . . .	33
4.6. Labornetzteil im Leerlauf . . . . .	35
4.7. Kurzgeschlossenes Labornetzteil . . . . .	35
4.8. Vor Platine A3 positionierter PT100 . . . . .	36
4.9. Vergleich von gemessenem Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Um- gebungstemperatur um Platine A3 . . . . .	37
4.10. Skalierter Stromwert an der Platinenschraubklemme in Volt über der Zeit .	38
4.11. Verlauf der Spannung am Strom-Spannungswandlerausgang im stromlosen Zustand . . . . .	38
4.12. Verlauf der 5V-Spannung zur Generierung der 2,5V-Referenzspannung beim Einschalten . . . . .	39
4.13. Schaltungstechnischer Aufbau der 5V-Teilplatine . . . . .	39
4.14. Temperaturabhängigkeit der 5V-Spannung aus dem Datenblatt des L78L05	40
4.15. Schaltungsentwurf für die Verstärkung der Referenzspannung . . . . .	42
4.16. Aufbau eines Bandabstandsreferenzelementes nach A.P. Brokaw . . . . .	43
4.17. Schaltung zur Dunkelkennlinienerzeugung . . . . .	45
4.18. Spannungsrampe zum Erfassen der Dunkelkennlinie mit 24VDC Platinen- Versorgung . . . . .	45
4.19. Spannungsrampe zum Erfassen der Dunkelkennlinie mit 26,7VDC Platinen- Versorgung . . . . .	46
4.20. Erster Entwurf des LabView-Programms . . . . .	48
4.21. Spezifizierter Entwurf des LabView-Programms . . . . .	49
6.1. Messung der temperaturabhängigen Stromwertdrift mit Spannungsstabilis- sierung . . . . .	56
A.1. Layout der Schaltnetzteilplatine . . . . .	66
A.2. Schaltplan der Schaltnetzteilplatine . . . . .	67
A.3. Layout von Platine A3 . . . . .	68
A.4. Schaltplan von Platine A3 . . . . .	69

A.5. Zeichnung der PV-Modulhalterung mit den maximal zulässigen Modulabmessungen . . . . .	70
A.6. Bedienoberfläche . . . . .	71
A.7. Dunkelkennlinie des monokristallinen Moduls JWS 1086 . . . . .	77
A.8. Messung bei verschiedenen Bestrahlungsstärken am Modul JWS 1086 . . . . .	78
A.9. Messung bei einer abgeschatteten Solarzelle am Modul JWS 1086 . . . . .	79
A.10. Messung bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln am Modul JWS 1086 . . . . .	80
A.11. Messung bei unterschiedlichen Modultemperaturen am Modul JWS 1086 . . . . .	81
A.12. Dunkelkennlinie des polykristallinen Moduls JWS 1201 . . . . .	82
A.13. Messung bei verschiedenen Bestrahlungsstärken am Modul JWS 1201 . . . . .	83
A.14. Messung bei einer abgeschatteten Solarzelle am Modul JWS 1201 . . . . .	84
A.15. Messung bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln am Modul JWS 1201 . . . . .	85
A.16. Messung bei unterschiedlichen Modultemperaturen am Modul JWS 1201 . . . . .	86
A.17. Dunkelkennlinie des amorphen Moduls . . . . .	87
A.18. Messung unter Abschattung einer Solarzelle am amorphen Modul . . . . .	88
A.19. Messung bei unterschiedlichen Modultemperaturen am amorphen Modul . . . . .	89
A.20. Temperaturabhängigkeit des Linearreglers L78L05 . . . . .	90
A.21. Prüfprotokoll nach DIN VDE 0701/0702 . . . . .	92
A.22. Probemessung mit Schaltnetzteilen . . . . .	93
A.23. Probemessung mit Schaltnetzteilen und $4,7\mu F$ -Kondensatoren parallel zu BNC-Buchsen . . . . .	93

## Tabellenverzeichnis

4.1. Denkbare Schaltungsvarianten . . . . .	27
4.2. Übersicht über die neuen Module . . . . .	46
5.1. Verwendete Messgeräte . . . . .	54
5.2. Am Leistungsverstärker einzustellende Werte . . . . .	54
6.1. Messergebnisse vom JWS 1086 bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken .	58
6.2. Messergebnisse vom JWS 1086 unter Abschattung einer Solarzelle . . . . .	58
6.3. Messergebnisse vom JWS 1086 bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln	58
6.4. Messergebnisse vom JWS 1086 bei unterschiedlichen Modultemperaturen .	59
6.5. Messergebnisse vom JWS 1201 bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken .	60
6.6. Messergebnisse vom JWS 1201 unter Abschattung einer Solarzelle . . . . .	60
6.7. Messergebnisse vom JWS 1201 bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln	61
6.8. Messergebnisse vom JWS 1201 bei unterschiedlichen Modultemperaturen .	61
6.9. Werte der Geräuscentwicklung beider Geräte . . . . .	61
A.1. Zusammenfassung der Modulparameter . . . . .	91

## 1. Einleitung

Das Studienfach Regenerative Energien des Studiengangs Informations- und Energietechnik der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) beschäftigt sich mit den unterschiedlichen Möglichkeiten der regenerativen Energiegewinnung und vertieft das theoretische Wissen der Studierenden in praktischen Laborversuchen. Im Laborversuch zur Photovoltaik wird dazu ein eigens entwickelter Versuchsstand eingesetzt. Ein Lampenfeld simuliert die Sonneneinstrahlung, deren Bestrahlungsstärke und Einstrahlungswinkel auf ein Photovoltaikmodul variiert werden können. Zusätzlich wird der Einfluss einer Teilabschattung des PV-Moduls und dessen Umgebungstemperatur untersucht. Die dabei auftretenden Auswirkungen auf die elektrischen Parameter des PV-Moduls werden in Form von charakteristischen Kurvenverläufen mit einem XY-Schreiber zu Papier gebracht, welche dann von den Studierenden zu untersuchen sind. Der zurzeit genutzte Versuchsstand wurde in einer Bachelorarbeit im Jahr 2016 auf Basis seines Vorgängers entwickelt.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Erfassung dieser Kurvenverläufe am Rechner zu ermöglichen, indem Hard- und Softwarekomponenten des Unternehmens national instruments eingesetzt werden. Neben der Verringerung einer störenden Messwertdrift, ist zudem die PV-Modulhalterung zu überarbeiten, sodass sie stabiler als bisher wird und weiterhin den Einsatz von unterschiedlichen PV-Modulen erlaubt.

Langfristig sollen zwei optimierte Versuchsstände im Einsatz sein, das heißt, dass die in dieser Arbeit zu erfolgenden Optimierungen und Erweiterungen auch an dem bisher eingesetzten Versuchsstand zu erfolgen haben. Bei der Erarbeitung der Lösungen wird deshalb darauf geachtet, dass sie sich als nachträgliches Retrofit eignen, um den Aufwand des Nachrüstens am Bestandsmodell möglichst gering zu halten und so dem Prinzip treu zu bleiben: So wenig Änderung wie möglich, so viel Änderung wie nötig.

In der ersten Phase werden die Komponenten des bestehenden Versuchsstandes auf ihre Vor- und Nachteile hin untersucht. In der zweiten, der Entwicklungsphase werden passende Lösungen entwickelt und die nötigen Komponenten beschafft. In der letzten bzw. dritten Phase wird der Versuchsstand aufgebaut, in Betrieb genommen und die Modulparameter der zu beschaffenden PV-Module ermittelt. Es ist eine sorgfältige Dokumentation der vorgenommenen Änderungen zu erstellen, damit diese effektiv ins Altgerät übernommen werden können.

Kapitel zwei fasst die gemachten Erkenntnisse der Bachelorarbeit von 2016 zusammen.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit der Untersuchung der Komponenten hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile. Mit Hilfe dieser Ergebnisse werden die zu entwickelnden Lösungen spezifiziert.

Im vierten Kapitel stehen die Ursachenforschung und Lösungsentwicklung sowie die Softwareerstellung mit LabView im Vordergrund.

Mit Kapitel fünf geht die Arbeit in die Aufbau- und Inbetriebnahmephase über.

Ein Musterprotokoll mit den ermittelten PV-Modulparametern wird im sechsten Kapitel erstellt. Dieses dient später gleichzeitig als Musterlösung des Laborversuchs.

Die Arbeit schließt mit dem siebenten und dem achten Kapitel ab, welche sich mit der Beurteilung des überarbeitenden Versuchsstandes und der Zusammenfassung dieser Arbeit beschäftigen.

## **2. Zusammenfassung der Bachelorarbeit von Pagel (Pagel, 2016 [1])**

Da der in dieser Arbeit zu optimierende Versuchsstand in der Vorgängerarbeit entwickelt und aufgebaut wurde, folgt an dieser Stelle eine Zusammenfassung der erfolgten Verbesserungen und Erkenntnisse. Dadurch wird dem Leser der Einstieg in die vorliegende Arbeit erleichtert.

### **2.1. Mechanischer Grundaufbau**

Ein wesentlicher Punkt in der Vorgängerarbeit war die Entwicklung eines robusten Gehäuses. Vor allem sollte es der langfristigen Beanspruchung über Jahre hinweg standhalten. Durch Marktrecherche wurde festgestellt, dass keins der angebotenen Gehäuse über die notwendige Kammeraufteilung verfügte, sodass die Entwicklung eines eigenen Gehäuses notwendig wurde. Als Grundlage für die Entwicklung wurde der Aufbau von 2006 zurückgezogen, in welchem die besagte Kammeraufteilung bereits funktionstüchtig integriert war. Zur Fertigung eines Gehäusegerüsts kamen industrietaugliche Aluminiumprofile mit quadratischem Querschnitt der Firma item zum Einsatz, welche den Aufbau verschiedenster Konstruktionen im Baukastenprinzip ermöglichten. Der verwendete Profiltyp verfügt über eine Kantenlänge von 40mm und weist an jeder Seite eine 8mm-Nut auf. In diese Nuten wurden weiße 8mm starke MDF-Platten als Gehäusewände eingesetzt. Mit dem reichhaltigen Produktsortiment der Firma item war ebenso die Fertigung von spezielleren Elementen möglich. So konnten die drei notwendigen Türen mit je einem Türanschlag versehen werden, um das Eindringen von Licht ins Innere der Modulkammer zu verhindern. Ein selbsttätiges Öffnen der Türen wurde durch den Einsatz eines Magnetanschlages und zwei weiterer Schlösser unterbunden. Alle Aluminiumprofile wurden mit elektrischen Erdverbindungen miteinander und über die Anschlussleitung mit dem Schutzleiter des elektrischen Versorgungsnetzes verbunden. So konnte ein gefahrloses Bedienen des Versuchsstandes gewährleistet werden. Zur Kühlung des Geräteinneren wurden rechteckige Aussparungen in die obere und untere Gehäusewand, sowie mehrere runde Ausschnitte für die Montage von Axiallüftern in die seitlichen Gehäusewände eingebracht.

Durch das eingesetzte System wurde ein Gehäuse mit deutlich besserer Langlebigkeit konstruiert, sodass lockere Türen der Vergangenheit angehörten. Zur besseren Abdunklung der Modulkammer wurde eine Platte eingesetzt, was zum gewünschten Erfolg führte. Damit trägt das neue Gehäuse in wesentlichen Teilen zur Verbesserung des Versuchstandes bei.

### **2.2. Elektrische Konstruktion**

Für die elektrische Konstruktion wurde zunächst nach Alternativen zu den bisher im Einsatz befindlichen Halogenstrahlern gesucht. Dazu wurden vier Forderungen aufgestellt, die das neue Leuchtmittel aufweisen sollte: Neben dem kontinuierlichen Spektrum AM 1,5

sollte es die Lichtstrahlen möglichst homogen und parallel aussenden, eine ausreichend hohe Abstrahlleistung erbringen und unterschiedliche Abstrahlleistungen erzeugen können. Es wurde herausgestellt, dass die in industrietauglichen Aufbauten zur Untersuchung von PV-Modulen verwendeten Leuchtmittel, optischer Filter bedürfen, deren Anschaffung das zur Verfügung stehende Budget deutlich überschritten hätte. Als nächstes wurde der Einsatz von LEDs überprüft. Obwohl das Spektrum von speziellen LED-Flächenelementen sehr dem natürlichen Lichtspektrum ähnelt, wurde diese Variante jedoch auf Grund des hohen Anschaffungspreises verworfen. Die Glühlampe wurde ebenfalls als Vertreter der Leuchtmittel mit naturlichtnahem Spektrum identifiziert. Jedoch kam diese Technologie aufgrund ihres geringen Wirkungsgrades trotz ihrer günstigen Anschaffung nicht zum Einsatz. Beim Vergleich der Eigenschaften eines 12V Halogenstrahlers mit den aufgestellten Forderungen, wurde dieses Leuchtmittel in ihrer Eignung für den Versuchsstand bestätigt. Zur Versorgung des Lampenfeldes wurde ein Leistungsverstärker verwendet. Dieser bietet neben einer exakt justierbaren Gleichspannung mit geringer Restwelligkeit eine einstellbare Stromgrenze an. Über entsprechende Laborbuchsen kann dieser mit dem Versuchsstand verbunden werden, sodass eine aufwändige Verdrahtung entfällt und der Lastkreis schnell spannungsfrei geschaltet werden kann. Um einige der wichtigsten Technologievertreter an PV-Modulen vergleichen zu können, wurden zwei polykristalline und ein amorphes Modul beschafft. Diese wurden so ausgewählt, dass sie möglichst über die gleiche Nennleistung verfügten. Die im Vorgängermodell eingesetzte Kleinsteuerung LOGO! von SIEMENS wurde nochmals eingesetzt. Ihre Funktionspalette und die modulare Erweiterungsmöglichkeit wurden als angemessen eingestuft, wobei die achte Version der Software LOGO! Soft Comfort eingesetzt und das bestehende Schaltungsprogramm überarbeitet wurde. Das Verwenden vergleichbarer Leuchtmittel wie im Vorgängermodell und der unmodifizierten Lampenfeldkonstruktion hatte an dieser Stelle keine wesentliche Verbesserung zur Folge. Durch den Einsatz des Leistungsverstärkers konnte aber die Homogenität des Lampenfeldes und dessen Bedienung verbessert werden. Der ab diesem Zeitpunkt mögliche Vergleich von unterschiedlichen Zelltechnologien, steigerte den Lerneffekt beim Arbeiten am Simulator. Die neuere Version der LOGO!-Software konnte keine großen Verbesserungen im Bezug zum Vorgänger generieren.

### **2.3. PV-Modulhalterung**

Die im Abschnitt 5.3 (Pagel, 2016, S. 42 u. 43) beschriebene Konstruktion entspricht nicht der im Gerät eingesetzten Konstruktion. Eine detaillierte Beschreibung und Beurteilung der tatsächlich eingesetzten Halterung findet in Abschnitt 3.3 statt. Für die Messung unter verschiedenen Einstrahlungswinkeln wurde ein Aluminiumblech mit einer selbst entworfenen Winkelfolie beklebt. Zur Fixierung der PV-Modulhalterung wurde bei jedem Winkel ein Loch für das Einschleiben eines entsprechenden Haltebolzens gebohrt. Das neu entwickelte Konzept zur Modulkammer-Abdunklung wurde mit einer dünnen Presspappplatte



realisiert. Diese ist per Hand ein- und ausziehbar und wird von zwei Aluminiumschienen geführt.

Das eingesetzte Winkelblech ermöglicht das schnelle und exakte Einstellen der gewünschten Winkellage des PV-Moduls. Die Bedienung ist unkompliziert und solide. Der Ersatz der bestehenden Lamellenkonstruktion zur Abdunklung der Modulkammer durch das neue Konzept verbesserte die Bedienbarkeit und den Lichtschutz des PV-Moduls.

#### 2.4. Belüftungskonzept

Das neue Belüftungskonzept wurde mit dem Fokus auf ausreichender Kühlleistung entwickelt, ohne dass dabei Umgebungslicht ins Innere der Modulkammer vordringen konnte. Ein wichtiger Schritt dabei war die Trennung von Lampen- und Modulkammer durch eine Glasscheibe. Somit konnte sich die Luft in der Modulkammer nicht mit der heißen Luft aus der Lampenkammer vermischen, was zwei getrennte Kühlkreisläufe erforderte. Die Lampenkammer wurde mit vier Axiallüftern versehen. Diese hatten die Aufgabe, kühle Umgebungsluft anzusaugen und über den damit entstehenden Überdruck erhitzte Luft nach außen zu drücken. Die in die obere Gehäusewand eingebrachten Aussparungen nutzten zusätzlich das Aufsteigen erhitzter Luft aus. Für die Kühlung der Modulkammer wurde der Luftstrom umgelenkt, sodass das Eindringen von Umgebungslicht verhindert werden konnte (Abbildung 2.1).

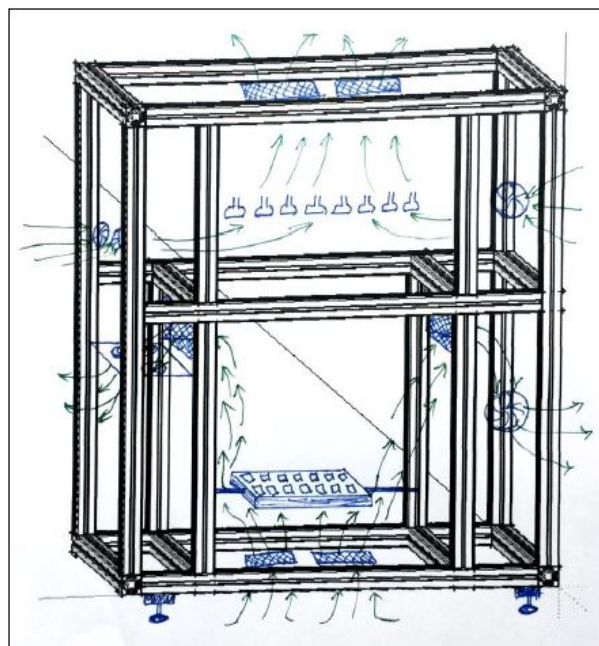


Abbildung 2.1: Von Pagel entworfenes Belüftungskonzept

## 2.5. Elektronik

Die im Vorgängermodell bereits vorhandenen elektronischen Schaltungen zur Kennlinienenerzeugung und Messwertskalierung wurden weitestgehend übernommen. Allerdings erfolgte eine vollständige Überarbeitung des Layouts mit der Software EAGLE, sodass vormals getrennte Schaltungen zusammengefasst werden konnten. Die Schaltung zur Hellkennlinienmessung wurde leicht modifiziert, sodass die Belastung der genutzten LOGO!-Kontakte zur Restentladung und die Zeitkonstante bei der Entladung der eingesetzten Kondensatoren verringert werden konnte. Aus der Schaltung zur Messwertskalierung wurde eine Verstärkerschaltung entfernt und ein Operationsverstärker durch eine Variante mit kleinerem Gehäuse ersetzt. Zusätzlich wurden verschiedene Widerstandswerte überarbeitet und zusätzliche Potentiometer für den Offsetabgleich der Verstärkerstufen hinzugefügt. Das Zusammenfügen der einzelnen Schaltungen zu größeren Schaltungen und deren Überarbeitung konnte einen wesentlichen Beitrag zur Übersichtlichkeit des Schaltschranks und dessen Platzausnutzung leisten. Beim Entwurf der neuen Schaltungen wurde jedoch das Vorzeichen der skalierten Modulspannung und damit der skalierten Modulleistung invertiert. Näheres dazu in vorliegender Arbeit unter Abschnitt 4.6.5. Die eingesetzte OPV-Schaltung zur Erzeugung einer 2,5V-Referenzspannung war zudem nicht im Stande, temperaturabhängige Schwankungen der Versorgungsspannung zu unterbinden. Deutlich machte sich dies in einer Drift des Strommesswertes. Näheres hierzu in Abschnitt 4.6.1. Beim Aufnehmen der Dunkelkennlinie gibt es zudem eine scharfe Einschränkung. Die an das PV-Modul anlegbare, maximale Spannung beträgt 22,5V. Dadurch ergibt sich das Problem, dass die Dunkelkennlinie von PV-Modulen mit relativ hoher Leerlaufspannung nicht bis zum Kurzschlussstrom vordringen kann (Pagel, Seite 79). So kann die Dunkelkennlinie nur von PV-Modulen mit einer Leerlaufspannung von maximal etwa 21 Volt erzeugt werden.

### 3. Analyse des bestehenden Aufbaus

#### 3.1. Mechanischer Grundaufbau

Das Gehäuse des Sonnensimulators ist aus Aluminiumprofilen mit quadratischem Querschnitt aufgebaut. Diese Profile sind verhältnismäßig leicht und belastbar. Die eloxierte Schutzschicht verhindert, dass sich eine unkontrollierte Oxidation auf der Oberfläche ausbildet, sodass der Aufbau beständig einen hochwertigen und industrietauglichen Eindruck macht. Montiert formen die Profile vier Kammern, deren Funktionen denen vom zweiten Aufbau von 2007 gleichen. Der Schaltschrank, die Lampenkammer und die Modulkammer sind über je eine Tür zugänglich, wobei die Türen zum Schaltschrank und zur Lampenkammer mit einrastenden Türschlössern verschließbar sind. Die aus 8 Millimeter starken MDF-Platten gefertigten Gehäuseabgrenzungen sind in die ebenso breiten Profalnuten der Aluminiumprofile gesteckt, was ein sehr stabiles und verwindungssteifes Gehäuse schafft. Während ein Teil der Seitenwände mit Ausschnitten für die Axiallüfter ausgestattet ist, sind das Boden- und das Deckenelement mit Ausschnitten zur Luftzufuhr, beziehungsweise Luftabfuhr versehen. Die Vorteile der Konstruktion liegen klar in der mechanischen Langzeitstabilität sowie im professionellen Design. Nachteilig ist das hohe Gewicht des Gehäuses, das sich durch die Masse der insgesamt über 20 Meter verbauten Aluminiumprofile und der eingesteckten MDF-Platten ergibt.

#### 3.2. Lampenfeld

Das eingesetzte Lampenfeld besteht aus einem Rahmen, welcher sich aus verschiedenen Aluminiumprofilen zusammensetzt (Abbildung 3.1).

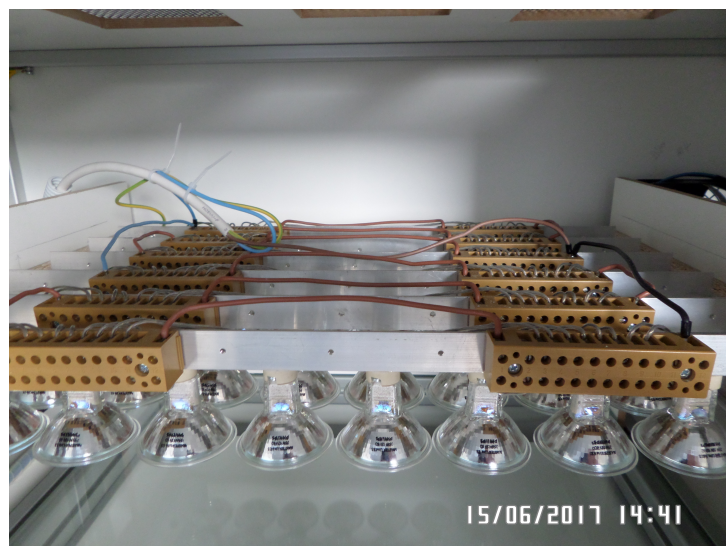


Abbildung 3.1: Bestehendes Lampenfeld

An diesem Rahmen sind neben den Leuchtmitteln auch Klemmblöcke montiert. Das Lam-

penfeld umfasst insgesamt 48 Halogenstrahler vom Typ MASTERLine ES 35W GU5.3 12V 8D 1CT. Jeder dieser Strahler nimmt bei Nennbetrieb eine Leistung von 35W auf. Die Klemmblöcke verbinden die Strahler mit der Zuleitung derart, dass sich eine Parallelschaltung aus zwei Reihenschaltungen ergibt. Jede dieser Reihenschaltungen fasst 24 Strahler. Das Lampenfeld ist mit einer Halterungskonstruktion aus MDF-Platten mechanisch mit dem Gehäuse des Sonnensimulators verbunden. Vorteilhaft an dieser Konstruktion ist, dass sich das Lampenfeld nicht aus einem massiven Teil zusammensetzt, sondern aus mehreren einzelnen Aluminiumstreben aufgebaut ist. So kann die erhitzte Luft gut nach oben abgeführt werden. Nachteilig sind die vielen sichtbaren Aderleitungen, welche einen unaufgeräumten Eindruck vermitteln. Außerdem befindet sich die Zuleitung teilweise über dem Lampenfeld also im Bereich der erhitzten Luft.

### 3.3. PV-Modulhalterung

Die bereits existierende PV-Modulhalterung (Abb. 3.2) besteht aus einer einfachen Konstruktion, welche sich aus zwei wesentlichen Komponenten zusammensetzt. Zum einen sind zwei Auflager vorhanden, eines an der linken Seite der Modulkammer, das andere an der rechten Seite. Das linke Auflager ist als Bohrung im Winkelblech ausgeführt. Das rechte Auflager ist ein aus Aluminiumprofilen konstruiertes Dreieck, welches keine Spitze, sondern eine Vertiefung an der Oberseite aufweist. Die zweite Komponente besteht aus zwei einfachen Gewindestangen, welche je über ein zusätzliches Vierkant-Aluminiumteil fest am PV-Modul befestigt sind. Durch die Einfachheit der Konstruktion ergeben sich einige Vorteile. Zum einen lässt sich der Wechsel des PV-Moduls sehr schnell vornehmen, da die linke Gewindestange in die Bohrung gesteckt und die rechte Gewindestange nur auf dem Aluminiumdreieck abgelegt wird. Das Modul kann über zwei Laborbuchsen elektrisch mit dem Versuchsstand verbunden werden, was den Wechsel ebenfalls einfach gestaltet. Durch die gewählte Konstruktion wird zudem erreicht, dass die Unterseite des Moduls nicht von mechanischen Teilen verdeckt wird. Somit lässt sich das Modul gut temperieren, was für die vorzunehmenden Messungen wichtig ist.

Allerdings ergeben sich auch Nachteile. Die Vertiefung des rechten Auflagers ist zu gering bemessen, sodass es bei hektischer Handhabung passieren kann, dass die Gewindestange aus der Vertiefung springt und das Modul aus der Halterung fällt. Beschädigungen am Modul sind dabei nicht auszuschließen. Weiterhin stellen die hervorstehenden Gewindestangen mechanische Hebel dar, die angreifende Kräfte verstärken und auf den dünnen Aluminiumrahmen des Moduls übertragen. Die Rahmen dieser Solarmodule sind nicht für diese Art der Belastung ausgelegt, wodurch sich bei fortwährender Handhabung über Jahre hinweg Verschleißerscheinungen an den Verbindungsstellen der Modulrahmen ausbilden können. Die fest montierten Gewindestangen haben zudem den Nachteil, dass sie beim Einlagern der nicht benötigten Module platzraubend sind. So ist es zum Beispiel nicht möglich, die Module in der wiederverschlossenen Originalverpackung zu verwahren



Abbildung 3.2: Bestehende Modulkammer

um sie vor Kratzern und Staub zu schützen. Als letztes sei erwähnt, dass es nötig ist, jedes Modul, welches im Sonnensimulator vermessen werden soll, mit fest montierten Gewindestangen zu versehen. Beim Neukauf eines PV-Moduls zu einem späteren Zeitpunkt, zum Beispiel weil der Laborversuch erweitert werden soll oder ein defektes PV-Modul gegen ein ähnliches Modul ersetzt werden soll, müsste auch immer die Ausführung des Rahmens hinsichtlich seiner Eignung zur festen Montage der Gewindestangen betrachtet werden.

### 3.4. Schaltschrank

Der vorliegende Schaltschrank macht einen aufgeräumten Eindruck. Auf der oberen der drei C-Schienen ist die Platine für die Erzeugung der Kennlinien A2, die Platine für die Normierung der Messwerte A3 sowie die für die Gleichspannungserzeugung verantwortliche Platine U1 untergebracht. Die von den Platinen erzeugten Messwerte weisen eine Drift auf, welche im Laborversuch deutlich erkennbar und störend ist. Der Ursache dieser Drift wird in vorliegender Arbeit in Abschnitt 4.6 nachgegangen, weswegen hier nicht weiter darauf eingegangen wird. Auf der zweiten Ebene finden neben den Elementen der LOGO! auch die beiden Relais für den Kurzschluss des Solarmoduls und für die Ansteuerung der Modulkammerlüfter Platz. Die untere Ebene ist komplett mit einer Klemmleiste belegt, die alle elektrischen und elektronischen Geräte fasst (Abbildung 3.3).

Weiterhin ist an der linken und rechten Seite je ein Lüfter angebracht, die mit für die Temperierung der Modulkammer verantwortlich sind. Sie saugen die Luft aus der Modulkammer, drücken sie in den Schaltschrank und von dort aus wird die Luft an die Umgebung abgegeben. Da die Platinen direkt unterhalb der Öffnung zur Modulkammer hin angebracht sind, befinden sie sich im Strom der angesaugten Luft. Dieser Aspekt wird später bei der Ursachenforschung der Drift des Strommesswertes von Bedeutung sein. Die

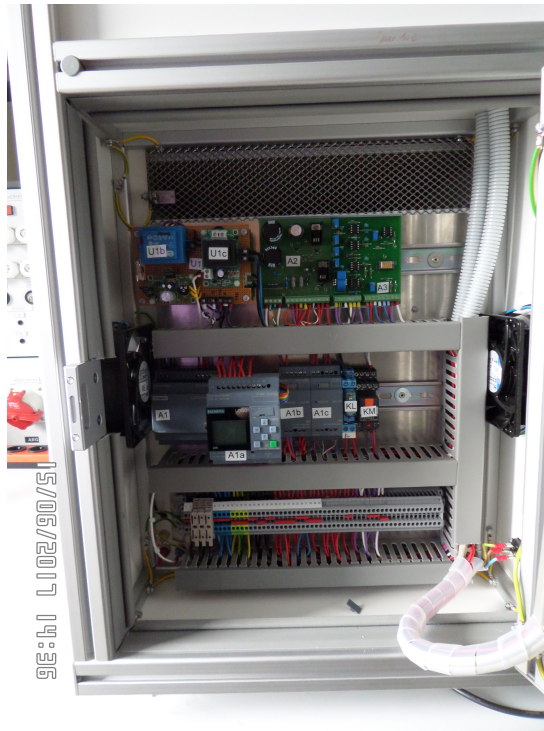


Abbildung 3.3: Bestehender Schaltschrank

230V-Zuleitung des Sonnensimulators wird über einen Kaltgeräteanschluss an der rechten Seite in den Schaltschrank geführt. Die an der Einspeisung verwendeten Kabelschuhe sind nicht vollisoliert, wodurch sich eine Gefährdung des Bedieners durch aktive Teile ergibt. Die elektrische Verbindung zu den Bedienelementen der Fronttür ist mit einem Spiralschlauch abgebunden, was die einzelnen Aderleitungen zu einem Strang bündelt.

### 3.5. Fronttür

Das Design der Fronttür wirkt ebenfalls aufgeräumt (Abb. 3.4). Eine bedruckte Folie auf der Fronttür beschreibt die Funktion der einzelnen Elemente unmissverständlich. Neben den Bedien- und Anzeigeelementen befinden sich zwei Laborbuchsen, die die nicht normierte Modulspannung bereitstellen, drei BNC-Buchsen für den Anschluss eines entsprechenden Schreibers sowie die Öffnung, die den Blick auf das LOGO!-Display frei gibt. Die Öffnung ist mit einem vermutlich gefrästen Stück durchsichtigen Kunststoff luftdicht verschlossen. Auf der Rückseite der Fronttür sind die Aderleitungen in aufgeklebten Verdrahtungskanälen untergebracht. Allerdings hat der Klebestreifen mit der Zeit seine Haftwirkung verloren, wodurch sich die Kanäle abgelöst haben und nunmehr unbefestigt an den elektrischen Elementen hängen.



Abbildung 3.4: Vorderseite des Simulators

### 3.6. Elektronikkammer

Die Elektronikkammer ist in zwei Ebenen aufgeteilt. Auf der oberen Ebene ist eine selbst gefertigte Platine untergebracht, welche den Lampenstrom und die Lampenspannung des Lampenfeldes skaliert, sodass beides auf den frontseitig montierten LCD-Anzeigen dargestellt werden kann. Zudem werden für die beiden LCD-Anzeigen von zwei Fertig-Teilplatten 9V Gleichspannung erzeugt. Auf der unteren Ebene sind neben zwei kleineren Klemmleisten ein Überspannungswächter, ein Schütz und ein Motorschutzschalter untergebracht. Die Einspeisung des Lampenfeldes ist über drei Laborbuchsen an der linken Seite der Elektronikkammer gelöst. Hier befindet sich auch ein Taster um den Überspannungswächter zurückzusetzen, wenn dieser ausgelöst hat. Im oberen Teil der Elektronikkammer sind zwei Lüfter eingebaut, welche zusammen mit den beiden Lüftern im Schaltschrank für die Temperierung der Modulkammer verantwortlich sind. Damit ist der Gleichstromteil des Simulators in der Elektronikkammer vom Steuerungsteil im Schaltschrank räumlich getrennt. Dadurch wird zum einen ausreichend Platz für alle Geräte erschlossen, zum anderen wird eine Beeinflussung der LOGO! durch elektromagnetische Störungen vermieden. Die gesamte Elektronikkammer ist mit einer Platte aus durchsichtigem Kunststoff berührungssicher ausgeführt. Die Platte ist mit 260 Belüftungslöchern ausgestattet, durch welche die aus der Modulkammer gesaugte Luft abgeführt kann.

## 4. Erweiterung und Optimierung

### 4.1. Mechanischer Grundaufbau und Lampenfeldaufhängung

Da die äußere Erscheinung des Simulators durch die bestehende Konstruktion vorgegeben ist und diese, wie in Abschnitt 3.1 bereits behandelt, viele Vorteile aufweist, wird das neue Gehäuse aus den gleichen Aluminiumprofilen aufgebaut. Allerdings wird ein preiswerterer Lieferant recherchiert, da die Firma item verhältnismäßig kostenintensiv ist. Bei der Auswahl des Lieferanten ist neben dem geringeren Preis darauf zu achten, dass das neue System item ähnelt, sondern item-kompatibel ist. Damit wird sichergestellt, dass Elemente aus dem item-Sortiment integriert werden können, die der neue Lieferant eventuell nicht anbietet. Das Unternehmen Metall- und Montagetechnik Fetik GmbH bietet mit seinem Profil vom Typ System I eine passende Lösung an. Es stehen Profile mit unterschiedlichen Nutbreiten zum Kauf bereit, wobei eine Nutbreite von acht Millimetern erforderlich ist. Das Strebenprofil 40x40mm Nut8IL entspricht den im Altgerät verwendeten Profilen, weshalb die Wahl auf diesen Typ fällt. Nun wird die Stückelungsempfehlung, die Frau Pagel in ihrer Arbeit zusammengestellt hat (Seite 91), mit einem Gliedermaßstab am Altgerät überprüft. Dabei fällt auf, dass die vier Eckprofile (Quer1\_1, Quer1\_3, Quer4\_1 und Quer4\_2) um je acht Millimeter kürzer sind als dokumentiert, da die je zwei der vier Millimeter starken Abdeckkappen nicht berücksichtigt worden sind. Bei der Entscheidung über die zu bestellende Gesamtmenge an Profilen kann jedoch nicht ausschließlich auf diese Empfehlung zurückgegriffen werden, da sowohl die Konstruktion des neuen Leuchtmittelmoduls als auch die Neukonstruktion der PV-Modulhalterung in Verbindung mit dem Gehäuse berücksichtigt werden müssen. Da die Bestellung der Gehäuse-Profile allerdings zeitnah geschehen muss, kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht detailliert darauf eingegangen werden. Aus diesem Grund wird zunächst nur der Teil der genannten Baugruppen konstruiert, von dem klar absehbar ist, dass er aus dem erwähnten Profiltyp gefertigt werden kann. Dadurch kann die Konstruktion der verbleibenden Teile zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Die beim Gehäuse verwendeten Profile eignen sich nicht, um die neue PV-Modulhalterung zu entwerfen, da die Konstruktion sonst sehr massiv ausfallen würde. Allerdings ist dieser Profiltyp für den Entwurf der höhenverstellbaren Aufhängung sinnvoll, da sie das Gewicht des Leuchtmittelmoduls sicher tragen muss. Zudem lassen sich für gleiche Profiltypen leichter passende Verbindungselemente finden als für unterschiedliche. Das Leuchtmittelmodul soll höhenverstellbar sein, um der Einbuße an Leuchtkraft durch Alterung entgegenzuwirken. Demnach ist es nicht notwendig, dass die Höhenverstellung schnell zu bewerkstelligen ist. Da das Leuchtmittelmodul ähnliche Ausmaße und eine ähnliche Form wie das alte Lampenfeld haben muss, wird zunächst auf einen rechteckigen Aluminiumrahmen geschlossen, in den das Leuchtmittelmodul einfach eingelegt werden kann. Allerdings würde die vordere Strebe des Rahmens ein einfaches Entnehmen des Moduls erschweren. Man müsste das Modul über die Strebe und im An-



schluss aus dem Gehäuse heben, was in Anbetracht der Leuchtmitteldichte und -höhe schwer vorstellbar ist. Aus diesen Gründen werden die vordere und die hintere Strebe weggelassen, was zu zwei zueinander parallel laufenden Profilen führt. Um diese ausreichend stabil mit dem Gehäuse zu verbinden, werden zwei zusätzliche Profile im Gehäuse notwendig, welche der Lampenkammertür gegenüberstehen. So können die zwei parallelen Profile je zweimal gelagert werden. Um die Höhenverstellbarkeit zu erreichen, wird auf den Schnellspanverbinder Nut 8I 0° (Abb. 4.1) zurückgegriffen, welcher an der Verbindungsstelle ein einfaches Spannen der Innensechskantschlüssel ermöglicht.



Abbildung 4.1: Schnellspanverbinder 0°

Um die beiden zusätzlichen Streben im Altgerät einfach nachrüsten zu können, wird der Automatik-Verbindungssatz 8 von Firma item in die Bestellliste aufgenommen. Dieser ermöglicht es, Aluminiumprofile nachträglich in einer bestehenden Konstruktion zu integrieren.

Im Altgerät wurden zwei Typen von Verbindern eingesetzt. Zum einen der Standard-Verbindungssatz zum anderen der Zentral-Verbindungssatz. Ersterer wird nur für den Zusammenbau der Türen verwendet, der zweite an allen anderen Verbindungsstellen. Auf Nachfrage bei Firma item stellt sich heraus, dass der Standard-Verbindungssatz für mehr als nur zwei miteinander zu verbindende Profile geeignet ist. Da dieser Verbindertyp auch beim neuen Lieferanten preiswerter ist und sich leichter verarbeiten lässt, werden sämtliche Verbindungen im Gehäuse mit diesem Typen geplant. Die notwendigen Montageschritte entsprechen den Schritten, die für die Montage des Standard-Verbindersatzes von Firma item zu tun sind (Pagel, Seite 55), nur ohne die Kunststoffscheibe. Lediglich an den Stellen, an denen zwei Profile gegenüber miteinander verbunden werden müssen (Abb. 4.2), ist der Zentralverbindersatz erforderlich. Im gesamten Aufbau werden so acht dieser Verbinder notwendig.



Abbildung 4.2: Zentralverbindungssatz

## 4.2. Lampenfeld

Bevor mit dem Entwurf des neuen Leuchtmittelmoduls begonnen wird, soll zunächst untersucht werden, ob andere Leuchtmittel als die bisher eingesetzten Halogenstrahler geeignet sind. Es werden Möglichkeiten zur weiteren Steigerung der Homogenität sowie Alternativen zur bestehenden Verschaltung der Leuchtmittel untersucht. Frau Pagel hat in ihrer Arbeit den Einsatz von LED im Nachfolgeaufbau vorgeschlagen. Nach umfangreicher Recherche wird allerdings beschlossen, dass LED mit sonnenähnlichem Spektrum immer noch deutlich zu teuer sind. Desweiteren haben LEDs eine um Größenordnungen geringere Wärmeabstrahlung als Halogenstrahler. Das ist zwar aus ökologischen Gründen sinnvoll, allerdings ließen sich einige der im Laborversuch notwendigen Umgebungstemperaturen in der Modulkammer nicht mehr erreichen. Es wäre eine zusätzliche Heizung nötig, um diesem wichtigen Aspekt gerecht zu werden. Da die bisher eingesetzten Strahler zudem gut an das Sonnenspektrum herankommen, preiswert sind sowie einen geringen Abstrahlungswinkel aufweisen, fällt die Wahl wieder auf die bereits eingesetzten Halogenstrahler. In der Vorgängerarbeit wird weiterhin der Einsatz von abstrahlungsstärkeren Leuchtmitteln im Randbereich erwähnt, um eine homogenere Bestrahlung des PV-Moduls zu erreichen. Allerdings hat der Einsatz von unterschiedlichen Strahlern den Nachteil, dass dies beim Ersatz der Leuchtmittel beachtet werden muss. Da Reserve-Leuchtmittel nur in geringer Menge vorgehalten werden, läuft man eher Gefahr, dass der Simulator nicht betrieben werden kann, sollte ein nicht vorgehaltenes Leuchtmittel defekt sein. Deswegen wird beschlossen, weiterhin mit einem Typ an Leuchtmitteln zu arbeiten. Die Verschaltung des alten Lampenfeldes wurde bereits in Abschnitt 3.2 vorgestellt, sodass nun darauf aufgebaut werden kann. Es werden zwei weitere Schaltungen bezüglich ihrer Eignung untersucht. Eine Serienschaltung aller 48 Strahler sowie drei parallel geschaltene Serienschaltungen zu je 16 Strahlern. Die aufgenommene Gesamtleistung jeder Variante berechnet sich durch die Addition der Nennleistung aller 48 Strahler (Gleichung 4.1). Im Anschluss können Stromaufnahme und zulässige Maximalspannung des Moduls berechnet werden. Tabelle 4.1 stellt die Ergebnisse dar.

$$P_{Modul} = 48 \cdot 35W = \underline{\underline{1680W}} \quad (4.1)$$

Tabelle 4.1: Denkbare Schaltungsvarianten

Schaltung	Stromaufnahme	zul. Maximalspannung
eine Serie	2,91A	576V
drei Serien	8,75A	192V

Wären alle Strahler in Reihe geschaltet, müsste eine sehr hohe Spannung bereitgestellt werden, um die volle Leistung des Moduls zu erreichen. Dadurch müsste der Gleichspannungskreis in der Elektronikkammer sowie das Leuchtmittelmodul hinsichtlich der Spannungsfestigkeit deutlich höheren Anforderungen genügen. Bei einer Parallelschaltung von drei Serienschaltungen würde der Strom bei voller Leistung auf 8,75A (Tabelle 4.1) steigen, was einen größeren und damit teureren Motorschutzschalter erfordern würde. Damit fällt die Wahl auf die bestehende Variante aus zwei Serienschaltungen. Im nächsten Schritt kann damit begonnen werden, das Leuchtmittelmodul zu entwerfen. Es darf sich in Form und Größe nicht sehr vom alten Lampenfeld unterscheiden, da es sich auch in das Altgerät einfügen muss. Um die in Abschnitt 3.2 genannten Nachteile zu beseitigen, wird die Möglichkeit geschaffen, die Aderleitungen zu verbergen. Weiterhin wird mit Hilfe von Laborbuchsen ermöglicht, das Modul elektrisch leicht vom Simulator zu trennen, damit die Entnahme komfortabel wird. Abbildung 4.3 zeigt den Entwurf des neuen Leuchtmittelmoduls, in den die genannten Forderungen eingearbeitet sind. Der äußere Rahmen wird aus einem zwei Millimeter starken Aluminiumwinkelprofil mit den Schenkelbreiten 25 zu 15 Millimeter gebogen. Auf dieses Winkelprofil werden Aluminium-U-Profile genietet, an welche wiederum die Sockel für die Strahler geschraubt werden. Die Verdrahtung wird bewerkstelligt, indem die vorkonfektionierte Aderleitung der Sockel mit Klemmen der Firma WAGO wie festgelegt verbunden werden. Als Abdeckung dieser U-Profile werden Aluminiumflachstangen verwendet, die in der Zentralen Laborwerkstatt mit einem passgenauen Bund versehen werden. So rutschen die Flachstangen bei Entnahme des Moduls nicht von den U-Profilen. Die Laborbuchsen werden an der Seite des Moduls angebracht, die später in Richtung der Elektronikkammer deutet.

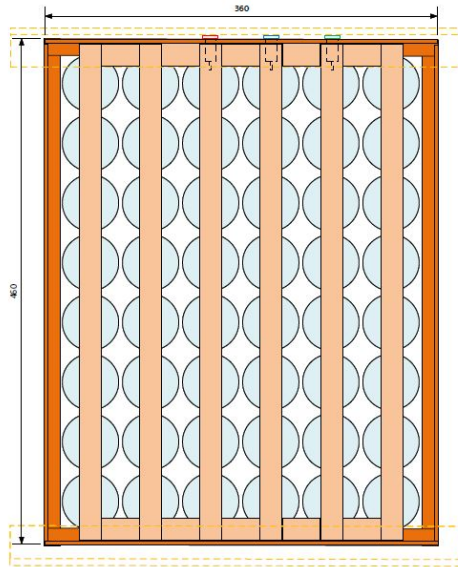


Abbildung 4.3: Entwurf des neuen Leuchtmittelmoduls

### 4.3. PV-Modulhalterung

In einem ersten Entwurf für die neue PV-Modulhalterung werden zu den in Abschnitt 3.3 genannten Vor- und Nachteilen der bestehenden Halterung weitere Verbesserungsmöglichkeiten untersucht und zusammengefasst. Dabei ist es sinnvoll und zweckmäßig die Vorteile zu erhalten, ohne die nachteiligen Eigenschaften zu übernehmen. In der fertigen Konstruktion stehen sich die schnelle Austauschbarkeit der PV-Module mit einer unsicheren Fixierung im Simulator sowie ungeeignete Lagerbedingungen der selbigen in einem Bauteil gegenüber. Zwar erfüllen die Gewindestangen die Anforderung nach schneller Austauschbarkeit sehr gut, jedoch ist eine sichere und stabile Fixierung der PV-Module nach jahrelanger Nutzung eine wesentliche Forderung, der in der vorliegenden Arbeit nachgegangen wird. Da weiterhin die Lagerproblematik der nicht verwendeten Module berücksichtigt werden soll, wird beschlossen, dass die zukünftige PV-Modulhalterung ohne zusätzlich befestigte Bestandteile an den PV-Modulen auskommen muss. Auf diese Weise müssen die zu untersuchenden Module mechanisch nicht bearbeitet werden, wodurch die genannten Nachteile bezüglich Lagerung und Belastung der Modulrahmen abgestellt werden können. Da die Gewindestangen zentraler Bestandteil der bestehenden Halterung sind, muss das gesamte Konzept überarbeitet werden. Der Schwerpunkt der folgenden Überlegungen wird somit auf ein schnelles Wechseln der Module und ein stabiles sowie funktionales Design gelegt, welches das Untersuchen von Modulen unterschiedlicher Abmessungen ermöglicht. Dazu wird zunächst recherchiert, ob sich die Abmessungen der am Markt befindlichen Module an Normen oder Standards orientieren. Allerdings ergibt sich, dass die Abmessungen von Länge, Breite und Höhe der Modulrahmen derart variieren, dass sich daraus kein Schluss auf eine auf einige Modelle zugeschnittene Halterung ziehen lässt. Somit muss ermöglicht werden sämtliche Module, die die Abmessungen der Mo-

dulkammer nicht überschreiten, ohne Schwierigkeiten fixieren zu können. Da inzwischen verschiedenste Unternehmen Lösungen für die Installation von PV-Modulen entwickelt haben, werden vor dem nächsten Entwicklungsschritt Methoden recherchiert, die im Simulator angewandt werden können. Die Firma Würth bietet ein Sortiment an Montageschienen an, auf welche mit Hilfe von speziellen Klemmen PV-Module befestigt werden können. Der Einsatz dieses Schienensystems macht die Installation von Modulen jeder Länge und Breite möglich. Dafür müssen lediglich die Abstände zwischen den Schienen auf ein geeignetes Maß gebracht werden. Die dazugehörigen Klemmen decken alle marktüblichen Rahmenhöhen ab. Das System wird dennoch nicht verwendet, da es für die dauerhafte Installation von PV-Modulen ausgelegt ist. Damit einhergehend sind die Klemmen mit Schrauben versehen, was im Laborversuch den Einsatz von zusätzlichem Werkzeug erfordern würde. Zudem sind sie für Rahmenhöhen zwischen 30 mm und 50 mm ausgelegt, was zwar für die Montage von ortsfesten Photovoltaikanlagen geeignet ist, aber nicht für Kleinmodule wie sie im Simulator untersucht werden sollen. So weist zum Beispiel das für den Simulator geeignete und bereits vorhandene Dünnschichtmodul von Firma conrad eine Rahmenhöhe von 17 mm auf. Obwohl das System nicht geeignet ist, wird untersucht inwieweit dessen Vorteile in einem selbst konstruierten Schienensystem nutzbar gemacht werden können. Da eloxiertes Aluminium auch für die PV-Modulhalterung eine geeignete Wahl ist, da es leicht ist, einfach zu bearbeiten und sich gut in das Design des Simulators einfügt, werden die nötigen Materialien ebenfalls bei der Firma Metall- und Montagetechnik Fetik GmbH gesucht. Für das Schienensystem kommt eine schmalere Variante des im Gehäuse verwendeten Profiltyps in Frage. Hierfür eignet sich das quadratische Strebenprofil Nut 5I mit einer Kantenlänge von 20mm. Um die maximale Bandbreite unterschiedlicher PV-Modulabmessungen in Länge und Breite aufnehmen zu können, ist die Verbindung der Profile zu einem rechtwinkligen Kreuz sinnvoll. Um das Kreuz herum wird ein Rahmen aus einer Kombination des gleichen Profiltyps und Aluminiumflachstange gefertigt, wodurch sich eine Art Tisch ergibt. Der Rahmen kann nicht vollständig aus dem Aluminiumprofil gefertigt werden, da dies zu einer Verringerung der nutzbaren Breite der Halterung führen würde. Für die senkrechte Verbindung steht ein Winkel mit Kunststoffabdeckung zum Kauf bereit, welcher die Profile mithilfe von Nutsteinen und passenden Schrauben verbindet. Nun muss noch das Klemmsystem durch eine eigene Konstruktion abgewandelt werden. Zu diesem Zweck wird das Sortiment der Firma H. Kleineberg GmbH konsultiert, welches HAW-Studenten schon in der Vergangenheit zur Verfügung stand. Als Klemmkörper kommt das auf eine Länge von 25mm zugeschnittene und 2 mm starke Aluminium-Rechteckrohr mit den Außenmaßen 50 mm x 30 mm in Frage. Der Klemmdeckel kann aus dem Aluminiumwinkelprofil mit den Abmessungen 40mm x 30mm x 3mm gefertigt werden. Um den Klemmdeckel zu spannen, ist eine Rändelschraube sinnvoll da diese mit der Hand festgezogen werden kann. Die zentrale Laborwerkstatt hält außerdem ein breites Spektrum an Niettechnik bereit, wobei

vorrätige Einnietmuttern als Gewinde für die Rändelschraube geeignet sind. Außerdem sind Rändelschraubenköpfe zum Aufpressen auf konventionelle Schrauben vorhanden, was den Einkauf teurer Rändelschrauben erspart. Auf jeden der vier Kreuzschenkel kann nun eine solche Klemme gesetzt werden, wodurch sich vier Befestigungspunkte ergeben, an denen sich das Modul sicher und schnell fixieren lässt. Problematisch an diesem System bleibt allerdings, dass es die PV-Module auf den Tisch spannt, wobei die Moduloberflächen, abhängig von der jeweiligen Modulrahmenhöhe, nicht auf Höhe der Drehachse der Halterung liegen. Damit würde eine Änderung des Einstrahlungswinkels ebenfalls die horizontale Position der Moduloberfläche innerhalb des Simulators verändern, wodurch die dann feststellbaren Messwertänderungen nicht mehr ausschließlich auf den geänderten Einstrahlungswinkel rückführbar wären. Eine Unterfütterung der Module durch Metall- oder Kunststoffplättchen, welche unterhalb der Klemmen positioniert werden, würde dieses Problem lösen (Abbildung 4.4). Jedoch würde der Verlust eines oder mehrerer dieser Plättchen den Laborablauf behindern, da sich das momentan verwendete PV-Modul möglicherweise nicht auf die korrekte Höhe der Drehachse fixieren ließe.

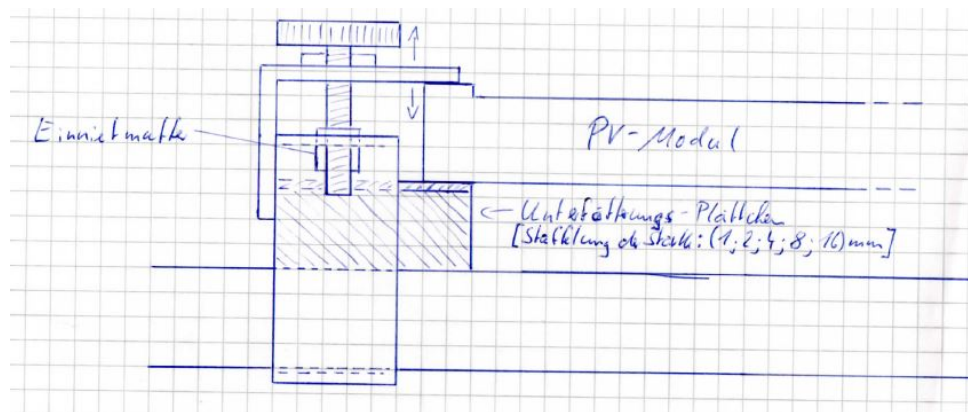


Abbildung 4.4: Erster Entwurf des Klemmsystems

Demnach ist es sinnvoller, einen festen Anschlag auf Höhe der Drehachse zu definieren. Der bewegliche Teil der Klemme kann dann von unten gegen das Modul geklemmt werden, wodurch sich die Moduloberfläche unabhängig von der Rahmenhöhe immer auf Höhe der Drehachse befindet. Dafür ist das Überarbeiten des Klemmkörpers nötig. Statt des Vierkantrohres wird ein Stück des schmalen Aluminiumprofils senkrecht auf jeden Kreuzschenkel gesetzt. Mit einer Schraube und einem passenden Nutenstein in jedem Kreuzschenkel kann das Stück verschoben und festgeklemmt werden. Der feste Anschlag am oberen Ende wird durch ein Aluminiumplättchen realisiert und mit derselben Schraube befestigt. Der bewegliche untere Teil der Klemme wird als kleiner Aluminiumklotz ausgeführt, welcher sich auf dem senkrechten Stück auf und ab bewegen lässt und ebenfalls mit einer kleinen Rändelschraube befestigt werden kann. Damit kann ein PV-Modul in zwei Schritten auf die Halterung gespannt werden. Erst fixiert der Student alle vier beweglichen Aluminiumklötze so, dass die Differenz zum Ende des senkrechten Stücks hin

der Modulrahmenhöhe entspricht. Nun kann das PV-Modul auf den Klotz gesetzt und mit der oberen Rändelschraube festgespannt werden. Damit legt die Höhe der senkrechten Profilstücke fest, wie weit der Tisch unterhalb der Drehachse liegen muss. Folglich muss es höher sein als der höchste in Frage kommende Modulrahmen. Je höher allerdings die senkrechten Stücke sind, umso weiter schwenkt die PV-Modulhalterung bei Änderung des Einstrahlungswinkels nach außen, wobei sie in der 60°-Stellung in den Schließbereich der Modulkammertür gelangen kann. Dann ließe sich die Tür nicht mehr schließen. Der höchste Modulrahmen, der während der Recherche nach geeigneten PV-Modulen auffindbar ist, beträgt 45mm. Um diese Höhe nicht wesentlich zu überschreiten, wird die Höhe der senkrechten Profilstücke auf 50mm festgelegt. Nun fehlt noch die Befestigung des Tisches in der Modulkammer, um die PV-Modulhalterung zu vervollständigen. Die Werkstatt bekommt den Auftrag, zwei Kunststoffbuchsen als Auflager, zwei Achsen aus Aluminiumrundstab und zwei massive Aluminiumdreiecke herzustellen. Die Dreiecke erhalten eine Bohrung für das Durchführen der Achse und können mit Nutensteinen und passenden Schrauben mit dem Halterungsrahmen verbunden werden. Die Kunststoffbuchsen werden in die linke und rechte Seite der Modulkammer eingelassen. So lässt sich die gesamte PV-Modulhalterung ruckelfrei und leichtgängig bei hoher Stabilität schwenken. Da die Halterung in der 90°- Stellung auf den Modulkammerboden treffen würde, muss die Drehachse im Vergleich zum Altgerät um 5 cm angehoben werden. Folglich muss das Winkelblech um die gleiche Strecke angehoben werden. Die Konstruktion der Halterung mit Angabe der maximal zulässigen Modulabmessungen ist in Anhang A.5 zu sehen.

#### **4.4. Reduzierung der Lüftergeräusche**

Bei der Auswahl des neuen Lüfertyps werden neben dem emittierten Geräuschpegel und dem erzeugten Volumenstrom auch der Preis in Betracht bezogen. Da der im Altgerät erzeugte Volumenstrom nicht unterschritten werden darf, hat dieser Parameter die höchste Priorität. Danach folgt die Geräuschentwicklung und zum Schluss der Preis. Das heißt, wenn zwei Lüfter in einem Parameter vergleichbare Werte aufweisen, wird der Parameter mit der nächsthöheren Priorität verglichen. Dabei erkennt man, dass bei gleicher Lagerung einem höheren Volumenstrom eine höhere Geräuschentwicklung gegenübersteht. Aus den recherchierten Modellen werden zwei herausgesucht, die die geforderten Attribute gut vereinen. Für einen direkten Vergleich der Geräuschentwicklung wird zunächst je ein Exemplar bestellt und deren Geräuschentwicklung subjektiv verglichen. Der Axiallüfter von Firma Artiko stellt sich dabei als deutlich leiser heraus als der Lüfter von Firma Pabst. Dieser Lüfter hat ein geringeres Fördervolumen als der im alten Lampenfeld eingesetzte Lüfter. Deshalb wird entschieden, einen Lüfter zusätzlich für die Kühlung des Lampenfeldes auf der Rückseite des Simulators einzusetzen.

#### **4.5. 3M™High Air Flow (HAF) Luftfiltermedium**

Während der Arbeit am Altgerät fällt eine Staubschicht auf der Glasplatte, die die Modulkammer von der Lampenkammer trennt, auf. Im Betrieb wird der Staub zusammen mit der Luft angesaugt und setzt sich auf der Glasplatte ab. Im Stillstand gelangt der Staub durch die großen Ausschnitte in der Geräteoberseite und setzt sich ebenfalls auf der Glasplatte ab. Es ist anzunehmen, dass sich der Staub auch auf dem Lampenfeld absetzt das im Betrieb sehr heiß wird. Damit ist bei diesem Phänomen auch ein gewisser Sicherheitsaspekt zu betrachten. Um dieses Problem zu lösen, wird das 3M™High Air Flow (HAF) Luftfiltermedium eingesetzt. Dieses Produkt ist elektrostatisch geladen und extrahiert so den Staub aus der Luft, ohne diese stark zu bremsen. Das Filtermedium wird in die Ausschnitte der Geräteoberseite sowie in die Ausschnitte der Grundplatte des Gerätes eingesetzt, sodass die angesaugte Luft gefiltert wird bevor sie in den Simulator gelangt. Aus diesem Grund wird die Strömungsrichtung in der Lampenkammer geändert, sodass die Luft oben angesaugt und zu den Seiten hinausgeblasen wird. Ohne diese Maßnahme würde der Staub weiterhin durch die seitlichen Lüfter ins Gehäuse gelangen.

#### **4.6. Platine zur Messwertskalierung**

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Verringerung der Messwertdrift an den BNC-Buchsen und mit dem Korrigieren des falschen Vorzeichens der Leistungskennlinie. Im Laborversuch macht sich die Drift bemerkbar, indem der Wert des Modulstromes ohne erkennbaren Grund innerhalb weniger Minuten zuzunehmen scheint. Dadurch ergibt sich bei der Aufnahme der Kurvenscharen ein scheinbares Offset der einzelnen Kurven, sodass diese nicht im selben Punkt beginnen. Allerdings hat die Drift einen kontinuierlichen Einfluss auf die Kurven, sodass sie kein konstantes Offset erzeugt, sondern die Messwerte auch während der Messung beeinflusst. Dadurch wird zudem die Form der Kurven minimal verändert. Das ist zwar mit bloßem Auge nicht zu erkennen verdeutlicht aber die Problemstellung. Bisher wurde diesem Phänomen mit der Anpassung der Stiftposition des XY-Schreibers im Anfangspunkt begegnet.

##### **4.6.1. Die Drift des Strommesswertes**

Für die Bereitstellung der Messwerte an den BNC-Buchsen ist Platine A3 zuständig, weswegen hier mit der Ursachenforschung begonnen wird. Die während des normalen Betriebs erzeugten Kurven eignen sich nicht zur näheren Untersuchung der Drift, da sie, wie in Abschnitt 4.6 beschrieben, kontinuierlich auf die Kurven einwirkt und somit zu jedem Augenblickswert eine andere Differenz zum korrekten Wert erzeugt. Zunächst muss also ein geeignetes Verfahren entwickelt werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Ein guter Ansatz hierfür ist die Betrachtung bestimmter Arbeitspunkte des PV-Moduls. Die markantesten Arbeitspunkte eines PV-Moduls lassen sich im Leerlauf, im Kurzschluss-



fall und im Falle der maximalen Leistung (MPP) erkennen. Um den MPP einzustellen, ist ein exaktes Justieren von Strom und Spannung durch eine variable Last nötig. Platine A2 stellt zwar eine variable Last zur Verfügung, allerdings lässt sie sich nicht auf einen festen Wert einstellen, sondern wird von der LOGO! gesteuert. Eine variable Last ließe sich auch mithilfe eines externen Potentiometers abbilden, allerdings wäre ein erheblicher Verdrahtungs- und Messaufwand nötig, um die exakten Strom- und Spannungswerte für das Erreichen des MPP einzustellen. Der in Frau Pagels Bachelorarbeit erstellte Schaltplan zeigt eine effektivere Möglichkeit auf (Abbildung 4.5). So ist das Relais KM im Stande, das PV-Modul kurzzuschließen, indem KM angesprochen wird. Der Kurzschlussstrom fließt dann vom Modul durch den Strom-Spannungswandler, über den geschlossenen Kontakt von KM und den Messshunt zum Modul zurück. Bleibt KM dagegen geöffnet, ergibt sich kein Stromfluss und am Modul bleibt die Leerlaufspannung bestehen. Relais KM lässt sich zudem leicht über den Schalter für die Umschaltung zwischen Hell- und Dunkelkennlinie ansprechen. Somit eignen sich die Arbeitspunkte im Kurzschluss und im Leerlauf sehr gut, um die Ursache der Drift messtechnisch zu ermitteln.

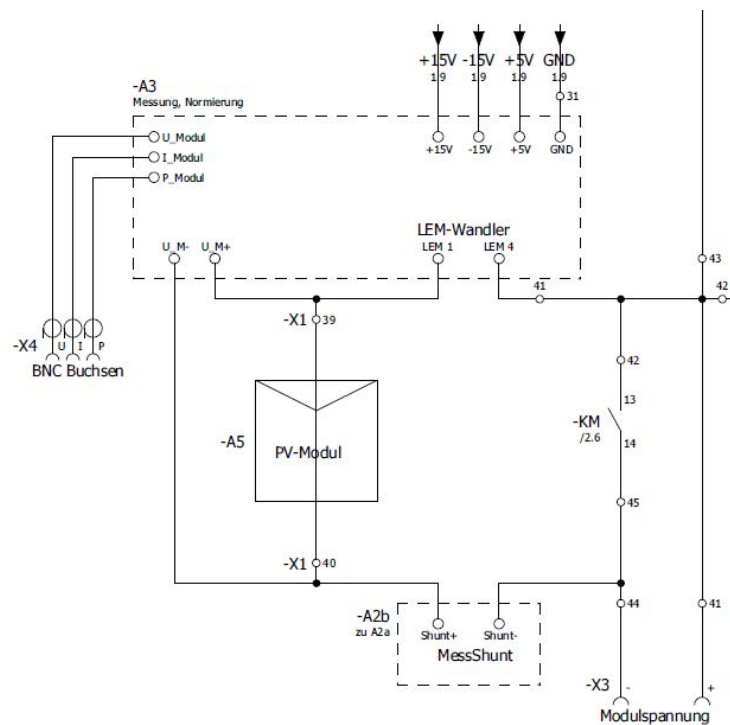


Abbildung 4.5: Ausschnitt aus dem Schaltplan der Arbeit Pagel

Um die Ursache einzugrenzen, wird Platine A3 zunächst anhand ihres Aufbaus analysiert. Die Messwerte werden durch mehrere Operationsverstärkerschaltungen skaliert. Die Verstärkung dieser Stufen ist von der äußeren Beschaltung der Operationsverstärker abhängig. Denkbar ist, dass sich die Widerstandswerte infolge von Temperaturschwankungen geringfügig ändern und sie damit eine temperaturabhängige Verstärkung verursachen. Weiterhin besitzen die Operationsverstärker selbst und der Strom-Spannungswandler einen

Temperaturkoeffizienten, was ebenfalls eine Abweichung der Ausgangsspannung verursachen könnte. Da die Umgebungstemperatur der Platinen auch von der Modulkammer-temperatur abhängig ist, und diese deutlichen Schwankungen unterliegt (siehe Abschnitt 3.4), erscheint diese Annahme plausibel. Transiente Verläufe wie eine Drift können auch durch den Auflade- oder Entladevorgang eines oder mehrerer Kondensatoren verursacht werden. Jedoch ist dieser Zusammenhang unwahrscheinlich, da keiner der auf Platine A3 eingesetzten Kondensatoren direkten Einfluss auf die Ausgangsspannung hat. Sie stützen lediglich die  $\pm 15V$ -Versorgungsspannung der Stufen, wobei nicht mit einem Einschnüren des Stellbereichs zu rechnen ist, sodass der Wert der Ausgangsspannung beeinträchtigt werden könnte. Somit ist der Temperatureinfluss auf die Bauteile von Platine A3 der erste konkrete Ansatz für die Entwicklung eines Messaufbaus. Um den Temperatureinfluss zunächst abzuschätzen, wird exemplarisch die letzte Verstärkerstufe im Stromzweig auf ihre Temperaturabhängigkeit hin analysiert. Im Datenblatt der beiden Widerstände ist ein Temperaturkoeffizient von 135ppm vermerkt (Quellenangabe durch Reichelt-Link). Das entspricht einer Abweichung von  $\alpha = 0,0135\% \cdot \frac{1}{K}$ . Die Offsetspannung des Operationsverstärkers vom Typ OP07CP weist laut Datenblatt einen Temperaturkoeffizienten von  $25\mu V \cdot \frac{1}{K}$  auf. Die nominelle Offsetspannung wurde bei einer Temperatur von  $25^\circ C$  gemessen und die maximal zulässige Temperatur beträgt  $70^\circ C$ . Aus diesem Grund wird diese Temperaturdifferenz als Berechnungsgrundlage herangezogen, und es lassen sich Gleichung 4.2 bis 4.7 aufstellen.

$$R_{70} = R_{25} \cdot (1 + [\alpha \cdot \Delta T]) = 100k\Omega \cdot \left(1 + \left[0,000135 \cdot \frac{1}{K} \cdot 45K\right]\right) = \underline{100,607k\Omega} \quad (4.2)$$

$$22k\Omega \cdot \left(1 + \left[0,000135 \cdot \frac{1}{K} \cdot 45K\right]\right) = \underline{22,134k\Omega} \quad (4.3)$$

$$V_{25} = -\frac{R_{13}}{R_{12}} = \frac{100k\Omega}{22k\Omega} = \underline{\frac{50}{11}} \quad (4.4)$$

$$V_{70} = \frac{100,607k\Omega}{22,134k\Omega} = \underline{4,54536} \quad (4.5)$$

$$V_{IO_{70}} = \frac{25\mu V}{K} \cdot 45K = \underline{1,125mV} \quad (4.6)$$

$$V_{70} \cdot V_{IO_{70}} = 1,125mV \cdot 4,54536 = \underline{5,114mV} \quad (4.7)$$

Es bildet sich bei einer Temperatur von  $70^\circ C$  eingangsseitig die in Gleichung 4.6 berechnete Offsetspannung aus, die zu einer zusätzlichen Auslenkung am Ausgang führt. Bei der in Gleichung 4.5 berechneten Verstärkung ergibt sich dadurch das in Gleichung

4.7 berechnete, ausgangsseitige Offset. Das entspricht einem absoluten Fehler in gleicher Höhe. Die Verstärkungsänderung führt zu dem in Gleichung 4.8 berechneten, vernachlässigbar kleinen, relativen Fehler, welcher deswegen nicht weiter betrachtet wird. Da alle vier Operationsverstärker, die an der Skalierung des Stroms beteiligt sind, über den gleichen Temperaturkoeffizienten verfügen, haben alle das gleiche eingangsseitige, temperaturabhängige Offset. Da die relativen Fehler vernachlässigbar klein sind, werden die absoluten Fehler mit der jeweiligen Stufenverstärkung bei  $25^{\circ}C$  multipliziert und dann aufaddiert. Bei einer Temperatur von  $70^{\circ}C$  weicht der skalierte Strommesswert also um etwa  $11,32mV$  vom korrekten Wert ab (Gleichung 4.9).

$$f_{relV} = \frac{V_{25} - V_{70}}{V_{25}} \cdot 100\% = \frac{\frac{50}{11} - 4,54536}{\frac{50}{11}} \cdot 100\% = \underline{0,0021\%} \quad (4.8)$$

$$f_{abs_{gesamt}} = 1,125mV \cdot \left( \frac{50}{1} + \frac{88}{25} + 1 + 1 \right) = \underline{11,32mV} \quad (4.9)$$

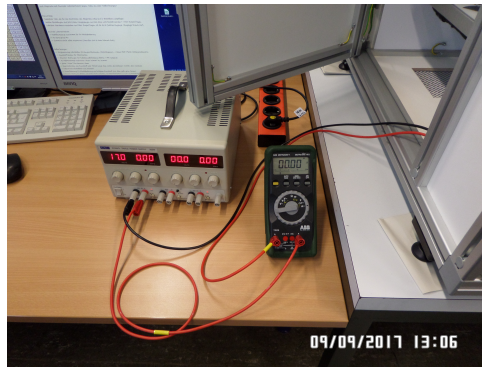


Abbildung 4.6: Labornetzteil im Leerlauf

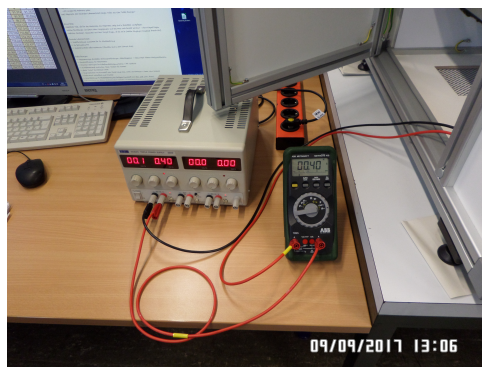


Abbildung 4.7: Kurzgeschlossenes Labornetzteil

Um diese Annahme zu verifizieren, könnte das im Labor bereits eingesetzte PV-Modul NT122 von Firma sharp genutzt werden, um Ergebnisse unter Laborbedingungen zu erhalten. Da jedoch die Leerlaufspannung und der Kurzschlussstrom sowohl von der Temperatur, als auch von der Bestrahlungsstärke abhängig sind, würden sie die Auswirkungen des

Temperatureinflusses auf Platine A3 verschleiern. Es muss also ein geeigneter temperatur- und einstrahlungsunabhängiger Ersatz für das Modul gefunden werden. Deshalb wird beschlossen, ein Labornetzteil als Ersatz für ein angeschlossenes PV-Modul zu verwenden. Dieses weist zwar unter Belastung ein anderes Verhalten auf, durch das Einstellen der Stromgrenze lässt sich jedoch ein definierter Kurzschlussstrom nachbilden. Die eingestellte Spannung repräsentiert die Leerlaufspannung eines angeschlossenen Moduls. Es wird eine fiktive Leerlaufspannung von 17V und ein fiktiver Kurzschlussstrom von 400mA eingestellt. Mit dem Lampenfeld wird nun mit einer Bestrahlungsstärke von  $1000 \frac{W}{m^2}$  die Temperatur in der Modulkammer angehoben, wobei die Modulkammerlüftung zunächst eingeschaltet bleibt. Mit dem Multimeter (Inv. Nr.: 1162b/IFC) wird der genormte Kurzschlussstrom minütlich an der entsprechenden BNC-Buchse erfasst. Zusätzlich wird der zugekaufte Temperatursensor (PT100 / Art-Nr: 172412 - 62) durch einen Spalt der geschlossenen Schaltschranktür geführt und direkt vor Platine A3 platziert, um die Umgebungstemperatur zu jedem Messzeitpunkt festzustellen (Abbildung 4.8). Gleichzeitig wird die Modulkammertemperatur über die Temperaturanzeige der LOGO! abgelesen.

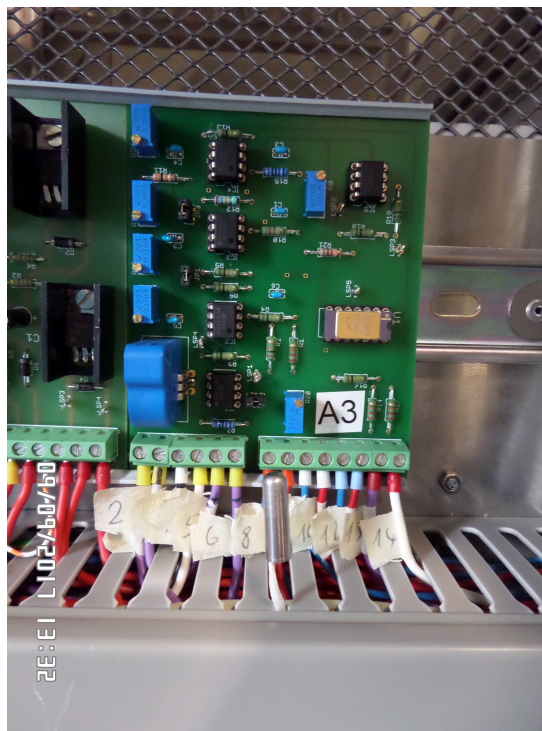


Abbildung 4.8: Vor Platine A3 positionierter PT100

Abbildung 4.9 zeigt den zeitlichen Verlauf der aufgenommenen Kurzschlussstromwerte in Minutenschritten. Der stetige Anstieg der Temperatur bis zum 19. Messpunkt ist deutlich zu erkennen. Am 20. Messpunkt wird die Modulkammerlüftung abgeschaltet, was einen deutlichen Anstieg beider Temperaturen und des Kurzschlussstromes zur Folge hat. Am 35. Messpunkt wird die Lüftung wieder eingeschaltet, was zu einem raschen Absinken aller Werte führt. Beim 35. Messpunkt hat die Umgebungstemperatur mit  $37,4^{\circ}C$  den

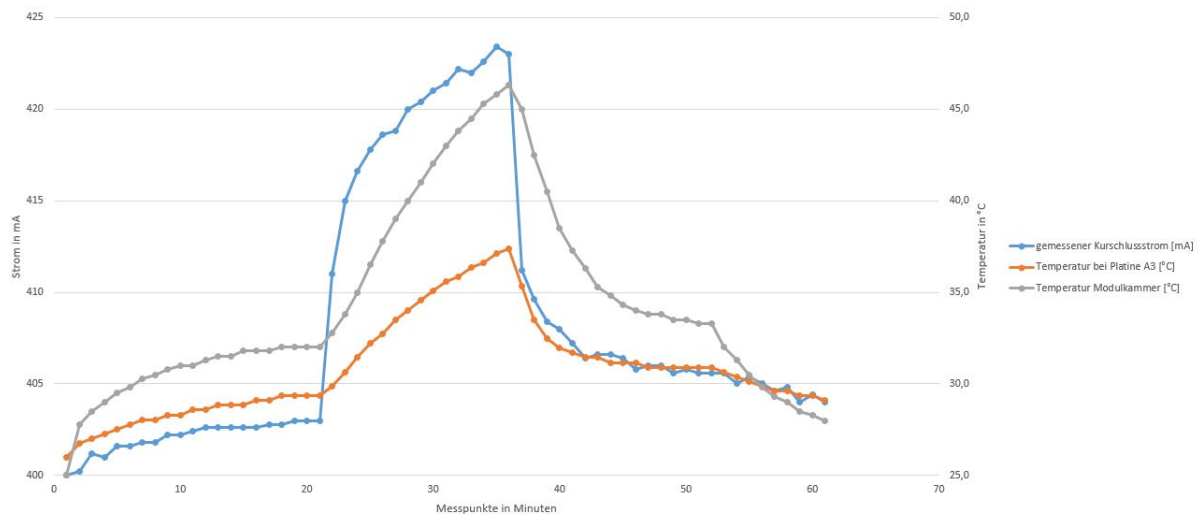


Abbildung 4.9: Vergleich von gemessenem Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Umgebungstemperatur um Platine A3

höchsten Wert erreicht. Zum selben Zeitpunkt liegt der Kurzschlussstrom 23mA über dem korrekten Wert. Das entspricht einer Spannung von 115mV an der BNC-Buchse. Damit beträgt die Abweichung bei  $37,4^{\circ}\text{C}$  gut dem 10-fachen der abgeschätzten Abweichung bei  $70^{\circ}\text{C}$ . Da ein klarer Zusammenhang zwischen der Umgebungstemperatur um Platine A3 und dem Strommesswert erkennbar ist, dieser aber wesentlich stärker ist als abgeschätzt, lässt sich die Temperaturabhängigkeit des Strommesswertes nicht allein durch die Bauteile auf Platine A3 erklären. Es fällt auf, dass der Strommesswert sehr empfindlich auf Temperaturänderungen reagiert. So wird der korrekte Wert von 400mA praktisch immer überschritten, selbst wenn die Modulkammerlüftung eingeschaltet ist. Um sein Verhalten bei reiner Raumtemperatur zu untersuchen, wird der Simulator abgeschaltet und das Labornetzteil entfernt, um eine eventuelle Erwärmung durch den 'Modulstrom' zu vermeiden. Es wird mehrere Stunden abgewartet, um sicher zu gehen, dass das Innere des Schaltschranks die Raumtemperatur angenommen hat. Im Anschluss wird der Simulator eingeschaltet und der Strommesswert mit dem Multimeter grob verfolgt. Es fällt auf, dass der Strommesswert nach dem Einschalten ansteigt und sich wenig später stabilisiert. Zur genaueren Analyse wird mit dem Programm LabView ein Signalverlaufdiagramm programmiert und der Zeitverlauf des Strommesswertes nach dem Einschalten des Simulators aufgezeichnet (Abbildung 4.10). Obwohl das Lampenfeld ausgeschaltet bleibt, steigt der Wert des gemessenen Stromes an, welcher nun bei 0A liegen sollte. Um die Ursache dafür zu finden, werden die zeitlichen Verläufe auch an den Ausgängen der vorangehenden Verstärkerstufen aufgezeichnet. Die erfasste Kurvenform lässt sich bis zur 5V-Eingangsspannung an der Referenzstufe am Anfang des Stromzweiges zurückverfolgen (Abbildung 4.12).

Man erkennt ein leichtes Absinken der 5V-Spannung nach dem Einschalten. Diese Span-

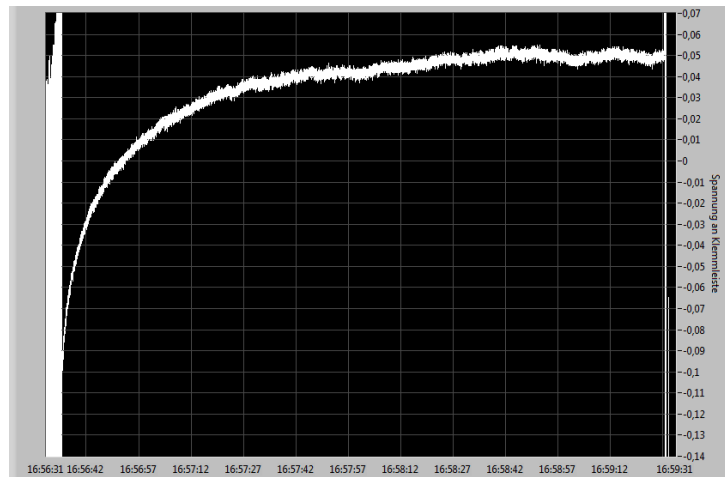


Abbildung 4.10: Skalierter Stromwert an der Platinenschraubklemme in Volt über der Zeit  
nung wird in der Referenzstufe halbiert und vom nachfolgenden Subtrahierer von der Spannung am Strom-Spannungswandlerausgang (Abbildung 4.11) abgezogen.

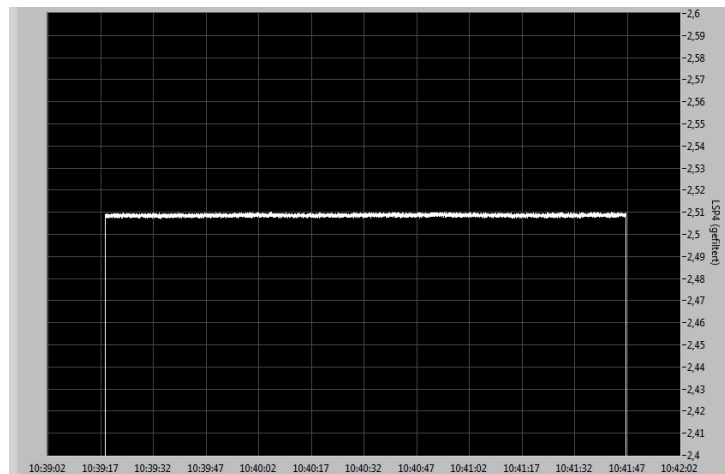


Abbildung 4.11: Verlauf der Spannung am Strom-Spannungswandlerausgang im stromlosen Zustand

Abschließend lässt sich feststellen, dass die von Platine U1 erzeugte 5V-Spannung nicht stabil genug ist, um den Anforderungen des Messstandes zu genügen. Es kann nun mit der Entwicklung einer Lösung begonnen werden.

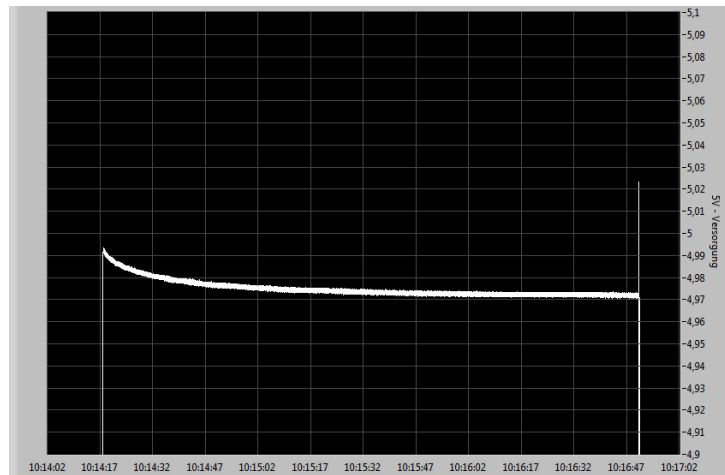


Abbildung 4.12: Verlauf der 5V-Spannung zur Generierung der 2,5V-Referenzspannung beim Einschalten

#### 4.6.2. Erarbeitung einer Lösung

Bei den schon im Aufbau von 1996 verwendeten Fertigplatinen, aus denen Platine U1 zusammengesetzt ist, handelt es sich um geregelte Gleichrichterschaltungen. Da weder bei der 9V-Versorgung der LED-Anzeigen noch bei der  $\pm 15V$ -Versorgung der Operationsverstärkerschaltungen Probleme auftreten, beschränkt sich die folgende Betrachtung auf die 5V-Teilplatine. Um einzuschätzen, ob das temperaturbedingte Einbrechen der Spannung typisch für diese Art der Spannungsgleichrichtung ist, wird deren Aufbau analysiert. Abbildung 4.13 zeigt den Aufbau der Schaltung für die 5V-Gleichrichtung. Man sieht, dass die Platinen-Ausgangsspannung parallel zur Ausgangsspannung des Linearreglers liegt, damit ist sie direkt von dessen Eigenschaften abhängig. Es handelt sich um einen Regler des Typs 78L05 von Firma ST microelectronics. Im aktuellen Datenblatt des gleichen Reglers findet man eine Darstellung über den Wert der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (Abbildung 4.14).

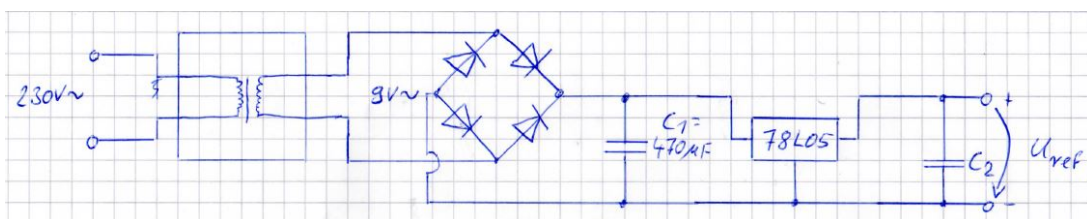
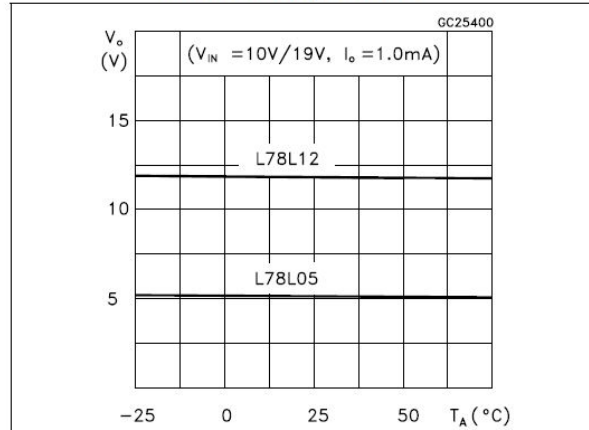


Abbildung 4.13: Schaltungstechnischer Aufbau der 5V-Teilplatine

$$U_{-25^{\circ}C} = \frac{5V \cdot 1,8mm}{42mm} = \underline{0,21V} \quad (4.10)$$

$$U_{75^{\circ}C} = \frac{5V \cdot 0,5mm}{42mm} = \underline{0,06V} \quad (4.11)$$

**Figure 4. L78L05/12 output voltage vs. ambient temperature**



**Figure 6. L78L05/12/24 thermal shutdown**

Abbildung 4.14: Temperaturabhängigkeit der 5V-Spannung aus dem Datenblatt des L78L05

$$\alpha = \frac{0,21V - 0,06V}{100^{\circ}C} = 0,0015 \frac{V}{^{\circ}C} \quad (4.12)$$

Die Steigung der dargestellten Geraden entspricht dem Temperaturkoeffizienten der Ausgangsspannung. Die Steigung wird ermittelt, indem die Spannung bei  $-25^{\circ}C$  und bei  $75^{\circ}C$  relativ zur 5V-Linie abgeschätzt und deren Differenz berechnet wird. Zum besseren Ablesen der Spannungswerte wird das Diagramm vergrößert und ausgedruckt. Der Maßstab der Spannungsachse auf dem Ausdruck beträgt  $42mm \hat{=} 5V$  (Abbildung 9.7). Nun lassen sich Gleichung 4.10 bis 4.13 aufstellen. Beim Ansteigen der Umgebungstemperatur um  $12,4^{\circ}C$ , wie in Abbildung 4.9 zu sehen, hätte dies eine Änderung der Ausgangsspannung von  $18,3mV$  zur Folge (Gleichung 4.13). Multipliziert mit der gesamten Verstärkung von 16 ergäbe sich ein Fehler von  $292,8mV$  an der BNC-Buchse.

$$U_{diff} = 0,0015 \frac{V}{^{\circ}C} \cdot 12,4^{\circ}C = \underline{18,3mV} \quad (4.13)$$

Somit ist die Temperaturabhängigkeit der 5V-Spannung ein normaler Bestandteil dieser Platine und es muss davon ausgegangen werden, dass die noch zu entwickelnde Lösung für die Spannungsgleichrichtung im Neugerät einer ähnlich ausgeprägten Abhängigkeit unterliegt. Demnach ist es also zusätzlich nötig, eine Spannungsstabilisierung zu entwickeln, die die geforderte Stabilität auch bei häufiger Temperaturänderung mit Sicherheit gewährleistet. Für die Eingrenzung der zu realisierenden Möglichkeiten ist erstmal festzustellen, welche Genauigkeit die Spannungsstabilität aufweisen muss. Der zukünftige Laborversuch wird mit der Software LabView absolviert werden, wobei die aufgenommenen Kurvenverläufe auf Papier der Größe DIN A3 im Querformat gedruckt werden sollen. Somit muss die Referenzspannung so stabil sein, dass das Abweichen vom korrekten Stromwert auf



dem gedruckten Papier nicht erkennbar ist. An dieser Stelle wird 'nicht erkennbar' als eine Abweichung vom korrekten Stromwert von 0,1mm auf dem gedruckten Papier definiert, da dies schmaler ist als die gedruckte Linie. DIN A3 Papier hat die Maße 29,7cm x 42cm, wobei der Strommesswert entlang der Breite des Papiers also 29,7cm abgetragen wird. Nimmt man an, dass die Stromachse über die gesamte Breite des Papiers reicht, dann entspricht ein Strom von 2A einer Länge von 29,7cm. Mit dem Skalierungsmaßstab des Stromes  $2A \hat{=} 10V$  lässt sich die geforderte Genauigkeit der neuen Referenzspannungsquelle  $U_{\Delta V_{ref}}$  berechnen.

$$U_{\Delta BNC} = \frac{10V}{29,7cm} \cdot 0,01cm = \underline{3,37mV} \quad (4.14)$$

$$U_{\Delta V_{ref}} = \frac{U_{\Delta BNC}}{V_{ges}} = \frac{3,37mV}{16} = \underline{0,2mV} \quad (4.15)$$

In Gleichung 4.14 wird die zulässige Spannungsabweichung an der BNC-Buchse berechnet. Teilt man diesen Wert durch die gesamte Verstärkung von Platine A3, erhält man den Wert, um den die neue Referenzstufe maximal abweichen darf (Gleichung 4.15).

Nach Recherche von unterschiedlichen Bauteilen zur Spannungsstabilisierung wird entschieden, dass eine Bandabstandsreferenz die geeignete Wahl ist. Das Funktionsprinzip dieses Bauteiles wird in Abschnitt 4.6.3 behandelt. Hier sei zunächst nur gesagt, dass dieses Bauteil ähnlich einer Z-Diode verwendet werden kann, aber über eine wesentlich höhere Genauigkeit verfügt und zudem sehr temperaturstabil ist. Weiterhin ist es mit dem zusätzlichen REF-Anschluss möglich, die erzeugte Referenzspannung schaltungstechnisch auf einen gewünschten Wert einzustellen. Im Sortiment von der Firma conrad.de findet sich im TL431BIP ein entsprechendes Bauteil, dessen elektrische Charakteristika zunächst im Datenblatt studiert werden. Es handelt sich um eine Bandabstandsreferenz im PDIP-Gehäuse und kann somit auf einem entsprechenden IC-Sockel platziert werden, wodurch es im Falle eines Defekts leicht gegen ein neues Exemplar getauscht werden kann. Die elektrischen Eigenschaften des TL431BIP finden sich im Datenblatt. Die Referenzspannung  $V_{ref}$  liegt bedingt durch Exemplarstreuung zwischen 2,483 V und 2,507 V. Ein schaltungstechnisches Ändern der Referenzspannung ist somit nicht nötig, da die Referenzstufe auf Platine A3 ohnehin etwa 2,5V erzeugen soll. Da die 0A-Spannung des Strom-Spannungswandlers leicht über 2,5V liegt (Abbildung 4.11) und nicht klar ist, welche Referenzspannung das bestellte Exemplar innerhalb des angegebenen Intervalls aufweisen wird, ist eine Möglichkeit zur Einstellung dieser Spannung nötig. Im Altgerät wurde dieses Problem mit einem einstellbaren Spannungsteiler gelöst, welcher sich durch den folgenden Impedanzwandler unbelastet verhielt. Da die Referenzspannung nun von der Bandabstandsreferenz erzeugt werden soll, ist hingegen ein nachträgliches Justieren nötig. Bedingt durch den knappen Platzbedarf auf der Platine wird nach einer Lösung gesucht, die möglichst ohne zusätzliche Bauteile auskommt. Aus diesem Grund

wird der Impedanzwandler zu einer nicht-invertierenden Verstärkerstufe mit einstellbarer Verstärkung umgewandelt. Eine invertierende Stufe ist nicht sinnvoll, da das Vorzeichen der Spannung unverändert auf den folgenden Subtrahierer gegeben werden muss. Die von der Bandabstandsreferenz erzeugte Referenzspannung ist über das gesamte angegebene Intervall geringer als die 0A-Spannung des Strom-Spannungswandlers. Somit scheint die naturgemäße Verstärkung von  $>1$  einer nichtinvertierenden Stufe zunächst passend. Um aber einen Sicherheitspuffer zu erhalten, der es ermöglicht die Referenzspannung auch zu verkleinern, wird ein Eingangsspannungsteiler an den Eingang des nichtinvertierenden Verstärkers geschaltet. Der Spannungsteiler und die Schaltungsverstärkung werden so dimensioniert, dass sich eine Verstärkung ergibt, welche sich um den Wert 1 herum einstellen lässt (Abbildung 4.15 und Gleichung 4.16 sowie Gleichung 4.17). So kann die temperaturstabilisierte Referenzspannung exakt auf die 0A-Spannung des Strom-Spannungswandlers eingestellt werden. Die entsprechenden EAGLE-Pläne sind den Anhängen A.1, A.2, A.3 und A.4 zu finden.

$$V_{U_{ref}} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.16)$$

$$V_{U_{ref}} = \frac{10k}{1k + 10k} \cdot \left(1 + \frac{0.5k}{10k}\right) = \underline{0,91..1,36} \quad (4.17)$$

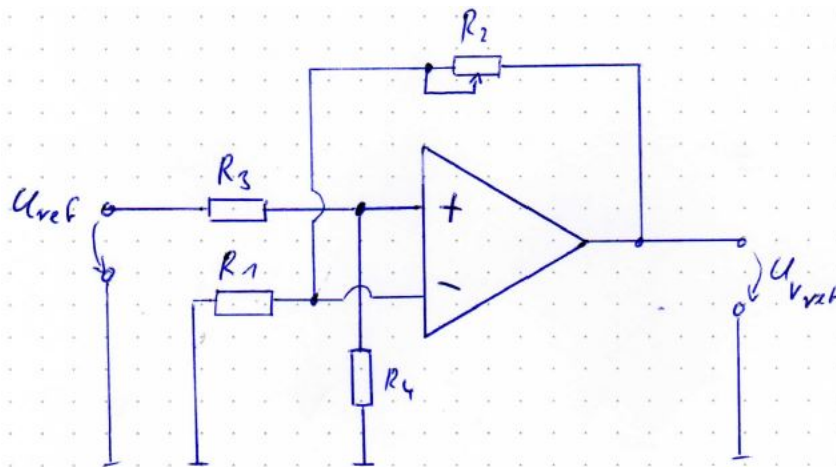


Abbildung 4.15: Schaltungsentwurf für die Verstärkung der Referenzspannung

#### 4.6.3. Funktionsprinzip einer Bandabstandsreferenzspannungsquelle (Jürgen Gutekunst et al. [2])

Bandabstands-Referenzelemente sind einfache, integrierte Schaltungen, die eine Referenzspannung mit definiertem Temperaturkoeffizienten zur Verfügung stellen (siehe Abbildung 4.16). Das wird im Prinzip erreicht, indem eine Spannung mit positivem Temperaturkoeffizienten und eine Spannung mit negativem Temperaturkoeffizienten addiert werden. Aus

den Grundlagen der Elektronik ist bekannt, dass die Basis-Emitterstrecke eines Transistors gedanklich durch eine Halbleiterdiode ersetzt werden kann. Halbleiter definieren sich durch einen bestimmten Bandabstand, welcher den Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband in Elektronenvolt meint. Dieser ist bei Halbleitern so beschaffen, dass eine bedeutende Anzahl Elektronen durch Energieeinprägung wie Wärme ins Leitungsband gehoben werden können. Dadurch sinkt der elektrische Widerstand des Halbleiters. Nun kann der Basis-Emitterspannung eines Transistors ein negativer Temperaturkoeffizient zugeordnet werden. In Abbildung 4.16 entspricht dies der Spannung  $U_{BE1}$ . Durch das Absinken des Kollektor-Emitterwiderstandes infolge erhöhter Temperatur sinkt nicht nur Spannung  $U_{BE1}$ , sondern es nimmt auch der Strom  $I_{C1}$  zu. Da der Spannungsfall über  $R_2$  proportional zu diesem Strom ist, kann diesem Spannungsfall ein positiver Temperaturkoeffizient zugeordnet werden. Der Operationsverstärker steuert die Transistoren so an, dass sie den gleichen Kollektorstrom führen.

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C \quad (4.18)$$

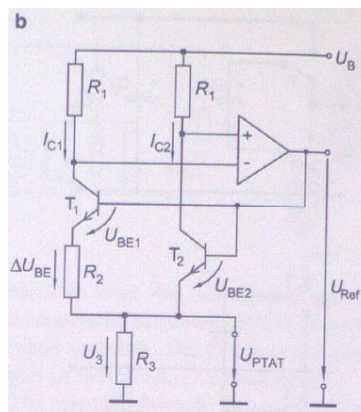


Abbildung 4.16: Aufbau eines Bandabstandsreferenzelementes nach A.P. Brokaw

Durch Anwenden der Maschenregel erkennt man, dass  $U_{BE2}$  der Addition von  $U_{BE1}$  und  $\Delta U_{BE}$  entspricht. Dabei unterliegt der Einfluss von  $\Delta U_{BE}$  dem Einfluss von  $U_{BE1}$ , was durch das Einbringen von Widerstand  $R_3$  ausgeglichen wird. Dieser erhöht den Einfluss von  $\Delta U_{BE}$  um den Faktor  $2 \cdot \frac{R_3}{R_2}$  (Gleichung 4.19 und 4.20).

$$U_{ref} = U_{BE2} + 2 \cdot I_C \cdot R_3 \quad (4.19)$$

Mit  $I_C = \frac{\Delta U_{BE}}{R_2}$  folgt:

$$U_{ref} = U_{BE2} + 2 \cdot \Delta U_{BE} \cdot \frac{R_3}{R_2} \quad (4.20)$$

#### 4.6.4. Testschaltung

Um die Bandabstandsreferenzquelle auf ihre Funktionstüchtigkeit und ihr Verhalten hin zu untersuchen, wird zunächst eine Testschaltung aufgebaut. Zu diesem Zweck wird die neu entworfene Referenzschaltung diskret auf einer Experimentierplatine aufgebaut. Allerdings wird als Versorgung der Referenzschaltung nicht 5VDC verwendet, sondern es wird eine einstellbare Spannungsquelle vom Labornetzteil eingesetzt. So kann simuliert werden, wie gut die Schaltung auf Schwankungen der 5V-Versorgung reagiert.

#### 4.6.5. Ursache des falschen Vorzeichens der Leistungskurve

Da in der Arbeit Pagel eine Operationsverstärkerschaltung gegenüber der Arbeit Schulz (Schulz, 2007 [3]) eingespart wurde, wird der Vermutung nachgegangen, ob dabei ein notwendiger Invertierer verloren ging. Durch den Vergleich der von Frau Schulz und von Frau Pagel erstellten Schaltpläne stellt sich jedoch heraus, dass die Verstärkerstufe eingespart werden konnte, ohne die Schaltungsfunktion zu beeinträchtigen. Bei der Analyse des Platinen-Schaltplans fällt jedoch auf, dass der Leistungswert und mit ihm sein Vorzeichen, durch Multiplikation von Strom- und Spannungswert gebildet wird. Weiterhin setzt sich der Zweig zur Spannungsskalierung aus einer nicht-invertierenden und einer folgenden invertierenden Verstärkerstufe zusammen, was in einem invertierten Vorzeichen mündet. Da der Spannungsskalierungsmaßstab ( $25V \hat{=} 10V$ ) einer Verstärkung von 0,4 entspricht, wird die erste Stufe in eine invertierende Schaltung abgeändert, da sie eine Verstärkung kleiner 1 ermöglicht und das Vorzeichen durch die bereits vorhandene invertierende Schaltung wieder richtig gestellt wird.

#### 4.7. Platine zur Kennlinienerzeugung

Wie in Abschnitt 2 erwähnt, ist die zur Verfügung gestellte Spannung zu gering, um die Dunkelkennlinie für PV-Module mit einer Leerlaufspannung über 22 Volt sicher zu erzeugen. Da dies die Auswahl an geeigneten PV-Modulen stark eingrenzt, ist eine Lösung des Problems erforderlich. In Abbildung 4.17 ist die im Altgerät vorhandene Schaltung zur Kennlinienerzeugung zu sehen. Die Funktionsweise dieser Schaltung ist in der Arbeit Pagel, Seite 48 nachzulesen.

Die einfachste Möglichkeit, das Problem zu lösen, liegt darin, die Spannung, die an Klemme X2-3 auf die Schaltung gegeben wird, zu erhöhen. Diese Spannung wird direkt vom LOGO!-Netzteil erzeugt und beträgt im Altgerät 24VDC, was zur in Abbildung 4.18 dargestellten Spannungsrampe am PV-Modul führt. Das LOGO!-Netzteil stellt die Möglichkeit zur Verfügung, diese Spannung über ein Potentiometer im Bereich von 22,2V bis 26,4V zu verstellen. Um keine der von dieser Spannung versorgten Bauteile zu beschädigen, werden zunächst die Datenblätter der SIEMENS-Peripherie, der beiden Finder-Relais und der beiden frontseitig angebrachten LED konsultiert. Zusätzlich werden die

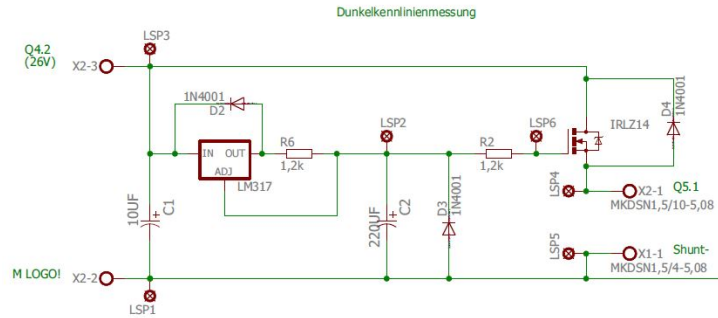


Abbildung 4.17: Schaltung zur Dunkelkennlinienerzeugung

auf Platine A2 verwendeten, elektronischen Bauteile auf ihre Spannungsverträglichkeit hin untersucht. Sowohl die SIEMENS-Erweiterungsmodule als auch beide Finder-Relais verfügen über einen ausreichend großen Versorgungsspannungsbereich. Im Datenblatt der LED ist kein Spannungsbereich angegeben aber über die gegebenen Angaben lässt sich auf die maximal zulässige Versorgungsspannung schließen (Gleichung 4.21).

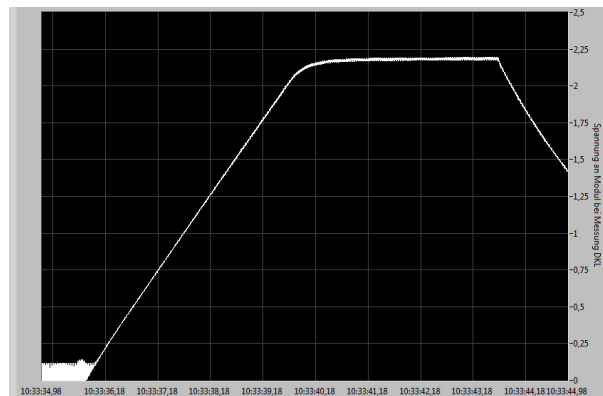


Abbildung 4.18: Spannungsrampe zum Erfassen der Dunkelkennlinie mit 24VDC Platinen-Versorgung

$$U_{max} = R_V \cdot I_F = 1500\Omega \cdot 20mA = \underline{30V} \quad (4.21)$$

Damit weisen auch die LED einen ausreichend hohen Versorgungsspannungsbereich auf. Auch die auf Platine A2 verwendeten elektronischen Bauteile sind für die höhere Spannung geeignet. Nun kann die Gleichspannung am LOGO!-Netzteil sinnvoll erhöht werden, was zur Sicherheit parallel mit einem Multimeter überwacht wird. Um die korrekte Einstellung zu finden, wird die Spannung in kleinen Schritten erhöht und die von Platine A2 erzeugte Spannungsrampe auf ihre Maximalspannung hin überprüft. Später wird diese Einstellung mit den noch zu bestellenden PV-Modulen überprüft. Dieses vorsichtige Vorgehen ist notwendig, da die steile Diodenkennlinie selbst bei einer geringen Spannungserhöhung zu einer drastischen Stromänderung führt und der Strom nicht wesentlich höher als der Kurzschlussstrom des PV-Moduls sein darf. Wird das LOGO!-Netzteil auf eine Spannung

von 26,7V eingestellt, ergibt sich die in Abbildung 4.19 dargestellte Spannungsrampe.

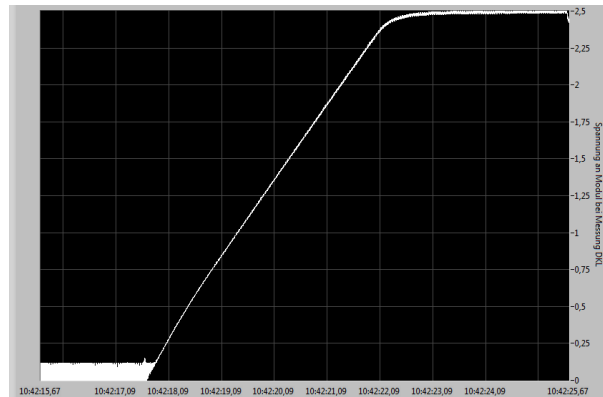


Abbildung 4.19: Spannungsrampe zum Erfassen der Dunkelkennlinie mit 26,7VDC Platinen-Versorgung

#### 4.8. Die Gleichrichterplatine

Durch die in Abschnitt 4.6.2 entwickelte Spannungsstabilisierung ist es möglich, die gleichen Gleichrichterplatinen wie im Altgerät zu verwenden, ohne die Messwertdrift negativ zu beeinflussen. Da diese Variante aber wieder in einer zusammengesetzten Platine münden würde, wird ein anderer Ansatz verfolgt. Im Handel werden Schaltnetzteile für die Platinenbestückung angeboten. Bei der Firma farnell stehen Netzteile zur Erzeugung von 5VDC, 9VDC und  $\pm 15$ VDC zum Kauf bereit. Diese drei Netzteile lassen sich auf einer Europlatine unterbringen, wodurch die Gleichspannungserzeugung von einer kompakten und übersichtlichen Einheit vorgenommen werden kann. Mit dem Layouteditor EAGLE Version 6.5.0 werden die überarbeitete Platine zur Messwertskalierung A3 und die Gleichrichterplatine layoutet und bestellt.

#### 4.9. Die neuen Photovoltaik-Module

Tabelle 4.2: Übersicht über die neuen Module

Modell	Technologie	$\frac{P_{MPP}}{[Wp]}$	$\frac{U_0}{[V]}$	$\frac{I_K}{[mA]}$	$\frac{L}{[mm]}$	$\frac{B}{[mm]}$	$\frac{H}{[mm]}$	$\frac{A}{[cm^2]}$	$\frac{Preis}{EUR}$
Conrad 110467	amorph	4	21	320	315	315	19	992,25	-
JWS 1201	polykristallin	10	21,6	643	340	290	17	986	20
JWS 1086	monokristallin	10	22,2	601	335	290	25	971,5	20

Für die Suche nach geeigneten PV-Modulen sind mehrere eingrenzende Faktoren zu berücksichtigen. Erstens dürfen sie auf der einen Seite nicht die mechanischen Möglichkeiten der neuen PV-Modulhalterung überschreiten, auf der anderen Seite sollten ihre elektrischen Parameter möglichst die Messbereiche der Messkarten ausreizen, um ihr Verhalten

bei schlechten Bedingungen gut messen zu können. Zweitens sollen Module unterschiedlicher Zelltechnologie beschafft werden. Drittens sollen diese Module sinnvoll miteinander verglichen werden können, das heißt, sie müssen entweder über die gleiche Nennleistung und/oder die gleiche Moduloberfläche verfügen. Es werden drei Module mit möglichst gleicher Moduloberfläche ausgewählt, da kein amorphes Modul auffindbar ist, welches bei vergleichbaren Leistungsparametern nicht gegen das erste Kriterium verstößt. Tabelle 4.2 stellt die Auswahl der neuen PV-Module dar. Das amorphe Modul von conrad wurde bereits von Frau Pagel beschafft, weshalb der Kaufpreis entfällt.

#### **4.10. Visualisierung mit LabView**

Bei LabView handelt es sich um eine grafische Entwicklungsumgebung von national instruments. Die Software eignet sich für das Entwickeln von Mess-, Steuer- und Regelungssystemen (vgl. Thomas Beier u. Thomas Mederer, 2015, S. 14 [4]). Um rechtzeitig mit der Entwicklung des LabView-Programms beginnen zu können, wird das bereits vorhandene USB-Multifunktions-I/O-Gerät NI 6229 in Betrieb genommen. Um die Funktionstüchtigkeit zu erproben und einen ersten Einblick in die Funktionsweise zu bekommen, wird das NI 6229 zunächst über den Measurement & Automation Explorer NI-MAX bedient. Diese Umgebung ermöglicht es unter anderem, analoge oder digitale Signale zu erzeugen und/oder einzulesen ohne ein lauffähiges Programm schreiben zu müssen. Mit einem Labornetzteil wird eine Spannung von 3VDC erzeugt, eingelesen und auf dem Monitor dargestellt. Auch die analoge Ausgabe wird erprobt, indem eine Spannung erzeugt und mit einem Multimeter gemessen wird.

##### **4.10.1. Ein erster Entwurf**

Die neue Software soll den bisher eingesetzten XY-Schreiber ersetzen. Damit lässt sich das Programm bereits in grobe Schritte zergliedern. Abbildung 4.20 zeigt den ersten Entwurf. Im Schritt 'Eingänge konfigurieren' werden alle Einstellungen vorgenommen, die für das fehlerfreie Erfassen der skalierten Spannungen notwendig sind. Da dies nur einmal geschehen muss, ist dieser Schritt aus der folgenden while-Schleife herausgelöst. In 'Erfassung' werden die Spannungen abgetastet, damit sie mit der Software verarbeitet werden können. Der Schritt 'Kurvenverläufe darstellen' überträgt die eingelesenen Verläufe an ein geeignetes Frontpanel-Instrument, um sie darstellen zu können.

##### **4.10.2. Spezifizierung des Programmentwurfs**

Damit das grobe Struktogramm verfeinert werden kann wird nun die Funktionsweise des Punktes 'Kurvenverläufe darstellen' festgelegt. Im Wesentlichen soll sich die Bedienung möglichst dicht an einem XY-Schreiber orientieren. Demnach muss der Bediener in der Lage sein die Erfassung der Spannungen ein- und auszuschalten, womit das Runtersetzen

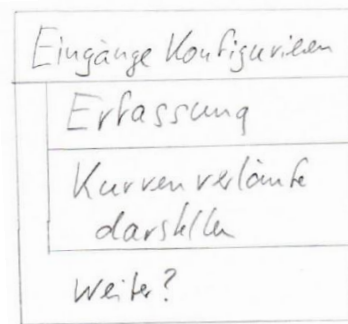


Abbildung 4.20: Erster Entwurf des LabView-Programms

und Hochnehmen des Stiftes nachgeahmt wird. Es wird also eine entsprechende Schaltfläche geschaffen. An dieser Stelle ergibt sich die Möglichkeit die aufgezeichneten Graphen zu verwerfen, sollte die Messung misslingen. Schaltet der Bediener die Erfassung ab wird er über einen Dialog dazu aufgefordert die Messung zu verwerfen oder als gelungen einzustufen. Damit muss das Programm in der Lage sein Messungen zu speichern. Für diesen Zweck werden beim Start des Programms drei zweidimensionale arrays initialisiert und mit Nullen aufgefüllt. Im ersten array werden die Spannungswerte gespeichert, im zweiten die Stromwerte und im dritten die Werte der Leistung. Damit die gespeicherten Werte im XY-Graph dargestellt werden können, müssen sie später zu zwei XY-Paaren verknüpft werden. Demnach ist zusätzlich die Möglichkeit zu schaffen den Speicher zu löschen, indem die arrays wieder mit Nullen aufgefüllt werden. Zwischen der Darstellung der aktuellen Messung und dem Speicher muss hin- und hergewechselt werden können, wofür eine weitere Schaltfläche vorzusehen ist. Um die Ergebnisse dokumentieren zu können ist eine Möglichkeit für das Ausdrucken des Speichers notwendig. Zusätzlich wird das dauerhafte Speichern von Messungen ermöglicht. Dadurch kann der Student die unterschiedlichen Zelltechnologien direkt vergleichen, ohne den Laborversuch an allen Modulen vornehmen zu müssen. Nun kann das Struktogramm spezifischer aufgebaut werden. Abbildung 4.21 zeigt den neuen Entwurf und es kann mit dem Programmieren begonnen werden.

LabView stellt für die Konfiguration der Eingänge fertige VIs zur Verfügung. Diese sind in der korrekten Reihenfolge miteinander zu verbinden und mit entsprechenden Parametern zu versehen. In einem ersten Schritt müssen ausreichend virtuelle Kanäle erzeugt werden. Jeder virtuelle Kanal umfasst einen physikalischen Kanal, also einen der BNC-Anschlüsse der LabView-Hardware, und Angaben zu diesem Kanal. Diese Angaben ermöglichen den Einfluss auf zum Beispiel den Ein- oder Ausgabebereich der einzulesenden Spannung. Das VI 'DAQ.mx - Virtuellen Kanal erzeugen' übernimmt diese Aufgabe und fügt die erstellten virtuellen Kanäle einem Task zu. Das VI 'DAQ.mx - Timing' ist einzubinden, damit die Abtastrate festgelegt werden kann. Um ein erstes lauffähiges Programm zu erhalten, wird ein Wert von 1000 Samples pro Sekunde gewählt. Da bei den abzutastenden Spannungen verhältnismäßig geringe Änderungsgeschwindigkeiten zu erwarten sind, wird





Abbildung 4.21: Spezifizierter Entwurf des LabView-Programms

die Abtastrate später angepasst. Zusätzlich wird der kontinuierliche Abtastmodus ausgewählt. Im Gegensatz hierzu besteht die Möglichkeit, eine endliche Anzahl an Samples festzulegen. Da das aber nicht dem Verhalten eines XY-Schreibers entspricht, wird von dieser Variante Abstand genommen. Nun muss der erstellte Task gestartet werden, indem das VI 'DAQ.mx – Task starten' eingebunden wird. Damit ist der Schritt 'Eingänge konfigurieren' abgeschlossen.

Die Erfassung der Daten beginnt mit dem VI 'NI-DAQmx - Lesen'. Das VI wird so konfiguriert, dass sie die Daten als Signalverläufe strukturiert, die nun dem Express-VI 'XY-Graph erzeugen' zugeführt werden. Dieses VI strukturiert die gegebenen Daten in einem cluster-array. In einem cluster können unterschiedliche oder gleiche Datentypen zusammengefügt werden und entsprechen damit am ehesten dem Datentyp struct aus der Programmiersprache C. Jeder cluster im cluster-array enthält ein array bestehend aus den X-Werten und ein array bestehend aus den Y-Werten. Das VI 'XY-Graph' plottet die array-Inhalte jedes clusters als einen XY-Plot. Zum Speichern wird dieser cluster in seine Spannungs-, Strom- und Leistungsarrays aufgeteilt und einer case-Struktur zugeführt, in der das VI 'Teilarray ersetzen' genutzt wird, um die gelesenen Werte in den am Anfang initialisierten Speicher-arrays zu hinterlegen. Im SUB-VI 'ARRAY IN XY' wird das zweidimensionale Speicher-array in seine Zeilen aufgeteilt und alle darin verbliebenen Nullen entfernt. Dieses bereinigte array wird wieder zu einem cluster-array zusammengesetzt und

über das VI ‘Auswählen‘ mit dem XY-Graph verbunden. Über eine binäre Schaltfläche kann die Funktion ‘Auswählen‘ bedient werden. Im Frontpanel wird ein cursor-Werkzeug und die Möglichkeit alle Achsen zu skalieren integriert, um das Ablesen charakteristischer Punkte zu erleichtern. Die Skalierung der Achsen während des Programmablaufs zu ändern, ist nur durch einen Eigenschaftsknoten möglich. Über einen Rechtsklick auf den XY-Graph im Frontpanel wird der Punkt Erstellen/Referenz ausgewählt und die Referenz per Mausklick im Blockdiagramm abgelegt. Nun wird ein Eigenschaftsknoten eingefügt, indem die Schnelleinfügeliste von LabView über STRG+Leertaste aufgerufen und ‘Eigenschaftsknoten‘ eingegeben wird. Schließlich wird der Referenzeingang des Eigenschaftsknotens mit der Referenz zum XY-Graph verbunden worauf sich der Name des Eigenschaftsknotens in ‘XYGraph (strikt)’ ändert. Die angefügte Liste kann beliebig aus einer Vielzahl von Eigenschaften gefüllt werden. Durch den Anschluss entsprechender Bedien- oder Anzeigeelemente können diese Eigenschaften nun vom Bediener angepasst werden. Auf die gleiche Weise wird über die Eigenschaft ‘CrsrScrollGrph’ festgelegt, dass der Bediener mit dem cursor nicht durch den Graphen scollen kann, da dies schnell zur Desorientierung führt. Ein weiterer Eigenschaftsknoten innerhalb einer vom Bediener auslösbaren case-Struktur wird eingesetzt, um das Drucken des angezeigten Plots zu ermöglichen. Zusätzlich werden hier Einstellungen wie die Ausrichtung des Ausdrucks und die Stärke der Seitenränder festgelegt. Da die Eigenschaft ‘Drucken.Panel nach Drucker‘ das Frontpanel mit allen sichtbaren Bedien- und Anzeigeelementen ausdruckt, wird der Plotbereich des XY-Graphen für das Drucken maximiert und alle Bedien- und Anzeigeelemente ausgeblendet. Im Anschluss wird der Plotbereich auf die ursprüngliche Größe zurückgesetzt und alle Elemente wieder eingeblendet. Für das dauerhafte Speichern von Messungen wird das VI ‘Tabelle mit Trennzeichen schreiben‘ verwendet. In einem Dialog wird der Bediener aufgefordert einen Speicherpfad und einen Dateinamen festzulegen. Über das VI ‘Tabelle mit Trennzeichen lesen‘ können die Daten jederzeit im Speicher abgelegt werden. Einige der in der Schleife eingesetzten VIs haben zwei Fehleranschlüsse, einen Fehlereingang und einen Fehlerausgang. Diese werden miteinander verbunden, indem der Fehlerausgang eines VIs an den Fehlereingang des folgenden VIs angeschlossen wird. Sind alle VIs auf diese Weise verbunden, erfolgt der Anschluss zum ‘Einfachen Fehlerbehandler‘. Die grün-gelbe Verbindung ist der Fehlercluster. Er setzt sich aus einem Status (BOOL), einem code (INTEGER) und einer Quelle (STRING) zusammen. Der Status gibt an, ob ein Fehler vorliegt oder nicht. Der code gibt einen Fehler- beziehungsweise Warncode zurück. Die Quelle enthält den Namen der Fehlerquelle. Diese Informationen werden dem ‘Einfachen Fehlerbehandler‘ zugeführt, damit auf Fehlermeldungen reagiert werden kann. Im Inneren der Schleife wird der Status über die Funktion ‘Nach Namen aufschlüsseln‘ aus dem Fehlercluster herausgelesen und zusammen mit der STOP-Schaltfläche über eine ODER-Bedingung mit dem Bedingungsanschluss der Schleife verbunden. Bei einem Fehler wird die Schleife also beendet und im Anschluss der ‘Einfache Fehlerbehandler‘ aufgerufen.

Über eine case-Struktur werden unterschiedliche Fehlercodes abgefragt und bei Bedarf wird dem Bediener eine entsprechende Meldung präsentiert. Auf diese Weise wird der Bediener zum Beispiel dazu aufgefordert, die physikalischen Eingänge in den entsprechenden dropdown-Menüs auf dem Frontpanel einzutragen, sollte er dies versäumt haben. Da dieser case-Struktur damit eine besondere Bedeutung zukommt, sind die Fehlercases rot und der fehlerfreie case grün umrahmt. In Anhang A.1 ist eine Übersicht der Bedienoberfläche und eine Bedienungsanleitung enthalten.

## **5. Aufbau und Inbetriebnahme**

### **5.1. Mechanischer Grundaufbau**

Der Aufbau des Gehäuses, bestehend aus den in Abschnitt 4.1 genannten Aluminiumprofilen und MDF-Platten, erfolgt als erstes. Der Zuschnitt der benötigten Profillängen wird in der Zentralen Laborwerkstatt vorgenommen, wie auch der Zuschnitt der MDF-Platten mit den runden Lüfterausschnitten. Zusätzlich bekommt die Werkstatt den Auftrag, die in der Fronttür verbaute Aluminiumplatte maßgerecht zu fräsen. Die Gewinde und Durchgangsbohrungen für den Zusammenbau werden selbst vorgenommen, wie auch die Bohrungen für die Erdverbindungen. Die so vorbereiteten Gehäuseteile werden zusammengesetzt und die Erdverbindungen zwischen den leitfähigen Aluminiumprofilen gesetzt. Nun werden die bestellten Lüfter montiert und verdrahtet, womit die Montage des Gehäuses beendet ist.

### **5.2. Lampenfeld**

Das neue Leuchtmittelmodul wird, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, montiert. Da zukünftig zwischen den aktiven Teilen der Leuchtmittelsockelverdrahtung und dem umgebenden U-Profil eine Spannung von maximal 288V auftreten wird, werden die Aderleitungen zusätzlich mit Schrumpfschlauch isoliert. Bei einem Test zur Entnahme des Leuchtmittelmoduls fällt auf, dass die Laborbuchsen völlig von der Leuchtmittel-Modulaufhängung verdeckt werden. Aus diesem Grund wird das ganze Leuchtmittelmodul mit U-Profilen angehoben, sodass die Laborbuchsen die Aufhängung überragen. Am hinteren Ende der U-Profile wird je eine Schraube gesetzt, welche als mechanische Anschläge für das herausnehmbare Leuchtmittelmodul dienen. Beim Zusammenbau stellt sich zudem heraus, dass die Deckel nicht eben auf den U-Profilen sitzen bleiben, sondern von den Aderleitungen der Leuchtmittelsockel ein wenig nach oben gedrückt werden. Dadurch fixiert der Bund die Deckel nicht mehr richtig und sie fallen beim Transport des Leuchtmittelmoduls herunter. Um diesem Problem zu begegnen, werden die Deckel mit Schrauben M3 am Leuchtmittelmodul fixiert, welche mittig durch die U-Profile verlaufen. Damit die Isolierung der Aderleitungen nicht durch das Gewinde dieser Schrauben in Mitleidenschaft gezogen wird, werden die Schrauben mit flexiblen Gummihülsen isoliert.

### **5.3. PV-Modulhalterung**

Für die Aufhängung der neuen PV-Modulhalterung sind zunächst zwei Bohrungen mit einem Durchmesser von je 12mm in die Modulkammerseiten vorzunehmen, in die die gedrehten Kunststoffauflager gesteckt werden können. Der Rahmen der PV-Modulhalterung wird, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, montiert und mit den Aluminiumachsen in den Kunststoffauflagern gelagert. Bei der Montage der senkrechten Profilstücke stellt sich jedoch heraus, dass die Rändelschraubenköpfe nicht fest genug auf den M4er Schrauben zum

Festspannen der Auflageklötze sitzen. Beim Versuch die Klötze festzuspannen, rutschen diese über die Schraubenköpfe der M4er Schrauben, wodurch die Klötze beim Spannen des Gegenstücks nach unten rutschen und das PV-Modul locker sitzt. Dieses Problem wird gelöst, indem die Rändelschraubenköpfe entfernt werden. Dadurch muss zwar ein Schraubendreher zum Spannen der Auflageklötze verwendet werden, darüber hinaus entsteht jedoch kein zusätzlicher Aufwand. Der Haltebolzen zur Winkeleinstellung wird von der alten PV-Modulhalterung übernommen und in einer entsprechenden Vorrichtung am Rahmen gelagert.

#### **5.4. Platinen**

Platine A2, A3 und die Gleichrichterplatine werden mit den entsprechenden Bauteilen bestückt. Im Anschluss wird ein Offsetabgleich an den Verstärkerstufen von Platine A3 vorgenommen. Die Gleichrichterplatine wird für einen Test mit 230VAC versorgt und die Funktionstüchtigkeit der Schaltnetzteile mit einem Multimeter geprüft. Dabei fallen keine Unregelmäßigkeiten auf.

#### **5.5. Inbetriebnahme nach DIN VDE 0701/0702**

Der Simulator wird entsprechend der DIN VDE 0701/0702 als Gerät der Schutzklasse I geprüft. Eine Kopie des Prüfprotokolls ist in Abbildung 9.23 enthalten.

#### **5.6. Inbetriebnahme der SIEMENS LOGO!**

Bei Inbetriebnahme der LOGO! lässt sich feststellen, dass sich keine Verbindung zum PC herstellen lässt. Die Software LOGO! Soft Comfort findet zwar die Steuerung, sie kann aber nicht darauf zugreifen. Dadurch ist das Übertragen des Steuerungsprogramms auf die Steuerung nicht möglich. Auf Nachfrage bei SIEMENS stellt sich heraus, dass die neu bestellte LOGO! über eine neuere Firmwareversion als die im Altgerät verbauten LOGO! verfügt, obwohl beide vom gleichen Typ sind. Dadurch wird das Update von LOGO! Soft Comfort v8.0.1 auf v8.2.0 nötig. Nach dem Update gelingt die Verbindung zwischen PC und Steuerung problemlos und das Programm wird übertragen. Beim folgenden Erkunden der Funktionen dieser Steuerung fällt auf, dass die Hintergrundbeleuchtung im Unterpunkt Einstellungen/HG-Beleuchtung dauerhaft eingeschaltet werden kann. Dies wird vorgenommen, wodurch die Integrierung des von Frau Pagel vorgeschlagenem Tasters (Pagel, Seite 84) entfallen kann.

#### **5.7. Einstellung des Leistungsverstärkers**

Die Fläche der neuen PV-Modulhalterung wird mit der von Pagel entwickelten Methode (siehe Seite 70 bis 73) vermessen und mit MS Excel die entsprechenden polynomischen Trendlinien berechnet. Da sich jedoch im Abschnitt 4.9 herausgestellt hat, dass sich die

Auswahl geeigneter PV-Module weder in der Länge noch in der Breite wesentlich unterscheiden, wird die Oberfläche nicht lückenlos vermessen. Es werden dreimal sechs Messpunkte gleichmäßig auf der Fläche verteilt, sodass sich in Summe 18, statt wie bei Pagel 16 Messpunkte, ergeben. Tabelle 5.1 und 5.2 zeigen die dabei verwendeten Messgeräte und die Ergebnisse.

Tabelle 5.1: Verwendete Messgeräte

Verwendetes Messgerät	Kennzeichnung	Hersteller
Solarstrahlungssensor Si-01 TC	95 - 019	Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer
Multimeter M2036	1119/B9/4N	ABB Metrawatt

Tabelle 5.2: Am Leistungsverstärker einzustellende Werte

Parameter	200 $E \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	400 $E \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	600 $E \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	800 $E \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	1000 $E \left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$U [V]$	156	192	220	244	265
$I [A]$	4,34	4,84	5,2	5,48	5,74

## 6. Messungen

Bevor in diesem Abschnitt mit der Bestimmung der Modulparameter begonnen wird, werden die Erkenntnisse, die sich aus der Verwendung der Schaltnetzteile ergeben haben, kurz dargelegt. Weiterhin wird die Messreihe aus Abschnitt 4.6.1 wiederholt, um die Wirksamkeit der Spannungsstabilisierung zu prüfen. Im Anschluss werden die Messergebnisse und die Berechnung der Modulparameter für das monokristalline PV-Modul JWS 1086 und das polykristalline PV-Modul JWS 1201 zusammengefasst. Vom amorphen PV-Modul der Firma conrad können diese Parameter nicht bestimmt werden, da die Messergebnisse dies nicht zulassen (siehe Abbildung 9.17, 9.18 und 9.19). Die Dauer der Messung reicht nicht aus, um den Bereich der Leerlaufspannungen zu erreichen. Zudem weist die Dunkelkennlinie einen linearen Verlauf auf, was weder das Ablesen der Spannung  $U_{DS}$  noch der Spannung  $U_K$  erlaubt. Die Werte von  $U_0$ ,  $I_K$ ,  $I_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$  und  $P_{MPP}$  werden mit Hilfe des cursor-Werkzeuges abgelesen, deshalb erfolgt kein Einzeichnen entsprechender Hilfslinien und ein Ausdruck der Plots entfällt. Es werden lediglich die Plots ausgedruckt, in die Steigungsdreiecke oder schräge Hilfslinien eingezeichnet werden müssen. Alle Kurvenverläufe sind im Anhang enthalten.

### 6.1. Messung unter Verwendung der Schaltnetzteile

Mit einer ersten Probemessung wird die Funktionstüchtigkeit des neuen Simulators geprüft. Dabei sind Spannungsspitzen auf den Kurvenverläufen von Leistung und Strom deutlich zu erkennen (siehe Anhang A.22). Um der Vermutung nachzugehen, dass diese

durch das Takten der Schaltnetzteile entstehen, wird Platine A3 mit einem Labornetzteil versorgt. Die Spannungsspitzen verschwinden dadurch vollständig. In einem nächsten Schritt werden parallel zu den Gleichspannungsausgängen der Schaltnetzteile Kondensatoren geschaltet und die Messung wiederholt. Trotz stufenweiser Erhöhung der Kapazitäten, bis auf einen Wert von je  $220\mu F$ , lässt sich jedoch kein Effekt auf die Spannungsspitzen erkennen. Im nächsten Schritt werden die Kondensatoren so an die Rückseite der BNC-Buchsen gelötet, dass je ein Kondensator parallel zu einer Buchse geschaltet ist. Da die Spannungsspitzen nicht mehr erkennbar sind, wird die Kapazität der Kondensatoren bis auf einen Wert von je  $4,7\mu F$  verringert. Die verwendeten Kondensatoren sind klein genug, um sie unauffällig an der Rückseite der BNC-Buchsen zu belassen und glätten die Spannungsspitzen sehr gut (siehe Anhang A.23). Allerdings entsteht durch die Kondensatoren ein negativer Nebeneffekt. Wenn die Leistungskurve am Ende der Messung gegen die Nulllinie strebt, entlädt sich der Kondensator nicht vollständig. Dadurch endet die Leistungskurve in geringer Distanz über der Nulllinie und es bildet sich eine unerwünschte Verdickung der Linie. Diese entsteht wahrscheinlich durch das 'Kreisen' der Spannungsleistungskordinate auf der Stelle. Zudem lässt sich nicht sagen, inwieweit die parallel geschalteten Kondensatoren Einfluss auf die Kurvenform nehmen. Da unklar ist ob in der begrenzten Zeit eine Lösung für die genannten Probleme gefunden werden kann, wird auch im neuen Simulator auf die Linearregler-Technologie zur Gleichspannungserzeugung gesetzt.

## 6.2. Messreihe zur Messwertdrift

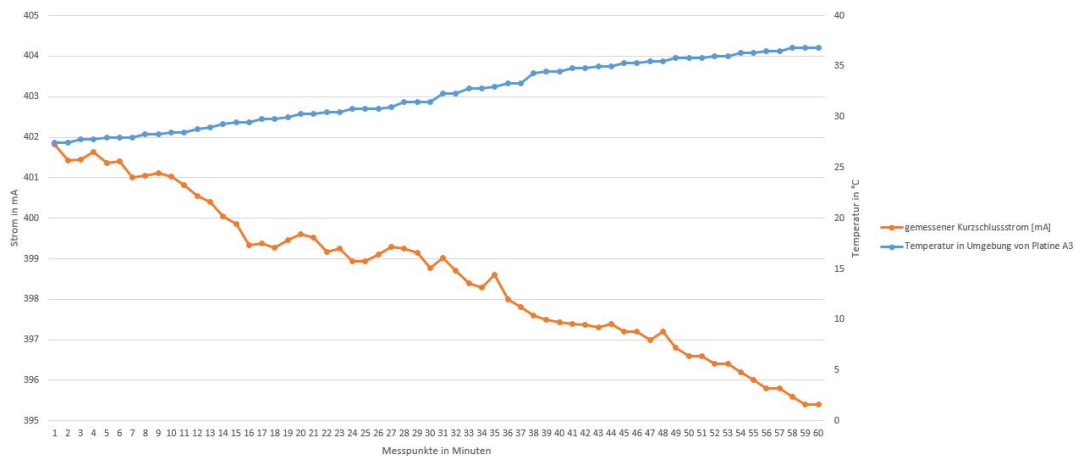


Abbildung 6.1: Messung der temperaturabhängigen Stromwertdrift mit Spannungsstabilisierung

Die Messreihe zur Drift des Strommesswertes aus Abschnitt 4.6.1 wird wiederholt. Es wurde zwar festgestellt, dass die Temperaturabhängigkeit des Strommesswertes von der Platine zur Spannungsgleichrichtung abhängig ist. Damit die beiden Messreihen jedoch vergleichbar sind, wird wiederum die Temperatur in der Umgebung um Platine A3 gemessen. Zunächst erkennt man deutlich, dass die Temperatur wesentlich langsamer steigt als in der ersten Messreihe, sodass die Modulkammerlüfter für die Dauer der ganzen Messung ausgeschaltet bleiben, um etwa die gleiche Höchsttemperatur zu erreichen. Bei der Höchsttemperatur von etwa  $37^{\circ}\text{C}$  liegt der Strommesswert etwa  $4,5\text{mA}$  unter dem korrekten Stromwert. In der Messreihe am Altgerät war der Wert um etwa  $23\text{mA}$  größer als der korrekte Wert. Im Betrieb ist nicht mit einer Abweichung von  $4,5\text{mA}$  zu rechnen, da die Modulkammerlüfter eingeschaltet bleiben und die Temperatur in Umgebung von Platine A3 nicht auf  $37^{\circ}\text{C}$  ansteigt.



### 6.3. Monokristallines Modul JWS 1086

#### 6.3.1. Hellkennlinie

##### Bestimmung vom Serienwiderstand $R_S$ , $R_P$ und $I_S$

Aus der Hellkennlinie werden folgende Werte abgelesen:

- $I_K = \underline{581mA}$
- $U_0 = \underline{22V}$

$$R_S = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U_0} = \frac{3,63V}{1,25A} = \underline{2,9\Omega} \quad (6.1)$$

$$R_P = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{I_K} - R_S = \frac{24,61V}{12,8mA} - 2,9\Omega = \underline{1919,76\Omega} \quad (6.2)$$

$$I_S = \frac{I_K}{\frac{U_0}{e^{N \cdot U_T}}} = \frac{581mA}{e^{\frac{22V}{36 \cdot 25,69mV}}} = \underline{27,12pA} \quad (6.3)$$

#### 6.3.2. Dunkelkennlinie

##### Bestimmung des Serienwiderstandes $R_S$

Aus der Dunkelkennlinie werden folgende Werte abgelesen:

- $U_K = \underline{22,74V}$
- $U_{DS_{Modul}} = \underline{20,76V}$

$$R_S = \frac{U_K - U_0}{I_K} = \frac{22,74V - 22V}{581mA} = \underline{1,27\Omega} \quad (6.4)$$

$$U_{DS_{Zelle}} = \frac{U_{DS_{Modul}}}{N} = \frac{20,76V}{36} = \underline{0,58V} \quad (6.5)$$

#### 6.3.3. Unterschiedliche Bestrahlungsstärken

Die Füllfaktoren in Tabelle 6.1 werden über Gleichung 6.6 berechnet.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_K \cdot U_0} \quad (6.6)$$

Tabelle 6.1: Messergebnisse vom JWS 1086 bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken

$E \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	$I_K [mA]$	$U_0 [V]$	$U_{MPP} [V]$	$I_{MPP} [mA]$	$P_{MPP} [W]$	$FF [1]$
1000	581	22	17,94	540,8	9,75	0,763
800	463,3	21,68	17,72	428,38	7,64	0,761
600	350	21,25	17,14	320	5,57	0,749
400	236,7	20,58	16,43	213,3	3,58	0,735
200	118,9	19,06	14,85	107,09	1,65	0,728

Tabelle 6.2: Messergebnisse vom JWS 1086 unter Abschattung einer Solarzelle

$I_K [mA]$	$U_0 [V]$	$U_{MPP} [V]$	$I_{MPP} [mA]$	$P_{MPP} [W]$	$FF [1]$
125	21,93	21,12	100	2,15	0,784

### 6.3.4. Abschattung

Wird eine Zelle abgeschattet, so nimmt der Füllfaktor geringfügig zu (Tabelle 6.2). Dieser Effekt entsteht durch die von  $U_{MPP}$  und  $I_{MPP}$  aufgespannte Fläche. Diese kommt im Abschattungsversuch näher an das von  $I_K$  und  $U_0$  aufgespannte Rechteck heran. Die maximal abgreifbare Leistung sinkt jedoch auf  $2,15W$  ab, weshalb der gestiegene Füllfaktor in diesem Fall keinen höheren Ertrag bedeutet. Man kann feststellen, dass bereits die Abschattung einer von 36 Solarzellen zu einem massiven Einbruch der bereitgestellten Leistung führt. Aus diesem Grunde sind Abschattungen in Folge von Blattwerk, Schmutz aber auch durch Schattenwurf zu vermeiden. Da sich das nicht in jedem Falle verhindern lässt, werden in größeren PV-Modulen Bypass-Dioden eingebaut. Diese Halbleiterbauelemente überbrücken im Abschattungsfall einen Teil des Moduls, sodass der abgeschattete Bereich nicht mehr zum Tragen kommt. Natürlich ergeben sich durch das Überbrücken ebenfalls Einbußen im Energieertrag, welcher aber nicht so hoch ausfällt als wenn keine Bypass-Dioden integriert wären.

### 6.3.5. Unterschiedliche Einstrahlungswinkel

Tabelle 6.3: Messergebnisse vom JWS 1086 bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln

$Winkel [Gradmaß]$	$P_{MPP} [W]$
0	9,78
30	8,72
60	5,69
90	2,01

### 6.3.6. Unterschiedliche Modultemperaturen

Die Kurzschlussströme und Leerlaufspannungen werden bei den Temperaturen  $\vartheta = 25^\circ C$ ,  $30^\circ C$ ,  $35^\circ C$  und  $40^\circ C$  abgelesen. Im Anschluss werden die Werte bei  $\vartheta = 25^\circ C$  und

$\vartheta = 40^\circ\text{C}$  genutzt, um die Temperaturkoeffizienten zu berechnen.

Tabelle 6.4: Messergebnisse vom JWS 1086 bei unterschiedlichen Modultemperaturen

$\vartheta [^\circ\text{C}]$	$I_K [\text{mA}]$	$U_0 [\text{V}]$	$I_{Krel} [\%]$	$U_{0rel} [\%]$
25	581	22	100	100
30	588,1	21,67	101,2	98,5
35	594	21,33	102,24	96,95
40	598	20,9	102,93	95

$$T_{K_{I_K}} = \frac{I_{Krel_{40^\circ\text{C}}} - I_{Krel_{25^\circ\text{C}}}}{40^\circ\text{C}[\text{K}] - 25^\circ\text{C}[\text{K}]} \quad (6.7)$$

$$T_{K_{U_0}} = \frac{U_{0rel_{40^\circ\text{C}}} - U_{0rel_{25^\circ\text{C}}}}{40^\circ\text{C}[\text{K}] - 25^\circ\text{C}[\text{K}]} \quad (6.8)$$

$$T_{K_{I_K}} = \frac{102,93\% - 100\%}{313,15\text{K} - 298,15\text{K}} = \underline{\underline{0,195\frac{\%}{\text{K}}}} \quad (6.9)$$

$$T_{K_{U_0}} = \frac{95\% - 100\%}{313,15\text{K} - 298,15\text{K}} = \underline{\underline{-0,33\frac{\%}{\text{K}}}} \quad (6.10)$$

## 6.4. Polykristallines Modul JWS 1201

### 6.4.1. Hellkennlinie

Bestimmung vom Serienwiderstand  $R_S$ ,  $R_P$  und  $I_S$

Aus der Hellkennlinie werden folgende Werte abgelesen:

- $I_K = \underline{\underline{661,9\text{mA}}}$
- $U_0 = \underline{\underline{22,24\text{V}}}$

$$R_S = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U_0} = \frac{3,94\text{V}}{1,51\text{A}} = \underline{\underline{2,6\Omega}} \quad (6.11)$$

$$R_P = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{I_K} - R_S = \frac{22,67\text{V}}{17,86\text{mA}} - 2,6\Omega = \underline{\underline{1266,7\Omega}} \quad (6.12)$$

$$I_S = \frac{I_K}{\frac{U_0}{e \cdot N \cdot \bar{U}_T}} = \frac{661,9\text{mA}}{e^{36 \cdot 25,69\text{mV}}} = \underline{\underline{23,8\text{pA}}} \quad (6.13)$$

### 6.4.2. Dunkelkennlinie

Bestimmung des Serienwiderstandes  $R_S$

Aus der Dunkelkennlinie werden folgende Werte abgelesen:

- $U_K = \underline{22,93V}$
- $U_{DS_{Modul}} = \underline{20,86V}$

$$R_S = \frac{U_K - U_0}{I_K} = \frac{22,93V - 22,24V}{661,9mA} = \underline{1,1\Omega} \quad (6.14)$$

$$U_{DS_{Zelle}} = \frac{U_{DS_{Modul}}}{N} = \frac{22,86V}{36} = \underline{0,56V} \quad (6.15)$$

### 6.4.3. Unterschiedliche Bestrahlungsstärken

Die Füllfaktoren in Tabelle 6.5 werden über Gleichung 6.16 berechnet.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_K \cdot U_0} \quad (6.16)$$

Tabelle 6.5: Messergebnisse vom JWS 1201 bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken

$E \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	$I_K [mA]$	$U_0 [V]$	$U_{MPP} [V]$	$I_{MPP} [mA]$	$P_{MPP} [W]$	$FF [1]$
1000	661,9	22,24	18,95	631	12,06	0,819
800	531,0	21,87	18,8	505,0	9,5	0,818
600	395,2	21,67	18,85	371,4	7,03	0,821
400	264,3	21,24	18,66	244,0	4,59	0,818
200	140,5	20,37	17,67	123,8	2,23	0,779

### 6.4.4. Abschattung

Tabelle 6.6: Messergebnisse vom JWS 1201 unter Abschattung einer Solarzelle

$I_K [mA]$	$U_0 [V]$	$U_{MPP} [V]$	$I_{MPP} [mA]$	$P_{MPP} [W]$	$FF [1]$
628,41	22,17	21,25	157,95	3,4	0,244

Wird eine Zelle abgeschattet, so wird der Füllfaktor wesentlich geringer (Tabelle 6.6). Wird eine Zelle abgeschattet, so wird der Füllfaktor wesentlich kleiner (Tabelle 6.6). Ausschlaggebend hierfür ist der Strom, welcher bei steigender Spannung einbricht. Dadurch ist die Fläche die der Kurzschlussstrom zusammen mit der Leerlaufspannung aufspannt, gegenüber der Fläche von  $U_{MPP}$  und  $I_{MPP}$  sehr groß. Im Gegensatz zum monokristallinen Modul bleibt jedoch mit  $3,4W$  eine höhere Leistung abgreifbar.

### 6.4.5. Unterschiedliche Einstrahlungswinkel

### 6.4.6. Unterschiedliche Modultemperaturen

Die Kurzschlussströme und Leerlaufspannungen werden bei den Temperaturen  $\vartheta = 25^\circ C$ ,  $30^\circ C$ ,  $35^\circ C$  und  $40^\circ C$  abgelesen. Im Anschluss werden die Werte bei  $\vartheta = 25^\circ C$  und

Tabelle 6.7: Messergebnisse vom JWS 1201 bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln

<i>Winkel</i> [Gradmaß]	$P_{MPP}$ [W]
0	11,97
30	10,62
60	7,12
90	2,74

$\vartheta = 40^\circ C$  genutzt, um die Temperaturkoeffizienten zu berechnen.

Tabelle 6.8: Messergebnisse vom JWS 1201 bei unterschiedlichen Modultemperaturen

$\vartheta$ [ $^\circ C$ ]	$I_K$ [mA]	$U_0$ [V]	$I_{Krel}$ [%]	$U_{0rel}$ [%]
25	659,5	22,24	100	100
30	663,1	21,9	100,55	98,47
35	669	21,54	101,44	96,85
40	682,1	20,93	103,44	94,11

$$T_{K_{I_K}} = \frac{I_{Krel_{40^\circ C}} - I_{Krel_{25^\circ C}}}{40^\circ C[K] - 25^\circ C[K]} \quad (6.17)$$

$$T_{K_{U_0}} = \frac{U_{0rel_{40^\circ C}} - U_{0rel_{25^\circ C}}}{40^\circ C[K] - 25^\circ C[K]} \quad (6.18)$$

$$T_{K_{I_K}} = \frac{103,44\% - 100\%}{313,15K - 298,15K} = \underline{\underline{0,23\frac{\%}{K}}} \quad (6.19)$$

$$T_{K_{U_0}} = \frac{94,11\% - 100\%}{313,15K - 298,15K} = \underline{\underline{-0,39\frac{\%}{K}}} \quad (6.20)$$

## 6.5. Vergleichsmessung der Geräusentwicklung

Damit beurteilt werden kann wie gut die leiseren Lüfter die Geräusentwicklung verringern wird eine Vergleichsmessung vorgenommen. Dazu werden die Geräuschpegel an beiden Geräten nacheinander in einer Entfernung von 30cm auf jeder Seite gemessen. Tabelle 6.9 stellt die Ergebnisse dar.

Tabelle 6.9: Werte der Geräusentwicklung beider Geräte

Simulator	Vorderseite	Türseite	Rechte Seite	Rückseite
alt	48dB	52dB	53dB	49dB
neu	47dB	45dB	51dB	56dB

Durch die neuen Lüfter konnte die Geräusentwicklung nicht wesentlich verringert werden. Lediglich auf der Türseite, wo sich die Studenten während des Laborversuchs aufhalten, ist die Lautstärke um 7dB gesunken. Wahrscheinlich ist der Grund dafür, dass auf

dieser Seite absichtlich kein Lampenfeldlüfter montiert wurde. Das erklärt auch warum die Lautstärke an der Rückseite um den gleichen Wert zugenommen hat, weil hier ein Lüfter mehr arbeitet als im Altgerät.

## 7. Beurteilung Versuchsstand

Eine der wesentlichen Optimierungsforderungen war das Entwickeln eines Programms zur Aufnahme und Visualisierung der Modulkennlinien. Diese Forderung wurde vollständig erfüllt. Da nun das dauerhafte Speichern von Messungen in Dateien und das spätere Laden derselben möglich ist, können die verschiedenen PV-Module direkt miteinander verglichen werden. Durch die einfache Bedienung des Programms kann der Student den Versuch selbstständig absolvieren.

Eine weitere wesentliche Forderung war die Verringerung der Messwertdrift des Stromwertes, welche auch vollständig erfüllt wurde. Allerdings konnte die selbst auferlegte Forderung, die Schwankung der Referenzspannung auf 0,2 mV zu begrenzen, nicht erreicht werden. Das fällt aber nicht ins Gewicht, da die verbleibende Schwankung nicht wahrnehmbar ist. Zusätzlich wurde das Vorzeichen der Leistungskurve korrigiert und das sichere Erzeugen der Dunkelkennlinie für PV-Module mit einer maximalen Leerlaufspannung von 22V ermöglicht.

Durch die Neukonstruktion der PV-Modulhalterung können die Module nun sicher und völlig fest fixiert werden. Dabei ist es möglich Module jedweder Abmessungen zu fixieren, solange diese die zulässigen Abmessungen nicht überschreiten. Im Gegensatz zum Vorgängermodell dauert das Wechseln des Prüflings mit etwa zwei Minuten ein wenig länger. Da der Wechsel jedoch nicht während des Laborversuches vorzunehmen ist und sich ein deutlicher Mehrgewinn dadurch verzeichnen lässt, dass die Module nicht mehr mechanisch vorbereitet werden müssen, sind die zwei Minuten ein vernachlässigbarer Nachteil. So konnte die Forderung nach einer verbesserten PV-Modulhalterung erfüllt werden.

Auch das Leuchtmittelmodul wurde neu konstruiert, was sich besonders in den verborgenen Aderleitungen zeigt. Es ist nun möglich, das Leuchtmittelmodul in der Höhe zu verstellen und es komplett zu entnehmen. So kann ein eventueller Defekt bequem auf der Werkbank behoben werden, während das noch zu bauende zweite Leuchtmittelmodul leicht in Betrieb genommen werden kann.

Das Display der LOGO! leuchtet nun dauerhaft, was die Bedienung deutlich erleichtert.

Die Geräusentwicklung des Simulators konnte nicht signifikant reduziert werden, obwohl deutlich leisere Lüfter eingesetzt worden sind. Demnach ist die Geräusentwicklung der Lüfter gemäß Datenblatt nicht ursächlich für die Lautstärke des Simulators. Es ist anzunehmen, dass der Lautstärkepegel durch auf das Gehäuse übertragene Schwingungen entsteht. Folglich sind die Lüfter vom Simulatorgehäuse zu entkoppeln. Hierfür genügt

aber das Einbringen eines weichen Materials zwischen Lüfter und Gehäuse nicht, da sich die Schwingungen auch über die Schraubverbindungen übertragen. Für eine vollständige Entkopplung müsste also zusätzlich eine Alternative zu den Schraubverbindungen aus zum Beispiel Gummi gefunden werden. Lösungen für den Aufbau von Rechnergehäusen gibt es beispielsweise in Form von Bolts oder screws aus Weichgummi. Allerdings sind diese Lösungen auf die dünnen Metallwände von Rechnergehäusen zugeschnitten und nicht für 8mm starke MDF-Platten. Demnach ist hier eine individuelle Lösung zu entwickeln, wofür weitergehende mechanische Kenntnisse nötig sind.

Inwieweit die neu eingesetzten Filtermedien Staub daran hindern in den Simulator einzudringen, lässt sich nur durch Beobachtung über einen längeren Zeitraum feststellen. Die Staubschicht im Inneren des Altmodells hat sich über Monate gebildet, sodass erst nach Monaten konkret absehbar sein wird wie gut die Maßnahme funktioniert. Da das eingesetzte Produkt aber für die Staubfiltration konstruiert wurde, ist mit einer Verbesserung der Situation zu rechnen.

Bei der Vermessung des amorphen Solarmoduls der Firma conrad hat sich die Vermutung ergeben, dass eine der Zellen defekt ist oder die tatsächlichen Modulparameter sehr stark von den Datenblattangaben abweichen. Die Dunkelkennlinie bleibt bei der angelegten Spannungsrampe im linearen Bereich. Es lässt sich aber erkennen, dass sie eine negative Steigung aufweist. Das ist auch bei den anderen Modulen der Fall. In Verbindung mit der Tatsache, dass die Messung bei  $25\text{ }^\circ\text{C}$  eine wesentlich höhere Leerlaufspannung als im Datenblatt angegeben aufzeigt ist es denkbar, dass die in der Dunkelkennlinienmessung zu erreichende Spannung  $U_K$  trotz Erhöhung der Platinenversorgungsspannung nicht erreicht werden kann.



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Beim Aufbau des Neugeräts wurde sich eng am Altgerät orientiert, um den Aufwand und die Kosten beim Nachrüsten möglichst gering zu halten. So wurde auch bei den Detaillösungen darauf geachtet, dass diese keinen unverhältnismäßig hohen Aufwand beim Nachrüsten erfordern. Dadurch sind die beiden Geräte sowohl in Bedienung als auch vom äußeren Erscheinungsbild her fast identisch, was den Parallelbetrieb beider Geräte im Laborversuch einfacher gestaltet.

Die Kombination aus der neuen PV-Modulhalterung und der Möglichkeit, auf dauerhaft gespeicherte Messergebnisse zuzugreifen, ermöglicht einen direkten Vergleich aller im Laborversuch verwendeten PV-Module. Dadurch können Unterschiede der Zelltechnologien unter gleichen Messbedingungen analysiert werden, ohne in der begrenzten Laborzeit alle Module vermessen zu müssen. Zudem ist es nun deutlich einfacher, den Versuch um weitere PV-Module zu erweitern bzw. alte oder defekte Module gegen neue zu ersetzen.

Die Schaltnetzteile bieten den Vorteil einer kompakteren Gleichspannungserzeugung. Da die Spannungsspitzen jedoch nicht bei einem gleichzeitig unangetasteten Kurvenverlauf geglättet werden konnten, war diese Variante nicht in der Zeit umsetzbar. Sollte dies für die Zukunft angestrebt werden, muss eine Filterung der Spannungsspitzen am Ausgang der Schaltnetzteile erfolgen.

Der Ablauf des Laborversuches ändert sich im Bezug zu vorher nur minimal. Der Versuch kann in zwei Gruppen aufgeteilt werden, von denen die eine das monokristalline Modul und die andere das polykristalline Modul untersucht. Jede Gruppe bekommt die dauerhaft gespeicherten Ergebnisse des anderen Moduls die in der vorliegenden Arbeit zusammengetragen wurden, in Form der Textdateien zur Verfügung gestellt. So kann jede Gruppe jede Messung miteinander vergleichen ohne beide Module zu untersuchen.

## A. Anhang

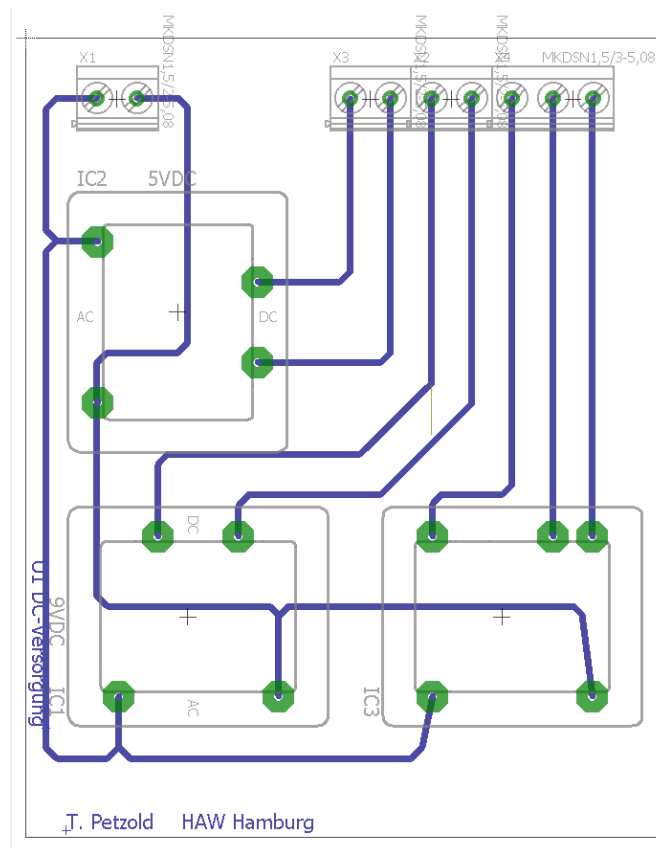


Abbildung A.1: Layout der Schaltnetzteilplatine

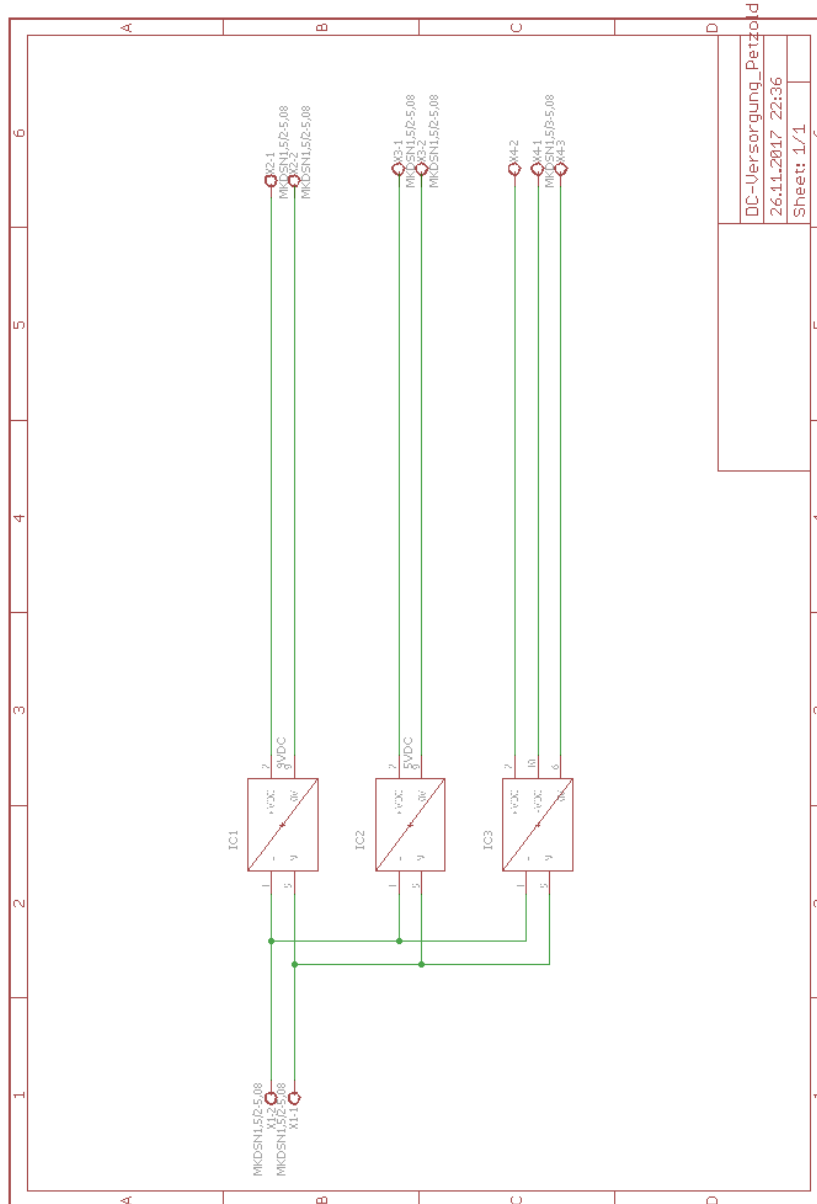


Abbildung A.2: Schaltplan der Schaltungsteilplatte

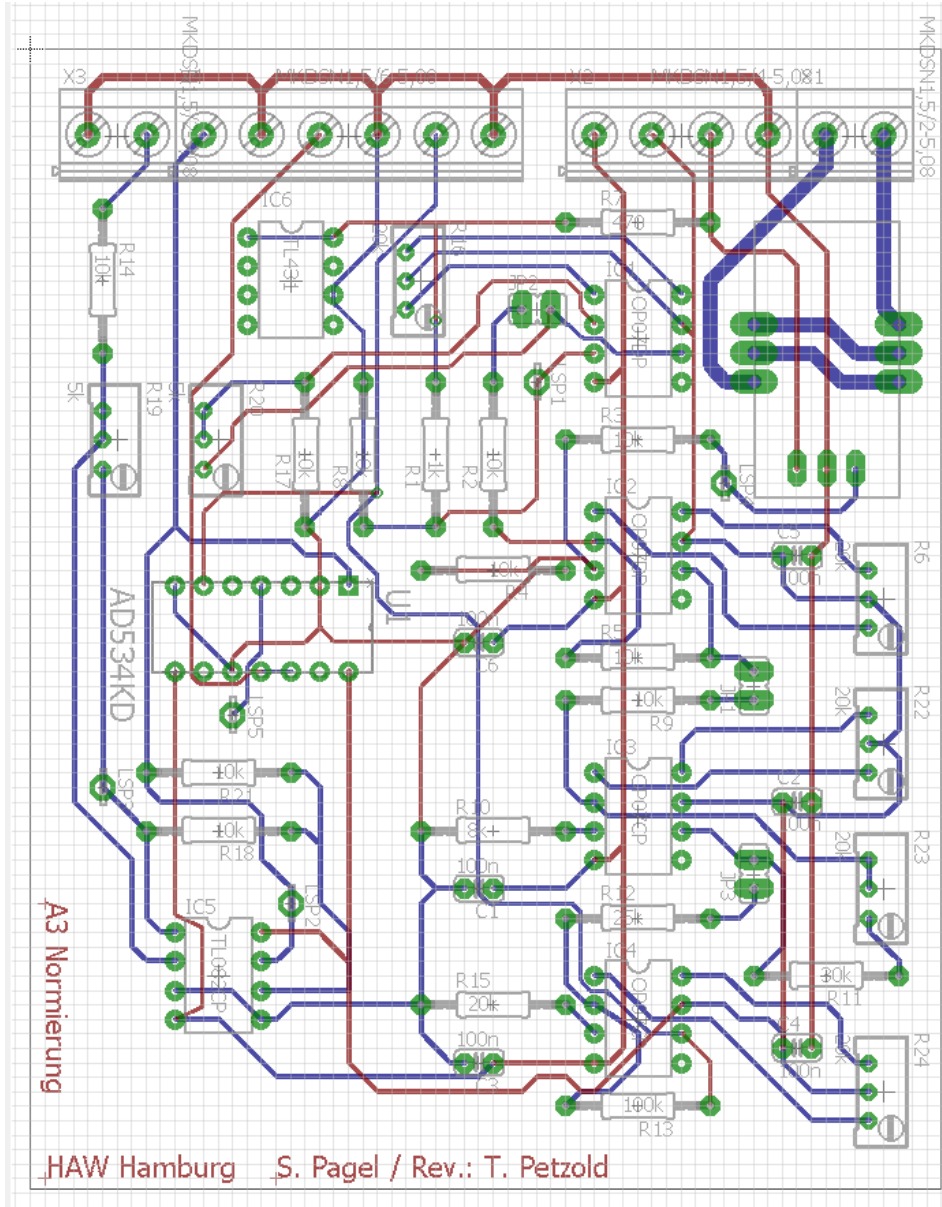


Abbildung A.3: Layout von Platine A3

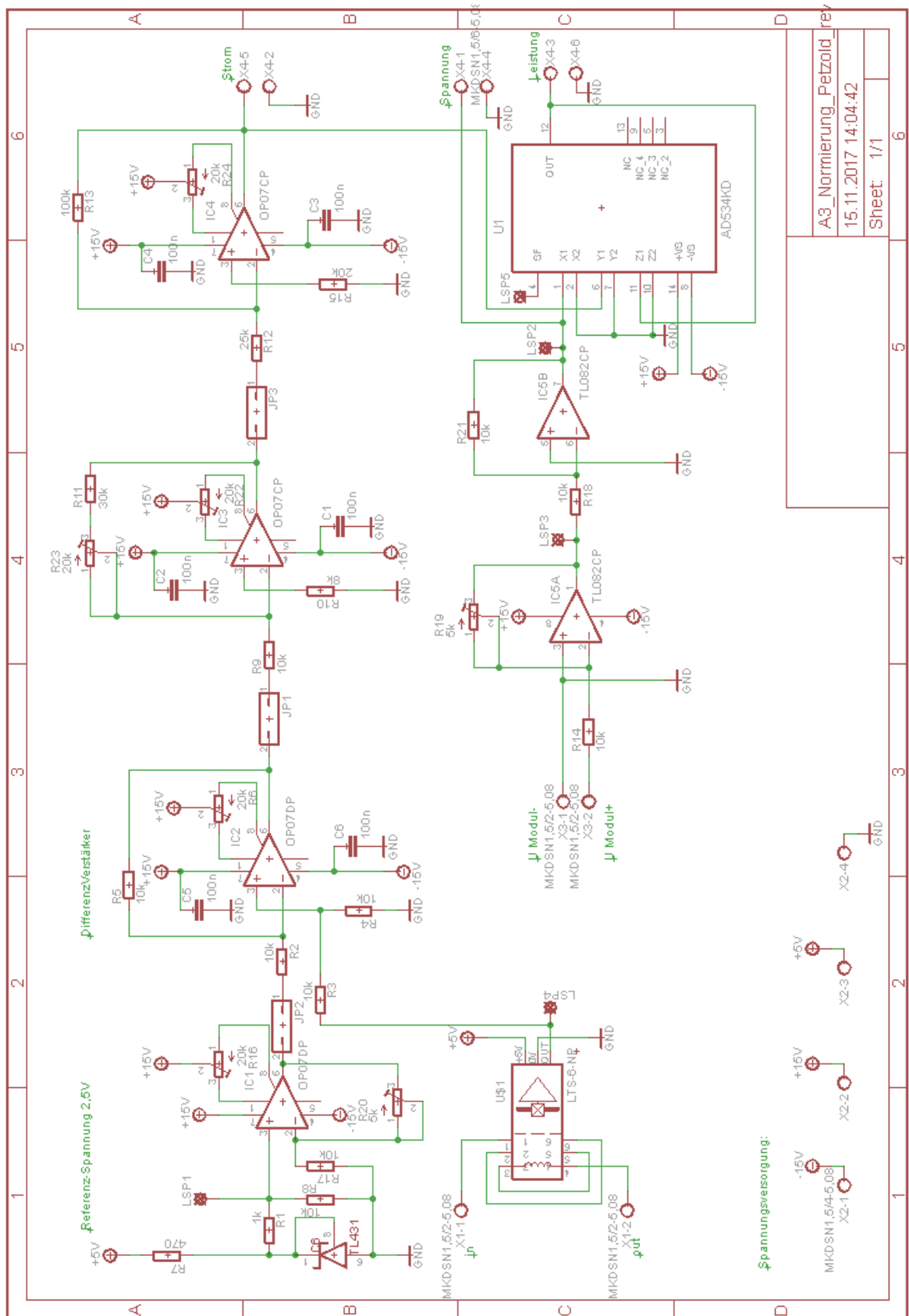


Abbildung A.4: Schaltplan von Platine A3

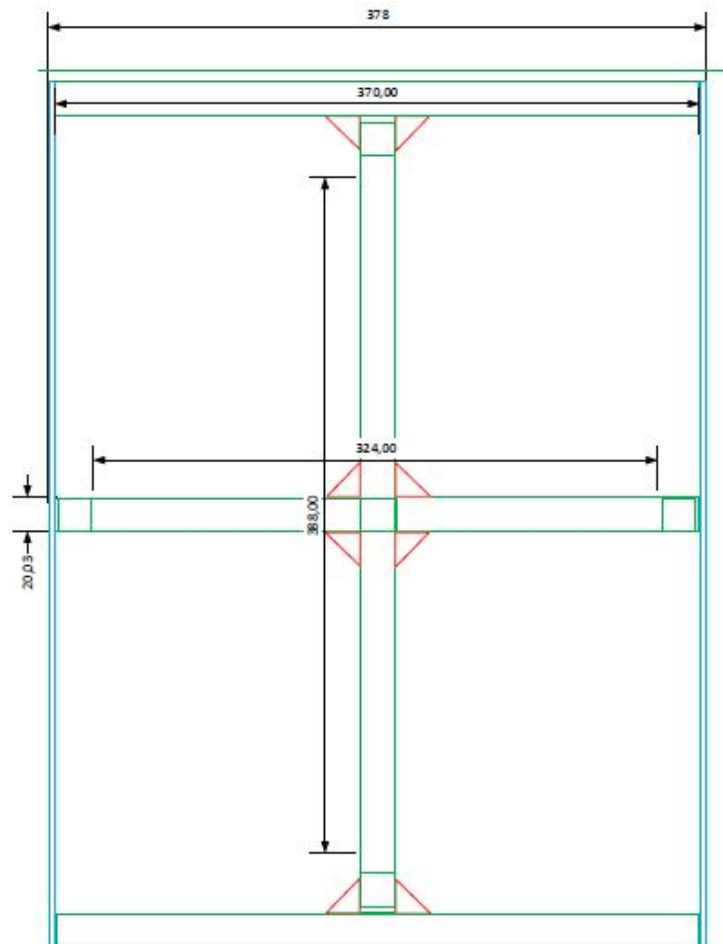


Abbildung A.5: Zeichnung der PV-Modulhalterung mit den maximal zulässigen Modulabmessungen

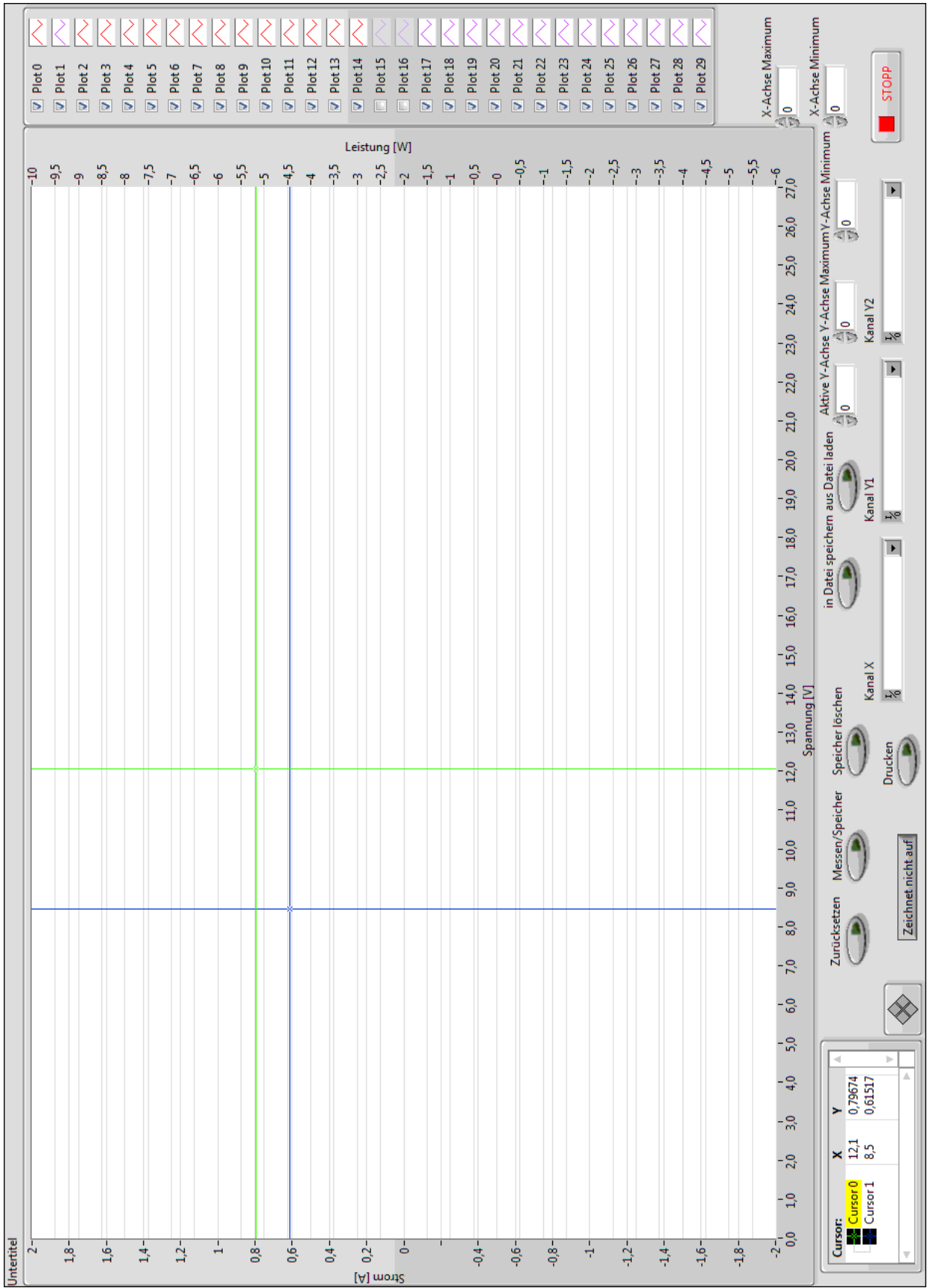


Abbildung A.6: Bedienoberfläche

## A.1. Bedienoberfläche des LabView-Programms

### Plotbereich

Der Plotbereich stellt die aufgezeichneten Kurvenverläufe dar. Links befindet sich die Stromachse und rechts die Leistungsachse. Am unteren Rand ist die Spannungsachse abgetragen.

### Schaltflächen:

#### Zeichnet auf/Zeichnet nicht auf

Aktiviert und deaktiviert die Aufzeichnung (Entspricht dem Hochnehmen, beziehungsweise dem Absetzen des Stiftes eines analogen XY-Schreibers). Die Schaltfläche wird bei aktivierter Erfassung grün hinterlegt und trägt den Schriftzug ‚Zeichnet auf‘. Bei deaktivierter Erfassung wird die Schaltfläche grau hinterlegt und trägt den Schriftzug ‚Zeichnet nicht auf‘. Wird die Erfassung abgeschaltet wird der Bediener dazu aufgefordert, die Messung als gelungen einzustufen, oder zu verwerfen.

#### Messen/Speicher

Schaltet zwischen der Darstellung der aktuellen Messung und dem Inhalt des Zwischenspeichers um. Ist die Schaltfläche aktiviert, wird der Inhalt des Zwischenspeichers dargestellt. Ist sie deaktiviert, wird die Aufzeichnung aktueller Messwerte dargestellt. Siehe dazu Schaltfläche ‚Zeichnet auf/Zeichnet nicht auf‘

#### Zurücksetzen

Die Schaltfläche setzt den im Graphen vorhandenen Speicher zurück, aber nicht den Zwischenspeicher. Diese Schaltfläche ist nach jeder Messung einmal zu betätigen.

#### Drucken

Druckt den aktuell sichtbaren Plotbereich und alle in ihm enthaltenen sichtbaren Plots am Standarddrucker aus.

#### Speicher löschen

Löscht den Inhalt des Zwischenspeichers. Es können maximal 15 Kurvenpaare zwischengespeichert werden. Jedes Kurvenpaar setzt sich aus einer Stromkurve  $I = f(U)$  und einer Leistungskurve  $P = f(U)$  zusammen.

#### in Datei speichern

Speichert die erste Messung im Zwischenspeicher dauerhaft in einer \*.txt-Datei. Alle weiteren im Zwischenspeicher enthaltenen Messungen können nicht dauerhaft in einer Datei gespeichert werden. Siehe dazu ‚Vorgehen zum dauerhaften Speichern von Messungen‘.



### **aus Datei laden**

Lädt den Inhalt einer Datei in den Zwischenspeicher. Jede Datei beinhaltet eine Messung, bestehend aus einer Strom- und einer Leistungskurve. Siehe dazu ‚Handhabung während der Messung‘.

### **Stopp**

Beendet das Programm und löscht den Zwischenspeicher.

### **Dropdown-Menüs:**

#### **Kanal X**

Der analoge BNC-Eingang der NI-Hardware, der die Daten für die X-Achse liefert, ist hier auszuwählen. Standardmäßig ist dies AI0. Wird nichts ausgewählt, erfolgt eine entsprechende Fehlermeldung. Das Ändern dieser Einstellung wird erst nach Neustart des Programms übernommen.

#### **Kanal Y1**

Der analoge BNC-Eingang der NI-Hardware, der die Daten für die erste Y-Achse liefert, ist hier auszuwählen. Standardmäßig ist dies AI1. Wird nichts ausgewählt, erfolgt eine entsprechende Fehlermeldung. Das Ändern dieser Einstellung wird erst nach Neustart des Programms übernommen.

#### **Kanal Y2**

Der analoge BNC-Eingang der NI-Hardware, der die Daten für die zweite Y-Achse liefert, ist hier auszuwählen. Standardmäßig ist dies AI2. Wird nichts ausgewählt, erfolgt eine entsprechende Fehlermeldung. Das Ändern dieser Einstellung wird erst nach Neustart des Programms übernommen.

#### **Y-Achse Maximum**

Der darzustellende Maximalwert der aktiven Y-Achse kann hier festgelegt werden, wodurch die Achse automatisch neu skaliert wird. Alle Messwerte, die den Maximalwert überschreiten, werden nicht dargestellt, sind aber nicht verloren. Durch nachträgliches Ändern der Einstellung können nicht sichtbare Messwerte dargestellt werden. Das Ändern der Einstellung ist jederzeit möglich.

#### **Y-Achse Minimum**

Der darzustellende Minimalwert der aktiven Y-Achse kann hier festgelegt werden, wodurch die Achse automatisch neu skaliert wird. Alle Messwerte, die den Minimalwert unterschreiten, werden nicht dargestellt, sind aber nicht verloren. Durch nachträgliches Ändern der Einstellung können nicht sichtbare Messwerte dargestellt werden. Das Ändern der Einstellung ist jederzeit möglich.

### **aktive Y-Achse**

Legt die aktive Y-Achse fest. Es kann immer nur eine Y-Achse aktiv sein.

### **X-Achse Maximum**

Der darzustellende Maximalwert der X-Achse kann hier festgelegt werden, wodurch die Achse automatisch neu skaliert wird. Alle Messwerte, die den Maximalwert überschreiten, werden nicht dargestellt, sind aber nicht verloren. Durch nachträgliches Ändern der Einstellung können nicht sichtbare Messwerte dargestellt werden. Das Ändern der Einstellung ist jederzeit möglich.

### **X-Achse Minimum**

Der darzustellende Minimalwert der X-Achse kann hier festgelegt werden, wodurch die Achse automatisch neu skaliert wird. Alle Messwerte, die den Minimalwert unterschreiten, werden nicht dargestellt, sind aber nicht verloren. Durch nachträgliches Ändern der Einstellung können nicht sichtbare Messwerte dargestellt werden. Das Ändern der Einstellung ist jederzeit möglich.

### **Weiteres:**

#### **Cursorlegende mit Positionierwerkzeug**

Die Cursorlegende zeigt die aktuelle Position des cursors. Der cursor kann mit der Maus frei über den sichtbaren Plotbereich gezogen werden. Die Koordinaten des cursors können über die Cursorlegende vorgegeben werden. Nach einem Doppelklick auf die jeweilige Koordinate kann diese auf einen beliebigen Wert gesetzt werden. Der cursor springt dann auf die gewünschte Position.

#### **cursorachse**

Der cursor zeigt in Y-Richtung entweder den Strom- oder den Leistungswert an. Mit der cursor-Achse kann ausgewählt werden, ob der cursor den Strom- oder den Leistungswert anzeigen soll.

#### **Plot-Legende**

Hier können verschiedene Eigenschaften der Plots, wie zum Beispiel Farbe, Linientyp oder Linienbreite, geändert werden. Durch Setzen bzw. Rücksetzen der Häkchen kann jeder Plot beliebig sichtbar bzw. unsichtbar gemacht werden. Die Plots 0 bis 14 entsprechen dabei den Stromkurven, die Plots 15 bis 29 den dazugehörigen Leistungskurven. Soll zum Beispiel das dritte aufgezeichnete Kurvenpaar unsichtbar gemacht werden, sind die Häkchen vor Plot 2 und Plot 17 zu entfernen.

## A.2. Anleitung für den Laborversuch

1. Schaltfläche ‚Messen/Speicher‘ deaktivieren, um die Erfassung der Messung zu verfolgen.
2. Aktivierung der Schaltfläche ‚Zeichnet auf/Zeichnet nicht auf‘.
3. Auslösen der Messung durch Druck auf den Taster ‚Messung starten‘ an der Frontseite des Sonnensimulators.
4. Ist die Messung abgeschlossen, sofort die Schaltfläche ‚Zeichnet auf/Zeichnet nicht auf‘ deaktivieren.
5. Im folgenden Dialog kann die erfolgte Messung verworfen oder im Zwischenspeicher abgelegt werden.
6. Optional kann nun über das Aktivieren der Schaltfläche ‚Messen/Speicher‘ der aktuelle Inhalt des Zwischenspeichers in Augenschein genommen werden.
7. Der zu untersuchende Parameter ist gemäß der Aufgabenstellung abzuändern.
8. Durch Wiederholung der Schritte 1 bis 6 werden die Messungen im Zwischenspeicher abgelegt und zu einer Kurvenschar zusammengefasst.
9. Ist die Kurvenschar komplett im Zwischenspeicher abgelegt worden, ist dieser über die Aktivierung der Schaltfläche ‚Messen/Speicher‘ darzustellen.
10. Optional können jetzt Einstellungen wie Achsenskalierung, Linienbreite, usw. der einzelnen Plots vorgenommen werden.
11. Klick auf die Schaltfläche ‚Drucken‘.
12. Bevor mit dem Aufzeichnen einer neuen Kurvenschar begonnen werden kann, ist der Zwischenspeicher mit Klick auf die Schaltfläche ‚Speicher löschen‘ zu löschen.

Es können jederzeit dauerhaft gespeicherte Messungen in den Zwischenspeicher geladen werden. Dazu ist wie folgt vorzugehen.

1. Schaltfläche ‚Messen/Speicher‘ aktivieren, um den Inhalt des Zwischenspeichers darzustellen.
2. Klick auf Schaltfläche ‚aus Datei laden‘.
3. Zur gewünschten Messung browsen, auswählen und bestätigen.
4. Die Messung erscheint im Zwischenspeicher. Es kann beliebig zwischen dem Erfassen neuer Messungen und dem Laden dauerhaft gespeicherter Messungen gewechselt werden.

### **A.3. Anleitung für das dauerhafte Speichern von Messungen**

1. Es sind die Schritte 1 bis 6 aus ‚Handhabung während der Messung‘ zu befolgen.
2. Klick auf ‚in Datei speichern‘.
3. Verzeichnis des korrekten PV-Moduls öffnen und Messung gemäß unten folgender Namenskonvention speichern.

#### **Namenskonvention:**

##### **Für Messung unter geänderter Bestrahlungsstärke:**

‚E200‘, ‚E400‘, ‚E600‘, ‚E800‘ bzw. ‚E1000‘

##### **Für Messung unter geändertem Einstrahlungswinkel:**

‚Winkel0Grad‘, ‚Winkel30Grad‘, ‚Winkel60Grad‘ bzw. ‚Winkel90Grad‘

##### **Für Abschattungsmessung:**

‚Abschattung‘

##### **Für Messung unter geänderten Umgebungstemperaturen:**

‚Temperatur25Grad‘, ‚Temperatur30Grad‘, ‚Temperatur35Grad‘ bzw. ‚Temperatur40Grad‘

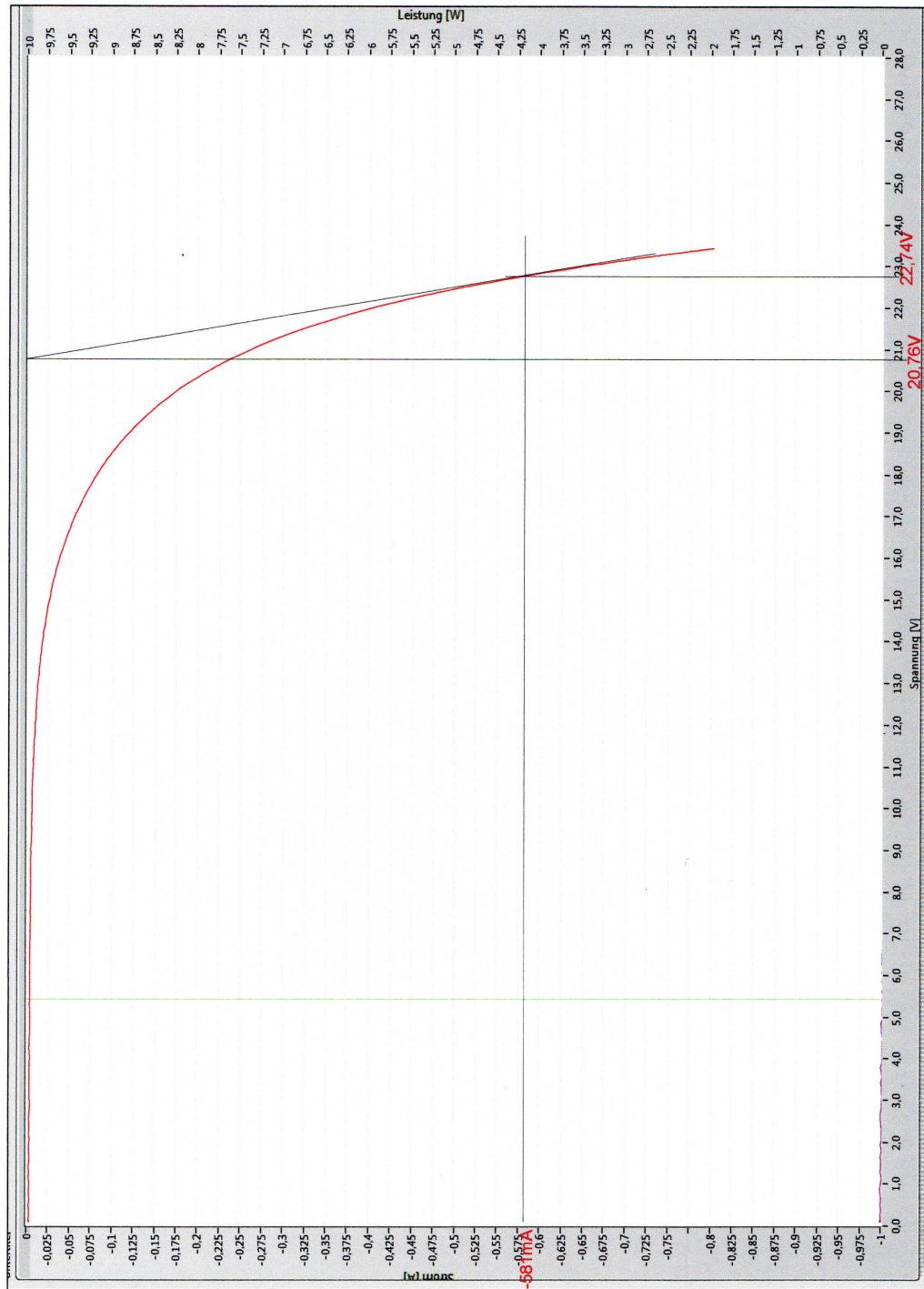


Abbildung A.7: Dunkelkennlinie des monokristallinen Moduls JWS 1086

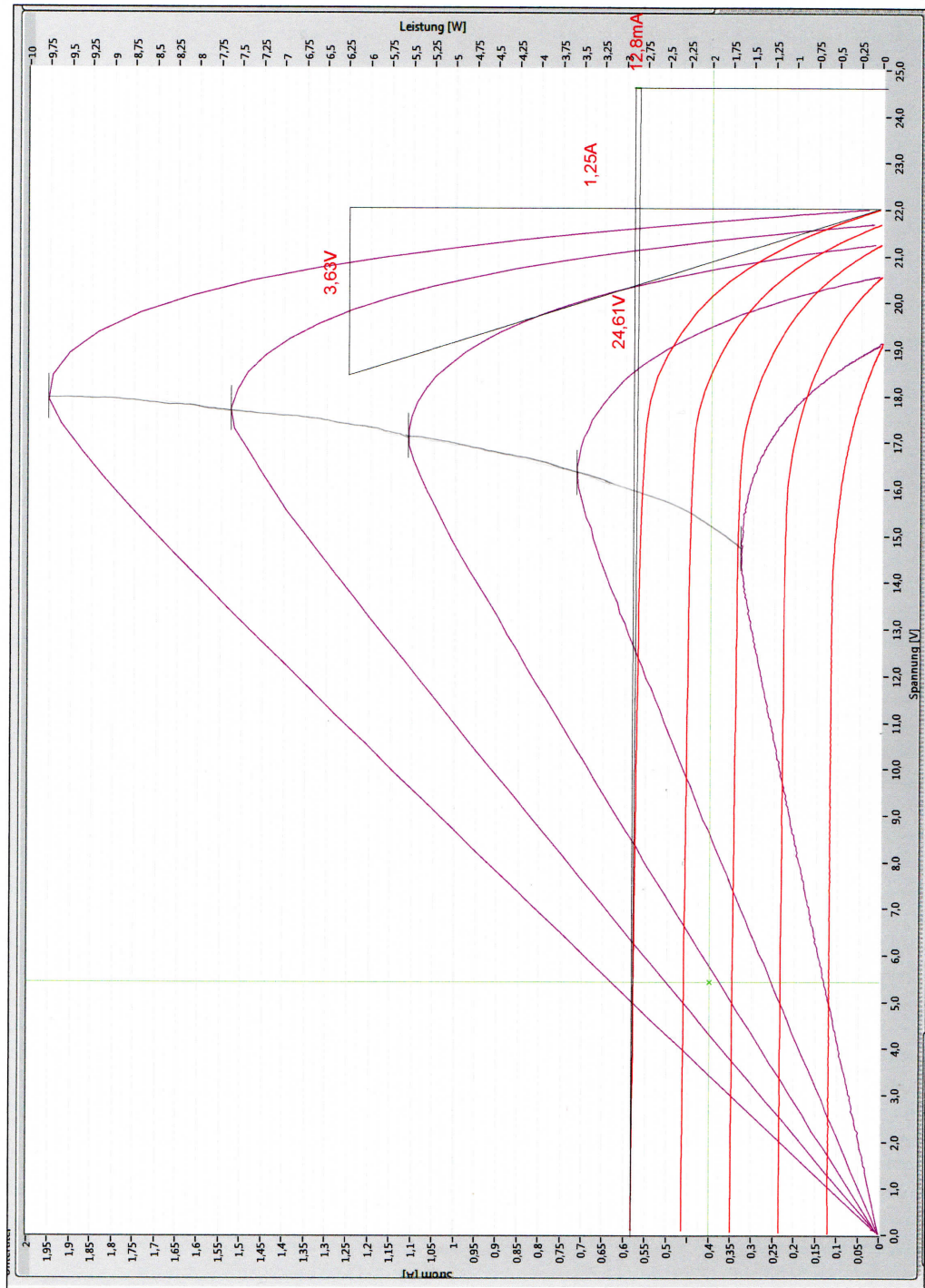


Abbildung A.8: Messung bei verschiedenen Bestrahlungsstärken am Modul JWS 1086

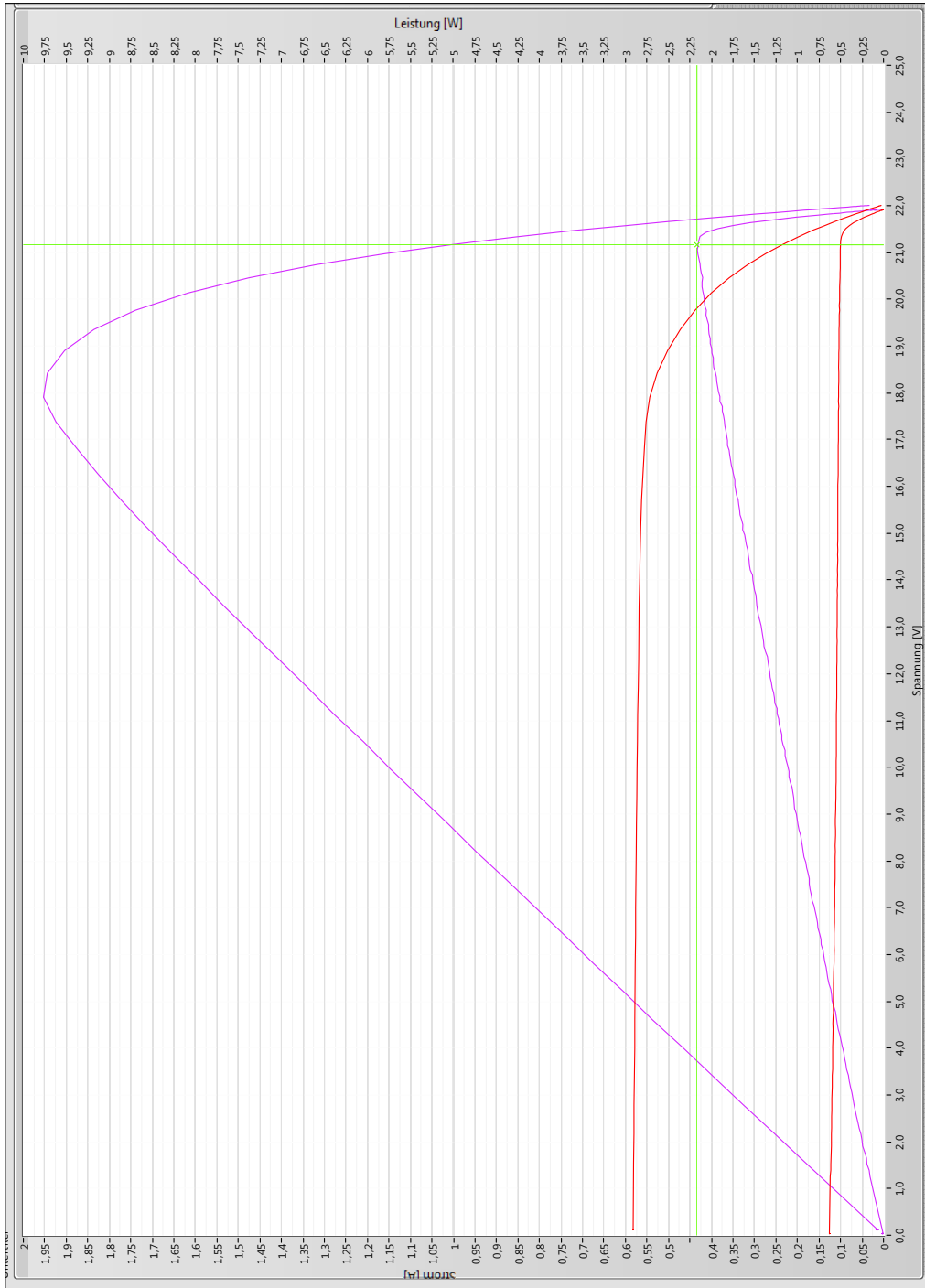


Abbildung A.9: Messung bei einer abgeschatteten Solarzelle am Modul JWS 1086

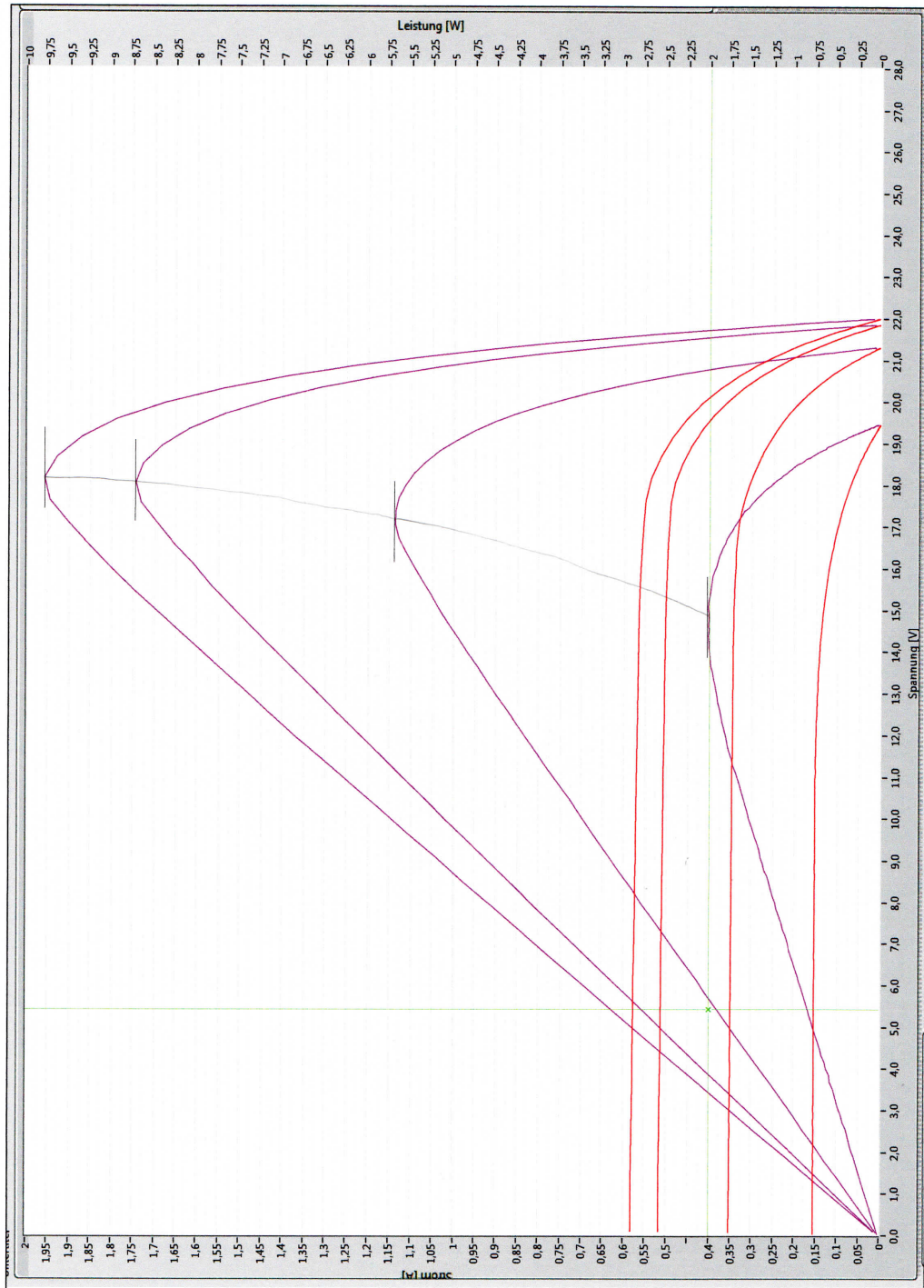


Abbildung A.10: Messung bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln am Modul JWS  
1086



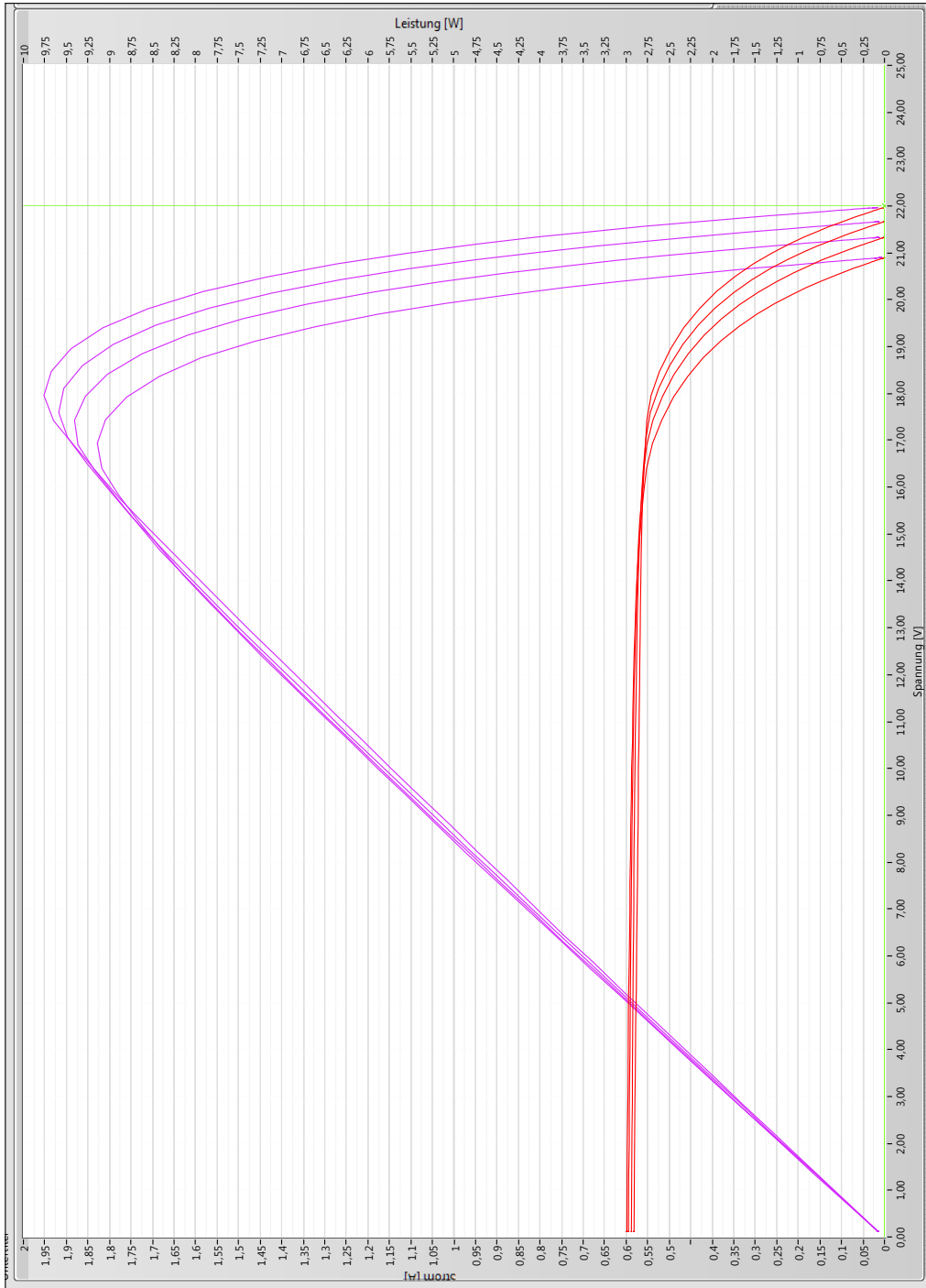


Abbildung A.11: Messung bei unterschiedlichen Modultemperaturen am Modul JWS 1086

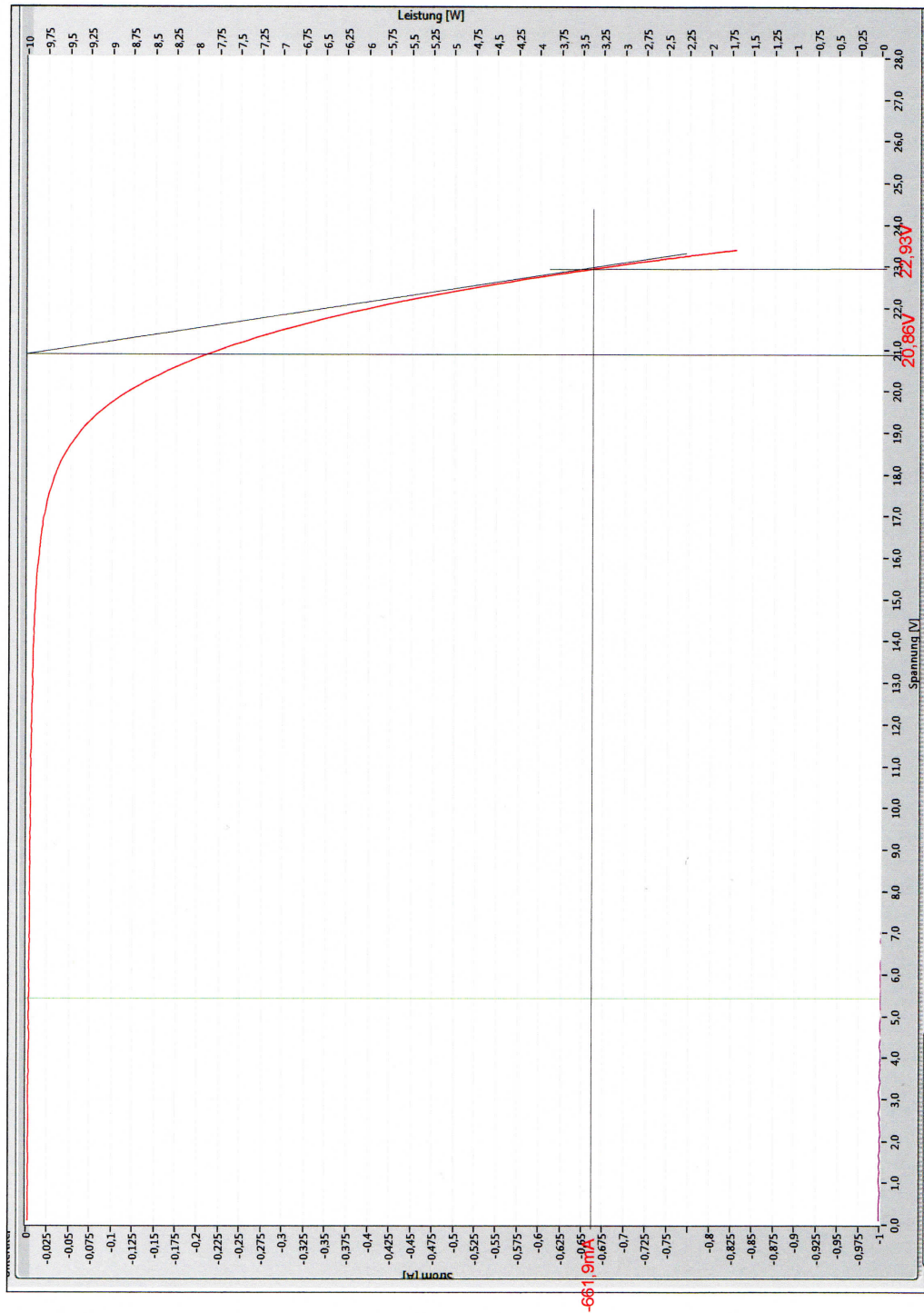


Abbildung A.12: Dunkelkennlinie des polykristallinen Moduls JWS 1201

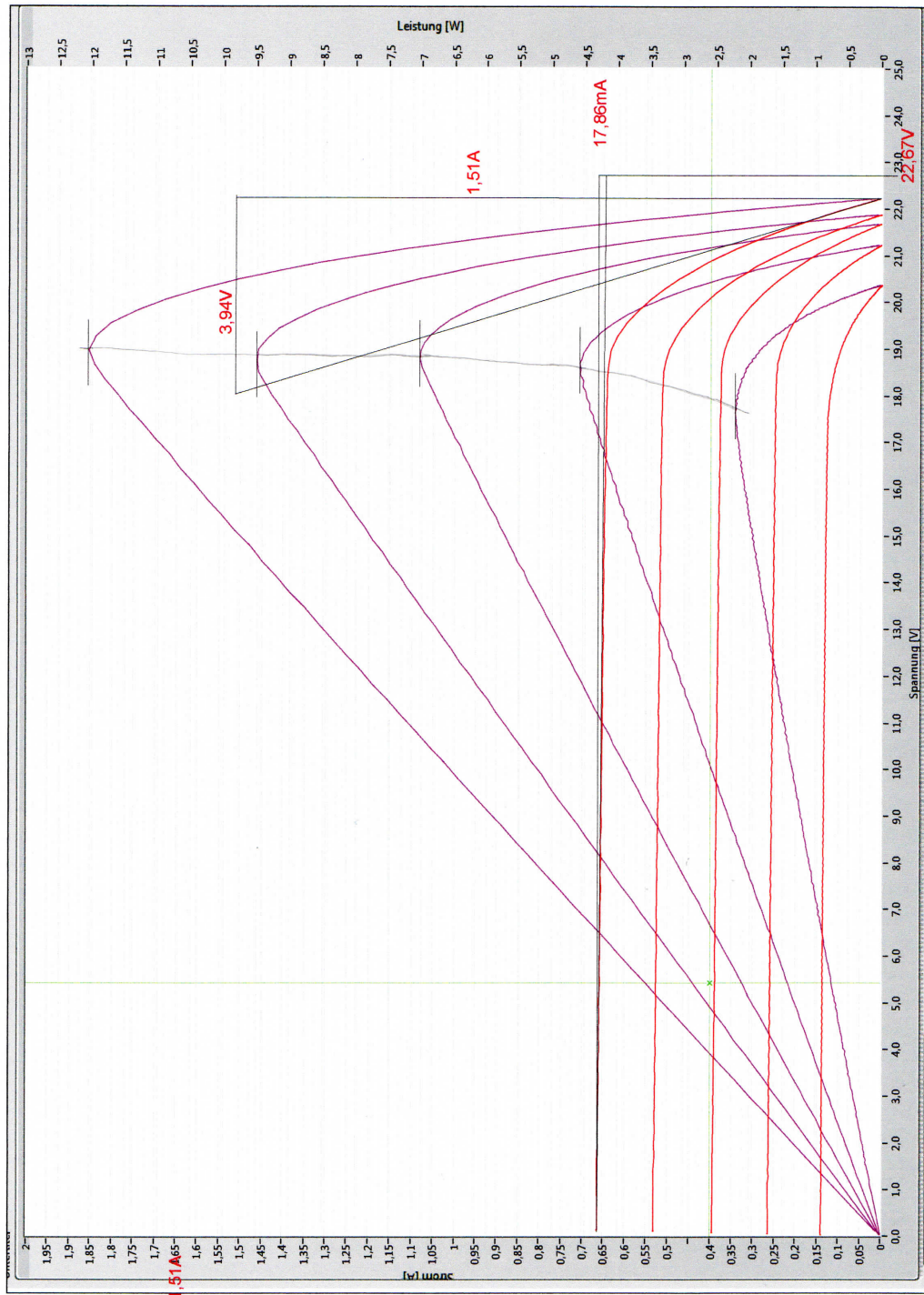


Abbildung A.13: Messung bei verschiedenen Bestrahlungsstärken am Modul JWS 1201

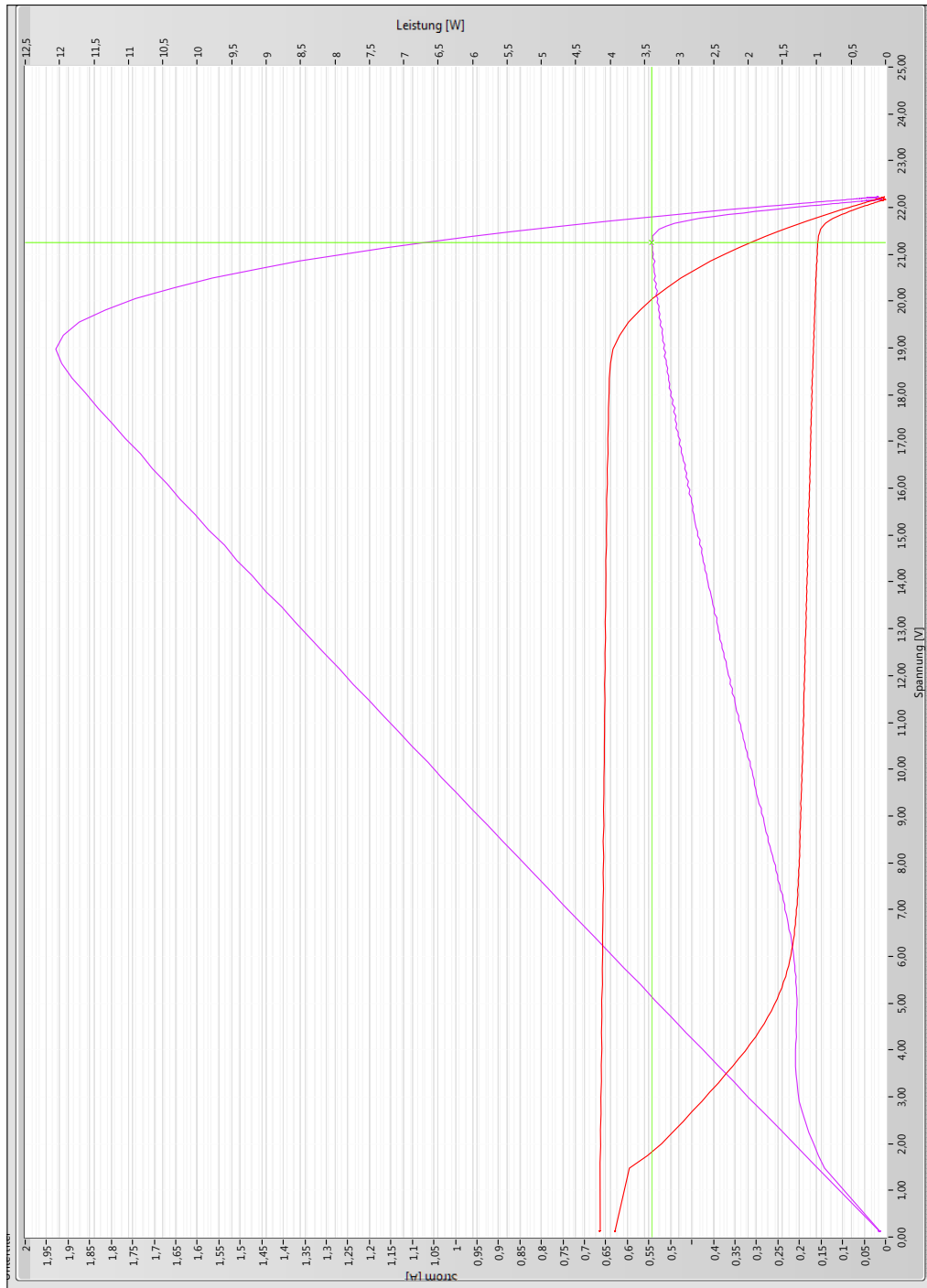


Abbildung A.14: Messung bei einer abgeschatteten Solarzelle am Modul JWS 1201

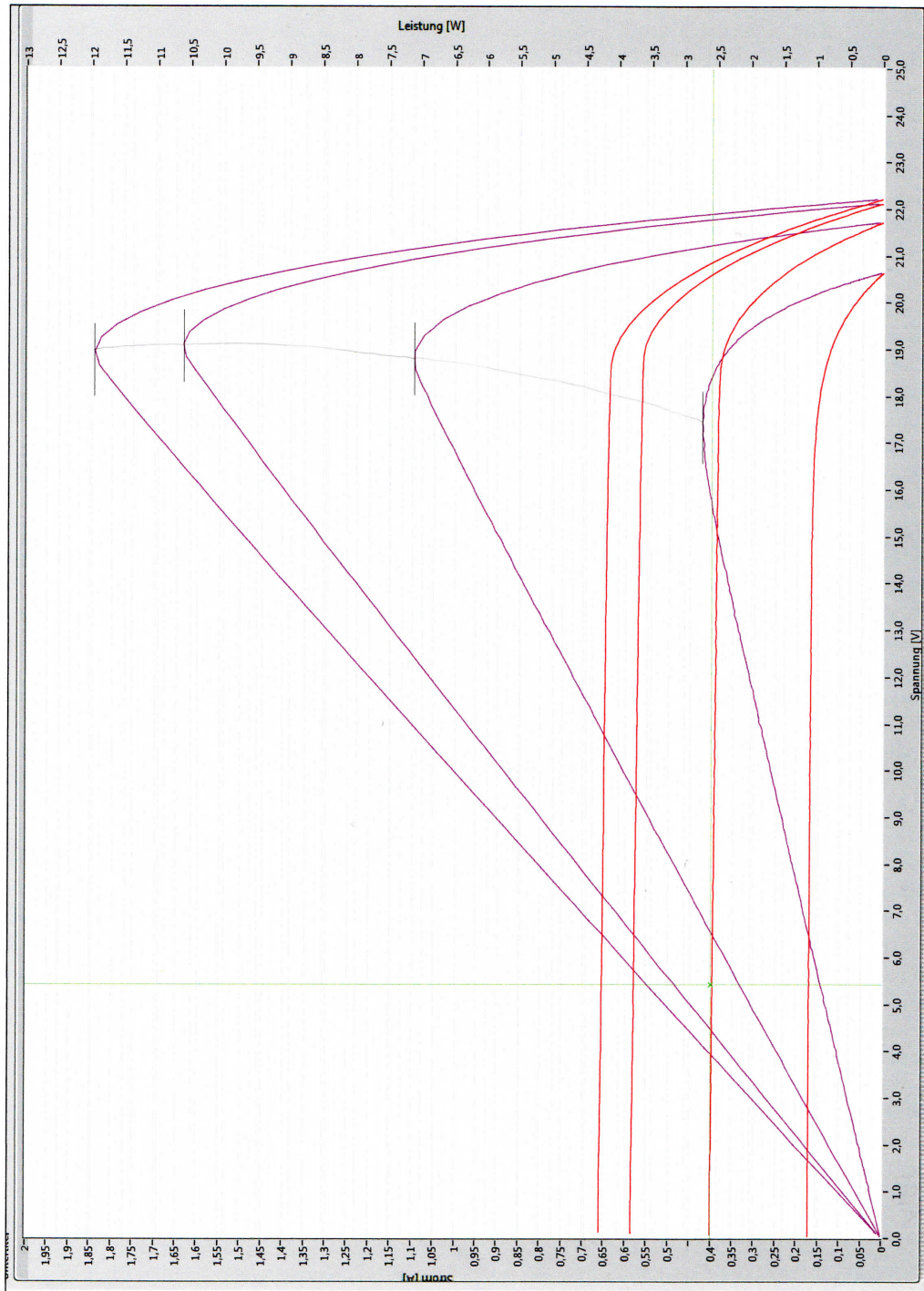


Abbildung A.15: Messung bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln am Modul JWS 1201

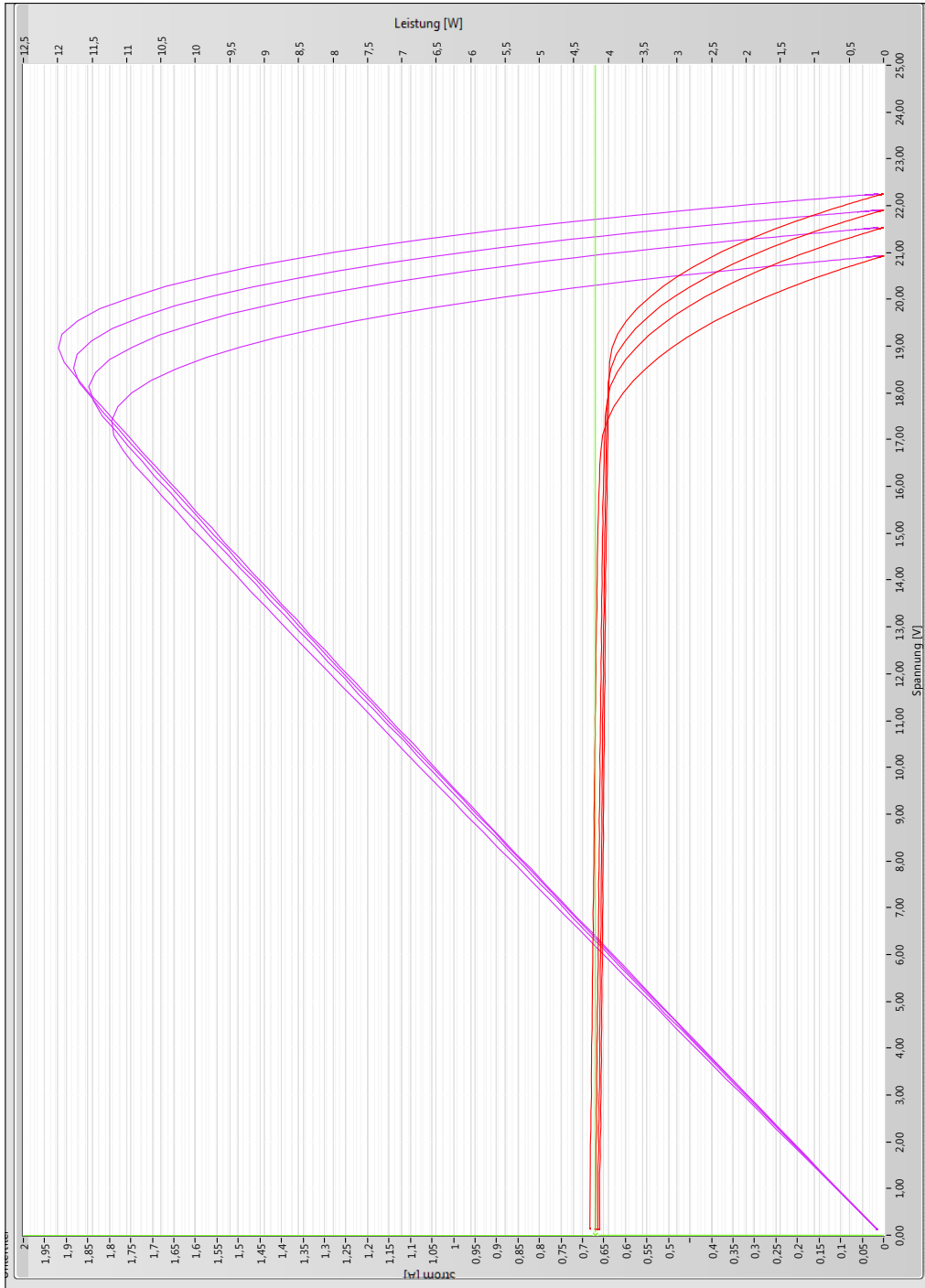


Abbildung A.16: Messung bei unterschiedlichen Modultemperaturen am Modul JWS 1201

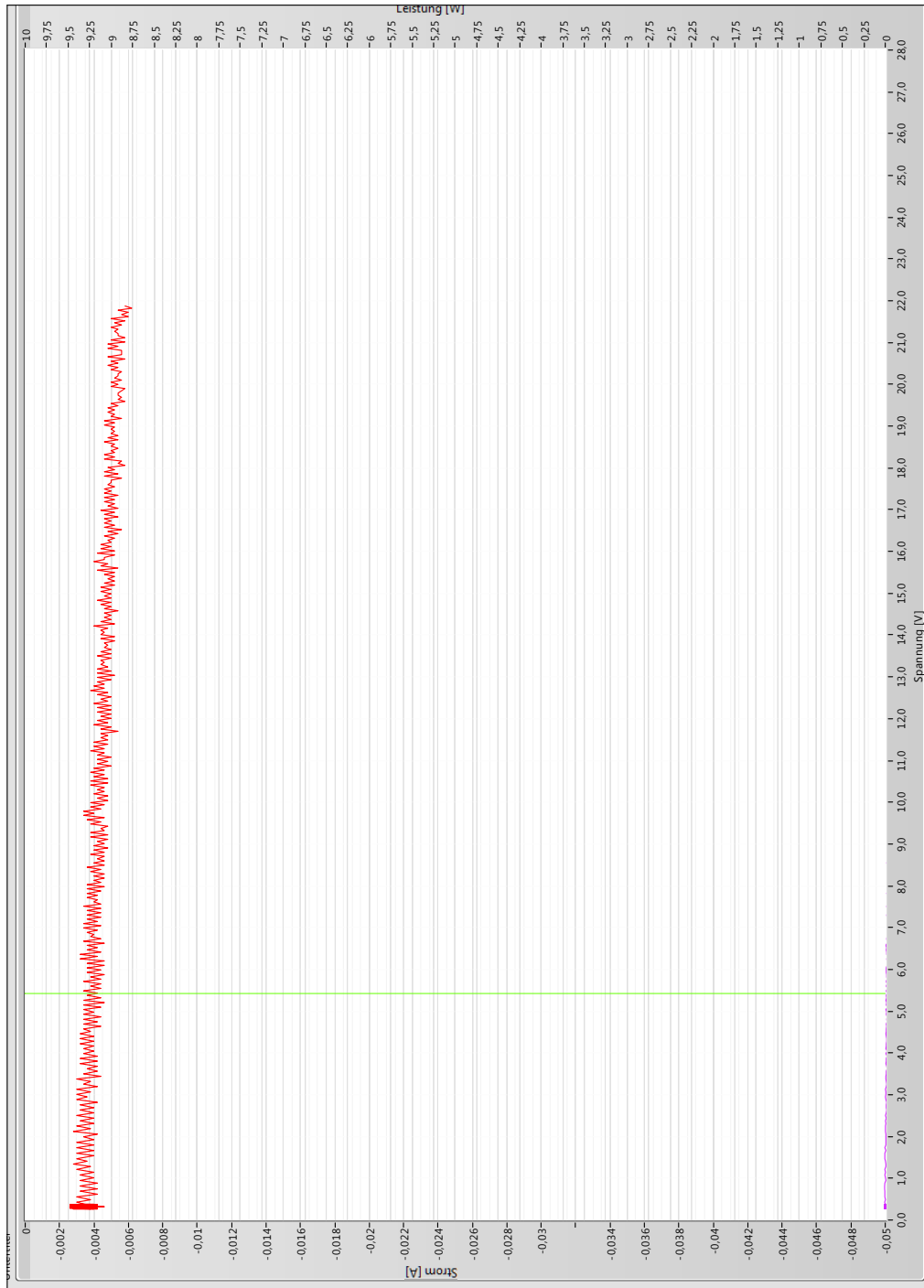


Abbildung A.17: Dunkelkennlinie des amorphen Moduls

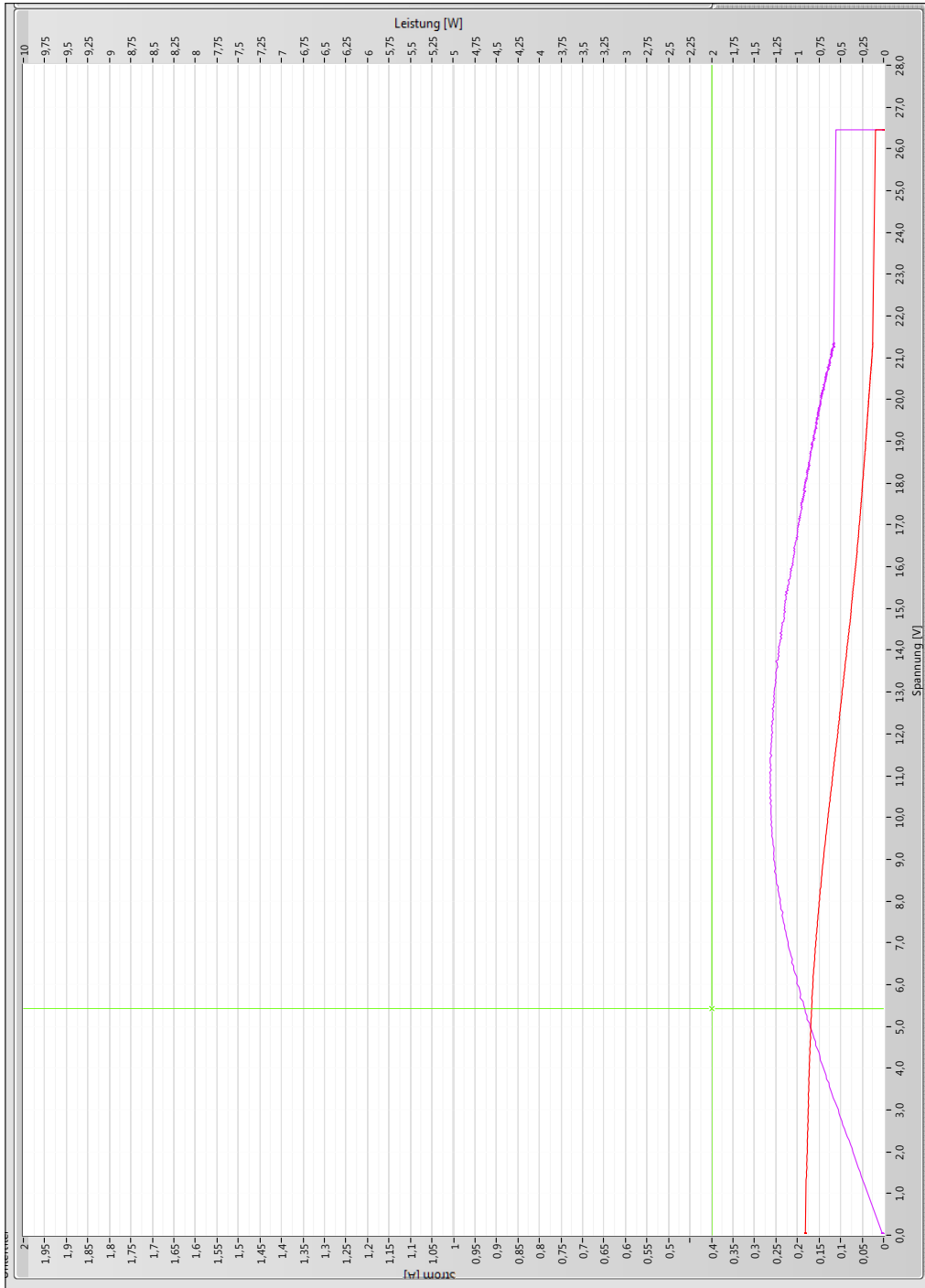


Abbildung A.18: Messung unter Abschattung einer Solarzelle am amorphen Modul





Abbildung A.19: Messung bei unterschiedlichen Modultemperaturen am amorphen Modul

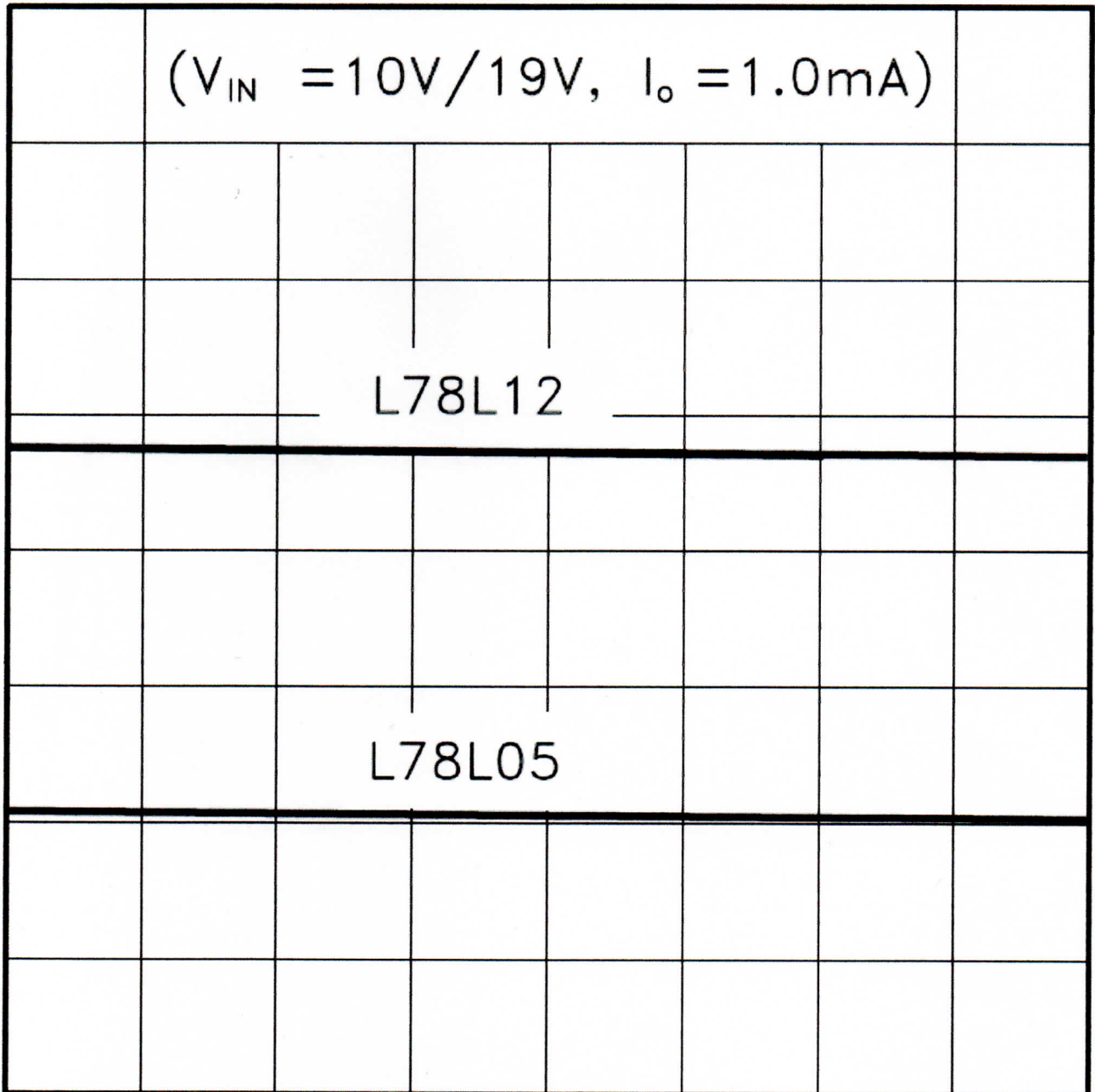


Abbildung A.20: Temperaturabhängigkeit des Linearreglers L78L05

#### A.4. Zusammenfassung der Modulparameter beider Module

Tabelle A.1: Zusammenfassung der Modulparameter

PV-Modul	$I_K$ [mA]	$U_0$ [V]	$I_S$ [pA]	$R_S$ [ $\Omega$ ] aus DKL	$R_S$ [ $\Omega$ ] aus HKL	$R_P$ [ $\Omega$ ]
JWS 1086	581	22	27,12	1,27	2,9	1919,76
JWS 1201	661,9	22,24	23,8	1,1	2,6	1266,7

**Erst- und Wiederholungsprüfung  
ortsveränderlicher elektrischer Geräte**

Nur für Ausbildungs-  
und Prüfungszwecke  
zu verwenden!

**Prüf- und Messprotokoll**

<b>Nr.</b>	Blatt 1 von 1	Kunden-Nr.:
Auftraggeber:	Auftrags-Nr.:	Auftragnehmer: AL-Labor
Gerät: Versuchsstand für Labor Photovoltaik	Prüfer/-in: Tom Petzold	

**Prüfung nach:** DIN VDE 0701/0702  BGV A3

Neugerät  Erweiterung  Änderung  Instandsetzung  Wiederholungsprüfung

**Gerätedaten:**

Hersteller: \_\_\_\_\_ Nennspannung: 230 V cos φ: \_\_\_\_\_  
 Typ: \_\_\_\_\_ Nennstrom: 6 A Schutzklasse: I  II  III   
 Serien-Nr. \_\_\_\_\_ Nennleistung: 1380 W Schutzart: IP \_\_\_\_\_  
 Ident.-Nr. \_\_\_\_\_ Frequenz: 50 Hz

Sichtprüfung	i.O.	n.i.O.		i.O.	n.i.O.		ja	nein
Typenschild/Warnhinweise/ Kennzeichnungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kühlluftöffnungen/Luftfilter	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Anzeichen von Überlastung/ unsachgemäßem Gebrauch	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Behälter/Schutzabdeckungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schalter, Steuer-, Einstell- und Sicherheitsvorrichtungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sicherheitsbeeinträchtigende Verschmutzung/ Korrosion/Alterung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Anschlussleitung/-stecker, Anschlussklemmen und -adern	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bemessung der zugänglichen Gerätesicherung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Mechanische Gefährdung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Überschutz/Zugentlastung der Anschlussleitung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bauteile und Baugruppen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Unzulässige Eingriffe und Änderungen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Befestigungen, Leitungshalterungen, Sicherungshalter, usw.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Messungen	Grenzwert	Messwert	i.O.	n.i.O.	Bemerkungen
Isolationswiderstand	<0,3 Ω	0,209 Ω	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Isolationswiderstand	>1 MΩ	>310 MΩ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Isolationsstrom	mA	mA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Leitungsstrom	<0,5mA mA	0,002 mA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	mA	mA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Funktionsprüfung	i.O.	n.i.O.
Funktion des Geräts	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<b>Benutzte Messgeräte</b>	Fabrikat: SECUTEST	Fabrikat:	Fabrikat:
	Typ: S2N+	Typ:	Typ:

<b>Prüfergebnis:</b>	keine Mängel festgestellt <input checked="" type="checkbox"/>	Prüfplakette erteilt:	ja <input type="checkbox"/>	Nächster Prüftermin:
	Mängel festgestellt <input type="checkbox"/>		nein <input type="checkbox"/>	

<b>Mängel/Bemerkungen:</b>	Das elektrische Gerät entspricht den anerkannten Regeln der Elektrotechnik. Ein sicherer Gebrauch bei bestimmungsgemäßer Anwendung ist gewährleistet.	ja <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
----------------------------	---	---

<b>Auftraggeber:</b>	<b>Prüfer/-in:</b>
Ort _____ Datum _____ Unterschrift _____	Hamburg 21.02.2018 Ort Datum <i>Tom Petzold</i> Unterschrift

Abbildung A.21: Prüfprotokoll nach DIN VDE 0701/0702

## A.5. Messungen zur Spannungsgleichrichtung)

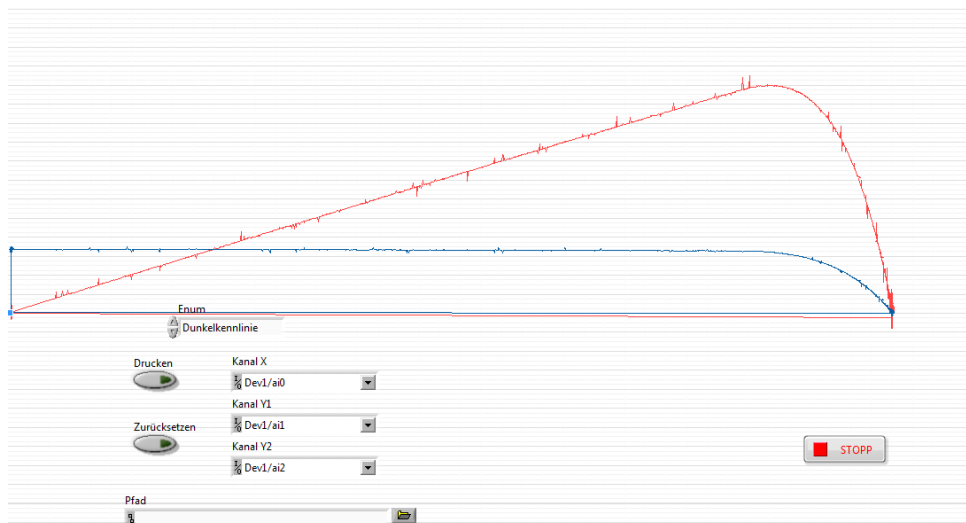


Abbildung A.22: Probemessung mit Schaltnetzteilen

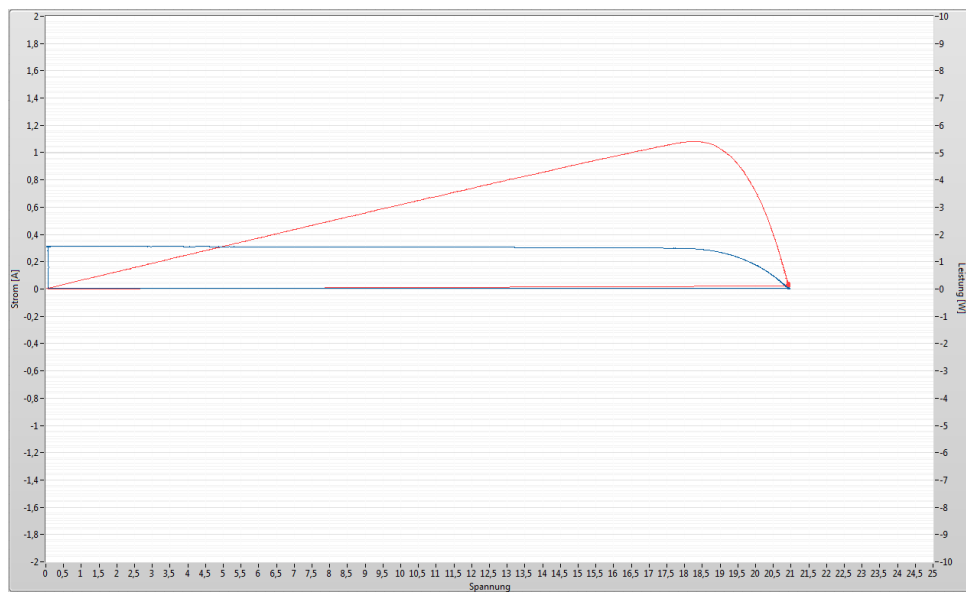


Abbildung A.23: Probemessung mit Schaltnetzteilen und  $4,7\mu F$ -Kondensatoren parallel zu BNC-Buchsen

Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf CD und ist einzusehen bei Prof. Dr.-Ing. Röther.

## Literatur

- [1] PAGEL, Stephanie V.: *Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Untersuchung von Photovoltaik-Modulen*, Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, Diss., 2016
- [2] GUTEKUNST, Jürgen(Hrsg.) ; EKBERT, Hering ; BRESSLER, Klaus: *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,, 2017. – Seiten 461 bis 466
- [3] SCHULTZ, Susanne: *Entwicklung und Aufbau eines Sonnensimulators zur Untersuchung von Solarmodulen*, Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, 2007
- [4] BEIER, Thomas ; MEDERER, Thomas: *Messdatenverarbeitung mit LabView*. Carl Hanser Verlag München, 2015. – ISBN: 978-3-446-44265-8

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich, Tom Petzold, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema `Aufbau, Erweiterung und Optimierung eines Sonnensimulators zur Untersuchung von Photovoltaik-Modulen` ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg

Ort

26.02.2018

Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift im Original