

MASTER THESIS

zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science in Engineering“
im Studiengang Industrielle Elektronik

Aufbau eines automatisierten Mess- und Auswertesystems zur Bestimmung der Bestrahlungsstärkeverteilung in einem stationären Sonnensimulator

Ausgeführt von: Thomas Schmatz BSc

Personenkennzeichen: 1010300002

1. BegutachterIn: DI Bernhard Kubicek

2. BegutachterIn: DI (FH) Thomas Krametz

Wien, 7. Mai 2012

Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Ich versichere, dass die abgegebene Version jener im Uploadtool entspricht.“

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Die Arbeit umfasst die Planung und Realisierung eines selbstfahrenden Messroboters, der die Bestrahlungsstärkeverteilung in der Prüfebene eines stationären Sonnensimulators erfassst. Neben den Einstrahlungsdaten werden werden zusätzliche Informationen über die Umgebungsbedingungen im Prüfkanal aufgezeichnet. Bei der Umsetzung wurden Rapid-Prototyping Techniken (3D-Druck, Platinenfräse und Lasercutter) eingesetzt. Behandelt werden theoretische Grundlagen und normative Anforderungen an stationäre Sonnensimulatoren, sowie Messunsicherheitsberechnungen und Validierung des Gesamtsystems.

Schlagwörter: Schlagwort 1, Schlagwort 2, Schlagwort 3, Schlagwort 4, Schlagwort 5

Abstract

Text
Text Text Text Text Text ...

Keywords: Keyword 1, Keyword 2, Keyword 3, Keyword 4, Keyword 5

Danksagung

Ich danke meinen Eltern für die Unterstützung und Geduld, die sie während des Studiums aufgebracht haben. Ich danke meinen Hochschulbetreuer für die umfangreiche Betreuung. Ich danke meinen Firmenbetreuer Thomas Krametz für die Zeit die er sich genommen hat. ... (Rohfassung!!!!)

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	1
1.1. Warum Module im Sonnensimulator	1
1.2. Sonnensimulator Aufbau	1
1.3. Normative Anforderungen an den Sonnensimulator	1
1.4. Theorie Referenzzelle	3
2. Entwicklungprozess	6
2.1. Hardwaredesign	6
2.1.1. Mecanum-Platform	6
2.1.2. Chassis	8
2.2. Steuerungselektronik	8
2.2.1. Motorensteuerung	8
2.2.2. Optische Sensorik	8
2.2.3. Spannungversorgung	8
2.2.4. Mikrokontroller	12
2.2.5. Temperatursensoren	12
2.3. Softwareentwicklung	13
2.3.1. Entwicklungsumgebung	13
2.3.2. Auswertung optische sensoren	13
2.3.3. Auswertung ADCs	14
2.3.4. Programmablauf	14
3. Kalibration	15
3.1. Temperatursensoren	15
3.2. Messzelle	15
3.3. Strommessung	15
3.4. Thermische Stabilität der Temperaturmessung	15
4. Messung	17
4.1. Messaufbau	17
4.1.1. Platten	17
4.1.2. Ablauf	17
4.2. Auswertung	18
4.3. Schlussfolgerung	18
Abbildungsverzeichnis	22
Tabellenverzeichnis	23
Abkürzungsverzeichnis	24

A. Sourcecode Arduino	25
B. Sourcecode Auswertung	40

1. Aufgabenstellung

1.1. Warum Module im Sonnensimulator

Ein Sonnensimulator simuliert die Wirkung von Sonnenlicht auf Prüfobjekte. Für die Prüfung von PV-Modulen ersetzt ein stationärer Sonnensimulator das natürliche Sonnenlicht, das ist notwendig weil aufgrund von Jahreszeit und Witterung nicht immer 1000W pro Quadratmeter mit den AM1,5 Spektrum zur Verfügung stehen. Es bedarf der Erklärung einiger wichtiger Begriffe. AM steht für Air Mass, die Lufthülle der Erde, die zum einem das Leben auf diesen Planeten ermöglicht, zum anderen muss das Sonnenlicht die Erdatmosphäre durchdringen. Dabei wird das Licht abgeschwächt und die spektrale Zusammensetzung verändert, weil bestimmte Moleküle (O_2 , H_2O , CO_2) der Luft einige Wellenlängenbereiche sehr gut absorbieren.

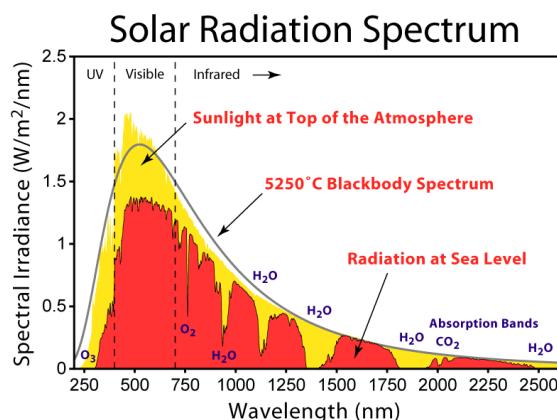


Abbildung 1.1.: Spektrum der Sonne

1.2. Sonnensimulator Aufbau

10 Lampen zu je 4 kW. Angeordnet in 2 Reihen zu je 5 Lampen. Die Lampen sind höhenverstellbar. Die Leistung der Lampen lässt sich einzeln ansteuern. Die Testobjekte, z.B. ganze Module oder auch einzelne Zellen liegen in einer Lade. Die Prüfebene ist 2,50 mal 4 Meter groß. Nur ein Teil dieser Ebene wird verwendet. Die Prüfebene liegt innerhalb eines Windkanals, der oben für die Strahlung durchsichtig ist. Der Windkanal verengt sich, damit die Windgeschwindigkeit ansteigt, um eine konstante Kühlleistung wegen der sich erwärmenden Luft zu haben.

1.3. Normative Anforderungen an den Sonnensimulator

Akkreditierung, Begründung warum Messroboter, Alte Ergebnisse, Alte Messmethode
In IEC 60904-9 legt die Anforderungen an Sonnensimulatoren fest.



Abbildung 1.2.: Sonnensimulator

	Wavelength range nm	Percentage of total irradiance in the wavelength range 400 nm – 1 100 nm
1	400 – 500	18,4 %
2	500 – 600	19,9 %
3	600 – 700	18,4 %
4	700 – 800	14,9 %
5	800 – 900	12,5 %
6	900 – 1 100	15,9 %

Abbildung 1.3.: Spektrale Strahlungsverteilung nach IEC 60904-9

Classifications	Spectral match to all intervals specified in Table 1	Non-uniformity of irradiance	Temporal instability	
			Short term instability of irradiance STI	Long term instability of irradiance LTI
A	0,75 – 1,25	2 %	0,5%	2 %
B	0,6 – 1,4	5 %	2 %	5 %
C	0,4 – 2,0	10 %	10 %	10 %

Abbildung 1.4.: Simulatorklassen

1.4. Theorie Referenzzelle

Es gibt verschiedene Solarzelltechnologien. Wirtschaftlich bedeutend sind im Moment nur kristalline Siliziumzellen und Dünnschichtzellen. Die kristallinen Siliziumzellen werden in monokristalline Zellen und polykristalline Zellen unterschieden. Beide zusammen machen über 80% des weltweiten Photovoltaikmarktes aus. Als Referenzzelle für Messungen werden ausschließlich kristalline Zellen verwendet. Wichtig ist, dass die Referenzzelle eine ähnliche spektrale Empfindlichkeit hat wie die zu messenden Zelle bzw. das zu messende Modul. Siliziumsolarzellen bestehen aus einer großflächigen Diode. Die Sperrsicht ist dabei dem Sonnenlicht ausgesetzt. Gelangt ein Lichtquanten in die Sperrsicht kann aufgrund des inneren Photoeffektes ein Elektron/Loch Paar erzeugt werden. Durch das elektrische Feld in der Sperrsicht werden die Ladungsträger getrennt bevor sie kombinieren können. Elektronen bewegen sich aufgrund ihrer negativen Ladung entgegen der Feldrichtung in die n-Zone. Löcher wandern in Feldrichtung zur raumladungsfreien p-Zone. Die Leerlaufspannung einer Solarzelle ist kleiner als die Diffusionsspannung.

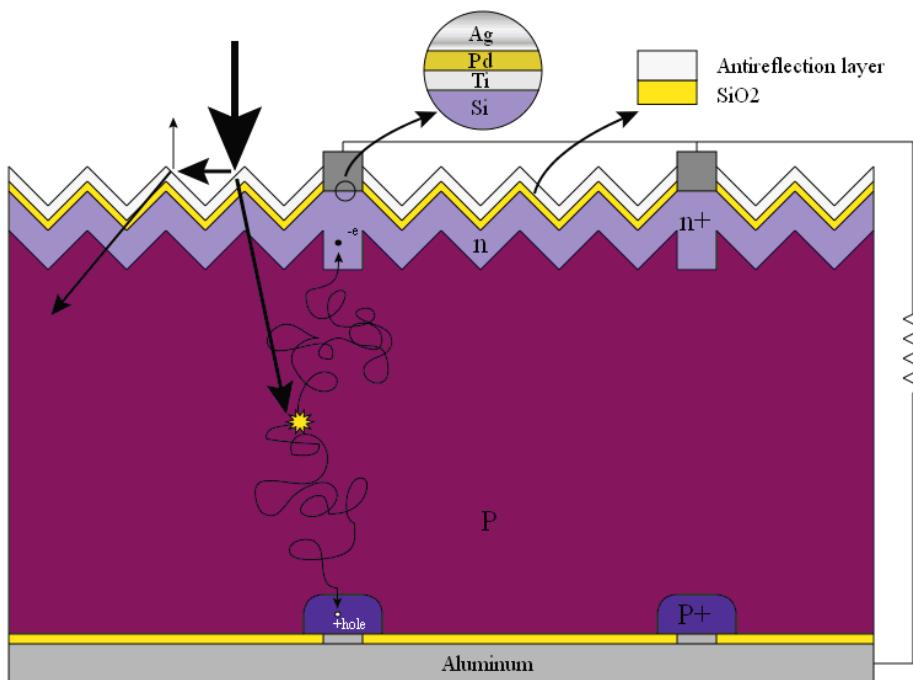


Abbildung 1.5.: Schematischer Aufbau einer Solarzelle

Die unbeleuchtete Solarzelle ist funktionell wie eine normale Halbleiterdiode, die einen Durchlassstrom von p- nach n-Seite fließen lässt, falls eine Spannung von p nach n anliegt. Bei Beleuchtung wird zusätzlich ein Photostrom erzeugt, welcher proportional zur Bestrahlungsstärke und der Zellfläche ist. Das Ersatzschaltbild 1.6 besteht daher aus einer Stromquelle, dazu parallel einer Diode, einem Parallelwiderstand und einem Serienwiderstand. Der Parallelwiderstand fasst Kurzschlüsse zusammen, die realen Solarzellen am Rand oder an den Körngrenzen auftreten können. Mit dem Serienwiderstand werden alle Spannungsabfälle in der Solarzelle erfasst. Eine ideale Solarzelle hat einen Serienwiderstand von null und einen Parallelwiderstand von unendlich.

Referenzzelle, Temperaturabhängigkeit Messzelle, Kennlinie, Warum Kurzschlussstrom,...

Der Kurzschlussstrom einer Solarzelle ist linear von der Bestrahlungsstärke abhängig.

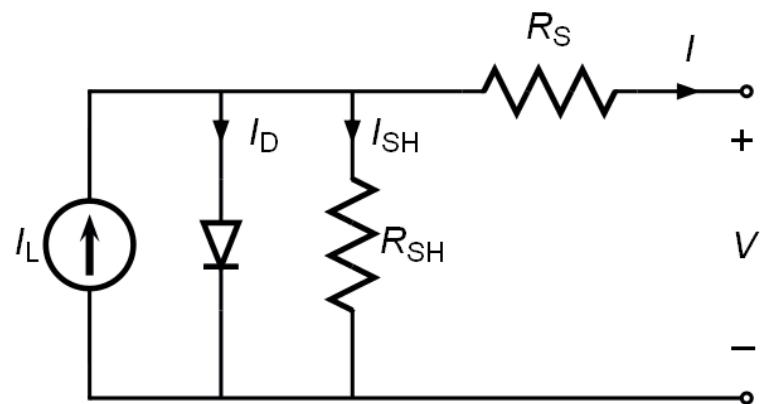


Abbildung 1.6.: Ersatzschaltbild

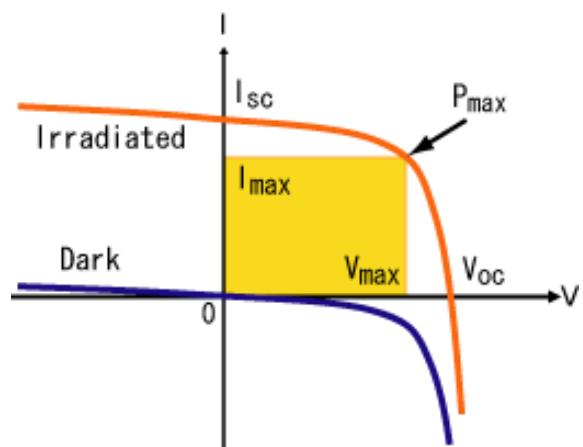


Abbildung 1.7.: Dunkel- und Hellkennlinien

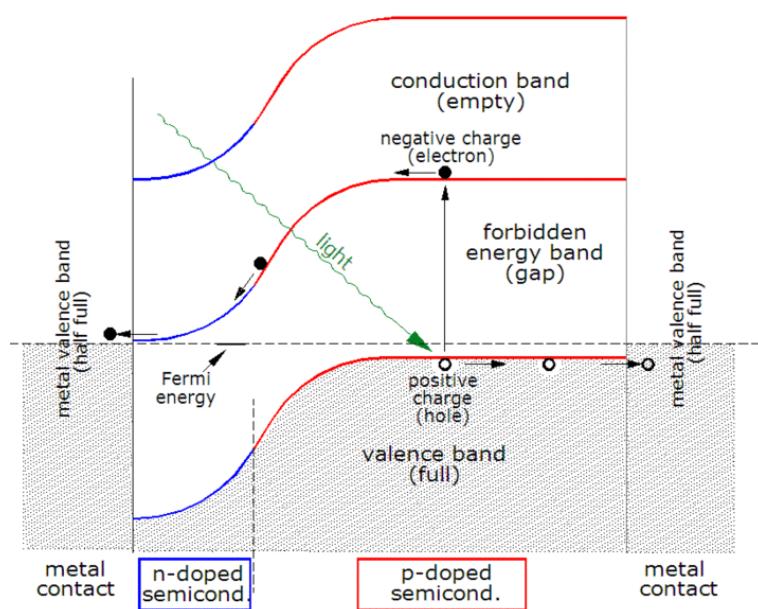


Abbildung 1.8.: Bandabstand

2. Entwicklungprozess

Ersatzschaltbild (Ein- dioden oder zweidiodenmodel), Erklärung der Funktion der einzelnen Bau- teile: Stromquelle, Diode(n), Serienwiderstand, Parallelwiderstand

Abhängigkeit von I-Sc von der Temperatur (und auch U-os und damit auch P-mpp)

2.1. Hardwaredesign

2.1.1. Mecanum-Platform

Das Mecanum-Rad ist ein Rad, das Fahrmanöver in jede Richtung erlaubt, ohne dass das Fahrzeug mit einer mechanischen Lenkung ausgestattet ist. Benannt ist es nach dem schwedischen Unternehmen Macanum AB in welchen dieses Rad 1971 entwickelt wurde. Erreicht wird die Wendigkeit der Fahrzeuge durch den Einsatz von Mecanum Rädern, die einzeln angetrieben werden. Diese Räder bestehen aus einer Felge, auf der unter einem Winkel von 45 Grad lose, ballige Rollen so angebracht sind, dass sie über den Abrollumfang wieder einen exakten Kreis bilden. Durch die Schräganordnung der Rollen entstehen beim Antreiben des Rades 2 Kraftkomponenten. Gegeneinander gerichtete Kräfte der einzelnen Räder werden über die Achsen und den Rahmen kompensiert. Die übrigen Kräfte addieren sich zur resultierenden Fahrtrichtung. Auf diese Weise kann durch entsprechendes Ansteuern der einzelnen Räder bezüglich Drehrichtung und -geschwindigkeit jedes beliebige Fahrmanöver erzeugt werden.

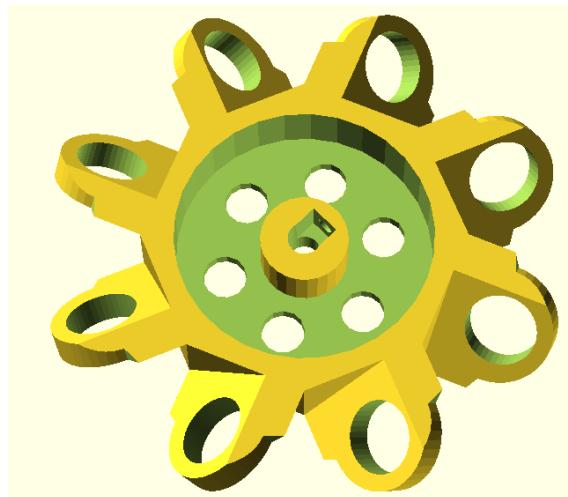


Abbildung 2.1.: Mecanum-Rad

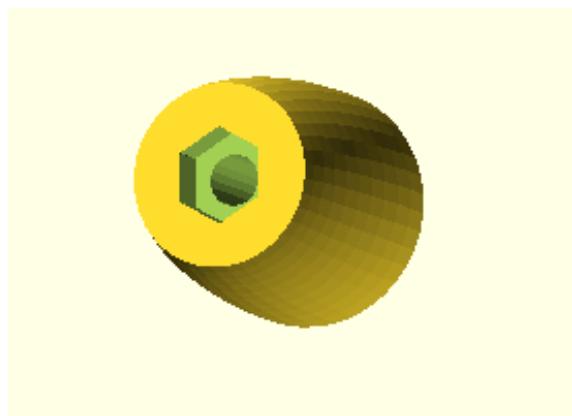


Abbildung 2.2.: Rolle

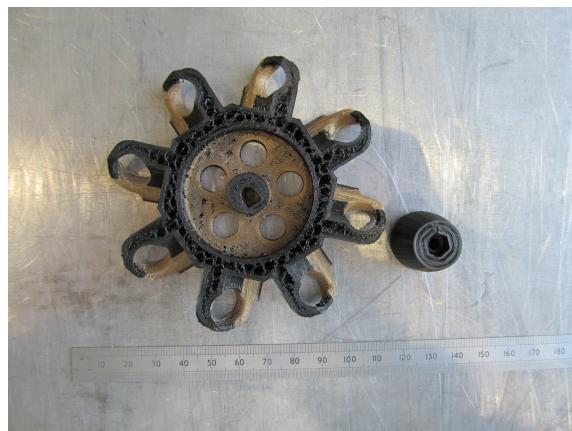


Abbildung 2.3.: Foto eines gedruckten Rades

2.1.2. Chassis

Die Chassis wurde aus Modellbau-Verbund-Holz gefertigt. Dieses Holz wurde gewählt weil es leicht zu bearbeiten, robust und UV-beständig ist. Das Design dafür entstand mit QCAD. QCAD ist ein 2-dimensionaler Autocadklon. Die Einzelteile wurden mit einem Lasercutter aus einer großen Platte geschnitten. Dann verschraubt und teilweise geleimt. Der Oberteil des Chassis lässt sich von der Bodenplatte trennen. Die Motoren sind verschraubt. Einzelne Räder und auch Rollen lassen sich bei Bedarf austauschen. Das Chassis besteht aus 3 Teilen:

- die Bodenplatte
- die Seitenwände
- das Dach mit der Aufnahme für die Messzelle

2.2. Steuerungselektronik

2.2.1. Motorensteuerung

Eine H-Brücke 2.5 erlaubt es einem Gleichstrommotor sich in zwei Richtungen zu drehen. Dafür müssen immer zwei schräg gegenüber liegende Schalter eingeschaltet sein. Zum Beispiel die Schalter S1 und S4 für die Drehrichtung im Uhrzeigersinn, S2 und S3 für die Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn. Zwei untereinander liegende Schalter dürfen nicht gleichzeitig eingeschaltet werden. Es muss einen hardwaretechnischen Schutz gegen diese Art von Kurzschlüssen geben. Ein softwaretechnischer Schutz reichte dem Autor nicht, nachdem ein früher Prototyp der Motortreibplatine sich in Rauch aufgelöst hatte. Deshalb wurde für den Roboter eine integrierte H-Brücke (NJM2670) verwendet, mit einer logischen Verriegelung, die keinen Kurzschluss produzieren kann. Die Drehzahl bei konstanter Versorgungsspannung lässt sich mit Pulsweitenmodulation variieren.

Die Gleichspannungsmotoren sind Getriebemotoren mit der Bezeichnung RB 35, und einem Übersetzungsverhältnis von 1:200. Die maximale Versorgungsspannung wurde mit 12V angegeben. Die Drehzahl beträgt bei 12V Versorgungsspannung 20 Umdrehungen pro Minute. Der Roboter wird mit einem Lithium-Ionen-Akku versorgt. Die Spannung beträgt, abhängig vom Ladezustand zwischen 16,2V und 15,5V. Damit es zu keiner Überlastung der Motoren, kommt wurde bei der Pulsweitenmodulation ein maximales Tastverhältnis von 50% eingehalten.

2.2.2. Optische Sensorik

Der Roboter ist ein Linienfolger. Damit er einer Linie folgen kann, muss diese zuerst zuverlässig erkannt werden. Als Sensor wurde ein CNY70 verwendet. Der CNY 70 ist ein Reflexionsensor. Der Sensor wird in einem fixen Abstand zu einer Ebene montiert. Eine LED sendet Licht mit 950nm aus, welches an der Ebene reflektiert wird. Damit können Unterschiede des Reflektionkoeffizienten, umgangssprachlich der Farbe, gemessen werden. Die Anordnung 9 solcher Sensoren in einem 3 mal 3 Array kann sowohl vertikale als auch horizontale Linien erkennen, sowie Ecken.

2.2.3. Spannungversorgung

Aku-handling, Überwachung der Akkuspannung, Alarm und Abschaltung bei Unterspannung. Es wird empfohlen vor jeden Messzyklus den Akku zu laden. Ein voller Akku schafft ohne Probleme 10 Messfahrten. Bauteile: Akku, Ladegerät (extern), bequemes und schnelles Laden des Akkus. Eine Schmelzsicherung ist direkt im Anschlusskabel des Akkus eingebaut. Der Akku schafft Ströme bis

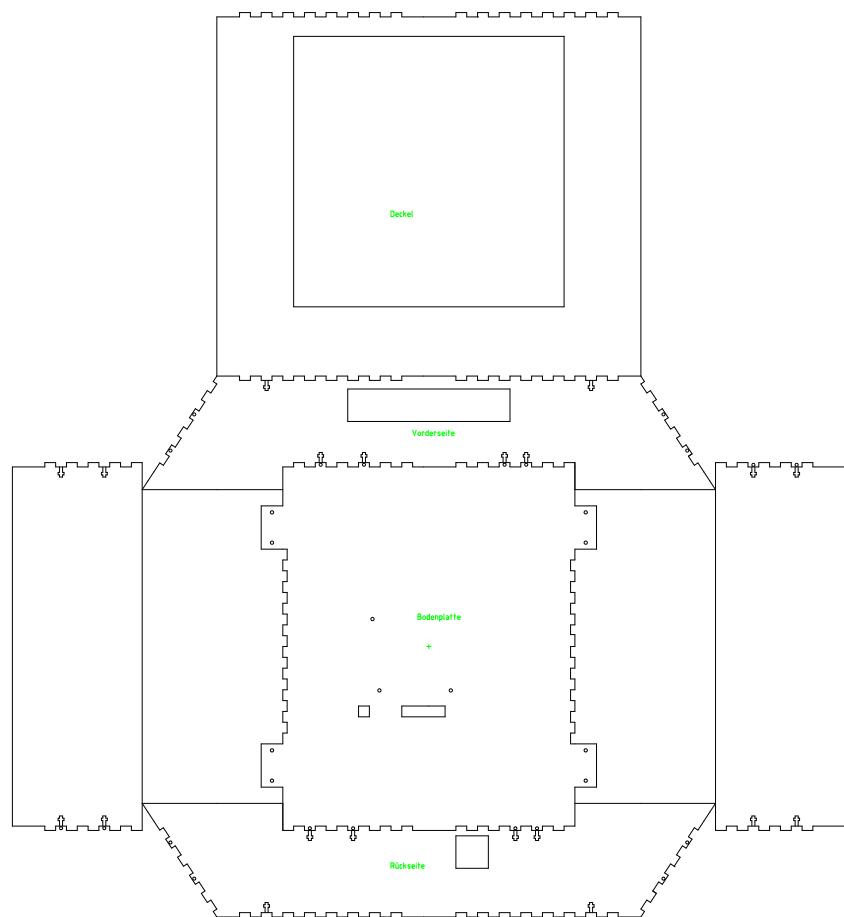


Abbildung 2.4.: Chassis

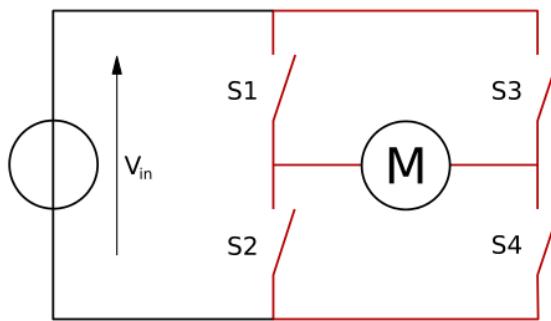


Abbildung 2.5.: H-Brücke

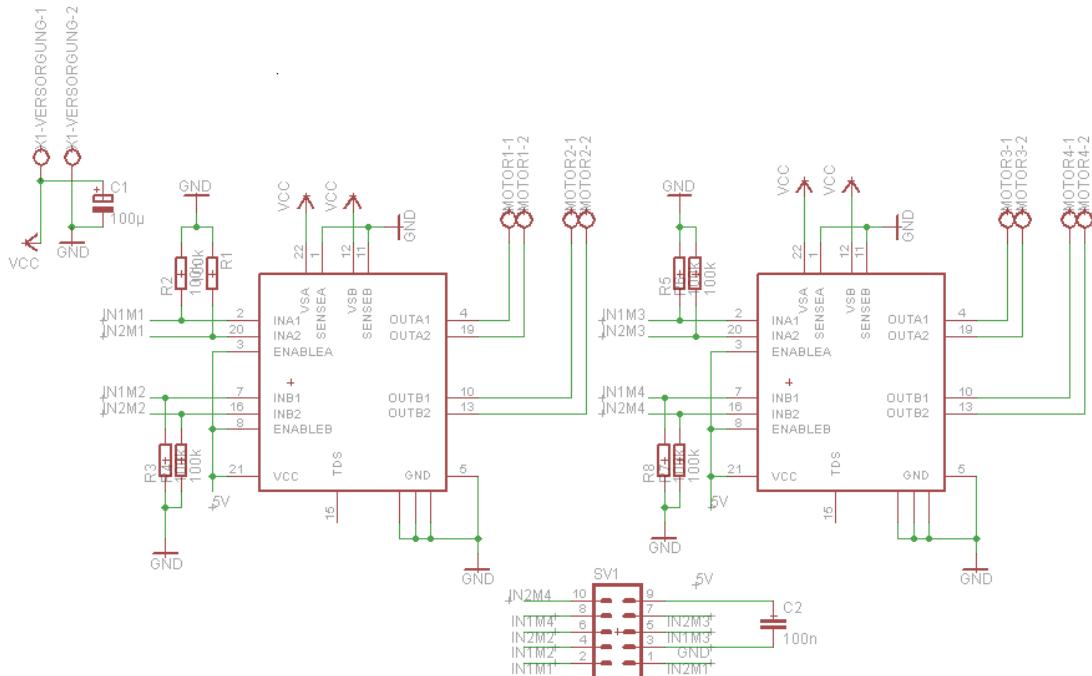


Abbildung 2.6.: H-Brücke Schaltung

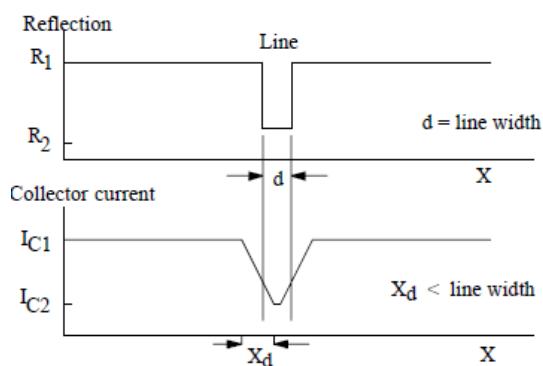


Abbildung 2.7.: ...

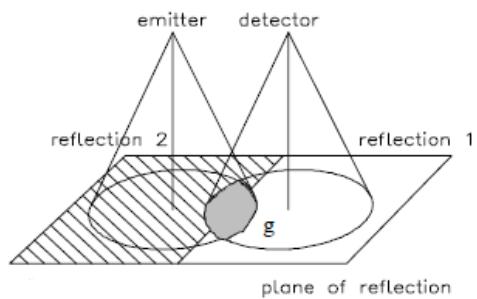


Abbildung 2.8.: ...

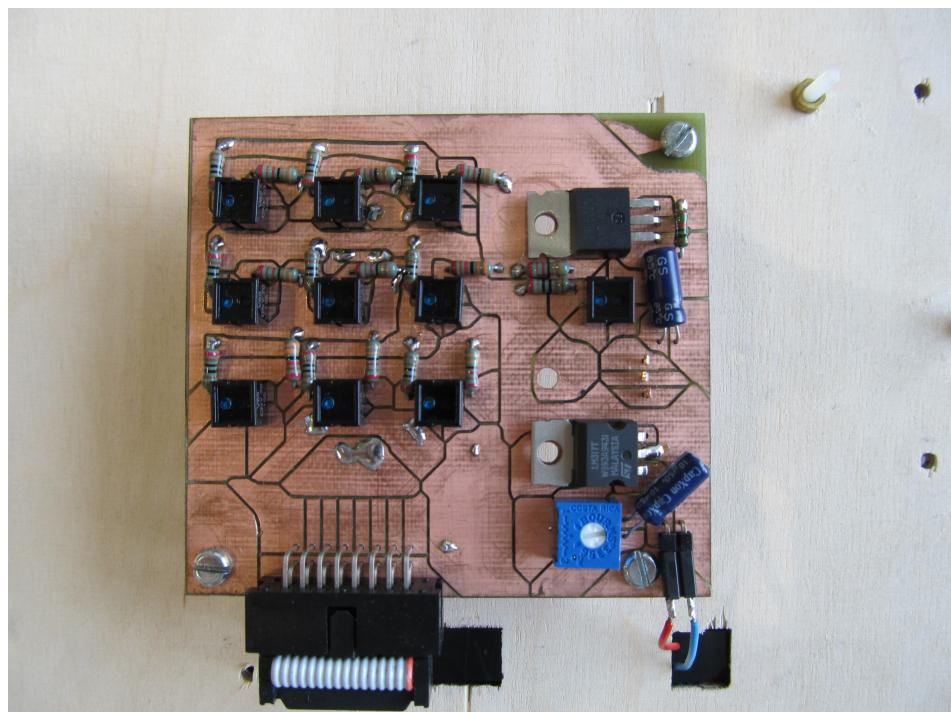


Abbildung 2.9.: Sensorarray im Roboter eingebaut

200A, da er aus dem Modellbausektor kommt. Was für den Roboter völlig überdimensioniert ist. Der maximale Strom aller 4 Motoren und der restlichen Elektronik liegt bei einem Ampere. Die Motoren werden direkt mit der Akkusspannung versorgt. Da realistischerweise die Versorgungsspannung zwischen 16,4V (Akku voll) und 15,5V (nach vielen Fahrten) liegt, ist der Einfluss auf die Drehzahl der Motoren zu vernachlässigen. Die 5 Volt Versorgung des Mikrocontrollers und der OPVs wurde mit einem RECOM R-785.0-1.0 DC-DC Konverter gelöst. Er ist pinkompatibel zu einem 7805, und bietet die Vorteile einer geringen Verlustleistung und einer sehr genauen Ausgangsspannung. Die Analog-Digitalwandlung des Arduino benötigt eine Referenzspannung. Das kann die Versorgungsspannung sein, was aber doch zu ungenau ist. The LT1021 is a precision reference with ultralow drift and noise, extremely good long term stability and almost total immunity to input voltage variations. The reference output will both source and sink up to 10mA. Three voltages are available: 5V, 7V and 10V. The 7V and 10V units can be used as shunt regulators (two-terminal zeners) with the same precision characteristics as the threeterminal connection. Special care has been taken to minimize thermal regulation effects and temperature induced hysteresis.

2.2.4. Mikrokontroller

Arduino (was ist das), Shield, SD, Aref,

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 (datasheet). It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.



Abbildung 2.10.: Arduino Mega 2560

2.2.5. Temperatursensoren

Messprinzip, Temperaturstabilität

Vergleich des Stromes durch eine 100 Ohm Präzisionswiderstand (Temperaturstabilität!) mit dem Strom durch einen PT-100. Als Stromquelle diente eine REF200-Stromquelle, welche 2 mal 100 Mikroampere (+- 0.5 Prozent) liefert.

Schaltung

Print foto Platine?

2.3. Softwareentwicklung

2.3.1. Entwicklungsumgebung

The microcontroller on the board is programmed using the Arduino programming language (based on Wiring) and the Arduino development environment (based on Processing). Arduino projects can be stand-alone or they can communicate with software running on a computer (e.g. Flash, Processing, MaxMSP).

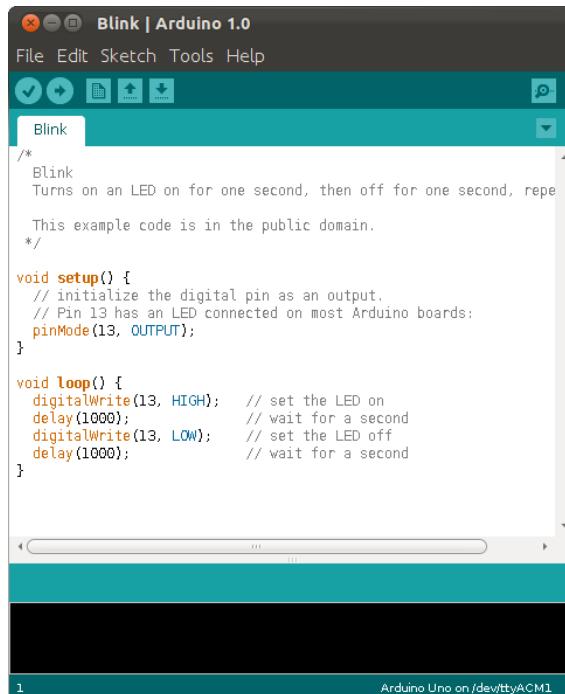


Abbildung 2.11.: Arduino Entwicklungsumgebung

2.3.2. Auswertung optische sensoren

Differentielle Messung: Zwar liegen die optischen Sensoren auf der Unterseite des Roboters, aber da es im Sonnensimulator eine Einstrahlung von 1000 Watt pro Quadratmeter gibt, mit einem Anteil im spektralen Arbeitsbereich der optischen Sensoren CNY70, ist es notwendig den Einfluss des Streulichtes zu unterdrücken. Dazu wird einmal mit und einmal ohne eingeschalteter Infrarot-LED gemessen, dann der Dunkelwert vom Hellwert abgezogen.

Mathematik Auswertung, Anhand der Werte der einzelnen optischen Sensoren wird die Lage der Linie relativ zum Mittelpunktes des Arrays bestimmt. Rohefassung: Die Methode der kleinsten Quadrate (engl.: method of least squares) ist das mathematische Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung. Dabei wird zu einer Datenpunktewolke eine Kurve gesucht, die möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft. Die Daten können physikalische Messwerte, wirtschaftliche Größen oder Ähnliches repräsentieren, während die Kurve aus einer parameterabhängigen problemangepassten Familie von Funktionen stammt. Die Methode der kleinsten Quadrate besteht dann darin,

die Kurvenparameter so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten minimiert wird. Die Abweichungen werden Residuen genannt. Folge der Linie: Der Roboter fährt standardmäßig gerade aus. Wird ein Versatz zur Linie erkannt, wird dieser Versatz durch eine Bewegung normal zur Linie minimiert. Eine Verdrehung zur Linie wird durch Verdrehen des Roboters korrigiert. Ein minimaler Versatz, bzw. eine minimale Verdrehung ist dabei zulässig. Das vorwärts- und rückwärts-Fahren funktioniert dabei besser als das nach rechts-Fahren. Mecanum-Räder haben eine Vorzugsrichtung.

Behandlung der Ecken:

Ecken müssen als solche erkannt werden, bevor sie die normale Fahrregelung stören. Wird eine Ecke erkannt wird der normale Fahrmodus unterbrochen, und in einem speziellen Eckenmodus gewechselt. Es gibt zwei Arten von Ecken: - einmal die klassische Ecke beim Wechsel vom Vor- bzw. Rückwärtsfahren nach rechts. - Die nach Rechts-Fahren Bahn endet, anstatt in einer Ecke in die Vor- bzw. Rückwärtsbahn zu enden. Damit ist auch das um die Ecke fahren auch unterschiedlich. Im Vor- bzw. Rückwärts-Fahren wird die Fahrt ohne Regelung solange fortgesetzt bis die obere bzw. untere Zeile der Sensormatrix schwarz sieht, dann fährt der Roboter ohne Regelung einige hundert Millisekunden nach rechts. Erst dann wird in den nach Rechts-Fahr-Modus gewechselt. Für den Rechts-fahr Modus endet die Linie abrupt. Der Roboter fährt einige hundert Millisekunden vor bzw. zurück. Dann steht er auf der Führungslinie. Bevor in den eigentlichen Vor- bzw. Rückwärtsfahrmodus gewechselt wird, wird der Roboter zur Linie hin ausgerichtet. Die Unterschiedliche Behandlung der Ecken ist notwendig, weil im Rechtsfahren größere Abweichungen von der Ideallinie auftreten als im Vor- und Zurückfahren.

Haltepunkte: Haltepunkte werden mit dem Haltepunktssensor erkannt, wenn dieser den Schwellwert für weiß überschreitet. Damit ein Haltepunkt nicht mehrfach erkannt werden kann, gibt es eine Verriegelung in der Software, die einen neuen Haltepunkt erst wieder zulässt wenn der Haltepunktssensor in der zwischen Zeit schwarz gesehen hat.

2.3.3. Auswertung ADCs

Aufgrund von Rauschen der ADC-Werte, wurden alle Messwerte über 500 Einzelmessungen gemittelt. Der notwendige Messzeit dafür beträgt unter einer halben Sekunde.

2.3.4. Programmablauf

Das Programm startet im Modus Start, der Roboter steht, und wartet 60 Sekunden, eine Pufferzeit damit nach dem Einschalten des Roboters die Lade des Sonnensimulator hineingeschoben und die Klappe geschlossen werden kann. Nach Ablauf dieser 60 Sekunden wechselt das Programm in den Modus Vorwärts. In diesem Modus fährt der Roboter in Vorwärtsrichtung. Abweichungen von der Idealspur werden erkannt und korrigiert. Wird mit dem Stopsensor eine Stopmarkierung erkannt, wechselt das Programm in den Messmodus.

3. Kalibration

3.1. Temperatursensoren

Zur Temperaturmessungen werden Pt-100 Messwiderstände verwendet. Ein Folien Pt-100 ist auf die Rückseite der Messzelle angeklebt. Für die Kalibration der Temperatormesselektronik wurden die Pt-100 Widerstände durch einen hochgenauen einstellbaren Widerstand ersetzt. Der Widerstand wurde im Bereich von 100 bis 120 Ohm in 1 Ohm Schritten verändert. Die ADC-Werte wurden über die USB-Schnittstelle des Arduino ausgelesen. Es zeigte sich, dass die beiden Schaltungen leicht unterschiedliche Verstärkungen haben. Messaufbau? Tabelle Messwerte,....

3.2. Messzelle

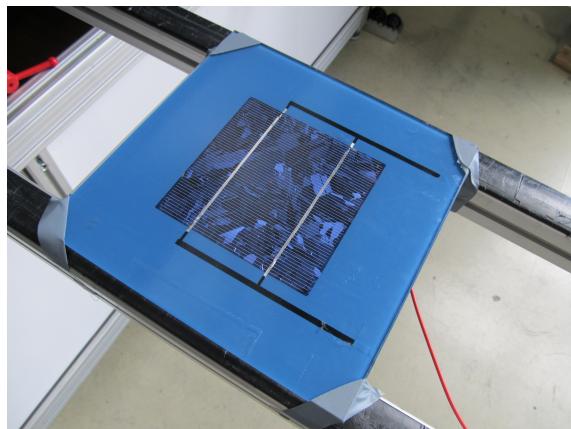


Abbildung 3.1.: Messzelle auf der Lade des Flashers

3.3. Strommessung

Stromquelle, Roboter in Klimakammer, Temperatur, von 10 bis 40 Grad Celcius verändert, Messwerte, Tabelle, Ausgleichsgerade, Umrechnung DAC Wert in Ampere

3.4. Thermische Stabilität der Temperaturmessung

Roboter in Klimakammer, pt-100 Widerstände wurden durch temperaturstabile 110 Ohm Widerstände ersetzt. Temperatur von zirka 40 bis 10 Grad Celsius. Ergebnisse Tabelle.

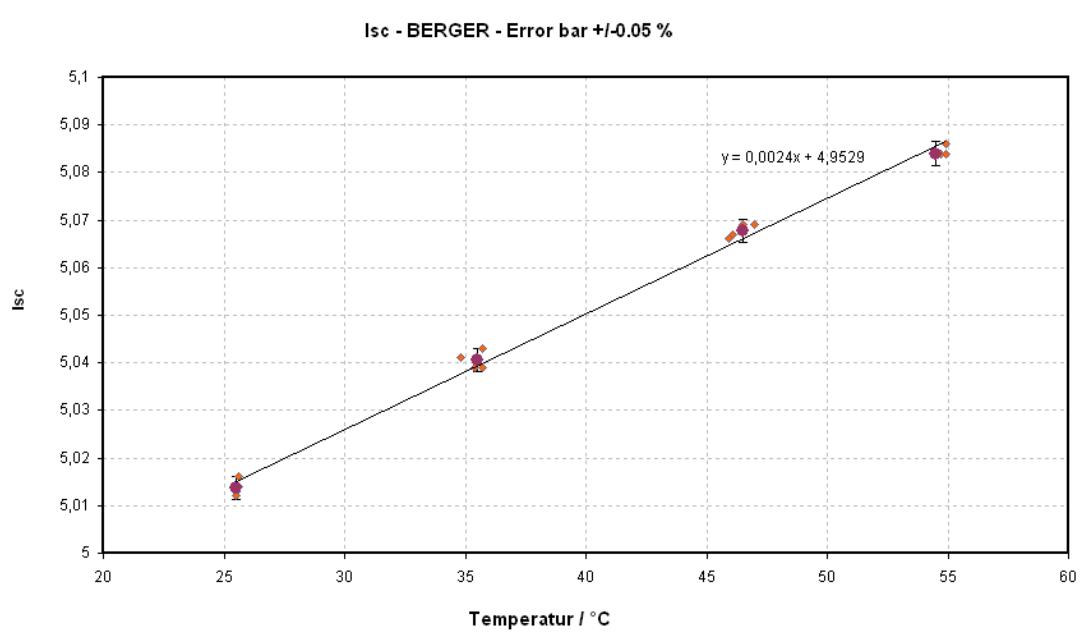


Abbildung 3.2.: Kurzschlusstrom über Temperatur

4. Messung

4.1. Messaufbau

4.1.1. Platten

Im Sonnensimulator 2 Platten. Auf den 3 Platten ist die Messbahn aufgemalt. Die Platten müssen eng aneinander anliegen. Damit keine zu groß Stufe wegen unschiedlicher Duschbiegung der Platten entsteht ist auf der Rückseite der Holzplatten Aluminiumbleche befestigt, auf einer Seite angeschraubt, die danebenliegende Platte liegt darauf. Da die Breite aller 3 Platten geringer ist als die Breite der Lade des Sonnensimulators, werden, damit die Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten verglichen werden können, die Platten so weit wie möglich nach rechts geschoben. Am Rand liegen die Platten auf Aluschienen auf. Die Übergänge der Messbahn von einer Platte zur

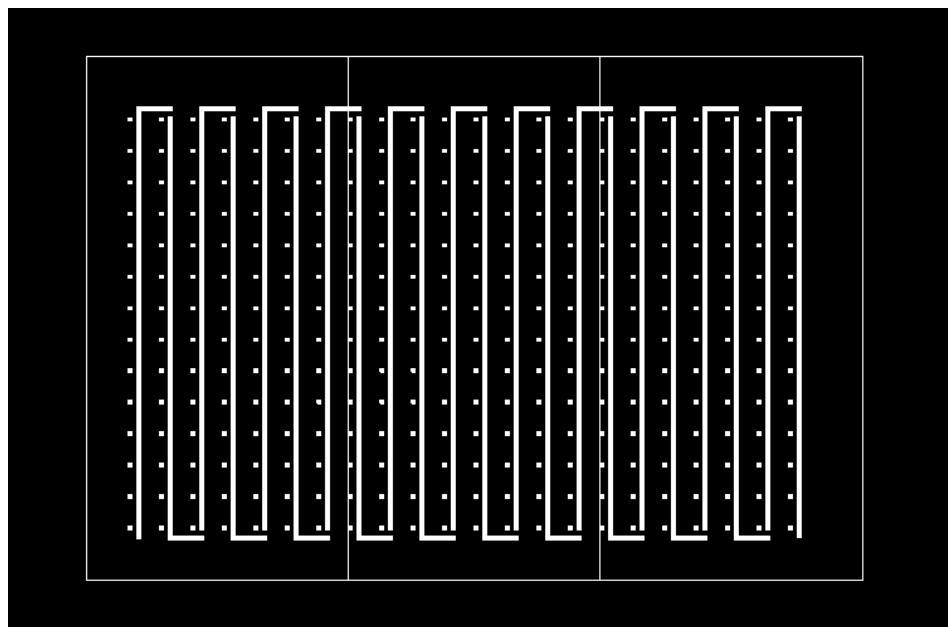


Abbildung 4.1.: Messbahn auf den Platten

nächsten sind mit weißem Isolierband der Breite 14mm zu überbrücken. Beschädigung der Messbahn, welche durch unsanftes Handling der Platten entstehen können, sind ebenfalls mit weißem Isolierband zu Überkleben.

4.1.2. Ablauf

Roboter wird auf das linke vordere Ende der Messbahn gestellt. Der Roboter muss dabei auf der Messbahn stehen. Kleinere Abweichungen der Idealposition werden beim losfahren korrigiert. Vor

der eigentlichen Messfahrt ist eine Testfahrt mit geöffneter Lade des Sonnensimulators zu empfehlen. Besonders die Übergänge von einer Platte zur nächsten können Probleme schaffen. Nach der bestandenen Testfahrt wird der Sonnensimulator eingeschaltet. Bis zur Messung sind 20 bis 30 Minuten zu warten, bis die Temperaturen im Simulator stabil sind. Der Roboter kann während dieser Zeit im Sonnensimulator stehen. Die Messzelle sollte allerdings abgeschaltet werden, damit diese sich nicht aufheizt. Zum Starten wird der Schalter von 0 auf 1 umgelegt. Damit wird der Mikrocontroller mit Spannung versorgt. Das Programm startet. Nach einer Pause von 60 Sekunden, die zum Schließen des Sonnensimulators notwendig ist, fährt der Roboter los. Eine Messfahrt dauert etwa 13 Minuten. Nach Ablauf dieser Zeit wird der Roboter entnommen und die Daten der SD-Karte entnommen, oder der Roboter wird auf die Startposition gestellt um weitere Messfahrten durchzuführen.

4.2. Auswertung

wie von sd zu Bild, gemessene Verteilungen,

Rohfassung: ADC Werte werden auf SD Karte gespeichert: Zeit in ms, Isc, Temperatur des Moduls, Umgebungstemperatur, Messpunkt, Reihe, Spalte Es sind 308 Messpunkte, 14 mal 22, es kann vorkommen, am Übergang von einer Platte zur anderen, dass ein Messpunkt ausgelassen wird. Das ist erkennbar wenn nicht 308 Messwerte im datalog-File sind. Um den Fehler leicht zu finden wurde Spalte und Reihe mit aufgezeichnet. Sind in einer Spalte nur 13 Messwerte, fehlt in dieser Spalte ein Wert. Anhand der mit aufgezeichneten Zeit kann der fehlende Messpunktes lokalisiert werden. Das geschieht nicht automatisch. Der Messwert wird anhand der neben liegenden Werte geschätzt. Alternativ werden nur Messfahrten mit allen Punkten ausgewertet.

Auf der SD Karte sind alle Messwerte in einer Wurst gespeichert. Für die visuelle Auswertung wird diese Datenwurst in ein zweidimensionales Array umgewandelt. Formel, Formel Der ADC Wert des Kurschlusstromes wird in Ampere umgerechnet. Verwendet wird die in der Kalibrierung gewonnene Formel.

4.3. Schlussfolgerung

Der Roboter erleichtert die Messung der Bestrahlungsstärkemessung enorm.

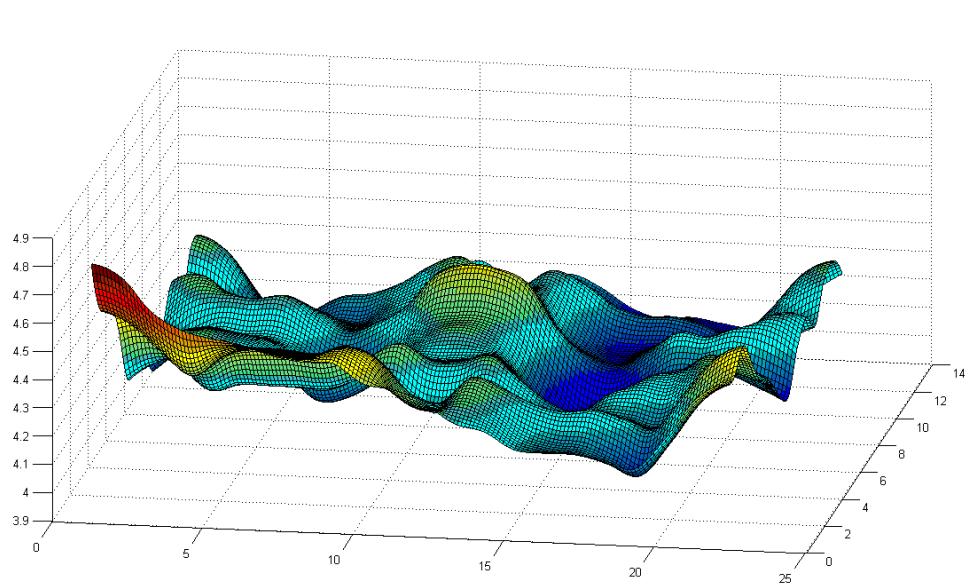


Abbildung 4.2.: Kurzschlusstrom in Ampere

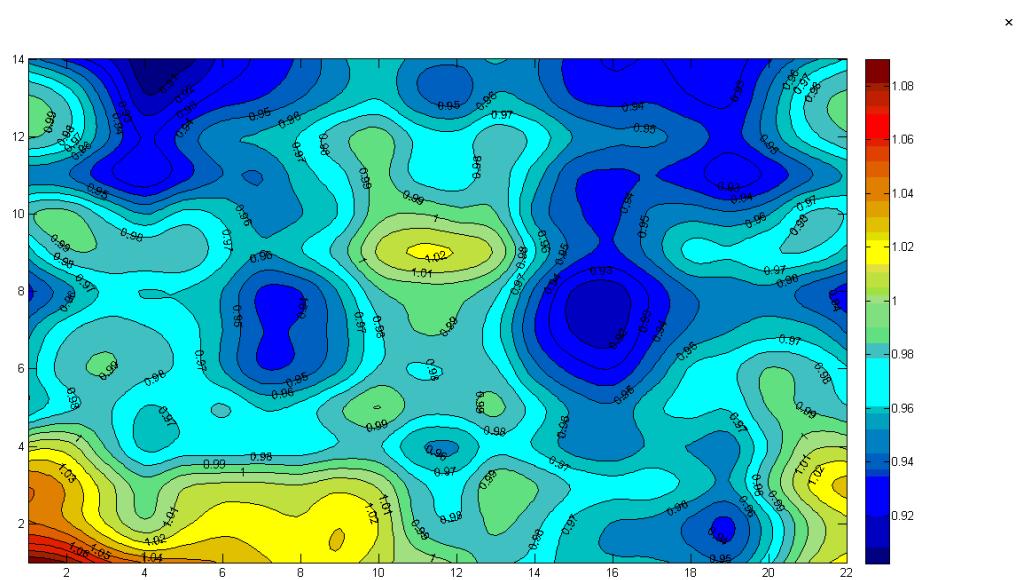


Abbildung 4.3.: Relative Verteilung der Einstrahlung

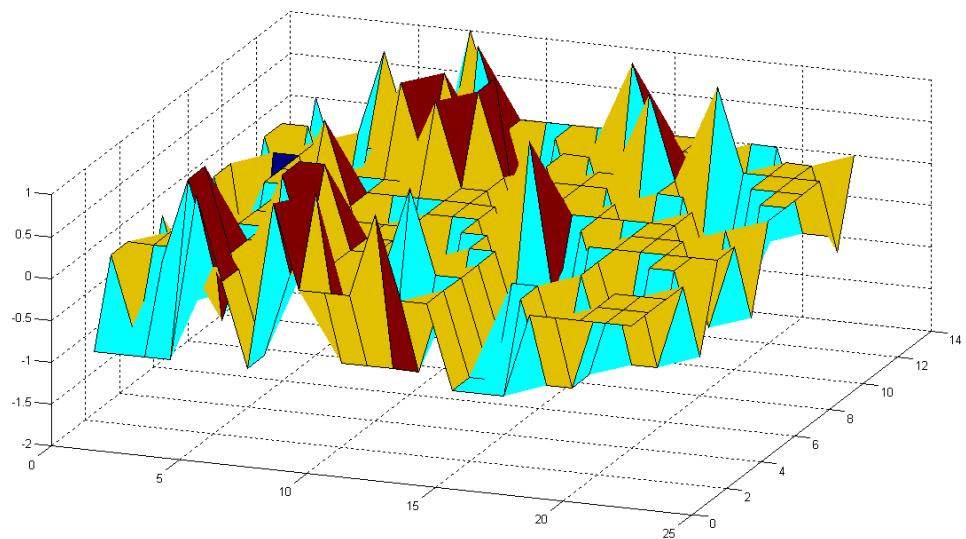


Abbildung 4.4.: Vergleich zweier Messungen

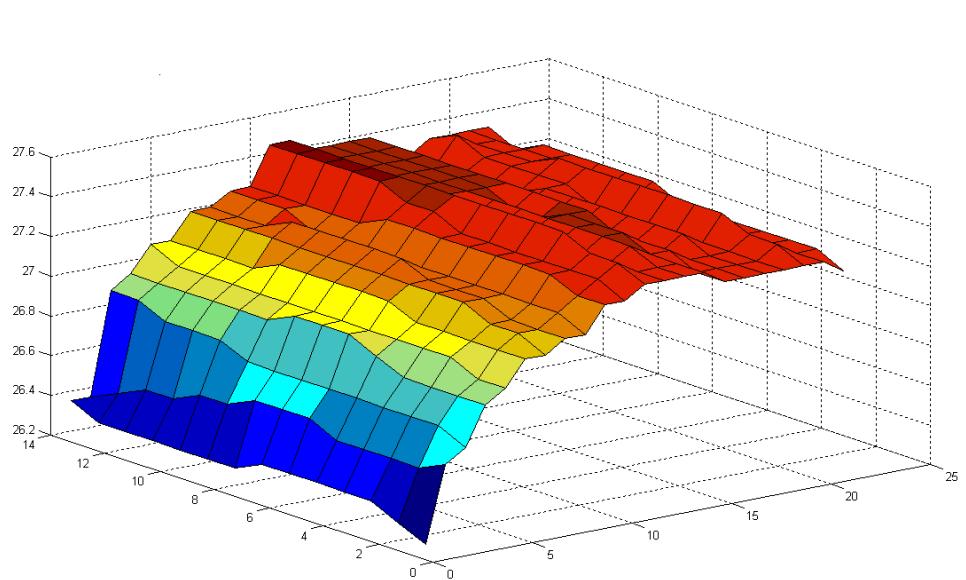


Abbildung 4.5.: Temperatur der Zelle

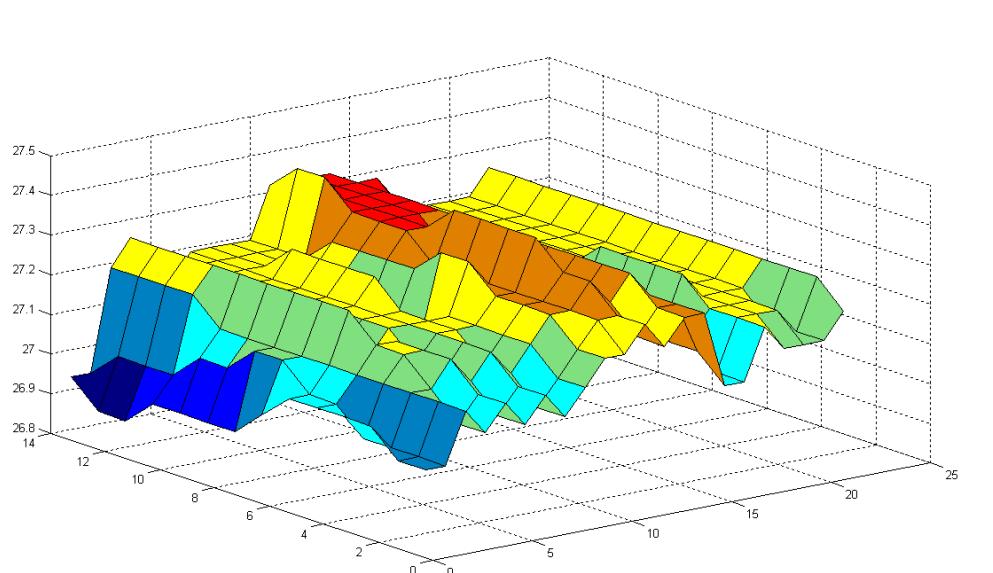


Abbildung 4.6.: konstante Temperatur der Zelle

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Spektrum der Sonne	1
1.2.	Sonnensimulator	2
1.3.	Spektrale Strahlungsverteilung	2
1.4.	Simulatorklassen	2
1.5.	Schematischer Aufbau einer Solarzelle	3
1.6.	Ersatzschaltbild	4
1.7.	Dunkel- und Hellkennlinien	4
1.8.	Bandabstand	5
2.1.	Mecanum-Rad	6
2.2.	Rolle	7
2.3.	Foto eines gedruckten Rades	7
2.4.	Chassis	9
2.5.	H-Brücke	10
2.6.	H-Brücke Schaltung	10
2.7.	10
2.8.	11
2.9.	Sensorarray	11
2.10.	Arduino Mega 2560	12
2.11.	Arduino Entwicklungsumgebung	13
3.1.	Messzelle auf der Lade des Flashers	15
3.2.	Kurzschlusstrom über Temperatur	16
4.1.	Messbahn auf den Platten	17
4.2.	Kurzschlusstrom in Ampere	19
4.3.	Relative Verteilung der Einstrahlung	19
4.4.	Vergleich zweier Messungen	20
4.5.	Temperatur der Zelle	20
4.6.	konstante Temperatur der Zelle	21

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

www World Wide Web
URL Uniform Resource Locator

A. Sourcecode Arduino

```
/*
Programm zum Steuern des Sonnensimulatormessroboters
Version 1.0
*/

#include <SD.h>

void vor(int sped);
void zuruck(int sped);
void left(int sped);
void right(int sped);
void tl(int sped);
void tr(int sped);
void ztl();
void ztr();
void vtl();
void vtr();
void halt();

// ADCs zum Auslesen der 3x3 Matrix
const int analogInPin0 = A9;
const int analogInPin1 = A2;
const int analogInPin2 = A5;
const int analogInPin3 = A8;
const int analogInPin4 = A1;
const int analogInPin5 = A4;
const int analogInPin6 = A7;
const int analogInPin7 = A0;
const int analogInPin8 = A3;
const int analogInPin9 = A6;

// Ausgang zum Schalten der Infrarot-Leds
const int analogInPin10 = A10;

// ADC für Messwerte
const int analogInPin12 = A12;
const int analogInPin13 = A13;
const int analogInPin14 = A14;
const int analogInPin15 = A15;
```

```
// Digitalausgänge zum Ansteuern der Motoren
int IN1M1 = 2;
int IN2M1 = 3;
int IN1M2 = 4;
int IN2M2 = 5;
int IN1M3 = 6;
int IN2M3 = 9;
int IN1M4 = 7;
int IN2M4 = 8;

// Sensorwerte der optischen Sensoren (beleuchtet)
int sensorValue0 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue1 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue2 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue3 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue4 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue5 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue6 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue7 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue8 = 0;           // value read from the pot
int sensorValue9 = 0;           // value read from the pot

// Sensorwerte der optischen Sensoren (unbeleuchtet)
int sensorValue0d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue1d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue2d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue3d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue4d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue5d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue6d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue7d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue8d = 0;          // value read from the pot
int sensorValue9d = 0;          // value read from the pot

// für Auswertung der opischen Sensoren
int A = 0;
int B = 0;
int C = 0;
int D = 0;
int E = 0;
int F = 0;
int G = 0;
int H = 0;
int I = 0;
int S = 0;

// Grenzwerte für hell (=white) und dunkel (=black)
```

```
int white = 400;
int white2 = 250;
int bleak = 100;
int bleak2 = 150;

// zur Berechnung der Lage der LInie
float x1,x2,x3,d,k;
float y1,y2,y3,d2,k2;

// einige Hilfsvariablen
char mode='s';
char richtung='v';
int _stop=0;
int vor_ein=0;
int zuruck_ein=0;

// für die Auswertung der Messwerte
long int temp_modul = 0;
long int temp_i=0;
long int _Isc = 0;
long int time = 0;

// zur Schreiben auf die SD Karte
const int chipSelect = 53;

// Zahlvariable für Messpunkt, Spalte und Reihe
int count = 0;
int count2 = 0;
int row = 1;

// zur Schreiben auf die SD Karte
String dataString = "";

// notwendig für die Kommunikation mit SD Karte
void setup() {
    pinMode(A10, OUTPUT);
    pinMode(53, OUTPUT);
    SD.begin(chipSelect);
}

// Definiert alle möglichen Bewegungen
void zuruck(int sped)
{
    analogWrite(IN1M1,0);
    analogWrite(IN2M1,sped);
    analogWrite(IN1M2,0);
    analogWrite(IN2M2,sped);
```

```
analogWrite(IN1M3,0);
analogWrite(IN2M3,sped);
analogWrite(IN1M4,0);
analogWrite(IN2M4,sped);
}

void vor(int sped)
{
    analogWrite(IN1M1,sped);
    analogWrite(IN2M1,0);
    analogWrite(IN1M2,sped);
    analogWrite(IN2M2,0);
    analogWrite(IN1M3,sped);
    analogWrite(IN2M3,0);
    analogWrite(IN1M4,sped);
    analogWrite(IN2M4,0);
}

void left(int sped)
{
    analogWrite(IN1M1,0);
    analogWrite(IN2M1,sped);
    analogWrite(IN1M2,sped);
    analogWrite(IN2M2,0);
    analogWrite(IN1M3,sped);
    analogWrite(IN2M3,0);
    analogWrite(IN1M4,0);
    analogWrite(IN2M4,sped);
}

void right(int sped)
{
    analogWrite(IN1M1,sped);
    analogWrite(IN2M1,0);
    analogWrite(IN1M2,0);
    analogWrite(IN2M2,sped);
    analogWrite(IN1M3,0);
    analogWrite(IN2M3,sped);
    analogWrite(IN1M4,sped);
    analogWrite(IN2M4,0);
}

void tr(int sped)
{
    analogWrite(IN1M1,sped);
    analogWrite(IN2M1,0);
    analogWrite(IN1M2,0);
```

```
analogWrite(IN2M2,sped);
analogWrite(IN1M3,sped);
analogWrite(IN2M3,0);
analogWrite(IN1M4,0);
analogWrite(IN2M4,sped);
}

void tl(int sped)
{
    analogWrite(IN1M1,0);
    analogWrite(IN2M1,sped);
    analogWrite(IN1M2,sped);
    analogWrite(IN2M2,0);
    analogWrite(IN1M3,0);
    analogWrite(IN2M3,sped);
    analogWrite(IN1M4,sped);
    analogWrite(IN2M4,0);
}

void vtr()
{
    analogWrite(IN1M1,64);
    analogWrite(IN2M1,0);
    analogWrite(IN1M2,0);
    analogWrite(IN2M2,64);
    analogWrite(IN1M3,128);
    analogWrite(IN2M3,0);
    analogWrite(IN1M4,128);
    analogWrite(IN2M4,0);
}

void vtl()
{
    analogWrite(IN1M1,0);
    analogWrite(IN2M1,64);
    analogWrite(IN1M2,64);
    analogWrite(IN2M2,0);
    analogWrite(IN1M3,128);
    analogWrite(IN2M3,0);
    analogWrite(IN1M4,128);
    analogWrite(IN2M4,0);
}

void ztr()
{
    analogWrite(IN1M1,0);
    analogWrite(IN2M1,64);
```

```
analogWrite(IN1M2,0);
analogWrite(IN2M2,64);
analogWrite(IN1M3,0);
analogWrite(IN2M3,64);
analogWrite(IN1M4,64);
analogWrite(IN2M4,0);
}

void ztl()
{
    analogWrite(IN1M1,0);
    analogWrite(IN2M1,64);
    analogWrite(IN1M2,0);
    analogWrite(IN2M2,64);
    analogWrite(IN1M3,64);
    analogWrite(IN2M3,0);
    analogWrite(IN1M4,0);
    analogWrite(IN2M4,64);
}

void halt()
{
    analogWrite(IN1M1,0);
    analogWrite(IN2M1,0);
    analogWrite(IN1M2,0);
    analogWrite(IN2M2,0);
    analogWrite(IN1M3,0);
    analogWrite(IN2M3,0);
    analogWrite(IN1M4,0);
    analogWrite(IN2M4,0);
}

// Hauptschleife
void loop()
{
    // Werte ohne Beleuchtung:
    sensorValue0d = analogRead(analogInPin0);
    sensorValue1d = analogRead(analogInPin1);
    sensorValue2d = analogRead(analogInPin2);
    sensorValue3d = analogRead(analogInPin3);
    sensorValue4d = analogRead(analogInPin4);
    sensorValue5d = analogRead(analogInPin5);
    sensorValue6d = analogRead(analogInPin6);
    sensorValue7d = analogRead(analogInPin7);
    sensorValue8d = analogRead(analogInPin8);
```

```
sensorValue9d = analogRead(analogInPin9);
digitalWrite(A10, HIGH); // LED ein
delay(2);
// Werte mit Beleuchtung:
sensorValue0 = analogRead(analogInPin0);
sensorValue1 = analogRead(analogInPin1);
sensorValue2 = analogRead(analogInPin2);
sensorValue3 = analogRead(analogInPin3);
sensorValue4 = analogRead(analogInPin4);
sensorValue5 = analogRead(analogInPin5);
sensorValue6 = analogRead(analogInPin6);
sensorValue7 = analogRead(analogInPin7);
sensorValue8 = analogRead(analogInPin8);
sensorValue9 = analogRead(analogInPin9);
digitalWrite(A10, LOW);

A = sensorValue1 - sensorValue1d;
B = sensorValue2 - sensorValue2d;
C = sensorValue3 - sensorValue3d;
D = sensorValue4 - sensorValue4d;
E = sensorValue5 - sensorValue5d;
F = sensorValue6 - sensorValue6d;
G = sensorValue7 - sensorValue7d;
H = sensorValue8 - sensorValue8d;
I = sensorValue9 - sensorValue9d;

S = sensorValue0 - sensorValue0d;

// zum Erkennen der Linie bei vor- oder zurückfahren
x1 = ((C-A)/float(2*A-4*B+2*C));
x2 = ((F-D)/float(2*D-4*E+2*F));
x3 = ((I-G)/float(2*G-4*H+2*I));

d = (x1 + x2 + x3)/3.; // ~ Abstand von der Ideallinie
k = (x1-x3)/2.; // Steigung = Verdrehung

// zum Erkennen der Linie bei links- oder rechtsfahren
y1 = ((G-A)/float(2*A-4*D+2*G));
y2 = ((H-B)/float(2*B-4*E+2*H));
y3 = ((I-C)/float(2*C-4*F+2*I));

d2 = (y1+y2+y3)/3.;
k2 = (y3-y1)/2.;

if( S < bleak2) _stop=0;

halt();
```

```
if(E>bleak2)
{

    switch(mode)
    {
        case 's': // Start
        {
            halt();
            delay(60000); // 1 Minuten warten
            mode='v';
        }
        break;

        // Messmode
        case 'e': // Ende
        {
            halt();
        }
        break;

        case 'm': // Messen
        {
            count = count + 1; // Anzahl der Haltepunkte
            count2 = count2 + 1;
            dataString = "";
            _stop=1;
            halt();

            delay(250); // damit die Strome der Fahrmotoren keinen Einfluss auf die AD-Wand

            _Isc = 0;
            temp_modul = 0;
            temp_i = 0;

            // Mittelung über jeweils 500 Messwerte
            for(int i = 0; i < 500 ; i++)
            {
                _Isc = _Isc + analogRead(analogInPin13);
                temp_modul = temp_modul + analogRead(analogInPin12);
                temp_i = temp_i + analogRead(analogInPin15);
            }
            _Isc = int(_Isc/500.0);
            temp_modul = int(temp_modul/500.0);
            temp_i = int(temp_i/500.0);
            time = millis();
        }
    }
}
```

```
// Schreiben auf SD-Karte
dataString += String(time);
dataString += "\t";
dataString += String(_Isc);
dataString += "\t";
dataString += String(temp_modul);
dataString += "\t";
dataString += String(temp_i);
dataString += "\t";
dataString += String(count);
dataString += "\t";
dataString += String(count2);
dataString += "\t";
dataString += String(row);

// Schreibe auf SD Card
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
    dataFile.println(dataString);
    dataFile.close();
}

// zurück in den Bewegungsmodus
if(richtung=='v') mode='v';
if(richtung=='z') mode='z';

}
break;

case 'v': // Vorwärtsfahren
{
    richtung='v';

    if(d>0.02) vtr();
    else
    {
        if(d>-0.02) vor(128);
        else
            vtl();
    }

//if((C<bleak)&&(A<bleak))
if(A<bleak2)
{
    if(k>0.01) tr(64);
    else
```

```
{  
    if(k<-0.01) tl(64);  
}  
  
if(d>0.025) right(64);  
else  
{  
    if(d<-0.025) left(64);  
}  
}  
if((A>white)&&(B>white)) mode='a';  
  
if(_stop==0)&&(S>white2)) mode='m';  
  
}  
break;  
  
case 'z': // Rückwärtsfahren  
{  
  
richtung='z';  
  
if(d>0.02) ztr();  
else  
{  
    if(d>-0.02) zuruck(128);  
    else ztl();  
}  
  
//if((G<bleak)&&(I<bleak))  
if(G<bleak2)  
{  
    if(k>0.01) tr(64);  
    else  
{  
        if(k<-0.01) tl(64);  
    }  
}  
if(d>0.025) right(64);  
else  
{  
    if(d<-0.025) left(64);  
}  
}  
if((G>white)&&(H>white)) mode='c';
```

```
if(( _stop==0)&&(S>white2)) mode='m';

if((I<bleak)&&(H<bleak)&&(G<bleak)) mode='e';

}

break;

case 'r':      //nach rechts
{
    richtung='r';
    count2 = 0;

    right(128);
    if(D>white2)
    {
        if(d2>0.04) vor_ein=1;
        if(d2<0.02) vor_ein=0;
        if(d2<-0.04) zuruck_ein=1;
        if(d2>-0.02) zuruck_ein=0;

        if(vor_ein==1) vor(64);
        if(zuruck_ein==1) zuruck(64);

        if((vor_ein==0)&&(zuruck_ein==0))
        {
            if(k2>0.02) tr(64);
            else
            {
                if(k2<-0.02) tl(64);
            }
        }
    }

    if((D<bleak)&&(G<bleak)&&(A<bleak))
    {
        mode='b';
    }

}
break;

case 'l':      // auch nach rechts
{
    richtung=='l';
    count2 = 0;

    right(128);
```

```
//if((C<bleak)&&(I<bleak))
if(D>white2)
{
    if(d2>0.04) vor_ein=1;
    if(d2<0.02) vor_ein=0;
    if(d2<-0.04) zuruck_ein=1;
    if(d2>-0.02) zuruck_ein=0;

    if(vor_ein==1) vor(64);
    if(zuruck_ein==1) zuruck(64);

    if((vor_ein==0)&&(zuruck_ein==0))
    {
        if(k2>0.02) tr(64);
        else
        {
            if(k2<-0.02) tl(64);
        }
    }
}

if((D<bleak)&&(G<bleak)&&(A<bleak))
{
    mode='d';
}

}
break;

case 'a': // Um die Ecke fahren
{
    if((A>bleak2)&&(B>bleak2)) vor(64);
    else
    {
        right(64);
        delay(700);
        halt();
        row = row +1 ;

        mode='r';
    }
}
break;

case 'b': // Um die Ecke fahren
{
```

```
zuruck(64);
delay(850);
halt();
delay(500);

mode='x';

}

break;

case 'x':
{
    if(d>0.025) right(64);

    if(d<-0.025) left(64);

    if((d<0.1)&&(d>-0.1)) mode='y';
}
break;

case 'y':
{
    if(k>0.01) tr(32);

    if(k<-0.01) tl(32);

    if((k<0.04)&&(k>-0.04)) mode='z';
}
break;

case 'c': // Um die Ecke fahren
{
    if((H>bleak2)&&(G>bleak2 )) zuruck(64);
    else
    {
        right(64);
        delay(700);
        halt();
        row = row +1 ;

        mode='l';
    }
}
break;

case 'd': // Um die Ecke fahren
```

```
{  
  
    vor(64);  
    delay(850);  
    halt();  
    delay(500);  
    mode='q';  
  
}  
break;  
  
case 'q':  
{  
    if(d>0.025) right(64);  
  
    if(d<-0.025) left(64);  
  
    if((d<0.1)&&(d>-0.1)) mode='p';  
}  
break;  
  
case 'p':  
{  
    if(k>0.01) tr(32);  
  
    if(k<-0.01) tl(32);  
  
    if((k<0.04)&&(k>-0.04)) mode='v';  
}  
break;  
}  
}  
  
else  
{  
    if((richtung=='v')||(richtung=='z'))  
    {  
        if((A>bleak2)|| (D>bleak2)|| (G>bleak2)|| (C>bleak2)|| (F>bleak2)|| (I>bleak2))  
        {  
            if((A+D+G)>(C+F+I)) right(128);  
            else left(128);  
        }  
        else halt();  
    }  
}
```

```
if((richtung=='r')||(richtung=='l'))
{
    if((A>bleak2)|| (B>bleak2)|| (C>bleak2)|| (G>bleak2)|| (H>bleak2)|| (I>bleak2))
    {
        if((A+B+C)>(G+H+I)) vor(64);
        else zuruck(64);
    }
    else halt();
}

delay(5);

}
```

B. Sourcecode Auswertung

```
% Graphische Auswertung der Robotermesswerte

close all;
clc;
clear all;

% "Offnen der Datei, welche eine Messfahrt mit genau 308 Messwerten
% enthalten muss
fid = fopen('data1.txt', 'r');
a = fscanf(fid, '%g %g', [7 308])
a = a';
fclose(fid)

j=1; k=1; l=1;

% Umwandeln der 1 dimensionalen Modultemperatur ADC-Werte in eine Matrix:
for(i=0:307)
    if(mod(i,28)>13) k = 28- mod(i,28);
    else k = mod(i,14)+1;
    end
    Tm(k,l)=a(i+1,3);
    if(mod(i+1,14)==0) l=l+1;
    end
end

% Umrechnung der ADC-Werte in Temperatur:
Rm = (Tm +4038.9)/40.107; % ADC --> Widerstand
TTm = (Rm-100.03)/0.3879; % Widerstand --> Temperatur

j=1; k=1; l=1;

% Umwandeln der 1 dimensionalen Innentemperatur ADC-Werte in eine Matrix:
for(i=0:307)
    if(mod(i,28)>13) k = 28- mod(i,28);
    else k = mod(i,14)+1;
    end
    Ti(k,l)=a(i+1,4);
    if(mod(i+1,14)==0) l=l+1;
    end
```

```

end

% Umrechnung der ADC-Werte in Temperatur:
Ri = (Ti +4023.6)/40.027; % ADC --> Widerstand
TTi = (Ri-100.03)/0.3879; % Widerstand --> Temperatur

j=1; k=1; l=1;

% Umwandeln der 1 dimensionalen Kurzschlusstrom ADC-Werte in eine Matrix:
for(i=0:307)
    if(mod(i,28)>13) k = 28- mod(i,28);
    else k = mod(i,14)+1;
    end
    I(k,l)=a(i+1,2);
    if(mod(i+1,14)==0) l=l+1;
    end
end

% Umrechnung der ADC-Werte in Ampere:

A = (I +4.5766)/119.2; % ADC --> Ampere
A = A - (TTm-25)*0.004; % Temperaturkorrektur

[XI,YI] = meshgrid(1:.125:22, 1:.125:14);

Ai = interp2(A,XI,YI,'cubic'); % Interpolation

A_max = max(max(Ai));
A_min = min(min(Ai));

Normiert = Ai / A_max * 1.1;

w = (A_max - A_min)/(A_max + A_min) * 100 % maximale Abweichung in Prozent

% Graphische Darstellung des Stromes
figure;
surf(XI,YI,Ai); % in Ampere

% Graphische Darstellung des normierten Stromes
zlevs2 = 0.9:0.01:1.1;
figure;
[C,h] = contourf(XI,YI, Normiert, zlevs2);
set(h, 'ShowText', 'on', 'TextStep', get(h, 'LevelStep')*2)
colorbar;

```

```
% Graphische Darstellung der Modultemperatur
figure;
surf(TTm);

% Graphische Darstellung der Umgebungstemperatur
figure;
surf(TTi);
```