

Project Powerline

Fachbericht

STUDIENGANG	Elektro- und Informationstechnik
MODUL	Projekt 4
AUFRAGGEBER	Hans Gysin
BETREUER	Matthias Meier, Pascal Schleuniger, Pascal Buchschacher, Anita Gertiser, Bonnie Domenghino
TEAM	3
AUTOREN	Marcel Heymann, Noah Hüsser, Raphael Frey, Dominik Keller, Marco Koch, Reto Nussbaumer, Francesco Rovelli
DATUM	20. Februar 2017
VERSION	1.0



Inhalt © 2016 Marcel Heymann
Noah Hüsser
Raphael Frey
Dominik Keller
Marco Koch
Reto Nussbaumer
Francesco Rovelli

Design © 2016 Raphael Frey

Erstellt im Frühlingssemester 2016 an der Hochschule für Technik der Fachhochschule Nordwestschweiz im Rahmen des Modules *Projekt 4* des Studiengangs *Elektro- und Informationstechnologie*.

Dies ist die elektronische Ausführung des Dokuments. Links sind farbig hervorgehoben und klickbar. Falls eine Version ohne farbige Akzentuierung erwünscht ist, kann diese bei rmfrey@runbox.com angefordert werden.

Dieses Dokument hat bisher 3300 Kompilierungsvorgänge durchlaufen.

Version 1.0 16.06.2016 Abgabe

Quelle Titelbild : [1]
Quelle Logo FHNW : [2]

Abstract

This project's aim was to develop a system for real-time monitoring of each panel of a photovoltaic facility. The system must be cost-effective and should scale from small single-household solutions to large industrial-scale solar farms. Panels which are not operating at full capacity for whatever reason (dirt, shade, defects) must be detected and the user informed so that appropriate measures (cleaning, replacement) can be taken.

Monitoring of the individual photovoltaic modules allows the facility's operator to optimally run their solar plant, thus reducing losses in both power output and profit.

Current solutions for per-module monitoring of solar facilities are expensive and often left out to save costs. As alternative sources of energy such as wind and solar power grow in importance, the overall losses in the energy industry of power and money incurred due to insufficient monitoring of solar facilities will become unsustainable.

Our system has two primary components: A controller which is installed centrally near the inverter and a sensor on each photovoltaic panel. Communication between the sensors and the master is routed through the direct current power transmission line; no additional wiring is needed. A coil is used to couple the signal to the power line. In case of an error (e.g. a dirty panel), an error message is sent to a user-configurable phone number.

Simulations for various coupling methods for a string of 20 PV panels have been performed. Inductive coupling at non-resonance conditions results in a signal level of roughly 6 mV peak-to-peak at the receiver without amplification. Operating the circuit at resonance yields a much improved peak-to-peak voltage of 250 mV at the receiver (also without amplification), which is sufficient for our purposes.

A frequency sweep for the coupling coil has been measured and inductive behavior up to 20 MHz verified, thus ensuring that the coil is adaptable enough to allow the use of a vast range of frequencies as needed.

The system's components have been implemented. A signal can be coupled to the DC transmission line and the sensor can perform correct voltage measurements and return that data. Both the graphical user interface on the master device and its database back-end are functioning.

Key words: photovoltaic technology, photovoltaic module, remote monitoring, solar technology, PV cell, power efficiency, alternative energy, powerline, communication, inductive coupling, capacitive coupling

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Überblick	3
2.1 Aufbau einer Photovoltaikanlage	3
2.2 Leistungseinbrüche	6
2.3 Unser System	10
2.4 Kommunikation über DC-Leitung	11
3 Modellierung eines Photovoltaik-Systems	13
3.1 Modellierung einer PV-Zelle	13
3.2 Modellierung eines PV-Moduls	16
3.3 Modellierung eines Modulstrangs	19
4 Lösungsansätze und Simulationen	21
4.1 Induktive Einkopplung	21
4.2 Kapazitive Einkopplung	27
4.3 Signalcodierung mittels Kurzschluss	29
4.3.1 Sender	29
4.3.2 Master-Gerät (Empfänger)	31
4.3.3 Gesamtsystem	34
4.4 Schlussfolgerungen	36
5 Hardware	37
5.1 Sensorplatine	38
5.1.1 Speisung	39
5.1.2 Transmitter	40
5.1.3 Microcontroller	40
5.1.4 Spannungsmessung	41
5.1.5 Interface	41
5.1.6 Empfänger	42
5.2 Master-Gerät	43
5.2.1 Speisung	45
5.2.2 Ein-/Ausgänge (GPIO)	46
5.2.3 Kommunikation mit Sensoren	47
5.2.4 Strommessung	48
5.2.5 GSM-Modem	50
6 Software	51

6.1	Datenfluss	52
6.2	Firmware Sensor	53
6.2.1	Benutzte Bibliotheken	53
6.2.2	Die Firmware	53
6.2.2.1	UART	53
6.2.2.2	Sensor	54
6.2.2.3	Statusanzeige	55
6.2.3	Open On Chip Debugger	55
6.3	Software Master-Gerät	56
6.3.1	Komponenten	56
6.3.2	Lizenzen	57
6.3.3	Threads	57
6.3.4	Benutzeroberfläche	58
6.3.5	Datenbank	60
6.3.6	Implementation	61
6.3.6.1	<code>database.py</code>	61
6.3.6.2	<code>input_handler.py</code>	62
6.3.6.3	<code>evaluator.py</code>	63
6.3.6.4	<code>reporter.py</code>	63
7	Validierung	64
7.1	Kopplungsspule	64
7.2	Modulator	66
7.3	Demodulator	68
7.4	Gesamtsystem	70
8	Benutzerhandbuch	71
8.1	Installation und Inbetriebnahme	71
8.2	Regulärer Betrieb	72
8.3	Störbetrieb	73
9	Fazit	74
	Anhänge	75
A	Daten von Solarmodulen	76
B	LTspice-Schaltungen	77
C	Schemata	82
D	Zusatzinformationen Validierung	85
D.1	Zusätzliche Plots für Validierung	86
D.2	Einstellungen Oszilloskop	87
	Literaturverzeichnis	90

1

Einleitung

In Zeiten der Energiewende sind Photovoltaikanlagen kein Nischenprodukt mehr. Um die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern, werden vielerorts Anlagen in allen Größen gebaut; von kleinen Installationen für Einfamilienhäuser bis zu Anlagen, welche einem normalen Kraftwerk in Sachen Leistung die Stirn bieten können. Die Sonnenstrahlung, welche kostenlos von der Sonne kommt, wird in elektrische Energie umgewandelt und kann gleich vor Ort genutzt werden. PV-Anlagen sind teuer, weshalb Anlagenbesitzer darauf angewiesen sind, dass diese den maximalen Ertrag liefern. Das ist in der Regel ohne grossen Aufwand der Fall. Doch es gibt Umstände, unter welchen die Effizienz einer Photovoltaikanlage sich erheblich verringern kann, und häufig wird dies nicht oder nur mit bedeutender Verzögerung bemerkt. In einer Photovoltaikanlage werden üblicherweise mehrere PV-Module zu einem String zusammengefasst, indem sie in Serie geschaltet werden. Dabei reduziert ein abgeschattetes, verschmutztes oder gar defektes Modul den Strom dieser Serieschaltung und beeinträchtigt somit auch die Leistung des gesamten Strings und der Anlage stark. Dies hat grosse finanzielle Einbussen zur Folge.

Das Ziel des Projektes P4 ist es, ein PV-Überwachungssystem zu entwickeln, um bei Szenarien wie dem oben geschilderten Abhilfe zu schaffen. Das System soll aus einer Sensorplatine und einem zentralen Meldegerät bestehen. Die Sensorplatine wird beim PV-Modul eingebaut und überwacht dessen Spannung, das zentrale Meldegerät wird im Schaltschrank beim Wechselrichter installiert. Die Kommunikation zwischen den beiden Komponenten erfolgt über die zur Energieübertragung benutzte DC-Leitung; es werden also keine zusätzlichen Datenleitungen benötigt.

Das Master-Gerät wertet die gemessenen Spannungen der Module aus und löst beim Erkennen eines fehlerhaften Moduls einen Alarm am Gerät selbst, lokal in der PV-Anlage via Relais (z.B. Sirene oder Warnlampe) und per SMS aus. Das System soll möglichst energieeffizient und kostengünstig sein, um die Wirtschaftlichkeit einer Photovoltaikanlage nicht zu verschlechtern.

Das Hauptproblem eines solchen Systems liegt bei der Signalübertragung über die DC-Leitung der Photovoltaikanlage. Denn die Spannung darauf schwankt zwi-

schen 12 und 60 Volt an der Sensorplatine und beträgt am Mastergerät bis zu 1000 Volt. Auf dieser Leitung ein Signal zu übertragen, ist schwierig und wird heutzutage kaum gemacht. Unsere Lösung koppelt mit einer Spule und dem Effekt der Induktivität ein Signal in die DC-Leitung ein, was uns das Übertragen von Daten erlaubt. Die Spule wird von einem auf dem Sensor platzierten Mikrocontroller gesteuert, der die Spannung misst und die Messdaten zum Versenden vorbereitet. Das Master-Gerät besitzt eine grafische Benutzeroberfläche zur Interaktion mit dem Benutzer und benutzt eine Datenbank zum Verwalten der Messdaten. Zudem ist das System darauf optimiert, möglichst wenig Leistung zu verbrauchen, um nicht selbst bedeutende Zusatzkosten im Betrieb zu verursachen.

Der vorliegende Bericht stellt die technische Dokumentation unseres Systems dar. Das Kapitel *Überblick* bietet eine kurze Einführung in die Thematik von PV-Anlagen; der Aufbau einer üblichen PV-Anlage wird kurz erläutert, um anschliessend die oben Problematik von Leistungsverlusten zu untersuchen. Ebenfalls werden einige Grundinformationen zur Signalmodulation gegeben. Anschliessend werden in den Kapiteln *Modellierung eines Photovoltaik-Systems* und *Lösungsansätze und Simulationen* verschiedene verfolgte Lösungsvarianten modelliert und mit Simulationen in LTspice untersucht. Die schlussendlich gewählte Lösung mit induktiver Kopplung ist in den darauf folgenden Kapiteln *Hardware* und *Software* dokumentiert. Im Kapitel *Validierung* werden das entwickelte System und seine Komponenten mit Labormessungen kritisch untersucht, um letztlich im *Fazit* unseren Gesamterfolg zu beurteilen und auch Empfehlungen für zukünftige Weiterentwicklungen zu geben.

2

Überblick

In diesem Kapitel wird zuerst kurz der grundlegende Aufbau einer PV-Anlage erklärt, um sicherzustellen, dass keine Missverständnisse beim Interpretieren der nachfolgenden Informationen und in der verwendeten Terminologie entstehen. Anschliessend werden Simulationsergebnisse präsentiert, welche verdeutlichen, dass die Leistungsverluste durch einzelne, nicht optimal funktionierende Zellen in einer grossen Anlage im Bereich von mehreren Kilowatt liegen können. Daraus leitet sich schlussendlich die Notwendigkeit eines Überwachungssystems ab. Zuletzt werden verschiedene Varianten vorgestellt, wie ein Signal auf den DC-Strom in der Leitung zwischen PV-Modul und Zentrale aufmoduliert werden kann: Frequenzumtastung, Amplitudenumtastung und *On-off Keying*.

2.1 Aufbau einer Photovoltaikanlage

Die Grundbausteine einer Photovoltaikanlage legen die PV-Zellen, welche aus verschiedenen Halbleitermaterialien bestehen. Die meisten heutzutage verwendeten Zellen werden aus dem Halbleitermaterial Silizium hergestellt. Siliziumzellen sind in verschiedenen Formfaktoren verfügbar; gängige Größen haben ca. zwischen 10 cm und 15 cm Kantenlänge. Zum mechanischen Schutz der Zellen sind diese mit einer durchsichtigen Antireflexschicht überzogen. Die an der PV-Zelle abgreifbare Spannung beträgt zwischen 0.5 V und 0.8 V DC, wobei die Klemmenspannung einer voll funktionsfähigen Zelle nur schwach von der Lichteinstrahlung abhängig ist. Die Stromstärke hingegen ist sehr stark von der Beleuchtungsstärke abhängig. Je nach Sonneneinstrahlung erreicht eine 100 cm^2 grosse Siliziumzelle eine Stromstärke von bis zu 2 A [4]. Abbildung 2.1 zeigt die Frontansicht einer PV-Zelle.

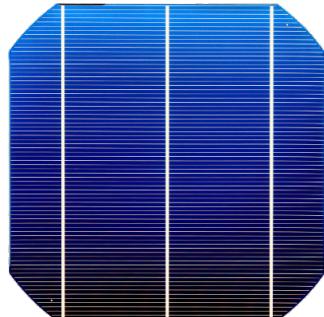


Abbildung 2.1: Solarzelle, Frontalansicht [3]



Abbildung 2.2: Solarmodul, zusammengesetzt aus 72 Solarzellen gemäss Abbildung 2.1

Modulstrang verschaltet (vereinfacht dargestellt in Abbildung 2.4). Dadurch wird eine höhere Ausgangsspannung erzeugt, was die Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom und dessen Einspeisung ins Wechselstromnetz erleichtert. Die Ausgangsspannung eines Modulstrangs darf gemäss Vorschrift 1000 V DC nicht überschreiten, was die Anzahl der in einem Strang in Serie geschalteten Module beschränkt. Module, die an unterschiedlichen Dachneigungen montiert sind oder die unterschiedliche Ausrichtungen haben, sollten nie zu einem Modulstrang zusammengeschaltet werden, da sie nicht den gleichen Strom produzieren werden, was die Effizienz des Strangs stark reduziert. Ein einzelnes beschattetes oder nicht einwandfrei funktionierendes Modul beeinträchtigt die vom gesamten Modulstrang abgegebene Leistung stark (siehe nächster Abschnitt).

Die in der Praxis übliche Baugruppe ist nicht die Solarzelle, sondern das Photovoltaikmodul. Um die Ausgangsspannung und/oder den Ausgangsstrom zu erhöhen und um diese in der Praxis besser einsetzen zu können, werden mehrere Zellen in verschiedenen Konfigurationen miteinander zu einem PV-Modul verschaltet. Das Konzept ist schematisch dargestellt in Abbildung 2.2, die Eckdaten einiger PV-Module sind als Beispiele in Anhang A auf Seite 76 aufgeführt.

Zur Erhöhung des Ausgangsstroms werden Zellen parallel geschaltet, zur Erhöhung der Ausgangsspannung werden sie in Serie verbunden. Je nach gewünschten Spezifikationen eines Moduls werden diese Ansätze einzeln oder kombiniert angewandt. In der Praxis üblich sind Module mit 36, 72 oder 144 Zellen und einer Ausgangsspannung von 12 V bis 60 V. In Photovoltaikanlagen werden nur solche ganzen Module eingesetzt; die einzelnen Zellen sind für Reparaturen nicht mehr zugänglich. Die elektrischen Anschlüsse befinden sich in kleinen Kunststoffdosen auf der Rückseite der Module (Beispiel in Abbildung 2.3) [5].

Mehrere identische Module werden üblicherweise mittels Reihenschaltung zu einem



Abbildung 2.3: Anschlussbox für PV-Modul, Montage normalerweise auf der Rückseite des Moduls [6]. Es sind auch drei Freilaufdioden erkennbar (Abschnitt 2.2 ab Seite 6)

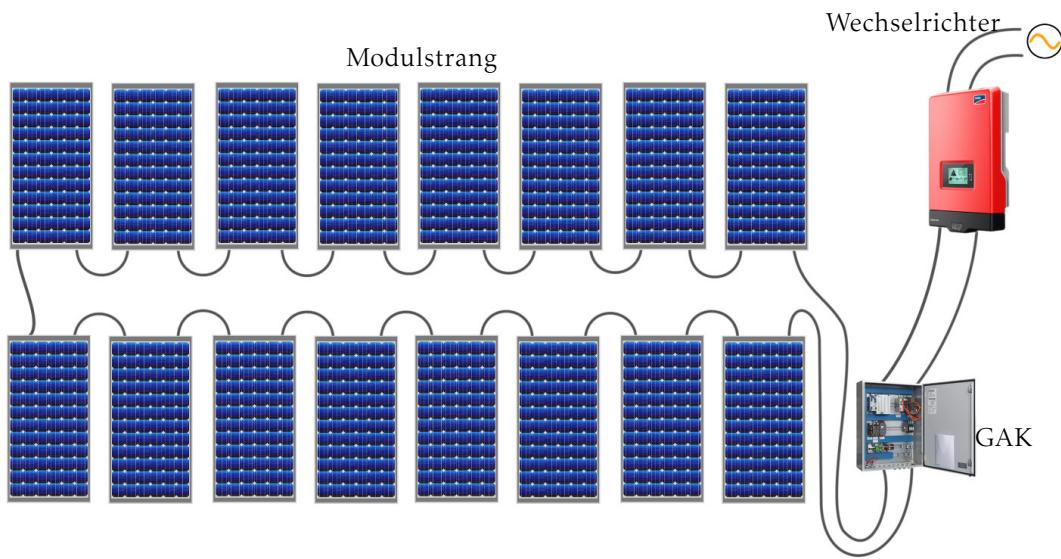


Abbildung 2.4: Modulstrang aus 16 Modulen gemäss Abbildung 2.2, GAK und Wechselrichter. Bild des GAK von [7], Bild des Wechselrichters von [8].

Die Umwandlung der Gleichspannung in Wechselspannung erfolgt mittels Wechselrichter (dargestellt auf der rechten Seite in Abbildung 2.4). Je nach Anwendungsbereich werden unterschiedliche Wechselrichter eingesetzt, aufgelistet in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Arten von Wechselrichtern

Modulwechselrichter:	Ein Wechselrichter, welcher den Strom eines einzelnen Moduls in Wechselstrom konvertiert.
Strangwechselrichter:	Konvertiert den Strom eines Modulstrangs zu Wechselstrom.
Multistrangwechselrichter:	Fasst die Gleichströme mehrerer Modulstränge zusammen und konvertiert diese zu Wechselstrom.
Zentralwechselrichter:	Ein einzelner Wechselrichter, welcher den Gleichstrom einer ganzen Photovoltaikanlage in Wechselstrom umwandelt. Kommt hauptsächlich in Grossanlagen zum Einsatz, bei denen alle Stränge die gleiche Neigung aufweisen und gleich ausgerichtet sind [9].

Als Leitungsschutz gegen Überstrom und Kurzschluss befindet sich unmittelbar vor dem Wechselrichter im Gleichstromnetz ein Generatoranschlusskasten (GAK). Dieser dient auch zur Trennung der gesamten Anlage vom Netz. Üblicherweise werden GAK und Wechselrichter am selben Standort platziert.

2.2 Leistungseinbrüche

In diesem Abschnitt werden einige Simulationsergebnisse präsentiert, die exemplarisch zeigen, wie drastisch die Leistungsfähigkeit einer PV-Anlage aufgrund von kleinen Ursachen abnehmen kann.

Bei der Serieschaltung von Zellen zu einem Modul kann bereits eine einzelne nicht voll funktionsfähige Zelle zu starken Einbussen bei der Leistungsfähigkeit des Moduls führen¹. Dieser Effekt ist in den Abbildungen 2.5 und 2.6 gezeigt. Die Abbildungen basieren auf der Simulation eines PV-Moduls, welches aus 72 in Serie geschalteten Zellen besteht (die zugehörige Schaltung ist in Abbildung B.3 auf Seite 78 dargestellt). Gibt schon nur eine von 72 Zellen weniger Strom ab als die restlichen, verringert sich die Leistungsfähigkeit des Moduls beträchtlich. Der dabei von einem Modul noch abgegebene Strom hängt wesentlich vom Shunt-Widerstand des Modells bzw. vom parallelen Innenwiderstand der Zelle ab (mehr zum Modell einer PV-Zelle in Abschnitt 3.1 ab Seite 13).

Strom, Spannung und Leistung eines PV-Moduls mit einer degradierten Zelle

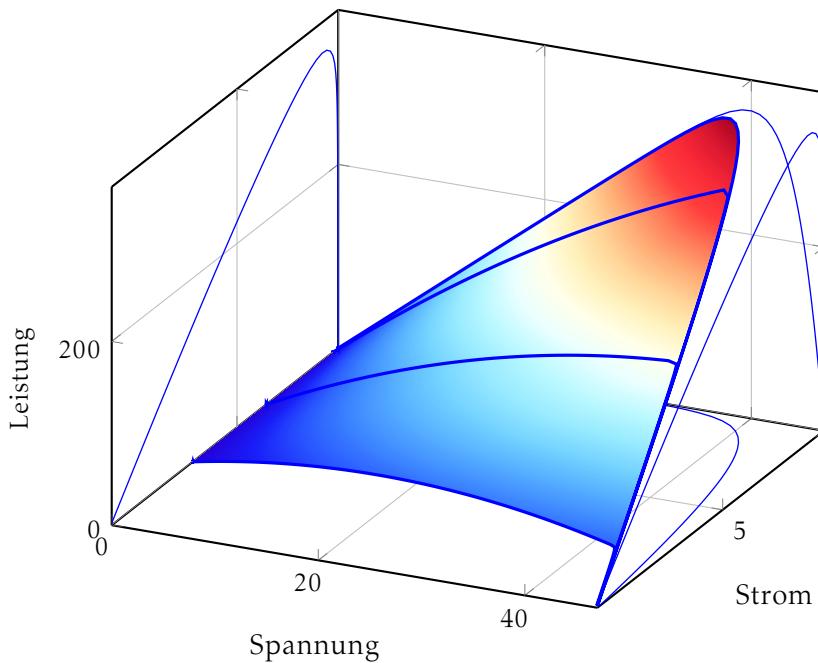


Abbildung 2.5: 3D-Darstellung von Leistung, Spannung und Strom eines PV-Moduls. Abbildung 2.6 zeigt diese Kurven zweidimensional. Die zugehörige LTspice-Schaltung ist in Abbildung B.3 auf Seite 78 abgebildet.

¹Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass aufgrund von Fertigungstoleranzen bei realen Modulen natürlich niemals alle Zellen den genau gleichen Arbeitspunkt haben. Diese Effekte zu berücksichtigen würde jedoch die im Rahmen dieses Projekts zur Verfügung stehenden Ressourcen übersteigen. Daher werden sie für den Rest dieses Berichts nicht berücksichtigt.

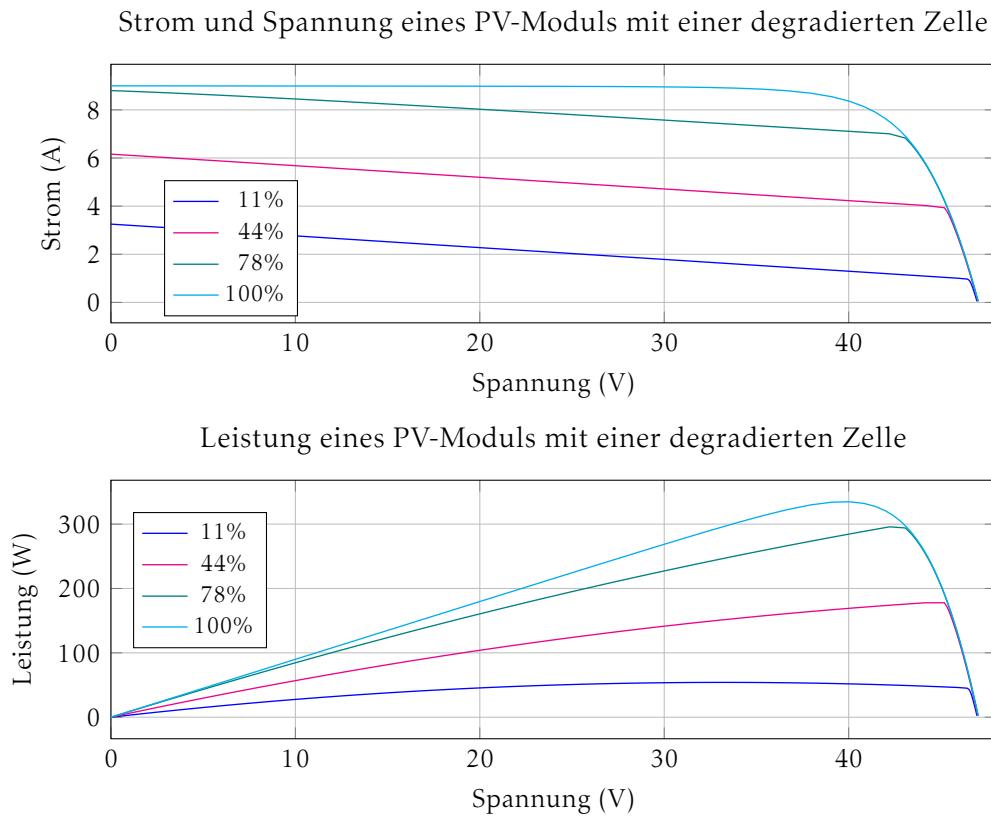


Abbildung 2.6: Verhalten eines Moduls bei Reduktion des Stroms einer einzelnen Zelle. Die zugehörige LTspice-Schaltung ist in Abbildung B.3 auf Seite 78 zu finden. Abbildung 2.5 zeigt die entsprechenden Zusammenhänge dreidimensional.

Bei Serieschaltung von mehreren PV-Modulen in einem Strang kann bereits eine einzige nicht voll funktionsfähige Zelle in einem Modul die Leistung des gesamten Strangs stark beeinträchtigen. Der gesamte von einem Modul und somit auch von einem Strang (wegen Serieschaltung der Module) abgegebene Strom hängt also stark von der schwächsten Zelle in der Schaltung ab.

Um diesen Effekt zu reduzieren, werden in der Praxis in jedem Modul jeweils über mehreren Zellen Freilaufdioden (Engl. *Bypass Diode*) geschaltet. In der Anschlussbox aus Abbildung 2.3 von Seite 4 sind drei Freilaufdioden sichtbar, womit zum Beispiel drei mal 24 Zellen mit je einer Freilaufdiode parallel geschaltet werden könnten. Aus Kostengründen wird nicht eine Freilaufdiode pro Zelle verbaut, obwohl dies aus elektrotechnischer Sicht optimal wäre.

Wird ein Strom durch eine PV-Zelle geleitet, ohne dass diese genügend belichtet ist, findet über der Zelle statt eines Spannungsanstiegs wie im regulären Betrieb ein Spannungsabfall statt, was bedeutet, dass der durch die PV-Zelle fliessende Strom in der Zelle thermische Verluste produziert. Dies ist nicht nur ineffizient und unökonomisch, sondern kann auch eine Brandgefahr darstellen. Abbildung 2.7 zeigt die Simulation eines Modulstrangs, in dem keines der Module mit Freilaufdioden versehen ist. Wie leicht zu erkennen ist, fällt die vom Modulstrang abgegebene Leistung bereits bei einer einzigen defekten Zelle (von 1440 Zellen im gesamten Modulstrang!) bedeutend ab. Gibt eine Zelle lediglich noch einen Fünftel des Stromes der restlichen Zellen ab, fällt die vom gesamten Strang abgegebene Leistung um etwa einen Viertel. Da die Sonneneinstrahlung verglichen mit einer voll funktionsfähigen Anlage aber unverändert ist, produziert die Anlage eigentlich immer noch beinahe gleich viel Leistung. Die nicht mehr zur Verfügung stehende Leistung wird aber grösstenteils thermisch statt elektrisch abgegeben (daher auch Brandgefahr).

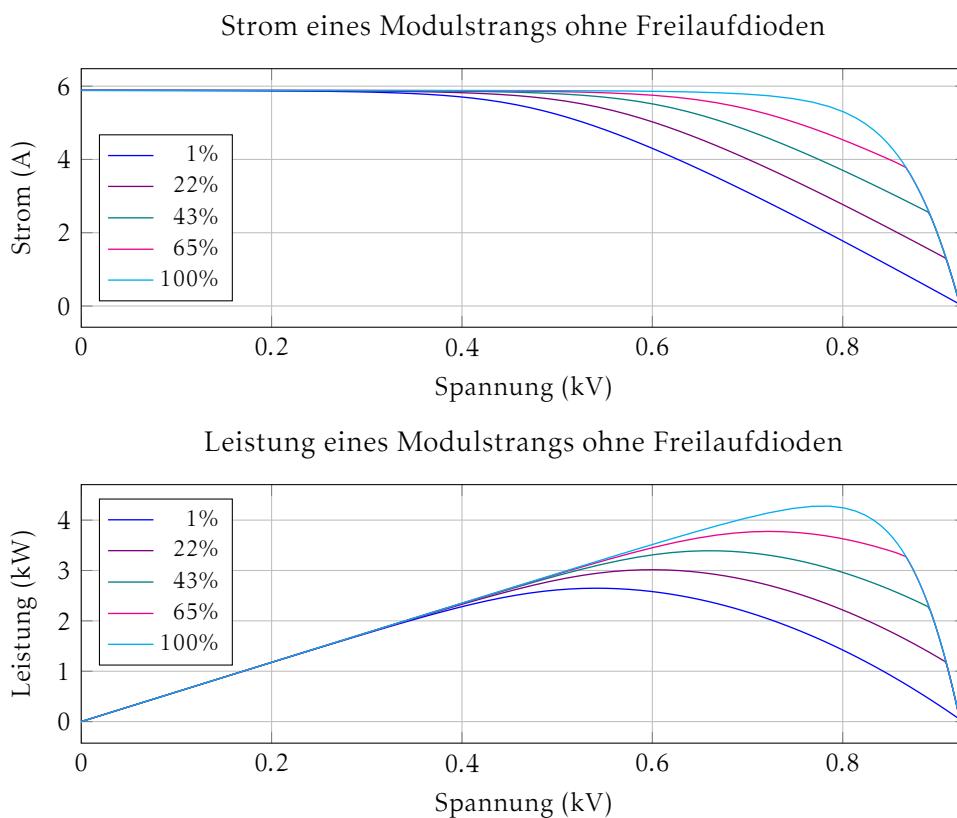


Abbildung 2.7: Verhalten eines Modulstrangs ohne Freilaufdioden bei Reduktion des Stroms einer einzelnen Zelle. Die zugehörigen LTspice-Schaltungen sind im Anhang in Abbildung B.5 auf Seite 79 und in Abbildung B.6 auf Seite 80 dokumentiert.

Abbildung 2.8 zeigt das Verhalten des gleichen Modulstranges wie Abbildung 2.7, nur dass nun zu jedem Modul noch eine Freilaufdiode parallel geschaltet ist (in der Praxis wird wie erwähnt mehr als eine Freilaufdiode pro Modul verwendet, aber für unsere Simulations-Szenarien ist eine Diode pro Modul ausreichend).

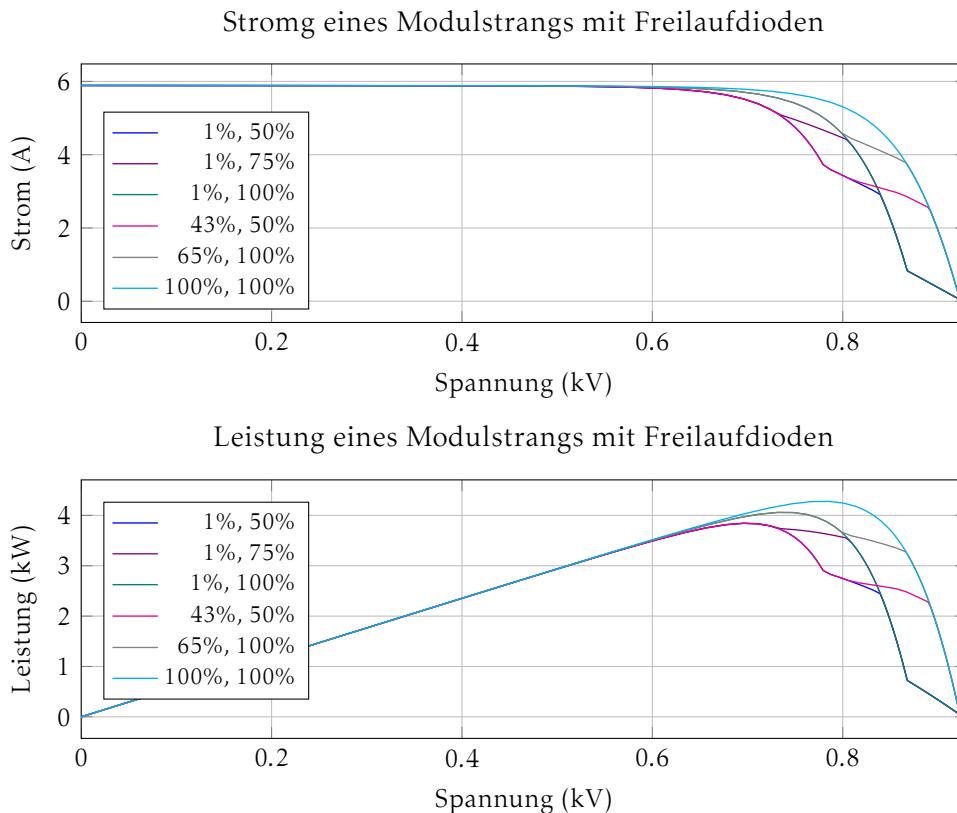


Abbildung 2.8: Verhalten eines Modulstrangs bei einer Freilaufdiode pro Modul. Es werden zwei Zellen in zwei verschiedenen Modulen im gesamten Modulstrang auf reduzierte Kapazität gesetzt. Die Prozentangaben in der Legende beziehen sich auf die Stromabgabe der zwei Zellen bezogen auf ihre maximale Kapazität. Die zugehörigen LTspice-Schaltungen sind im Anhang in Abbildung B.5 auf Seite 79 und in Abbildung B.7 auf Seite 81 dokumentiert.

Die Freilaufdioden leiten den Strom an den nicht korrekt funktionierenden Zellsträngen des Moduls vorbei, und verhindern somit, dass so grosse Verluste wie im Szenario ohne Freilaufdioden entstehen. Die über der Freilaufdiode abfallende Vorwärtsspannung ist viel kleiner als die über einem schlecht beleuchteten Modul abfallende Spannung. Somit sind auch die in der Freilaufdiode stattfindenden thermischen Verluste viel geringer.

Trotz Freilaufdioden können aber auch hier die Verluste in einer grossen PV-Anlage sehr beträchtlich werden, da eine solche Anlage aus tausenden von Strings bestehen kann. Somit sind Freilaufdioden alleine nicht ausreichend, um Leistungsverluste aufgrund von nicht optimal funktionierenden Zellen zufriedenstellend einzudämmen. Hier schafft ein Überwachungssystem Abhilfe.

2.3 Unser System

Unser System bietet, neben einer benutzerfreundlichen Bedienung und Inbetriebnahme sowie einer einfachen Integration in bestehende Anlagen, eine kostengünstige und energieeffiziente Lösung für die Überwachung von Photovoltaikanlagen. Das System setzt sich zusammen aus zwei Hauptkomponenten, dem Master-Gerät und den jeweiligen Sensoren. Die schematische Integration des Systems in eine PV-Anlage ist in Abbildung 2.9 gezeigt.

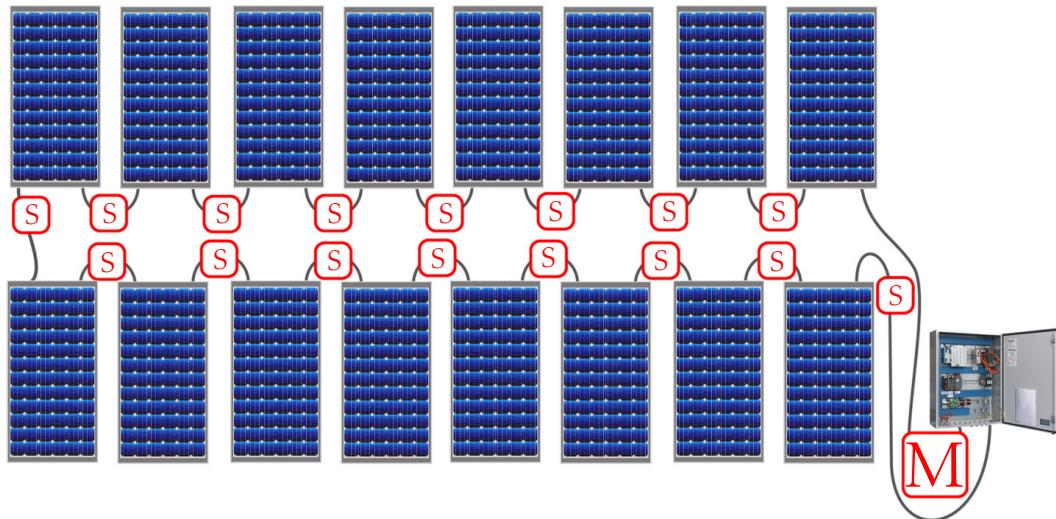


Abbildung 2.9: Modulstrang mit je einem Sensor **S** pro Modul und einem Master-Gerät **M** beim Generator-Anschlusskasten

Die Installation des Master-Gerätes erfolgt im zugehörigen Schaltschrank. Das Hutschienengehäuse ermöglicht eine einfache Installation in bestehende oder neue Schaltschränke. Der Anschluss an die Energieversorgung für das Gerät selbst wie auch die Ankopplung an die DC-Leitungen erfolgen im Innern des Schaltschranks und werden von einem Elektroinstallateur ausgeführt.

Neben dem Klemmenanschluss für die Energieversorgung und den zwei Relaisausgängen für externe Alarmgeräte sieht das Master-Gerät die Ankopplung der DC-Leitungen von bis zu drei Modulsträngen vor (einer gezeigt in Abbildung 2.9).

Ein internes 2.5“ Touch-Display ermöglicht eine einfache Inbetriebnahme und eine benutzerfreundliche Bedienung des Systems. Alle Messresultate der Sensoren werden vom Master-Gerät ausgewertet und dem Kunden auf einer grafischen Benutzeroberfläche dargestellt. Tritt ein Fehler an der Anlage auf, wird eine entsprechende Meldung auf dem Display angezeigt, die beiden Relais werden betätigt und es wird eine Nachricht mittels SMS versendet. Dadurch wird sichergestellt, dass der Kunde möglichst schnell über defekte PV-Module in Kenntnis gesetzt wird.

Als Fehler werden folgende Ereignisse definiert:

- Eine defekte Zelle
- Eine dauerhaft verschmutzte Zelle
- Eine defekte Leitung

Kein Fehler soll in folgenden Situationen ausgelöst werden.

- Kurzzeitige Abschattungen (z.B. Vogel auf Zelle)
- Regelmässige Abschattungen, die zu den Umweltbedingungen gehören (z.B. Baum, der täglich abschattet)
- Nacht und schlechtes Wetter
- Anlage absichtlich ausser Betrieb genommen (z.B. Unterhaltsarbeiten)

Für die Spannungsmessung und die Übertragung der Messresultate sind die Sensoren zuständig. Die Installation der Sensoren erfolgt in den Anschlussdosen auf der Rückseite der PV-Module. Für jedes PV-Modul ist jeweils ein Sensor zu installieren, wie in Abbildung 2.9 gezeigt. Eine zweidrige Verbindung von der Sensorplatine zu den Klemmen der Anschlussdose ist zuständig für die Energieversorgung des Sensors. Die Einkopplung in die DC-Leitung erfolgt mit einer kleinen Induktionsspule, durch welche die DC-Leitung geführt wird. Dies ermöglicht das Kommunizieren mit dem Master-Gerät.

2.4 Kommunikation über DC-Leitung

Die Kommunikation zwischen Sensor und Master-Gerät über die DC-Leitung ist das Herzstück des Systems und das zu lösende Kernproblem des Projekts. Es sind im Rahmen des Projekts vier grundsätzliche Ansätze untersucht worden, um Daten zwischen Sensor und Master-Gerät über die DC-Leitung zu senden und empfangen.

Frequency-shift keying: Bei der FSK (Frequenzumtastung auf Deutsch) wird dem in der Leitung fliessenden Gleichstrom ein (verhältnismässig) kleines Signal aufmoduliert, welches die zu übertragenden Informationen enthält. Die Frequenz des aufmodulierten Anteils wird in diskreten Schritten variiert und jeweils einem Symbol zugeordnet. Bei einer binären Umsetzung werden zwei Frequenzen benutzt; eine für 0 und eine für 1.

Amplitude-shift keying: Die ASK (Amplitudenumtastung auf Deutsch) benutzt statt verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Amplituden, um Symbole zu codieren.

On-Off keying: Bei der OOK bedeutet die Präsenz einer Oszillation auf der Leitung eine 1, die Absenz von Wechselstromanteilen eine logische 0. Eine spezielle Form der OOK, welche im Abschnitt [Signalcodierung mittels Kurzschluss](#) ab Seite 29 genauer untersucht und simuliert wird, benutzt das kontrollierte Kurzschliessen eines PV-Moduls und den zugehörigen Spannungsabfall zur Codierung eines Signals.

Abbildung 2.10 stellt diese vier Varianten vereinfacht dar, zusammen mit dem codierten Signal. Aufgrund der einfachen Implementation haben wir uns für die Benutzung einer OOK mit Oszillator entschieden.

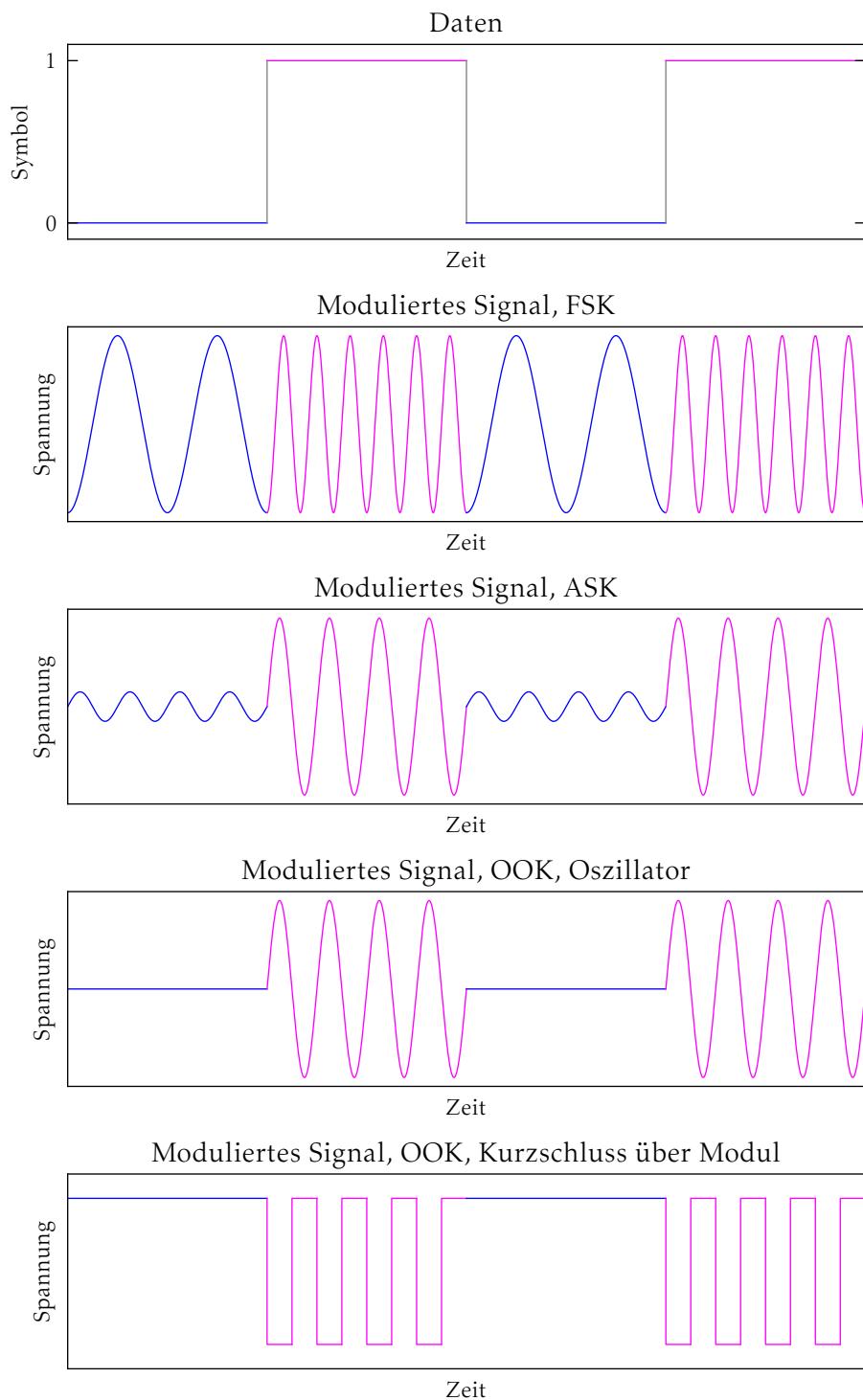


Abbildung 2.10: Frequency-shift keying: Oben sind die zu übertragenden digitalen Daten als 1 und 0 abgebildet, unten das zugehörige Verhalten des modulierten Signals.

Modellierung eines Photovoltaik-Systems

Bevor simuliert werden kann, müssen die dafür benötigten Modelle vorhanden sein. In diesem Abschnitt wird im *bottom-up*-Verfahren das Modell eines Strangs aus PV-Modulen mit Zuleitung entwickelt. Es wird zuerst das Modell einer Zelle definiert, aus dem anschliessend ein PV-Modul aufgebaut wird. Das Modell des PV-Moduls wird dann wiederum benutzt, einen Strang aus Modulen zu modellieren.

Die entwickelten Modelle werden anschliessend im Abschnitt *Lösungsansätze und Simulationen* in LTspice-Simulationen verwendet, um unsere Lösungsansätze zu untersuchen.

Konvention: Doppelt unterstrichene Werte in Gleichungen sind Parameter, welche in unser Model aufgenommen werden.

3.1 Modellierung einer PV-Zelle

Das Modell einer idealen Photovoltaikzelle ist eine Stromquelle mit einer parallel geschalteten Diode. Da PV-Zellen in Realität nicht ideal sind, wird das einfachste Ersatzschaltbild einer PV-Zelle üblicherweise durch einen zur Stromquelle parallel geschalteten Shunt-Widerstand R_{Sh} und einen Seriewiderstand R_S ergänzt; das resultierende Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Die Genauigkeit dieses Eindiodenmodells ist jedoch häufig nicht besonders gut [10] [11] (besonders bei niedrigen Beleuchtungsgraden), weshalb wir hier ein Zweidiodenmodell benutzen werden. Eine der beiden Dioden modelliert dabei

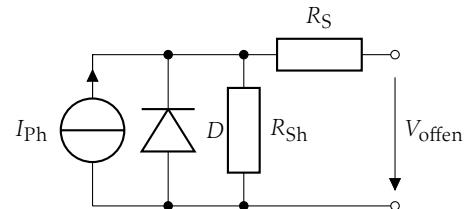


Abbildung 3.1: Eindiodenmodell einer PV-Zelle mit Stromquelle I_{Ph} , Diode D , Shunt-Widerstand R_{Sh} und Seriewiderstand R_S .

den Sättigungsstrom, welcher von Diffusionsprozessen verursacht wird, die zweite Diode modelliert den Sättigungsstrom, welcher von Rekombinationseffekten verursacht wird [11].

Zur Herleitung der Modellparameter existieren verschiedene Verfahren. Man kann beispielsweise eine PV-Zelle im Labor ausmessen und die Modellparameter aus diesen Messergebnissen ableiten. Dies ist jedoch nicht immer praktisch realisierbar, da man allenfalls kein Testexemplar zur Verfügung hat. Sollen bei der Messung noch Fertigungstoleranzen der PV-Zellen berücksichtigt werden, steigt der experimentelle (und finanzielle) Aufwand zusätzlich, da man mehrere Exemplare kaufen und ausmessen muss. Auch die Auswertung erfordert mehr Arbeit, wenn man mittels statistischer Methoden verlässliche Schlussfolgerungen ziehen können will.

Alternativ kann man auch versuchen, die Modellparameter aus dem Datenblatt einer PV-Zelle herzuleiten. Dies bietet zwei hauptsächliche Vorteile: Einerseits entfallen aufwändige Messungen und der Kauf von Testexemplaren, andererseits ist davon auszugehen, dass der Hersteller mehrere Exemplare ausgemessen hat und typische Angaben in den Datenblättern gemacht werden. Es setzt jedoch voraus, dass man den Herstellerangaben einigermaßen vertraut; Sicherheit ist letztendlich nur durch eigene Verifikation zu erlangen.

Das Herleiten der Modellparameter aus den Herstellerangaben ist nicht trivial; es wird deshalb an dieser Stelle ein Modell einer kommerziell erhältlichen PV-Zelle (M5SF-2 von JA Solar) als Grundlage verwendet, welches in [11] hergeleitet und verifiziert worden ist.

Üblicherweise wird bei PV-Zellen nur das Gleichstromverhalten untersucht; das Verhalten unter Wechselstrom interessiert meistens nicht. Da das Signal, welches in diesem Projekt auf die DC-Leitung aufmoduliert wird, jedoch Wechselstrom ist, muss das Wechselstromverhalten von PV-Zellen in unseren Simulationen berücksichtigt werden.

Das Zweidiodenmodell aus [11] wird deshalb in unseren Simulationen noch durch eine parallele Kapazität ergänzt, wie in Abbildung 3.2 gezeigt.

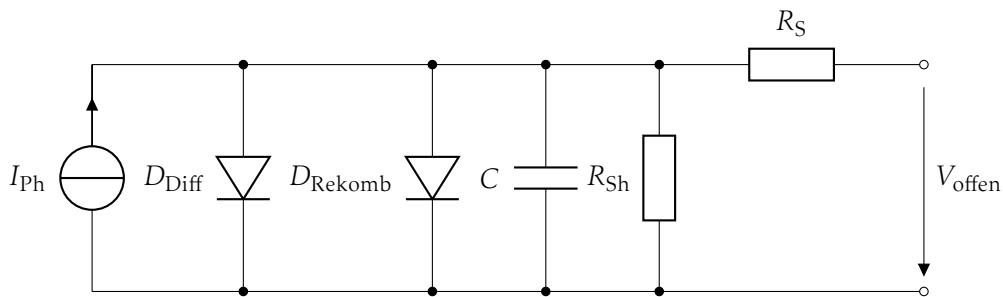


Abbildung 3.2: Schaltschema zur Modellierung einer Solarzelle gemäß Zweidiodenmodell mit zusätzlicher Kapazität. Die zugehörigen Modellparameter sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Die Größenordnung dieser Kapazität kann stark variieren und wird unter anderem vom Diodenmaterial, der Diodenspannung und der DiodenTemperatur beeinflusst. Basierend auf [12], [13] und [14] soll an dieser Stelle eine flächennormierte Kapazität von $C' = 20 \text{ nF cm}^{-2}$ verwendet. Die in [11] verwendete Zelle hat eine Grösse von $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ (allfällige abgeschnittene Ecken, wie sie in Abbildung 2.1 zu sehen sind, werden vernachlässigt), womit die Kapazität einer Zelle sich berechnet zu:

$$C_{\text{Zelle}} = A_{\text{Zelle}} \cdot C' = (125 \text{ mm})^4 \cdot 20 \text{ nF cm}^{-2} = \underline{\underline{3.125 \mu\text{F}}} \quad (3.1)$$

Somit sind das Ersatzschaltbild und die zugehörigen Parameter bestimmt; die Ergebnisse sind in Abbildung 3.2 und Tabelle 3.1 abgebildet respektive aufgelistet.

Tabelle 3.1: Übersicht Modellparameter für Solarzelle aus Abbildung 3.2

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Diodenstrom (<i>Photo Current</i>)	I_{Ph}	5.889 A	[11]
Sättigungsstrom Diffusionsdiode	$I_{\text{S},\text{Diff}}$	794.06 pA	[11]
Sättigungsstrom Rekombinationsdiode	$I_{\text{S},\text{Rekomb}}$	5.0762 μA	[11]
Idealitätsfaktor Diffusionsdiode	n_{Diff}	1	[11]
Idealitätsfaktor Rekombinationsdiode	n_{Rekomb}	2	[11]
Seriewiderstand	R_S	1.71 m Ω	[11]
Shunt-Widerstand	R_{Sh}	59.23 Ω	[11]
Kapazität	C	3.125 μF	[12], [13], [14], Gl. 3.1
Kantenlänge	s	125 mm	[11]

3.2 Modellierung eines PV-Moduls

Das im obigen Abschnitt hergeleitete PV-Zellen-Modell wird nun dazu verwendet, ein Modell für ein PV-Modul aufzubauen. In Anhang A auf Seite 76 sind zum Vergleich die Daten einiger kommerzieller PV-Module mit verschiedenen Zellenkonfigurationen aufgelistet.

Es wird ein PV-Modul aus 72 in Serie angeordneten Zellen gewählt und implementiert. Es wird ebenfalls eine Freilaufdiode parallel zu jedem Modul geschaltet, basierend auf den in Abbildungen 2.7 und 2.8 gezeigten Effekten und den zugehörigen Anmerkungen.

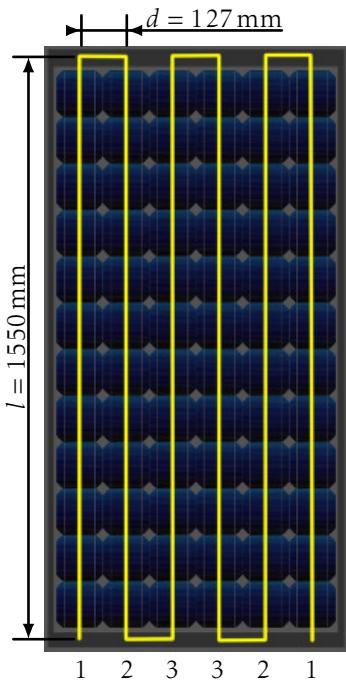


Abbildung 3.3: Solarmodul gemäß Abbildung 2.2 mit Stromleitungen und Längen zur Verbindung der Zellen. Die Nummerierung der Leiterbahnen entspricht der Nummerierung der Koeffizienten in Gleichungen 3.3 bis 3.5 (Seite 17).

Der Pfad, den der Strom in einem Modul zurücklegt, kann je nach Modul mehrere Meter Länge erreichen. Dieser Effekt wird in unserem Modell durch eine Stromleitung modelliert, die über alle Zellen geht. In Realität sind die Leiter, welche die Zellen miteinander verbinden, ziemlich kurz (angenommen die Zellen werden von Kante zu Kante verbunden), aber da der Strompfad durch die ganze Zelle geht, wird der gesamte Strompfad in unserem Modell vereinfacht als eine lange Leitung modelliert.

Zwischen diesen parallelen Leiterbahnen ergeben sich parasitäre Induktivitäten, die im Folgenden bestimmt und in unser Modell integriert werden. Die angenommene Form und die Abmessungen der internen Stromleitung sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Abmessungen basieren auf folgenden Annahmen:

- Kantenlänge einer Zelle: 125 mm
- Abstand zwischen zwei Modulen: 2 mm
- Überhang am oberen und unteren Ende des Moduls: 14 mm
- Der Abstand d zweier Leiterbahnen ist somit 127 mm und
- die Länge l einer Leiterbahn summiert sich auf 1550 mm.

Zur Berechnung der parasitären Induktivität wird *The Self and Mutual Inductances of Linear Conductors* von Edward B. Rosa herangezogen [15]. Darin wird unter anderem die Induktivität einer Leiterkonfiguration wie sie in unserem Modul angenommen wird (Abbildung 3.3) bestimmt. Die zugehörige Formel ist in Gleichung 3.2 gegeben¹.

¹Die Formeln in [15] sind im CKG-System (Centimeter, Kilogramm, Sekunden) notiert, für Gleichung 3.2 ist die Gleichung von Rosa auf das SI-System normiert worden.

Der Wert für die Selbstinduktivität der verschiedenen Drähte ist nicht identisch; dies wird im Summand A_i berücksichtigt, der abhängt von der Anzahl paralleler Leiterbahnen und ihrer Lage innerhalb der Leiteranordnung. Für 6 parallele Leiterbahnen ergeben sich die Werte aus Gleichungen 3.3, 3.4 und 3.5.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{d}{\rho}\right) + \frac{1}{4} - A_i \right] \quad \text{Selbstinduktivität eines Leiters} \quad (3.2)$$

$$A_1 = -\ln\left(\frac{15}{8}\right) \quad \text{äußerste Leiterbahnen} \quad (3.3)$$

$$A_2 = \ln\left(\frac{16}{5}\right) \quad \text{Leiterbahnen Nr. 2} \quad (3.4)$$

$$A_3 = \ln\left(\frac{4}{3}\right) \quad \text{Leiterbahnen Nr. 3, Mitte} \quad (3.5)$$

Wobei:

d : Abstand zwischen zwei Leiterbahnen

ρ : Radius des Leiters

A_i : Korrektursummand für Leiterposition gemäss Abbildung 3.3

Somit kann für jeden Teil der Leitung in einem Modul dessen Induktivität berechnet werden. Diese werden anschliessend summiert (Serieschaltung von Induktivitäten) und als Gesamtinduktivität eines Moduls in unser Modell integriert.

Es wird von einem Leiterquerschnitt von 4 mm^2 ausgegangen, was einen Leiterradius ρ von 1.128 mm ergibt. Dies ist eine gängige Grösse in PV-Installationen.

Die Induktivitäten der Leiterbahnen innerhalb des Moduls können somit bestimmt werden:

$$L_1 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{d}{\rho}\right) + \frac{1}{4} - A_1 \right] = 1.737 \mu\text{H} \quad (3.6)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{d}{\rho}\right) + \frac{1}{4} - A_2 \right] = 1.181 \mu\text{H} \quad (3.7)$$

$$L_3 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{d}{\rho}\right) + \frac{1}{4} - A_3 \right] = 1.453 \mu\text{H} \quad (3.8)$$

Wobei:

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$: magnetische Permeabilität des Vakuums

$l = 1550 \text{ mm}$: Länge einer Leiterbahn

$d = 127 \text{ mm}$: Abstand zweier Leiterbahnen

$\rho = 1.128 \text{ mm}$: Radius des Leiters

$A_1 = -0.6286$: Korrektursummand

$A_2 = 1.1632$: Korrektursummand

$A_3 = 0.2877$: Korrektursummand

Die Gesamtinduktivität der Leiterbahnen in einem Modul ist somit:

$$\underline{\underline{L_{\text{Modul}} = 2 \cdot (L_1 + L_2 + L_3) = 8.74 \mu\text{H}}} \quad (3.9)$$

Es bleibt noch der Ohm'sche Widerstand der Leiterbahn zu bestimmen². Dieser errechnet sich zu:

$$\underline{\underline{R = \frac{\rho \cdot l}{A} = 44.2 \text{ m}\Omega}} \quad (3.10)$$

Wobei:

$$A = 4 \text{ mm}^2$$

: Querschnittsfläche des Leiters

$$\rho = 0.0178 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$$

: Spezifischer Widerstand Leitungskupfer [16]

$$l = (6 \cdot 1550 + 5 \cdot 127) \text{ mm} = 9.935 \text{ m} : \text{Gesamtlänge des Leiters in einem Modul}$$

Mit diesen Informationen kann das Schaltbild für ein PV-Modul bestimmt werden, was die Schaltung in Abbildung 3.4 ergibt. Dieses Modell wird im Folgenden benutzt, um eine Solaranlage zu modellieren.

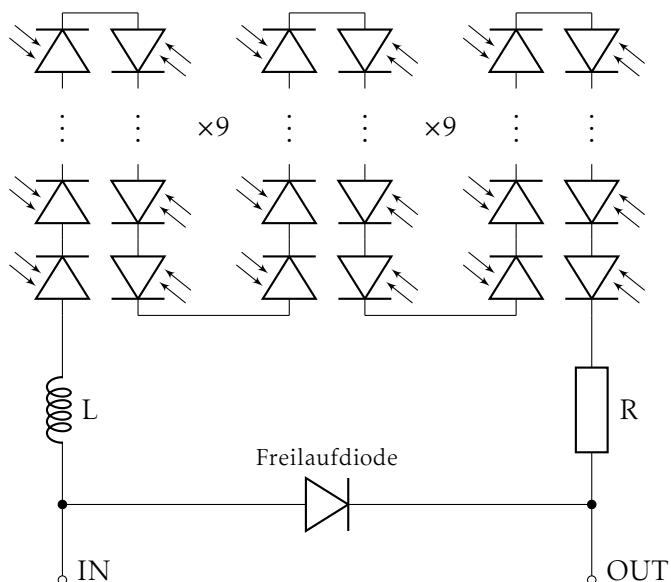


Abbildung 3.4: Ersatzschaltbild für das PV-Modul. Es besteht einem Strang mit 72 Zellen in Serie geschaltet und angeordnet wie auf dem Modul in Abbildung 2.2 auf Seite 4. Zusätzlich ist die parasitäre Induktivität der Leiterbahnen im Modul berücksichtigt und eine Freilaufdiode integriert. Die vollständige LTspice-Schaltung ist in Abbildung B.7 auf Seite 81 dargestellt.

²Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der im Modell der Solarzelle vorkommende Seriewiderstand R_S nicht die Leiterbahnen modelliert, sondern thermische Verluste im Halbleitersubstrat [11]

3.3 Modellierung eines Modulstrangs

Der zu simulierende Modulstrang soll aus 20 Modulen bestehen, die in Serie miteinander verbunden werden. Die Induktivität der Leitungen, welche die Module miteinander verbinden, wird vernachlässigt, da die zugehörigen Distanzen zwischen den Leitern viel grösser sind, als die Distanzen der Leiterbahnen innerhalb eines Moduls (siehe vorheriger Abschnitt).

Es soll jedoch die Induktivität der Anschlussleitung berücksichtigt werden. Dabei soll von einem 20 m langen Doppelleiterpaar ausgegangen werden, das in einem Abstand von 20 mm verlegt worden ist. Dies ist natürlich eine idealisierte Annahme; in der Realität sind diese Leiter weder mit konstant gleichem Abstand noch perfekt gerade verlegt.

Die von Rosa in [15] gegebene Formel für die Induktivität eines geraden, parallelen Leiterpaars lautet³:

$$\underline{\underline{L = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{d}{\rho}\right) + \frac{1}{4} \right] = 25 \mu\text{H}}}$$
(3.11)

Wobei:

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$: magnetische Permeabilität des Vakuums

$l = 20 \text{ m}$: Länge des Leiterpaars (ein Weg)

$d = 20 \text{ mm}$: Abstand der Leiter

$\rho = 1.128 \text{ mm}$: Radius des Leiters

Da zwei parallel verlaufende Leiter im Prinzip einen Kondensator darstellen, soll an dieser Stelle auch die parasitäre Kapazität der zu- und wegführenden Leiterbahnen berücksichtigt werden. Die Formel zur Berechnung dieser Kapazität ist gemäss Kuchling [19]:

$$\underline{\underline{C = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{d}{\rho}\right)} = 193.5 \text{ pF}}}$$
(3.12)

Wobei:

$\epsilon_0 = 8.854 \text{ pF m}^{-1}$: Elektrische Feldkonstante

$\epsilon_r = 1$: Permittivitätszahl von Luft

$l = 20 \text{ m}$: Länge des Leiterpaars (ein Weg)

$d = 20 \text{ mm}$: Abstand der Leiter

$\rho = 1.128 \text{ mm}$: Radius des Leiters

³Auch hier ist Rosa's Formel auf das moderne SI-System konvertiert worden. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Leiter aus Kupfer sind. Dessen relative Permeabilität μ_r liegt bei etwa 1 [17] und kann somit in der Gleichung vernachlässigt werden.

Auch Kuchling gibt in [18] die gleiche Formel.

Der Ohm'sche Widerstand der Anschlussleitung errechnet sich zu:

$$\underline{\underline{R = \frac{\rho \cdot l}{A} = 178 \text{ m}\Omega}} \quad (3.13)$$

Wobei:

$A = 4 \text{ mm}^2$: Querschnittsfläche des Leiters

$\rho = 0.0178 \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$: Spezifischer Widerstand Leitungskupfer [16]

$l = 40 \text{ m}$: Gesamtlänge der Anschlussleitung (beide Wege)

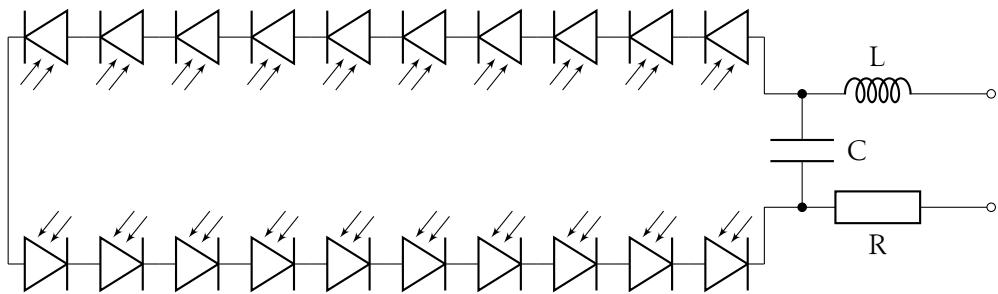


Abbildung 3.5: Modell eines Modulstrangs aus 20 seriell geschalteten Modulen mit Berücksichtigung der Resistivität, Induktivität und Kapazität einer 20 m langen Zuleitung

Abbildung 3.5 zeigt das Ersatzschaltbild eines Modulstrangs aus 20 in Serie geschalteten Modulen mit den parasitären Leiterimpedanzen. Dieses und die vorangegangenen Modelle werden nun in LTspice implementiert und für Simulationen benutzt.

4

Lösungsansätze und Simulationen

Mit den im vorigen Kapitel entwickelten Modellen werden nun drei Lösungsansätze auf ihre Vor- und Nachteile untersucht, um anschliessend eine Variante auszuwählen. Zuerst wird die Einkopplung eines Signals in die DC-Leitung mittels induktiver Kopplung untersucht, gefolgt von der kapazitiven Einkopplung. Zuletzt wird die Machbarkeit der OOK mittels Kurzschluss beurteilt. Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse befindet sich auf Seite 36.

Zur Simulation wird LTspice IV [20] von *Linear Technologies* verwendet. Es ist zu jeder LTspice-Schaltung angegeben, wo die zugehörige Datei auf dem Datenträger gespeichert ist, falls der geneigte Leser selbst simulieren möchte.

4.1 Induktive Einkopplung

Bei der induktiven Einkopplung wird eine Spule um die DC-Leitung gelegt. Auf diese Spule wird vom Sensor das zu übertragende Signal gegeben und die Spule induziert in der DC-Leitung entsprechende Spannungs-Rippel, die vom Master-Gerät ausgewertet werden können. Der entsprechende Schaltkreis ist schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt.

LTspice modelliert diese Situation als gekoppelte Spulen mit je einer Induktivität (L1 und L2 in Abbildung 4.1) und einem Kopplungsfaktor K. Es gilt, diese drei Parameter zu bestimmen.

Wir werden für unsere Simulationen von einer Toroidspule gemäss Abbildung 4.2 mit 20 Primärwicklungen und einer Sekundärwindung (der DC-Leitung) ausgehen. Die relative Permeabilität von ferromagnetischen Materialien kann enorm stark variieren; Werte von einigen Dutzend bis zu mehreren Tausend können auftreten. Wir werden für unseren Kern eine Permeabilitätszahl $\mu_r = 400$ annehmen.

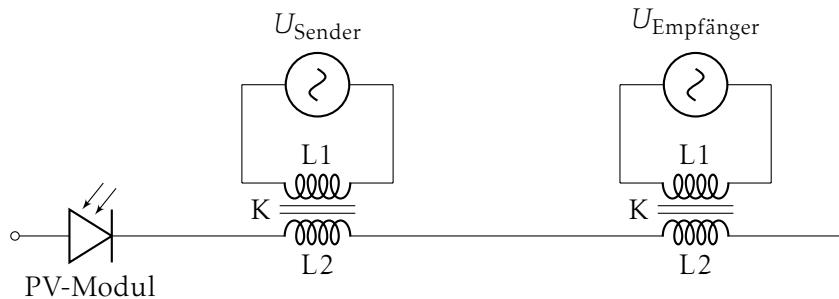


Abbildung 4.1: Induktive Einkopplung

Die Selbstinduktivität unserer Toroidspule errechnet sich somit zu:

$$L_1 = \frac{\mu_0 \mu_r r^2 N_1^2}{2R} \approx \underline{\underline{200 \mu\text{H}}} \quad (4.1)$$

Wobei:

- $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$: magnetische Permeabilität des Vakuums
- $\mu_r = 400$: angenommene relative magnetische Permeabilität des Kerns
- $r = 4 \text{ mm}$: Radius des Kernquerschnitts (Abb. 4.2)
- $R = 8 \text{ mm}$: mittlerer Radius des Toroids (Abb. 4.2)
- $N_1 = 20$: Anzahl Windungen

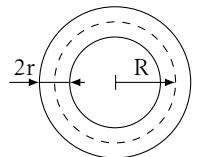
Die Induktivität der sekundären Seite lautet:

$$L_2 = L_1 \cdot \frac{N_2^2}{N_1^2} \approx \underline{\underline{500 \text{ nH}}} \quad (4.2)$$

Wobei:

- $L_1 = 200 \mu\text{H}$: Selbstinduktivität der Primärseite (Gl. 4.1)
- $N_1 = 20$: Windungen Primärseite (Transmitter/Receiver)
- $N_2 = 1$: Windungen Sekundärseite (DC-Leitung)

Der Kopplungsfaktor beschreibt, wie gross der Anteil des magnetischen Flusses ist, welcher beide Spulen durchfliesst. Ein Kopplungsfaktor von null bedeutet, dass die beiden Spulen völlig entkoppelt sind, ein Kopplungsfaktor von 1 heisst, dass der gesamte Fluss, welcher die eine Spule durchfliesst, auch die andere Spule durchfliesst. Es wird hier ein Streuverlust von 5% angenommen, was einen Kopplungsfaktor von 0.95 ergibt.

Abbildung 4.2:
Geometrie der Spule

Es wird zuerst eine vereinfachte Schaltung untersucht, bestehend aus einem Modul, dem Sender und dem Empfänger, dargestellt in Abbildung 4.3.

Abbildung 4.4 zeigt den zugehörigen Spannungsverlauf am Empfänger. Das Signal kommt sauber an, ist aber nicht sehr stark.

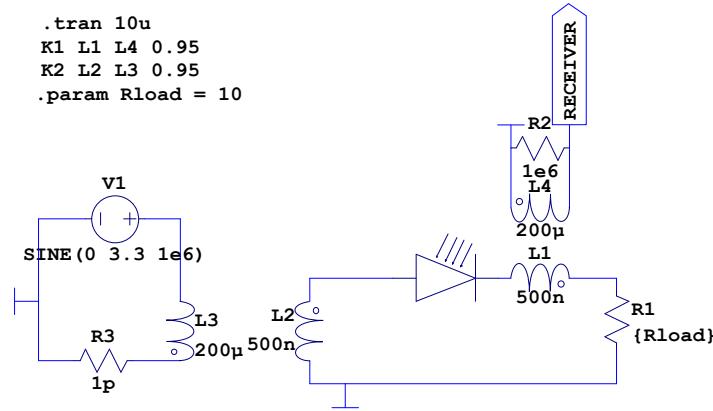


Abbildung 4.3: LTspice-Schaltung für den vereinfachten Schaltkreis zur Simulation der induktiven Einkopplung
Dateipfad: ltspice/inductive/singleModule.asc

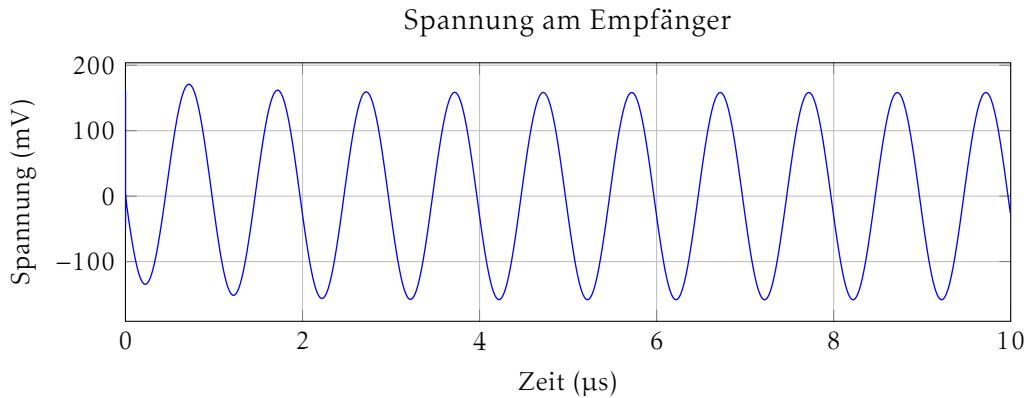


Abbildung 4.4: Simulationsergebniss für die Spannung am Empfänger aus Abbildung 4.3

Zur Simulation eines ganzen Modulstrangs wird die Schaltung aus Abbildung 4.5 benutzt; der Modulstrang basiert dabei auf den Herleitungen aus Abschnitt 3.3 ab Seite 19.

Abbildung 4.6 enthält Simulationsergebnisse für verschiedene Lastimpedanzen bei einer Senderfrequenz von 1 MHz. Die zugehörigen Impedanzkombinationen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Simulationen mit höheren resistiven Anteilen wären interessant, allerdings hat LTspice bei weiterem Ansteigen von R_{load} (vermutlich numerische) Schwierigkeiten und die Simulationszeit steigt auf Tage bis Wochen (falls sie überhaupt jemals endet und die Software nicht in einem Kreis von nicht konvergierenden Bedingungen festhängt).

Es ist zu erkennen, dass das Signal am Empfänger nicht besonders stark von der Lastimpedanz abhängt. Allerdings ist die Signalamplitude ziemlich klein und beträgt nur einige Millivolt. Dafür ist das Signal in seiner Form nur sehr schwach verzerrt, was wir als einen sehr positiven Punkt bewerten. Vorausgesetzt, das Signal wird nicht von Störungen auf der Leitungen überdeckt, würde es sich gut für Filterung und Verstärkung eignen. Ob dies wirklich der Fall ist, kann im Rahmen dieses Projekts allerdings nicht eruiert werden, da wir weder einen genügend grossen Modulstrang noch die zur gründlichen Untersuchung erforderliche Zeit zur Verfügung haben. Soll das System aber wirklich in der Praxis zum Einsatz kommen, muss dieser Punkt sicherlich genauer untersucht werden.

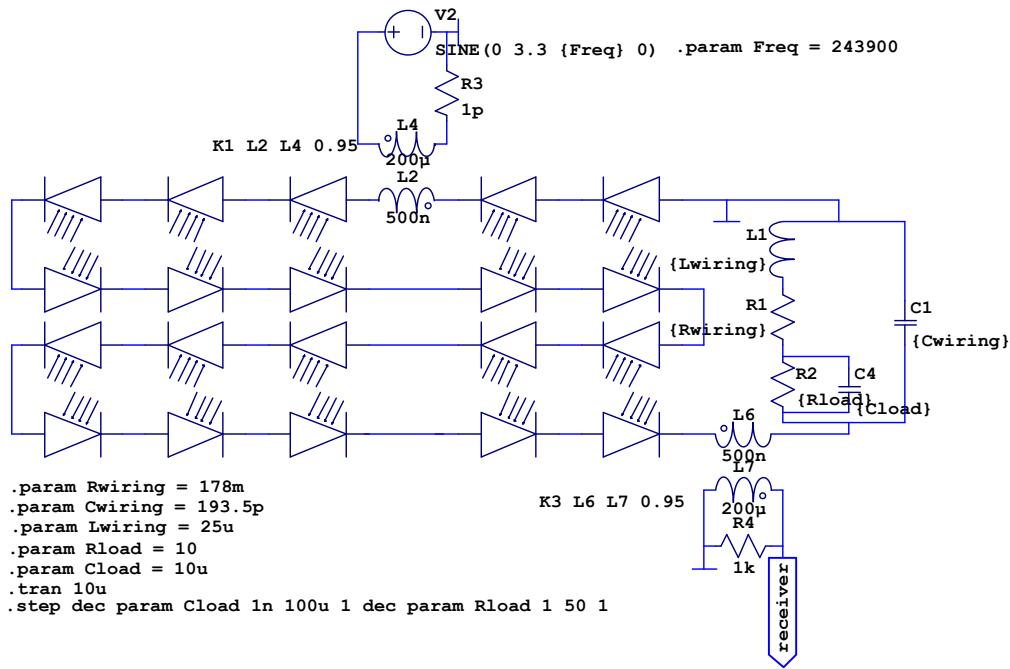


Abbildung 4.5: Schaltung zur Simulation eines Modulstranges mit parasitären Impedanzen in der Zuleitung und komplexer Lastimpedanz.

Dateipfad: ltspice/inductive/string.asc

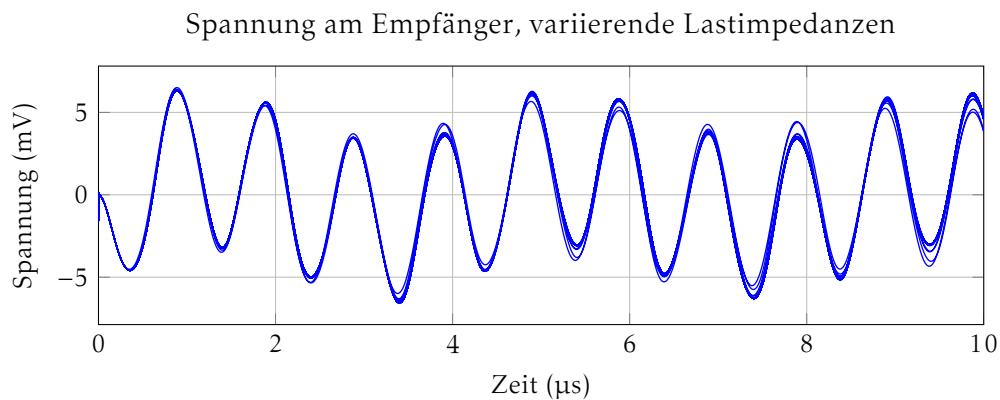


Abbildung 4.6: Simulationsergebniss für die Spannung am Empfänger aus Abbildung 4.5 mit den Parametern aus Tabelle 4.1

Tabelle 4.1: Lastimpedanzparameter für die Simulationsergebnisse aus Abbildung 4.6

Cload	Rload	Cload	Rload	Cload	Rload
1 nF	1 Ω	1 nF	10 Ω	1 nF	50 Ω
10 nF	1 Ω	10 nF	10 Ω	10 nF	50 Ω
100 nF	1 Ω	100 nF	10 Ω	100 nF	50 Ω
1 μF	1 Ω	1 μF	10 Ω	1 μF	50 Ω
10 μF	1 Ω	10 μF	10 Ω	10 μF	50 Ω
100 μF	1 Ω	100 μF	10 Ω	100 μF	50 Ω

Interessant ist der Betrieb des Senders mit Eigenfrequenz (ca. 240 kHz in diesem Fall) des Modulstrangs¹. Der zugehörige Spannungsverlauf am Empfänger ist in Abbildung 4.7 abgebildet. Hier wird ein vielfach grösserer Signalpegel erreicht; al-lerdings benötigt das Signal etwa 100 μ s, bis es wirklich seine maximale Amplitude erreicht hat. Da bei diesem System jedoch keine sehr hohen Datenraten benötigt werden, muss dies nicht unbedingt kritisch sein.

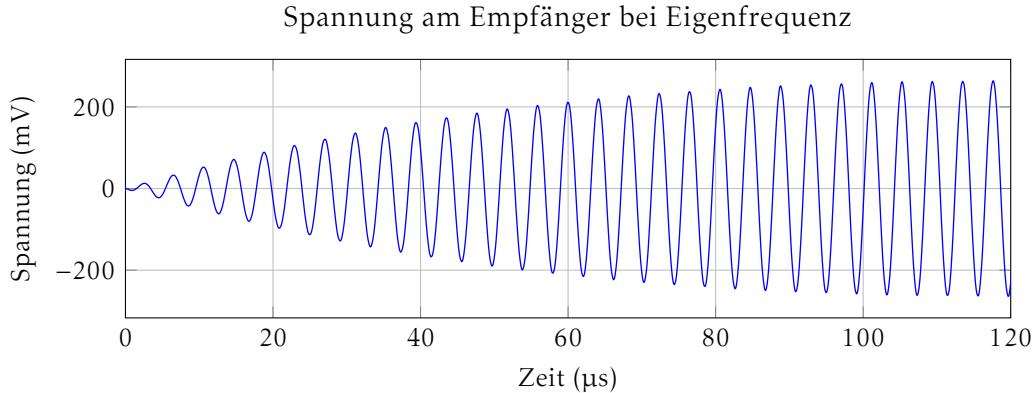


Abbildung 4.7: Simulationsergebniss für die Spannung am Empfänger aus Abbildung 4.5

Abschliessend kann man zur induktiven Kopplung sagen, dass sie bei kleineren Aufbauten gut funktionieren sollte, dass aber bei grösseren Anlagen möglicherweise zusätzliche Massnahmen nötig sein könnten, um das Signal klar empfangen und auswerten zu können. Dies könnte z.B. bedeuten, dass unser System die Eigenfrequenz des Modulstrangs selbst ausmisst und sich entsprechend selbst konfiguriert, um stets auf der optimalen Frequenz übermitteln zu können.

Das in den LTspice-Schaltungen verwendete Symbol für ein PV-Modul ist im Anhang auf Seite 79 erklärt.

¹Die Eigenfrequenz ist hier nicht mathematisch bestimmt, sondern aus den Simulationen abgelesen worden.

4.2 Kapazitive Einkopplung

Bei der kapazitiven Einkopplung wird eine Signalquelle via Kondensator mit der DC-Leitung verbunden. Bei jedem Modul und am Ende des Modulstrangs ist dabei eine Einkopplung vorgesehen. Das Prinzip ist schematisch in Abbildung 4.8 dargestellt. Für die nachfolgenden Versuche wird eine Trägerfrequenz von 1 MHz angenommen, sofern nicht anders angegeben.

Sowohl Master-Gerät wie auch Sensor können dabei Signale senden und empfangen; das Verfahren ist bidirektional.

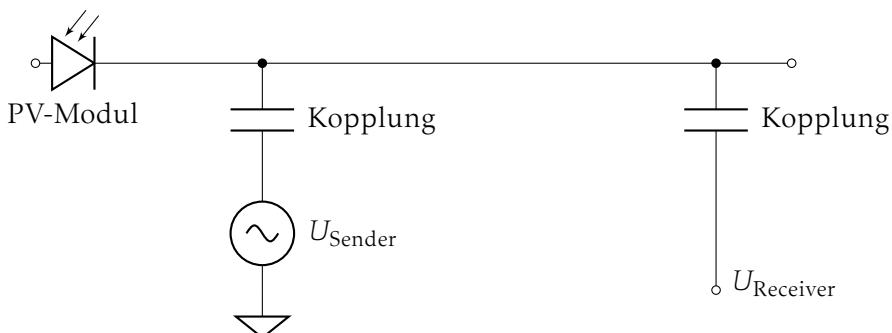


Abbildung 4.8: Vereinfachte Darstellung der kapazitiven Einkopplung mit Sender auf der linken Seite und Empfänger auf der rechten Seite. Prinzipiell ist das Verfahren jedoch bidirektional.

Zur Simulation in LTspice wird die Schaltung in Abbildung 4.9 benutzt. Sie basiert auf dem Modell eines Modulstrangs von Abbildung 3.5 (Seite 20), ergänzt um die Ein- und Auskopplungsschaltung. Zusätzlich wurde eine komplexe Lastimpedanz eingebaut.

Es werden der Signalpegel am Empfänger bei zwei verschiedenen Senderpositionen untersucht: Eine zu Beginn des Strangs, eine am Ende des Strangs. Ist der Sender am Anfang des Strangs positioniert, muss das Signal durch alle restlichen Module, um an den Empfänger zu gelangen; es sind dabei Verzerrungen und Abschwächungen des Signals zu beobachten.

Die in LTspice benutzte Schaltung ist in Abbildung 4.9 gezeigt. Die zugehörigen Simulationsresultate sind in Abbildung 4.10 zu sehen.

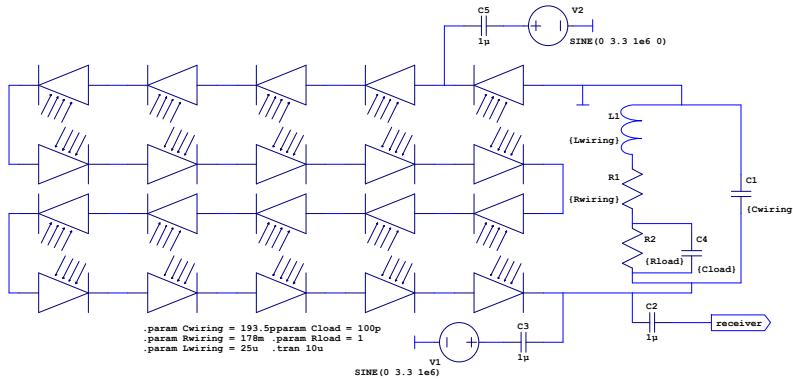


Abbildung 4.9: Simulationsschaltung eines Modulstrangs mit kapazitiver Einkopplung eines Signals. Die Sender werden durch Sinus-Spannungsquellen simuliert. Es ist jeweils nur ein Sender aktiv in der Simulation, der andere wird abgehängt.

Dateipfad: lts spice/capacitive/string.asc

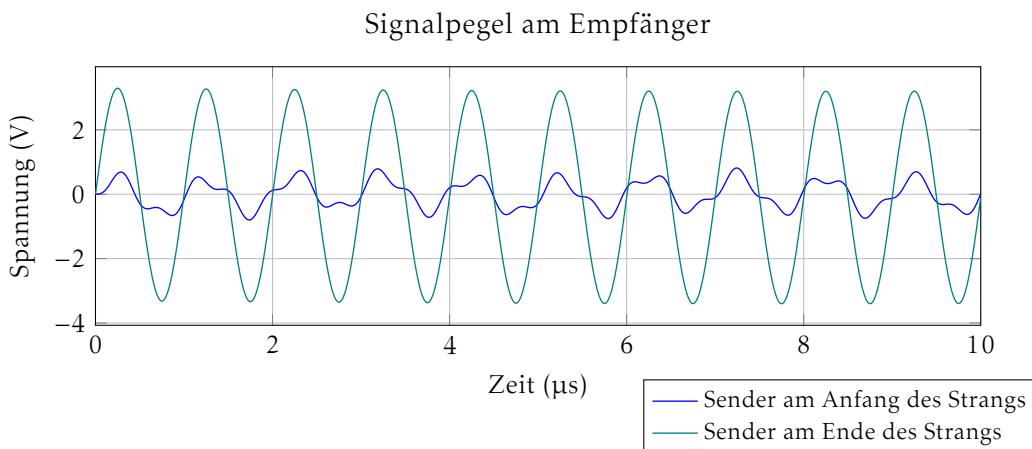


Abbildung 4.10: Transientensimulation der kapazitiven Einkopplung am Anfang des Modulstrangs und am Ende des Modulstrangs. Ist der Sender am Anfang des Strangs, wird das Signal merklich abgeschwächt und verzerrt.

4.3 Signalcodierung mittels Kurzschluss

Bei dieser Lösungsvariante wird jeweils ein Modul gesteuert kurzgeschlossen. Dies verursacht (theoretisch) kurze Spannungseinbrüche auf der DC-Leitung, welche vom Empfänger ausgewertet werden können, wie in Abbildung 2.10 auf Seite 12 vereinfacht dargestellt.

Da die Spannungseinbrüche auf der Leitung bei diesem Verfahren sehr abrupt sind, können die im System vorhandenen Induktivitäten gemäss $v = L \cdot \frac{di}{dt}$ (Spannung in Abhängigkeit der Stromänderung über einer Induktivität) und der Lenz'schen Regel diesen abrupten Änderungen Widerstand leisten. Wenn diese Gegenspannung zu gross ist, kann es sein, dass das Signal kompensiert wird und nicht mehr auswertbar ist.

Es werden in diesem Abschnitt zuerst Sender und Empfänger separat untersucht; anschliessend wird das Gesamtsystem evaluiert.

4.3.1 Sender

Das gesteuerte Kurzschließen des Moduls wird mit einem MOSFET umgesetzt, welcher zwischen Eingang und Ausgang des Moduls durchschalten kann und vom Microcontroller auf dem Sensor gesteuert wird. Abbildung 4.11 zeigt diesen Aufbau schematisch.

Die Ansteuerung des Transistors erfolgt mit 3.3 V, da dies die maximale Spannung ist, welche der auf dem Sensor platzierte Microcontroller ausgeben kann. Es muss dabei beachtet werden, dass der gewählte Transistor vollständig durchschaltet und in Sättigung betrieben wird, damit der Strom möglichst unbehindert am kurzgeschlossenen Modul vorbeifliessen kann.

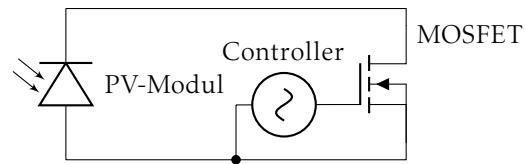


Abbildung 4.11: Gesteuerter Kurzschluss eines Solarmoduls mit einem microcontroller-gesteuerten Transistor.

Ein weiterer kritischer Punkt ist, dass die im Modul (oder sonstwo im Stromkreis) vorhandenen Kapazitäten zu starken Stromspitzen führen können, welche den Transistor beschädigen könnten.

Zuerst wird ein vereinfachtes Szenario simuliert: Ein einzelnes Modul mit einem kurzschliessenden Transistor und einer Ohm'schen Last, dargestellt in Abbildung 4.12.

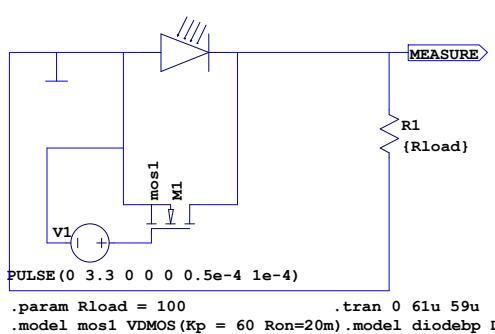


Abbildung 4.12: Simulationsschema für ein einzelnes Modul mit kurzschliessendem Transistor und angeschlossener Last von 1 kΩ.

Dateipfad: ltspace/short/single.asc

Wie in Abbildung 4.13 sichtbar, kommt am Knoten MEASURE ein recht klares Signal an. Der Strom durch den MOSFET oszilliert bei durchgeschaltetem Transistor ungefähr um den im Mittel vom Modul ange-

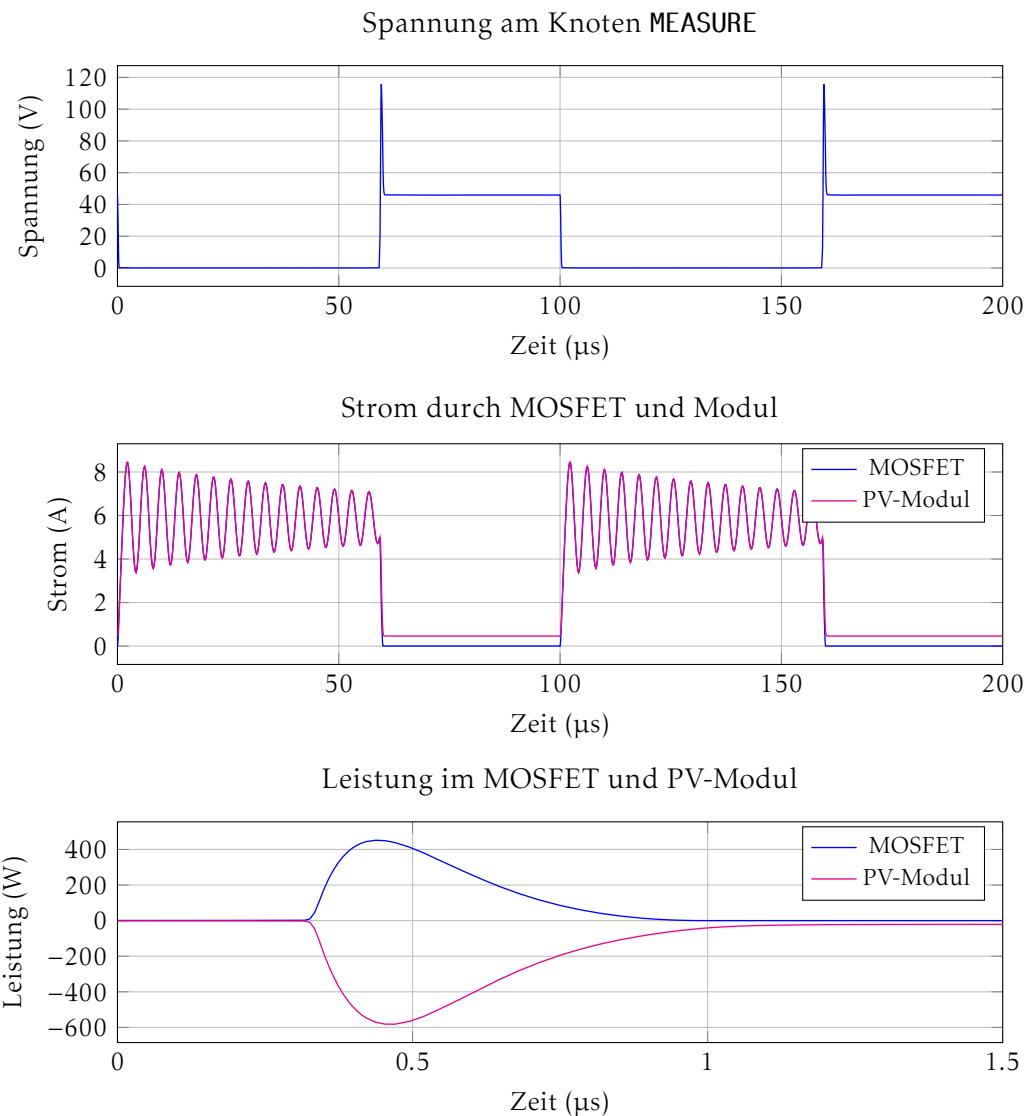


Abbildung 4.13: Transientensimulation für einen gesteuerten Kurzschluss über ein Solar-
modul mit einer rein Ohm'schen Last von 100Ω gemäss der Schaltung in Abbildung 4.12.
Positives Vorzeichen bedeutet aufgenommene Leistung (also thermische Verluste).

gegebenen Strom. Auffallend sind die Spannungs- und Leistungsspitzen, welche beim Deaktivieren des Transistors auftreten. Das PV-Modul gibt für kurze Zeit beinahe 600 W ab und der MOSFET absorbiert mehr als 400 W, allerdings sind diese Spitzen sehr kurz und die thermischen Verluste im Transistor sind im Durchschnitt bei einem Sendevorgang von 1 ms lediglich etwa 1 W.

4.3.2 Master-Gerät (Empfänger)

Der Empfänger basiert auf dem Prinzip der Klemmenschaltung. Es existieren verschiedene Implementationen; die hier gewählte ist schematisch in Abbildung 4.14 dargestellt. Der Zweck dieser Schaltung ist, den DC-Anteil aus dem ankommenden Signal auszukoppeln und den Pegel des verbleibenden AC-Signals in definierte Grenzen zu zwingen, sodass es anschliessend in die Empfängerschaltung weitergeleitet werden kann, ohne diese zu beschädigen.

Im vorliegenden Fall muss die Klemmenschaltung die Spannungsabfälle in der Größenordnung von einigen Dutzend Volt (ein kurzschiessendes Modul) ausfiltern und anschliessend auf ein Signal zwischen 0 V und 3.3 V konvertieren, welches dann vom Empfänger ohne Gefahr von Schäden ausgewertet werden kann.

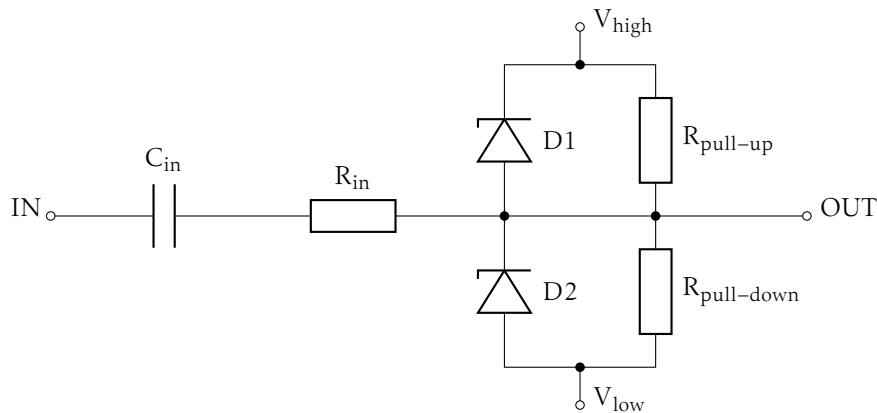


Abbildung 4.14: Die hier verwendete Klemmenschaltung

Das Funktionsprinzip ist dabei wie folgt:

- C_{in} koppelt das AC-Signal aus der Leitung aus (ist also ein sehr einfacher Hochpassfilter).
- R_{in} begrenzt den Strom, welcher in die Klemmenschaltung fliest, sollte also hochohmig sein.
- $R_{pull-up}$ und $R_{pull-down}$ sorgen dafür, dass die Spannung auf dem mittleren Schaltungsschnitt immer definiert ist.
- V_{high} und V_{low} sind die gewünschten obere respektive untere Pegelgrenze des Ausgangssignals. In unserem Fall sind dies 3.3 V und 0 V bzw. Ground.
- Die beiden Dioden D1 und D2 sind Zener-Dioden. Steigt die Spannung am Ausgang auf einen Wert über $V_{low} + V_{breakdown,D2}$, wird die Diode D2 durchbrechen. Somit steigt die Spannung nicht über den durch die untere Klemmenspannung und die Durchbruchspannung der Diode definierten Wert. Sinkt die Spannung am Ausgang unter $V_{high} - V_{breakdown,D1}$, bricht die obere Diode durch, womit ein Minimalwert für die Spannung am Ausgang definiert ist.

Zur Simulation wird in LTspice die Schaltung aus Abbildung 4.15 benutzt. Einige Simulationsergebnisse sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Es wird sowohl ohne Last wie auch mit Ohm'sch-kapazitiver Last simuliert. Eine abgeschätzte Leitungsimpedanz von $100 \mu\text{H}$ ist ebenfalls in die Simulation integriert.

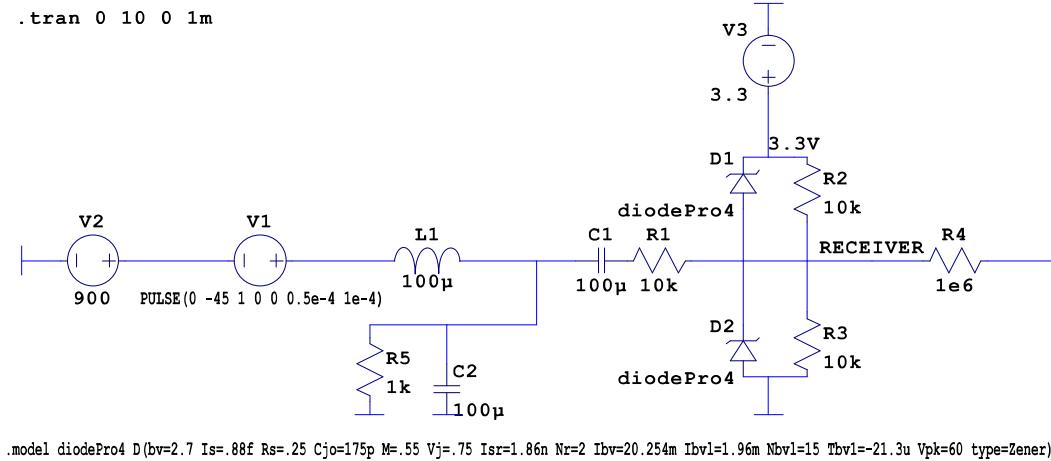


Abbildung 4.15: Simulationsschema für die Simulation der Klemme am Empfänger.
Dateipfad: ltspice/short/receiver.asc

Abbildung 4.15 zeigt die LTspice-Schaltung, welche zur Simulation benutzt wird. Das an kommende Signal wird durch einen negativen Spannungspuls von -45 V am Eingang simuliert (Leerlaufspannung eines PV-Moduls), welche die an kommende DC-Spannung von 900 V einbrechen lässt. In der Leitung ist eine parasitäre Induktivität von $100 \mu\text{H}$ eingebaut

Ebenfalls gezeigt ist eine Ohm'sch-kapazitive Last von $1 \text{k}\Omega \parallel 100 \mu\text{F}$. Die Simulationsergebnisse ohne Last sind im oberen Plot in Abbildung 4.16 gezeigt; der untere Plot in der gleichen Abbildung zeigt das simulierte Verhalten der Schaltung mit der in Abbildung 4.15 gezeigten Last.

Auf der rechten Seite ist ein Pull-down Widerstand auf Ground eingebaut, um einen definierten Signalpegel zu haben. Dies ist für die Simulation notwendig, gehört aber nicht per se zur Klemmenschaltung.

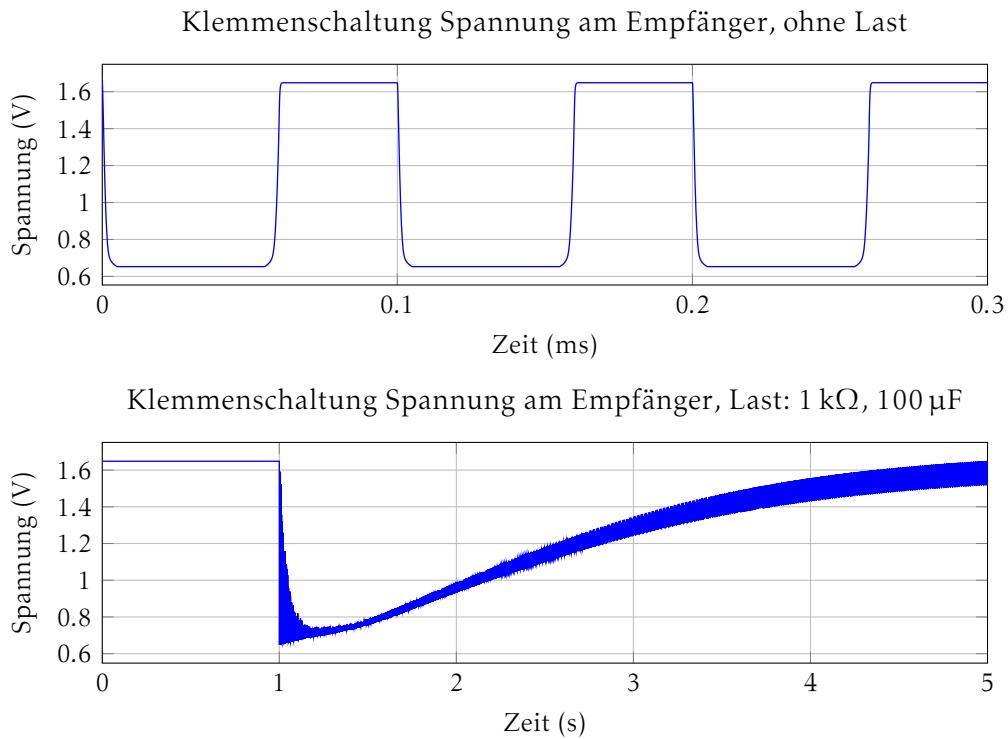


Abbildung 4.16: Simulation Empfänger. Die obere Kurve ist das Signal am Empfänger ohne angeschlossene Last. Der Übertragungsvorgang im unteren Bild beginnt bei einer Sekunde. Die Schaltungsfrequenz ist 10 kHz

Wie an Abbildung 4.16 gesehen werden kann, hat die Art der angehängten Last einen merklichen Einfluss auf das ankommende Signal. Ein grosser kapazitiver Anteil in der Last reduziert die Amplitude des ankommenden Signals bedeutend und führt einen sehr lange (etwa fünf Sekunden!) dauernden Entlade- und Ladevorgang der kapazitiven Anteile im Kreis ein.

4.3.3 Gesamtsystem

Im Folgenden werden der oben untersuchte Transmitter und Empfänger in den bereits in Abschnitt 3.3 ab Seite 19 vorgestellten Modulstrang aus 20 Modulen mit einer 20 m langen Anschlussleitung (pro Richtung) eingebaut und das Verhalten dieses Systems untersucht.

Die zugehörige Simulationsschaltung für LTspice ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

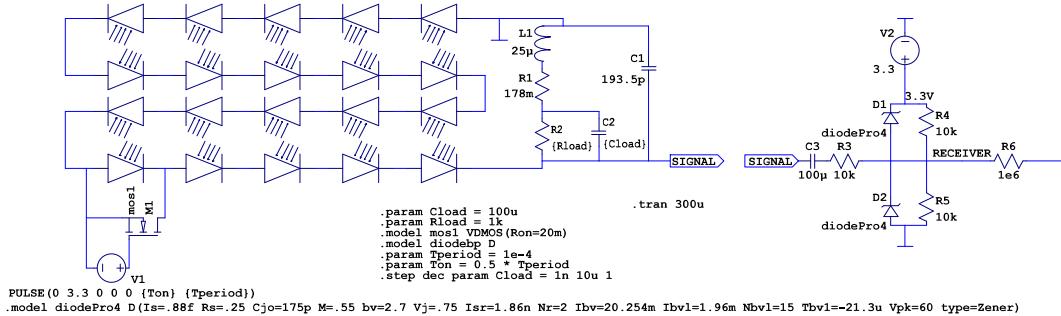


Abbildung 4.17: Gesamte Simulationsschaltung für die Kurzschlussmethode
Dateipfad: ltspice/short/string.asc

Wie in Abbildung 4.18 zu sehen, hat die angeschlossene Last einen beträchtlichen Einfluss auf das Signal, welches beim Empfänger ankommt (wie auch schon im vorigen Abschnitt beobachtet). Bei einem Ohm'schen Lastwiderstand von 1 kΩ und einer Lastkapazität von bereits 100 nF kommt anstatt eines Rechteckpulses eine Doppelschwingung beim Empfänger an; steigt die Grösse der parasitären Komponente der Last auf 1 mF, ist vom Signal am Empfänger bei der eingestellten Frequenz nicht mehr viel zu sehen.

Auch die Ohm'sche Komponente der Last hat bedeutenden Einfluss; ist sie zu klein, sinkt die Signalamplitude am Empfänger stark (blaue Kurve im unteren Plot von Abbildung 4.18).

Die Gesamtbeurteilung dieses Ansatzes ist gemischt: Prinzipiell könnte es möglich sein, eine funktionierende Implementation zu entwickeln. Allerdings gibt es Faktoren, welche erhebliche Auswirkungen auf die Erfolgschancen ausüben haben, und die wir nicht beeinflussen können, oder deren genaue Untersuchung im Rahmen dieses Projekts aus Zeit- und Materialgründen nicht möglich ist.

Sollte diese Lösungsvariante implementiert werden, müssten detailliertere Untersuchungen gemacht werden. Nicht nur muss das Verhalten des PV-Moduls (bzw. des Modulstrangs) bekannt sein, es müssen auch detaillierte Informationen über die angehängten Lasten eingeholt werden. Insbesondere muss das Verhalten des Wechselrichters unter verschiedenen Betriebsbedingungen (Last, momentane Leistung der PV-Modulstränge, allenfalls weitere unbekannte Parameter) bekannt sein. Abhängig von den Charakteristiken der gesamten mit dem Modulstrang verbundenen Schaltung könnte es sein, dass diese Lösungsvariante nicht implementierbar ist. Oder es müssten möglicherweise weitere Schaltkreise entwickelt und eingebaut werden,

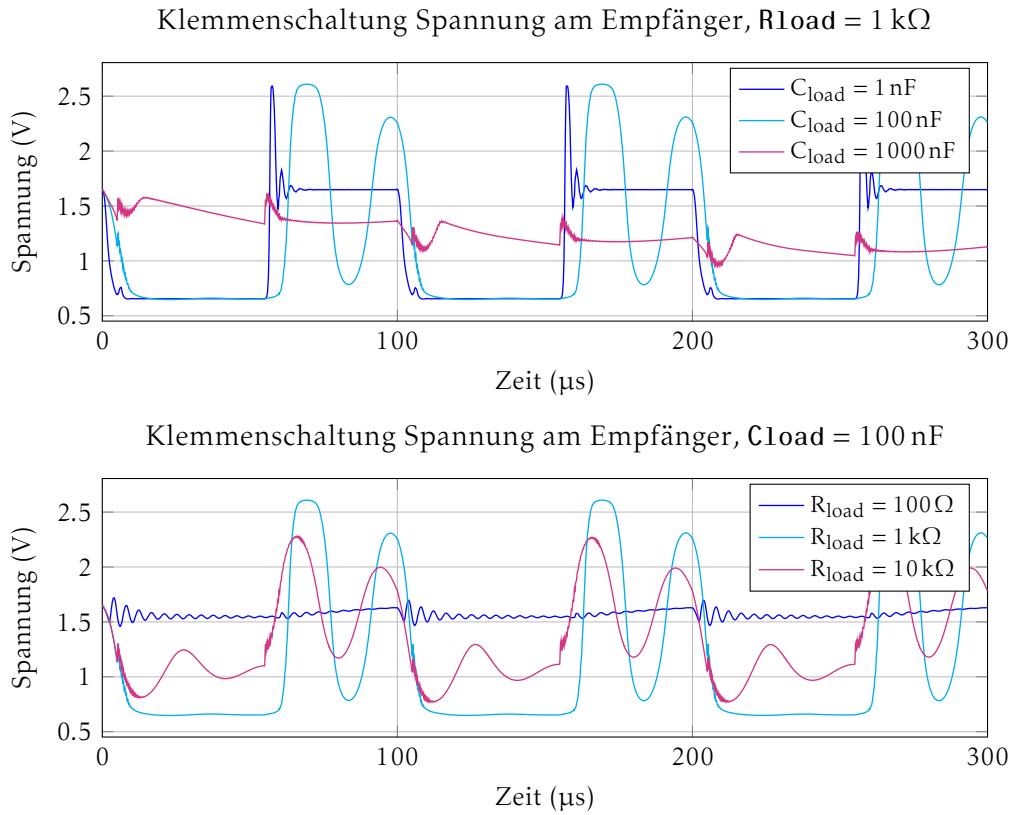


Abbildung 4.18: Simulationsergebnisse für das Signal am Knoten RECEIVER aus Abbildung 4.17 für Lasten mit verschiedenen kapazitiven Anteilen C_{load} (obere Plots) und resistiven Anteilen R_{load} (untere Plots). Die Übertragungsfrequenz beträgt 10 kHz.

um mit dem Verhalten des Wechselrichters und den an ihn angehängten Lasten korrekt umgehen zu können. Dies wiederum wäre nicht wirklich im Sinne dieser Lösung, da ihre grosse Attraktivität genau darin liegen würde, dass ihr Schaltungs- und Materialaufwand (theoretisch) sehr gering ist.

Grundsätzlich finden wir diese Lösungsvariante aufgrund des enorm simplen Prinzips zwar sehr interessant. Da dies jedoch (soweit uns bekannt) absolutes Neuland ist und wir die Ressourcen nicht haben, um einen Modulstrang oder das an einen Modulstrang angehängte System genau genug zu untersuchen (also ausmessen statt lediglich simulieren), beurteilen wir unsere Erfolgsschancen mit dieser Methode als gering.

4.4 Schlussfolgerungen

Die in den vorigen Abschnitten gemachten Beobachtungen sind in Tabelle 4.2 in einer Übersicht zusammengefasst.

Die Kurzschlussvariante wird aufgrund der starken Lastabhängigkeit und der Neuartigkeit des Konzepts nicht weiterverfolgt. Wie bereits angemerkt halten wird diesen Ansatz zwar für sehr interessant, beurteilen aber unsere Erfolgsschancen im Rahmen eines Semesterprojekts als zu gering, um diese Variante weiter zu verfolgen.

Bei der kapazitiven Einkopplung hat der Ort, an dem die Einkopplung in den Strang erfolgt, einen grossen Einfluss nicht nur auf die Signalamplitude beim Empfänger, sondern auch auf die Form des Signals. Dies beurteilen wird als nicht optimal, da allenfalls komplexe Lösungen nötig wären, um das Signal am Empfänger überhaupt noch als solches erkennen zu können.

Aufgrund der niedrigen Verzerrung des Signals bei der induktiven Einkopplung wird diese Variante implementiert. Die Signalamplitude beim Betrieb in einem Strang mit mehreren Modulen kann zwar stark abfallen, jedoch ist selbst unter diesen Umständen das Signal prinzipiell noch sehr sauber und könnte allenfalls wieder herausgefiltert und verstärkt werden. Alternativ könnte in einer weiteren Entwicklungsstufe eine Lösung implementiert werden, welche den Strang, in dem ein Sensor installiert ist, ausmisst, und automatisch bei der optimalen Frequenz (innerhalb von spezifizierten Grenzen) sendet.

Tabelle 4.2: Gegenüberstellung der drei Lösungsvarianten

KRITERIUM	INDUKTIVE KOPPLUNG	KAPAZITIVE KOPPLUNG	KURZSCHLUSS
Komplexität der Schaltung	mittel	mittel	simpel
Neuartigkeit des Konzepts	niedrig	niedrig	hoch
Kosten	hoch	mittel	klein
Stärke des Signals am Empfänger	bei Resonanz gut, kann sonst stark abfallen	variiert stark mit Position im Strang	variiert stark mit Last
Verzerrung des Signals am Empfänger	schwache Verzerrung	variiert mit Position im Strang, Signal kann sehr stark verzerrt werden	variiert stark mit Last

5

Hardware

Dieses Kapitel dokumentiert die Komponentenwahl und das Schaltungs-Design der Sensorplatine und des Master-Geräts. Die wichtigsten Komponenten werden vorgestellt, ihre Auswahl begründet und die nötigen Beschaltungen erklärt. Es wird ebenfalls auf kritische Punkte bei der Hardware-Entwicklung eingegangen.

5.1 Sensorplatine

Das Sensorboard besteht aus einer CPU, welche alle Komponenten koordiniert, einem Modulator und einem Demodulator zur Kommunikation und einem Buck-Konverter, der die Netzspannung für das Board transformiert.

Als CPU dient ein Atmel SAM D09 (Bereich 3 in Abbildung 5.3). Dieser wird verwendet, weil er der günstigste Prozessor in seiner Klasse ist und alle notwendigen Funktionen mitbringt. Der Mikrochip hat einen 12 Bit-ADC, ein CRC-Modul, eine 32 Bit ARM-Architektur und braucht extrem wenig Leistung.

Zum Speisen des Boards wird ein LMR16006 von Texas Instruments verwendet (Bereich 1 in Abbildung 5.3). Dieser kann die gesamte Spanne der Modulspannung von 12 V bis 60 V ohne Probleme auf 3.3 V transformieren, welche das Board versorgt.

Als Modulator dient ein Voltage Controlled Oscillator (VCO) auf dem 74HC4640-Chip von Texas Instruments (Bereich 2). Dieser kann mit der richtigen Beschaltung Frequenzen von wenigen Kiloherz bis mehreren Megahertz erzeugen.

Zum Demodulieren wird ein einfaches Tiefpassfilter mit einer Diode und einem Verstärker benutzt (Bereich 6).

Die Messung der Versorgungsspannung ist mit einem Spannungsteiler implementiert, zu finden in Bereich 4 von Abbildung 5.3.

Bereich 5 enthält zwei LEDs und einen Schalter, welche zu Statusangaben und Debuggen am Sensor direkt verwendet werden können.

Im Folgenden werden die einzelnen Teilschaltungen dokumentiert und die Komponentenwahl begründet.

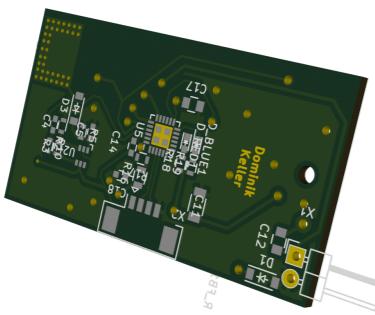


Abbildung 5.1: PCB, Vorderseite

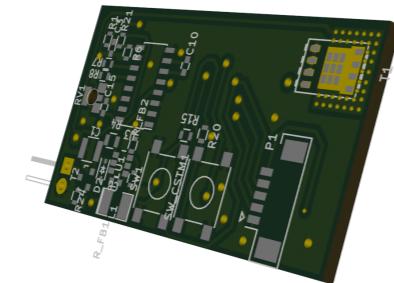


Abbildung 5.2: PCB, Rückseite

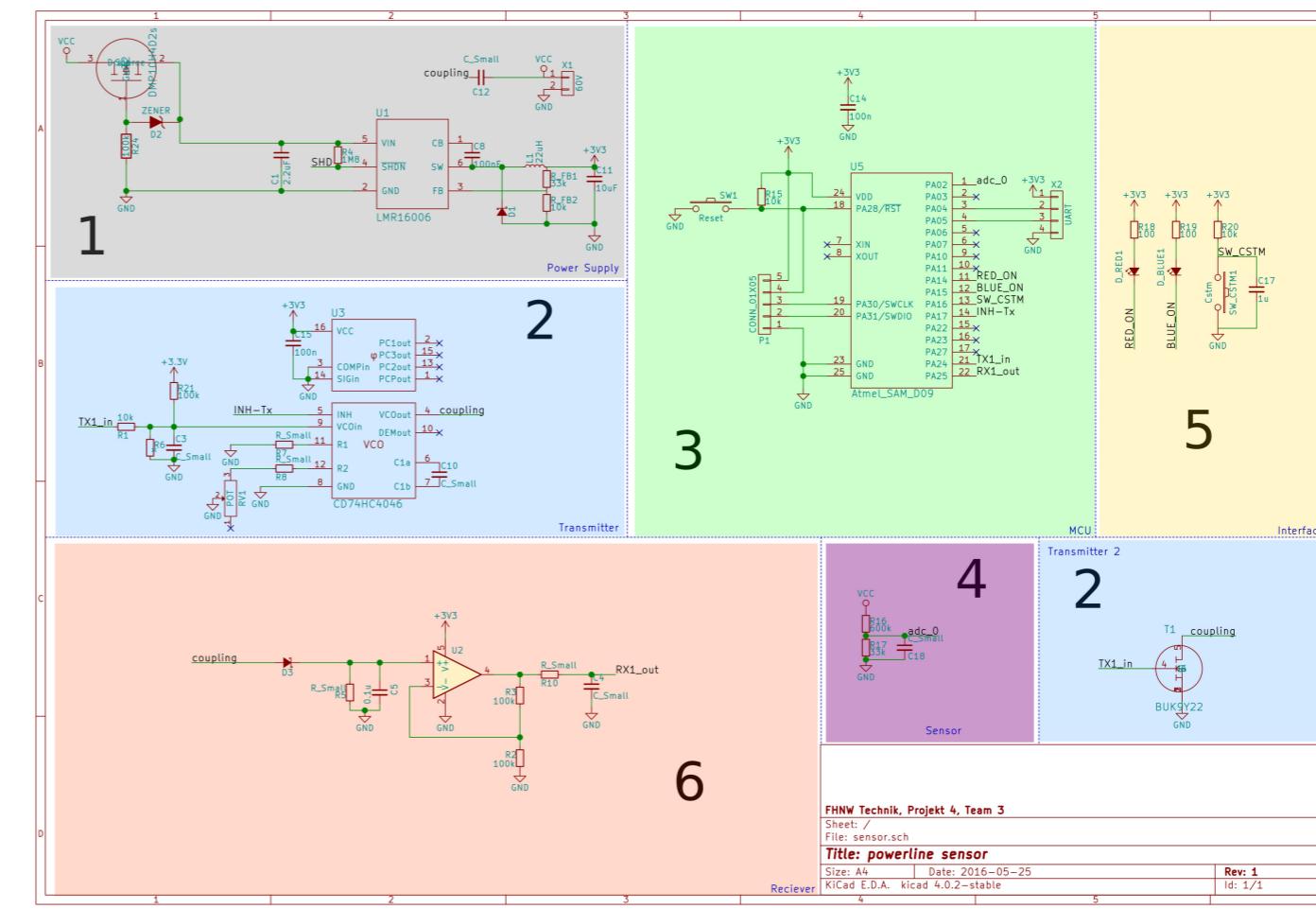


Abbildung 5.3: Schema des Sensors. Eine Grossversion ist in Anhang zu finden, die einzelnen Baugruppen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben und grösser abgebildet.

5.1.1 Speisung

Die Speisung der Schaltung übernimmt ein LMR16006. Er verkraftet am Input bis 63 V und sollte so die an handelsüblichen PV-Modulen anliegenden Spannungen verkraften (siehe auch Anhang A auf Seite 76). Er kommt auch mit 4 Volt am Eingang noch klar. Da die Versorgungsspannung im Verlauf des Tages zwischen 12 V und 60 V schwanken kann, ist der LMR16006 soweit bestens für unsere Schaltung geeignet.

Er hat einen sehr konstanten Wirkungsgrad von 70 bis 80 Prozent, je nach Speisespannung.

Der LMR16006 kann maximal 600 mA liefern, was ausreicht, wenn man einen genug grossen Pufferkondensator für Leistungsspitzen einbaut ($10 \mu\text{F}$ in unserem Fall, rechts in Abbildung 5.4).

Zudem hat dieser Spannungsregler einen typischen Quiescent Current von nur $28 \mu\text{A}$. Damit ist er auch extrem stromsparend. Die Beschaltung wurde nach Empfehlung des Datenblatts [21] gewählt, welche garantiert, dass Powerspikes gut abgefangen werden. R_{FB1} und R_{FB2} wurden im Verhältnis 1 : 3.3 gewählt, da 3.3 V die Spannung ist, die wir am Ausgang anstreben.

Der Active Low Shutdown Pin wird dauernd auf High gezogen, damit der Regler immer an ist sobald am Eingang Spannung anliegt.

Damit die Montage einfacher ist, ist ein Verpolungsschutz eingebaut. Dieser besteht aus einem P-Fet, einer Zenerdiode und einem Gate-Vorwiderstand (linke Seite in Abbildung 5.4).

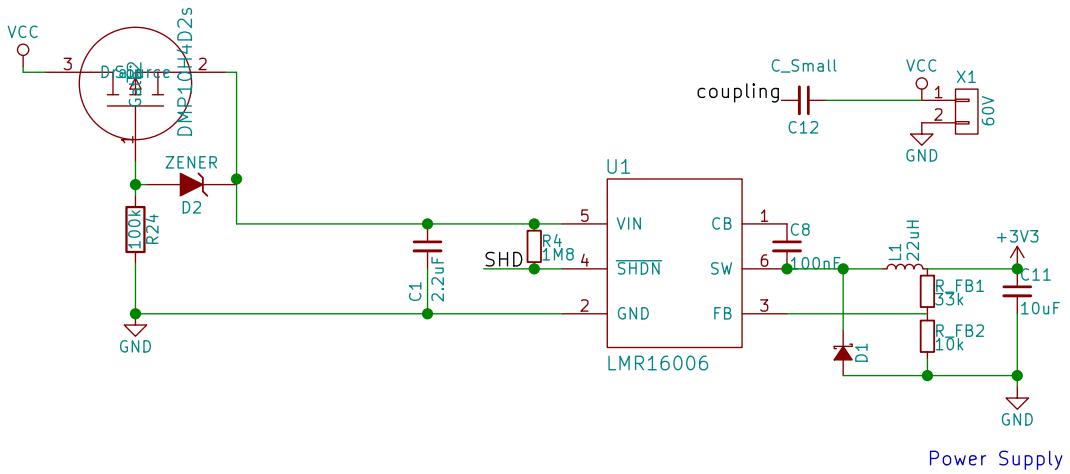


Abbildung 5.4: Speisung Sensor

5.1.2 Transmitter

Der Transmitter besteht aus einem einfachen VCO, der das Signal auf die Spannungsversorgung aufmoduliert. Dafür wird am VCO_{in} mithilfe eines Spannungsteilers eine fixe Spannung angelegt. Mit der korrekten Wahl von R7, R8 und C10 kann die Resonanzfrequenz für die Leitung erreicht werden, mit der dann moduliert wird. Diese Werte sind so gewählt, wie es die Graphen im Datenblatt [22] zeigen. Es wird eine Frequenz von 20 MHz ausgewählt. Das Signal wird moduliert, indem der UART TX Pin direkt am INH Pin den VCO ein- und ausschaltet und somit ein On-Off Keying zustande bringt. Hier ist wichtig, dass der Pin Active High ist.

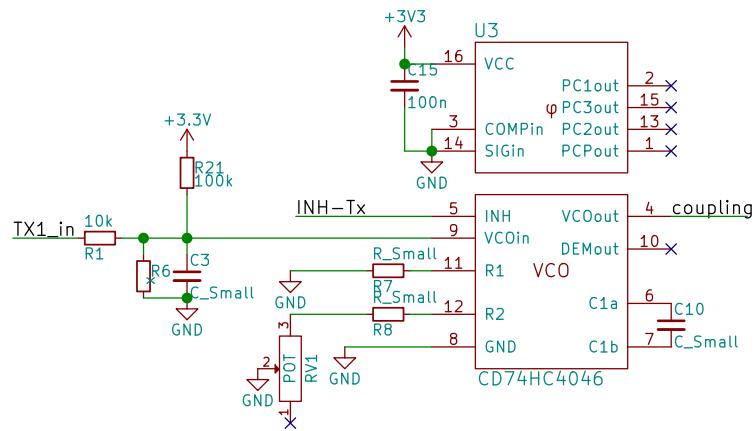


Abbildung 5.5: Transmitter Sensor

5.1.3 Microcontroller

Der Mikrokontroller braucht bis auf einen Pull-Up-Widerstand am Active Low Reset und einem Stabilisierungskondensator an der Spannungsversorgung keine spezielle Beschaltung. Der Mikrochip ist so beschaltet, dass die beiden UART-Linien verfügbar sind; eine zum Senden über die Leitung und eine zum Debuggen. Ebenfalls zu einem Stecker verbunden ist die Programmierschnittstelle (SWD). Das Datenblatt ist unter [23] verfügbar.

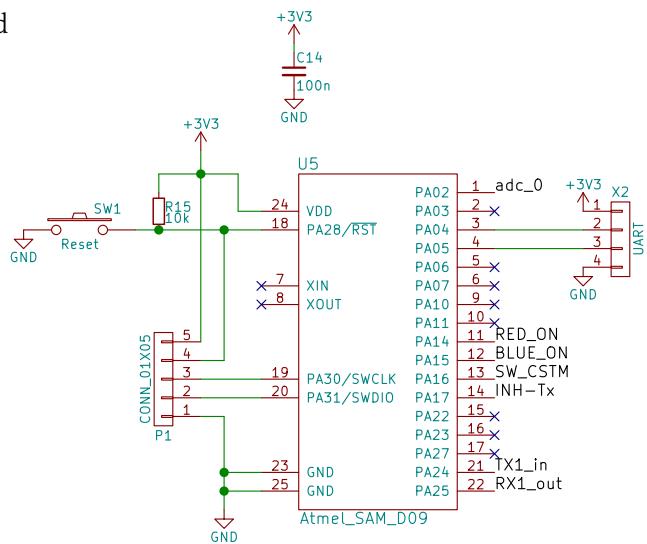


Abbildung 5.6: Microcontroller Sensor

5.1.4 Spannungsmessung

Der Spannungsteiler ist so eingestellt, dass am ADC-Pin 3.3 V anliegen, wenn bei der Spannungsversorgung 60 V anliegen. Der Kondensator C18 dient der Glättung des Signals.

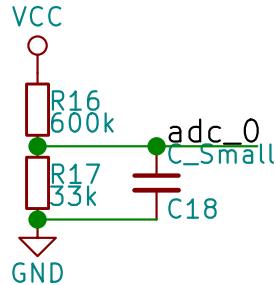


Abbildung 5.7: Spannungsmessung Sensor

5.1.5 Interface

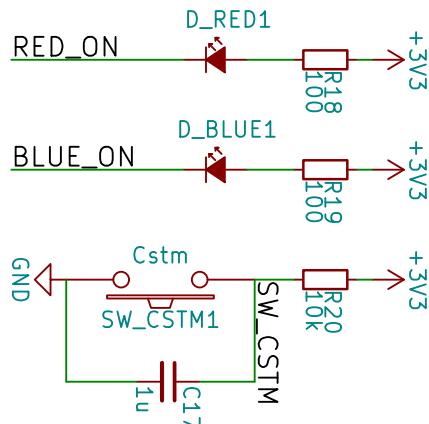


Abbildung 5.8: Interface Sensor

Am Sensor sind zwei LEDs und ein Schalter angebracht, welche zu Statusanzeigen und zum Debuggen benutzt werden können. In der aktuellen Firmware-Version werden die LEDs getoggled, um korrektes Funktionieren des Sensors anzuzeigen (siehe Abschnitt 6.2.2.3 auf Seite 55).

5.1.6 Empfänger

Der Empfänger ist ein einfaches Tiefpassfilter. Zuerst wird das Eingangssignal, welches noch moduliert ist, durch die Diode D3 gleichgerichtet. Ein dahinter geschalteter Tiefpass sorgt dafür, dass das Signal geglättet wird. Da dieses Signal durch Verluste auf der Leitung und über der Diode eine viel zu kleine Amplitude hat, wird es zusätzlich durch einen nicht invertierenden Opamp verstärkt.

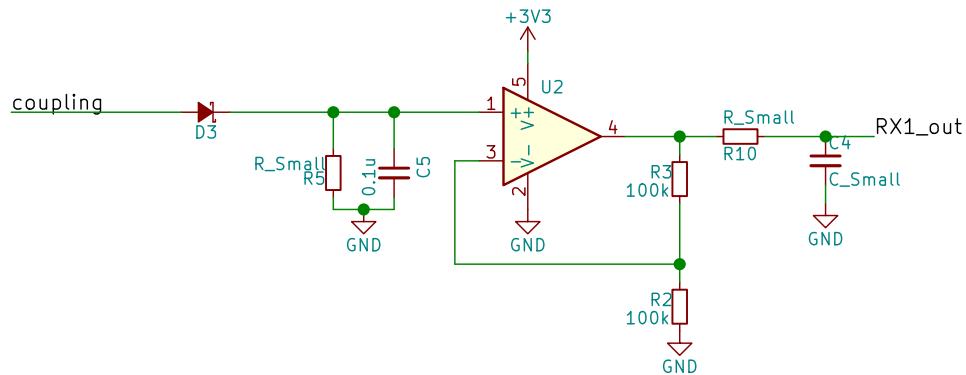


Abbildung 5.9: Empfänger Sensor

5.2 Master-Gerät

Das Master-Gerät (Abbildung 5.10) basiert auf einem Raspberry Pi (Abbildung 5.11), erweitert mit einem zugekauften Touchscreen-Modul und einem eigens entwickelten PCB, welches für zusätzliche Funktionalität verantwortlich ist (Kommunikation mit Sensoren, Strommessung, GSM-Modem).

Montiert ist das Master-Gerät in einem Hutschienengehäuse (auch bekannt als DIN-Rail-Gehäuse, Abbildung 5.12). Damit unser Gerät sinnvoll im Gehäuse untergebracht werden kann, ist eine eigene Frontplatte entwickelt und gefertigt worden (Abbildung 5.13).

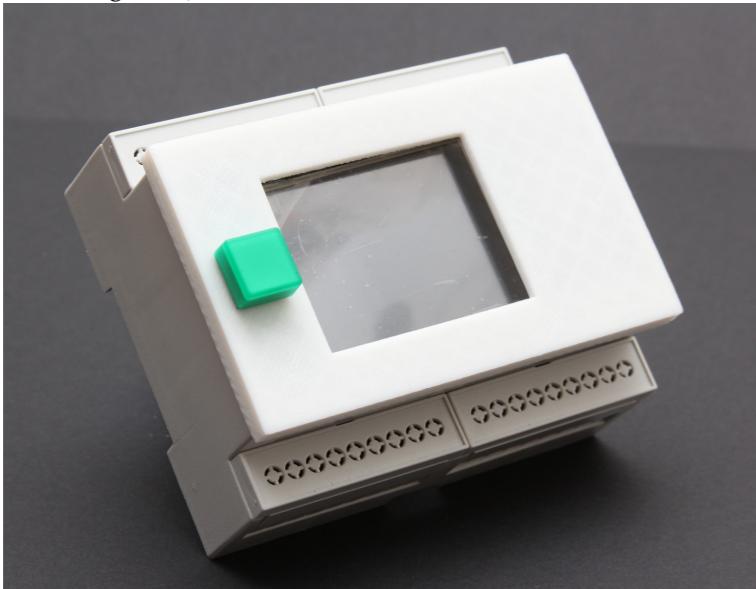


Abbildung 5.10: Master-Gerät, zusammengesetzt

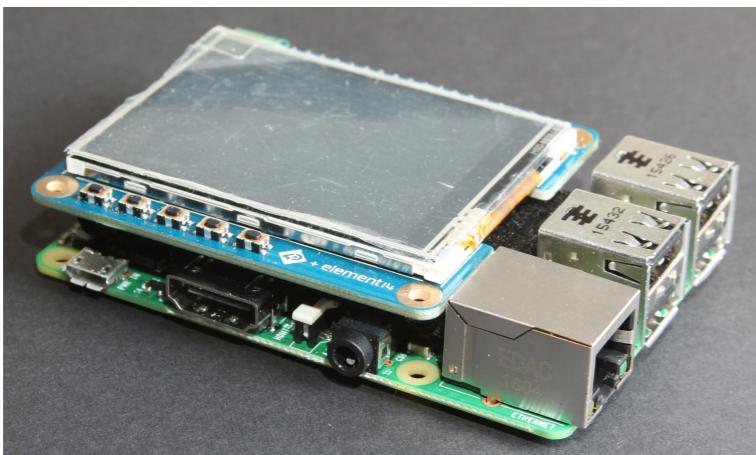


Abbildung 5.11: Raspberry Pi mit aufgestecktem Touchscreen-Modul

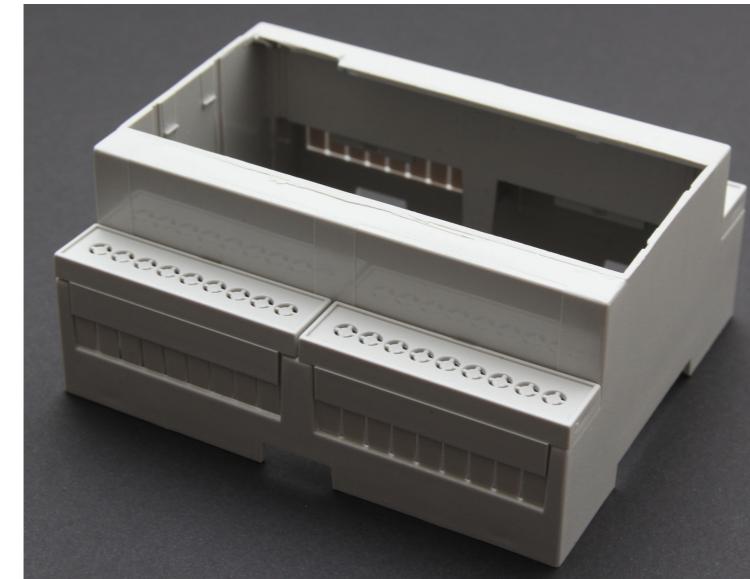


Abbildung 5.12: Hutschienengehäuse

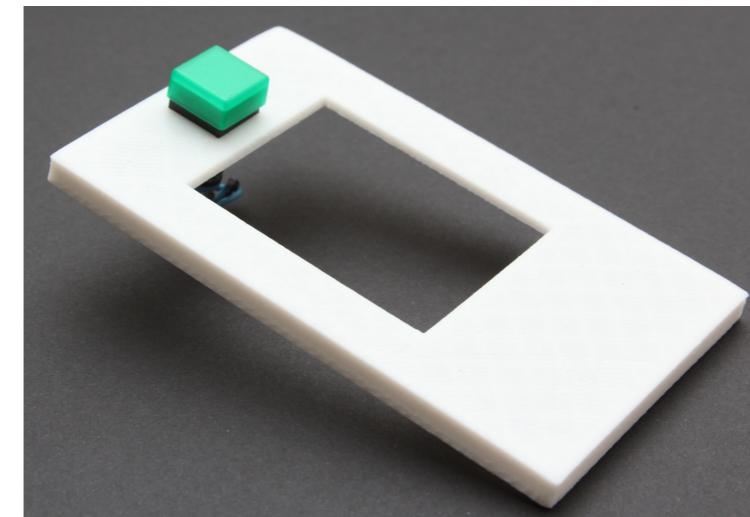


Abbildung 5.13: 3D-degruckte Abdeckung für das Hutschienengehäuse

Abbildung 5.16 zeigt das Schema für das Zusatz-PCB des Master-Geräts. Bereich 1 ist die Speisung (genauer dokumentiert in Abschnitt 5.2.1 ab Seite 45), allgemeine Ein- und Ausgänge sind im Bereich 2 untergebracht (siehe Abschnitt 5.2.2 ab Seite 46), die Kommunikation mit den Sensoren erfolgt durch die Schaltungen in Bereich 3 (Abschnitt 5.2.3 ab Seite 47), die String-Ströme werden mit den Komponenten aus Bereich 4 gemessen (Abschnitt 5.2.4 ab Seite 48) und Bereich 5 beinhaltet die GSM-Schaltung (Abschnitt 5.2.5 ab Seite 50).

Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen ein 3D-Modell des PCB, auf welchem die Zusatzfunktionen untergebracht sind.

Das PCB in der aktuellen Konfiguration kann drei Modulstränge parallel verwalten. Das Hinzufügen zusätzlicher Modulstränge wäre relativ einfach, würde aber ein grösseres PCB mit den zugehörigen zusätzlichen Komponenten bedingen.

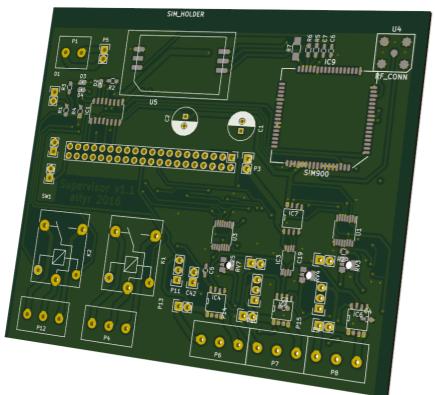


Abbildung 5.14: PCB, Vorderseite

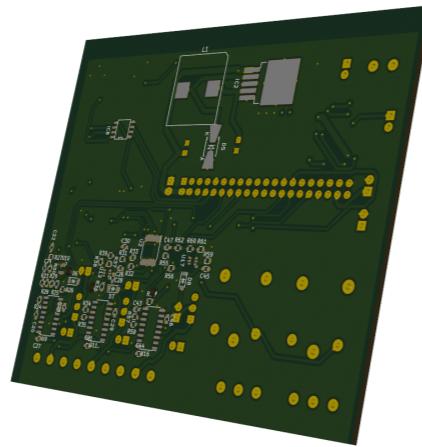


Abbildung 5.15: PCB, Rückseite

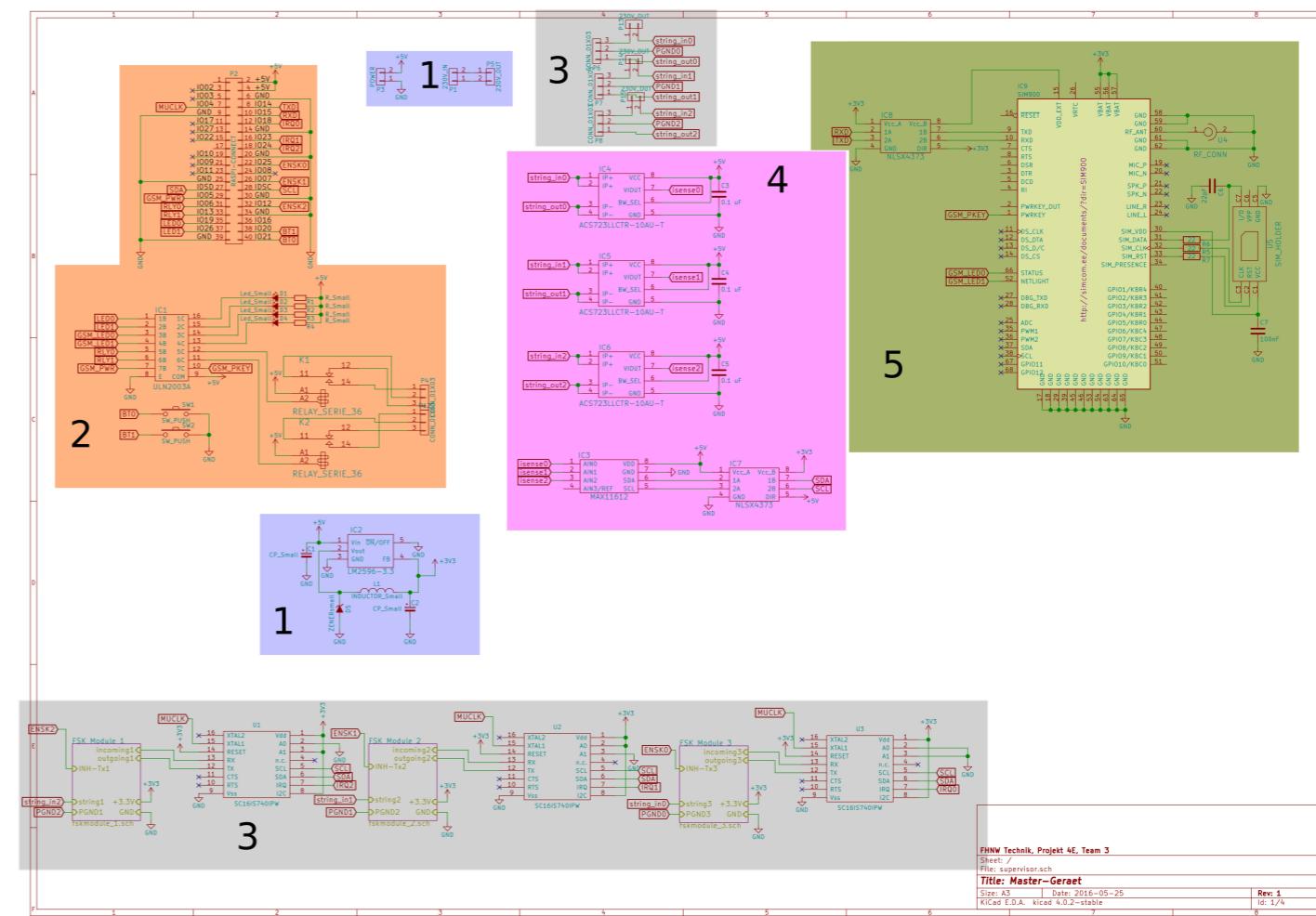


Abbildung 5.16: Schema des Master-Geräts. Eine Grossversion ist in Anhang zu finden, die einzelnen Baugruppen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben und grösser abgebildet.

5.2.1 Speisung

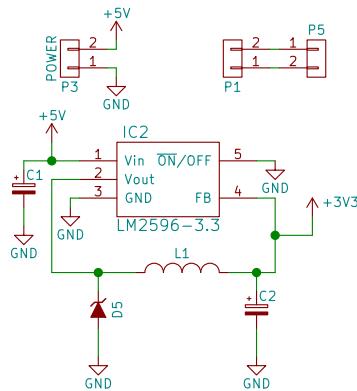


Abbildung 5.17: Stromversorgung Master-Gerät

Die Energie wird vom 230 V-Netz bezogen und von einem externen Netzteil auf 5 V transformiert. Aus Platzgründen und aufgrund der Form des Gehäuses wird der Netzananschluss dabei zuerst auf das PCB hin- und anschliessend zum Netzgerät weggeführt. Das Netzteil liefert dann 5 V zurück.

Für Bauteile, welche 3.3 V Versorgungsspannung benötigen, ist eine Spannungs-wandlung mit einem Schaltregler implementiert (IC2 und zugehörige Komponenten in Abbildung 5.17). Der Schaltregler ist das 3.3 V-Modell des LM2596 von *Texas Instruments*.

Hauptverbraucher auf der 3.3 V-Schiene ist das GSM-Modem (siehe Abschnitt 5.2.5), welches gemäss Datenblatt [24] bis zu 2 A bezieht. Es ist daher wichtig, dass die Spannungsversorgung der 3.3 V-Schiene genügend Strom liefern kann. Der ausgewählte Regler kann bei einer Versorgungsspannung von 5 V und einer Ausgangsspannung von 3.3 V bis zu 3 A liefern, was für das Modem und die restlichen Komponenten auf der 3.3 V-Linie ausreichen sollte.

Die Schaltregler der LM2596-Linie integrieren so viele Komponenten wie mög-lich. Dadurch sind nur vier diskrete Bauteile nötig, welche zur Unterdrückung von Spannungsrippel benötigt werden und nicht in das Chipgehäuse passen. Sie werden anhand der Empfehlungen im Datenblatt [25] ausgewählt:

- Spule L1: 22 μ H, Seite 23
- Cout: 560 μ F, Seite 23
- Diode D5: Kompatibel mit SK3-Serie, Seite 24
- Cin: 680 μ F, Seite 25

Tabelle 5.1 listet die hauptsächlichen Leistungsverbraucher auf, mit den Bedin-gungen, unter denen dieser maximale Verbrauch auftreten kann.

Anhand der Abschätzung des Leistungsverbrauchs wird als Netzteil ein TXM 025-105 von *Traco Power* ausgewählt [30]. Es handelt sich dabei um ein kompaktes und kostengünstiges 5 V-Netzteil, welches bis zu 5 A liefert und damit die Anforde-rungen gut erfüllt.

Tabelle 5.1: Hauptsächliche Leistungsverbraucher

Bauteil	Maximale Leistung	Testbedingungen	Quelle
Raspberry Pi	4 W	Maximallast im normalen Betrieb	[26]
Display	1.1 W	Maximale Helligkeit	[27]
Modem	6.6 W	Alle Kommunikationskanäle aktiv	[28]
Relais	0.72 W	Zwei Relais, schaltend	[29]

5.2.2 Ein-/Ausgänge (GPIO)

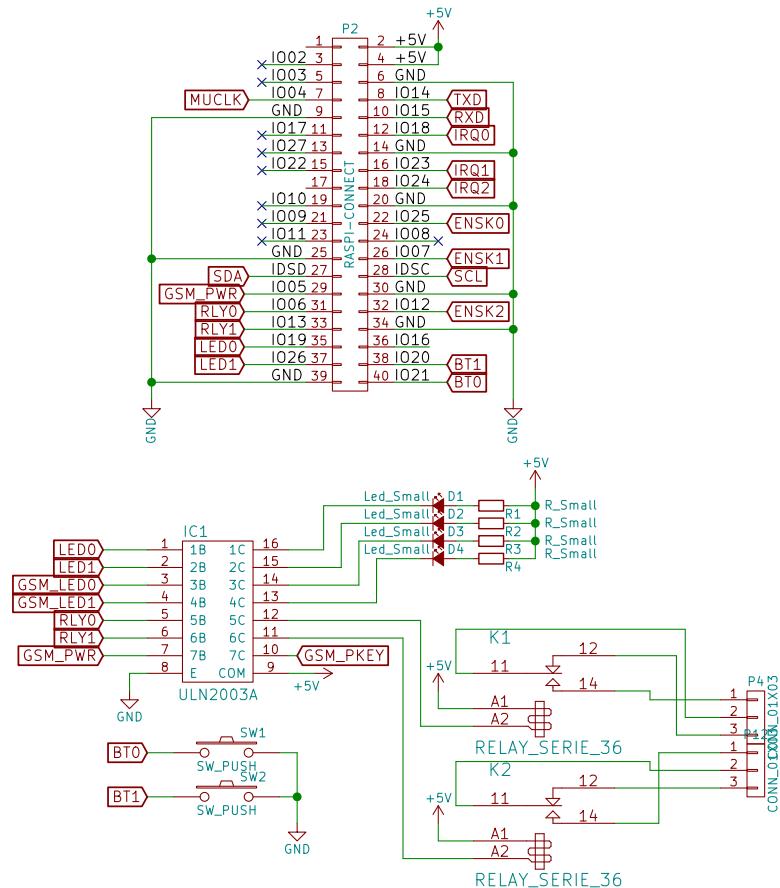


Abbildung 5.18: GPIO Master-Gerät

Das Master-Gerät besitzt verschiedene Ein- und Ausgänge. Kernstück des GPIO-Blocks ist ein Darlington Transistor Array (IC1 in Abbildung 5.18), welches verschiedene Steuersignale durchschalten kann.

Die Signale LED0 und LED1 steuern die LEDs D1 und D2, werden vom Raspberry Pi gesteuert und dienen dem allgemeinen Debugging. Signal GSM_LED0 respektive GSM_LED1 stehen dem GSM-Modem zur Statusausgabe zur Verfügung.

Die beiden Relais werden von RLY0 und RLY1 gesteuert und können vom End-

benutzer für beliebige Funtionalität verwendet werden. Dafür stehen die beiden Anschlüsse P4 und P16 zur Verfügung.

Das Signal `GSM_PWR` kann auf `GND` durchschalten, um das GSM-Modem via den Pin `GSM_PKEY` einzuschalten, analog zu einem Taster, um einen PC einzuschalten.

Die beiden Anschlüsse `BT0` und `BT1` sind mit dem Raspberry Pi verbunden und können für Jumper, Taster oder Schalter verwendet werden. In der Prototypenkonfiguration ist ein Schalter angeschlossen. Der Stecker `P2` ist die Hauptverbindung zum Raspberry Pi via Flachbandkabel.

Als IO-Verstärker wird ein `ULN2003A` von Texas Instruments gewählt [31]. Der IC verfügt über integrierte Freilaufdioden zum Schutz vor überhöhter Spannung auf der Ausgangsseite. In unserem Fall dient dies dazu, Spannungsspitzen, welche beim Ausschalten der Relais auftreten können, abzufangen. Da der Raspberry Pi maximal 3.3 V am Ausgang liefern kann, muss die Schaltschwelle für ein true-Signal bei diesem IC bei 3.3 V oder tiefer liegen, was der `ULN2003A` erfüllt. Die Relais beziehen bis zu 72 mA [29] Strom bei Betrieb mit 5 V. Der `ULN2003A` kann bis zu 100 mA pro Kanal liefern, was ausreichen sollte, um die Relais zuverlässig schalten zu können.

Die Relais sind von der Serie 36 von Finder [29]. Sie können Lasten bis zu 230 V und 10 A schalten, womit handelsübliche Geräte für das Niederspannungsnetz angeschlossen werden können. Dies gibt dem Kunden grosse Flexibilität bei der Wahl der zu betreibenden Geräte (Alarmlampe, Sirene, ...).

5.2.3 Kommunikation mit Sensoren

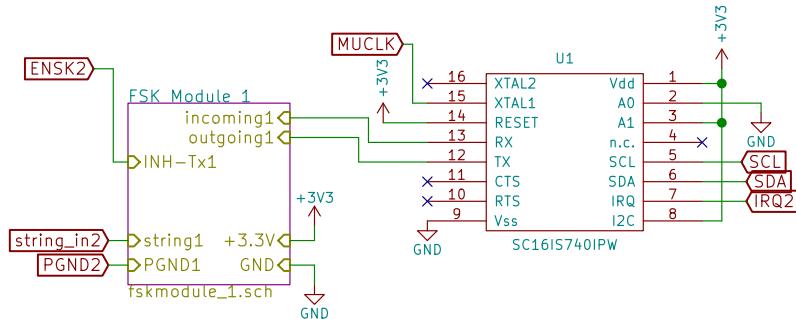


Abbildung 5.19: Kommunikation zu Sensor auf Master-Gerät

Abbildung 5.19 zeigt das Schema einer der drei Schaltungen, welche zur Kommunikation mit dem Sensor benutzt werden. Zur genauen Beschreibung des Blocks `fskmodule_1.sch` siehe Abschnitt 5.1.2 auf Seite 40.

Auf der rechten Seite in Abbildung 5.19 ist die Brücke U1 abgebildet, welche zwischen UART und I²C konvertiert. Es wird das Modell `SC16IS740` von NXP Semiconductors [32] verwendet. Der Sensor sendet seine Daten auf der DC-Leitung in UART-Kodierung. Da der Raspberry Pi nicht genügend UART-Eingänge für alle benötigten Leitungen besitzt, werden die Daten im I²C-Format in den Raspberry

Pi eingespeist. Die Brücke U1 ist dafür verantwortlich, zwischen UART (Anschlüsse TX und RX) und I²C (Anschlüsse SDA für Daten und SCL für Clock) zu konvertieren.

Den Clock erhält die Brücke vom Mikrocontroller des Raspberry Pi via die Leitung MUCLK.

Wenn von einem Sensor Daten empfangen werden, kann die Brücke mit dem Anschluss IRQ2 einen Interrupt an den Raspberry Pi senden, welcher darauf die Datenverarbeitung startet.

Die Pins A0 und A1 dienen der Addressierung der Brücke und sind für jede Brücke individuell angeschlossen. Für die vollständige Verdrahtung siehe Seite 84 in Anhang C

Abbildung 5.20 zeigt die Anschlüsse zur Einkopplung des Signals auf die DC-Leitung. Es sind drei Stecker P13, P14 und P15 vorhanden, durch welche der Strom geleitet wird. An den Steckern kann jeweils eine Einkopplung angeschlossen werden. Dies erlaubt Flexibilität bei der Implementierung der Einkopplung, da das PCB nicht auf eine spezifische Variante beschränkt ist.

Die Ausgänge des Einkopplungsblocks gehen auf die Strommessung.

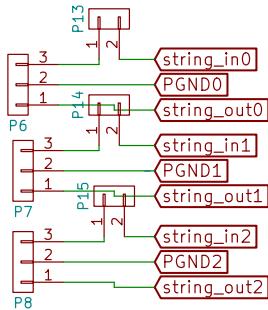


Abbildung 5.20: Anschlüsse zur Einkopplung

5.2.4 Strommessung

Der Strom jedes Modulstrangs wird separat überwacht; die dazu benutzte Schaltung ist in Abbildung 5.21 dargestellt. IC4, IC5 und IC6 sind die Strommessungssensoren. Es werden Hall-Sensoren der Modellreihe ACS725 von Allegro Microsystems benutzt. Diese können bis zu 10 A messen, sind durchschlagsfest bis zu 2.5 kV (Mindestanforderung 1 kV, Spannung auf einer DC-Leitung) und können sowohl mit 3.3 V wie auch 5 V betrieben werden [33].

Sie geben auf den Leitungen isense0, isense1 respektive isense2 eine Spannung aus, welche proportional zum den Sensor durchfliessenden Strom ist. Der vom Modulstrang kommende Strom geht in die Eingänge string_in{0,1,2} der Sensoren und verlässt diese wieder durch die Ausgänge string_out{0,1,2}, von wo er weitergeht in den Generatoranschlusskasten.

IC3 ist der A/D-Konverter, welcher die analogen Signale isense0 bis isense2 in digitale Signale mit 5 V-Pegel wandelt. Es kommt ein MAX11612 von Maxim Integrated zum Einsatz [34]. Dieser besitzt ein I²C-Interface, drei Kanäle und ist

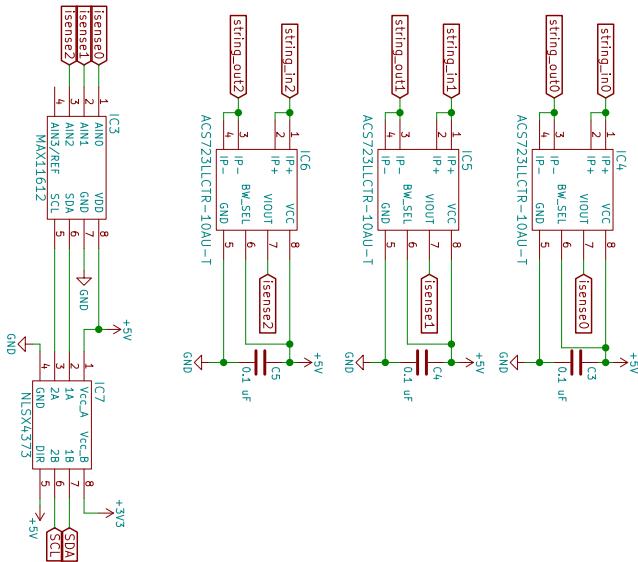


Abbildung 5.21: Strommessung

mit dem Ausgangspegel der Hall-Sensoren kompatibel. Allerdings liefert er ein Ausgangssignal mit einem 5 V-Pegel, was nicht mit dem Raspberry Pi kompatibel ist, dessen Eingänge mit einem Pegel von 3.3 V laufen. Deshalb wird zwischen IC3 und dem Raspberry Pi noch ein Pegelwandler der Serie NLSX4373 von ON Semiconductors geschaltet, welcher das 5 V-Signal des ADC auf 3.3 V konvertiert. Er ist speziell für I²C-Anwendungen entwickelt worden und eignet sich somit gut für unsere Zwecke.

Der Hersteller sieht zur Stabilisierung der Stromversorgung einen Kondensator der Grösse 100 nF, sichtbar im Diagramm auf Seite 1 des Datenblattes [33], vor.

5.2.5 GSM-Modem

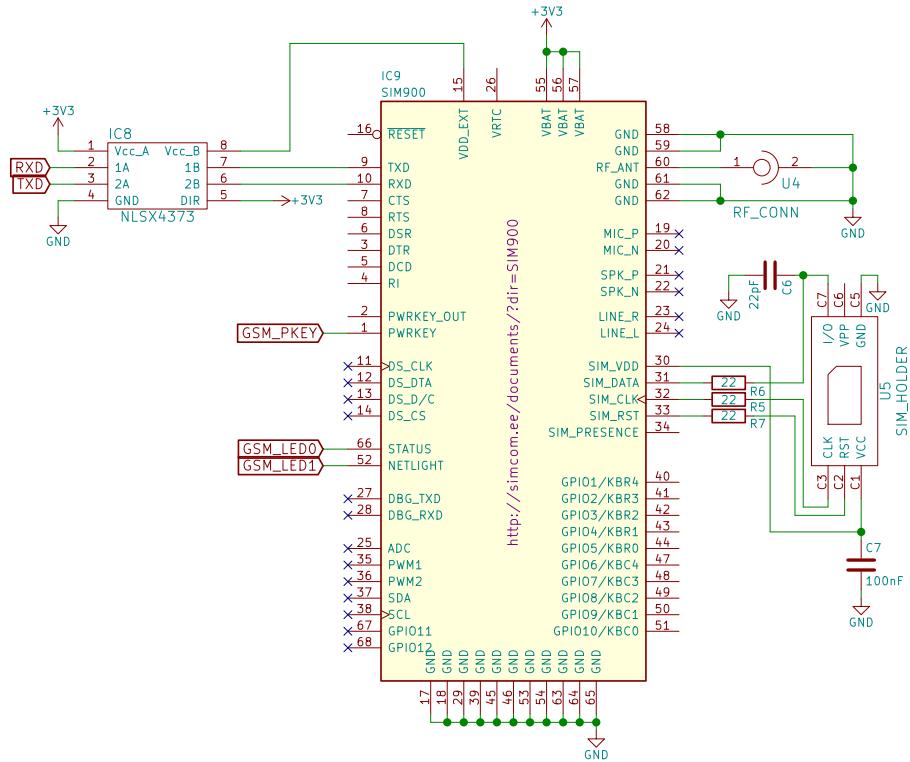


Abbildung 5.22: GSM-Modem Schaltung

Das GSM-Modem ist ein integrierter Baustein, der alle nötigen Funktionen bereitstellt. Es wird ein Modell der SIM900-Serie von Simcom [35] verwendet. Das Modem und seine Beschaltung sind in Abbildung 5.22 dargestellt. Wie auch bei der Strommessung wird hier ein Pegelwandler verwendet, um das Signal von der UART-Linie mit 3.3 V auf den vom GSM-Chip benötigten Pegel von 2.8 V (Pin VDD_EXT auf dem Chip, verbunden mit Vcc_B auf dem Pegelwandler) zu wandeln.

Der Pin **GSM_PKEY** dient zum Einschalten des GSM-Modems, gesteuert vom Raspberry Pi via GPIO (siehe Abschnitt 5.2.2, Seite 46).

Via die beiden Pins **STATUS** und **NETLIGHT** werden zwei Status-LEDs angesteuert (siehe ebenfalls Abschnitt 5.2.2). Auf der rechten Seite des Schaltungsblocks sind die Antenne und der Adapter für die SIM-Karte zu sehen.

Gemäss Referenzdesign auf Seite 9 des Modem-Guides [24] beträgt der Wert aller Simkarten-Widerstände 22Ω .

6

Software

Die Software unseres Systems gliedert sich analog zur Hardware in zwei primäre Teile: Die Firmware des Sensors und die Software des Masters.

In Abschnitt [6.1](#) wird im Folgenden kurz dargelegt, wie diese beiden Teilsysteme verknüpft sind. Anschliessend erklärt Abschnitt [6.2](#) die Funktionsweise der Firmware des Sensors. Die Software des Raspberry Pi ist abschliessend in Abschnitt [6.3](#) dokumentiert.

6.1 Datenfluss

Abbildung 6.1 zeigt den Ablauf der Spannungs- und Strommessung von den Messsonden bis zur Speicherung der Messergebnisse und der zugehörigen Metadaten in der Datenbank.

Die Spannung wird in jedem PV-Modul von einem Sensor mittels eines analog/digital-Konverters gemessen. Anschliessend wird ein laufender Durchschnittswert (siehe Abschnitt 6.2.2.2, Seite 54) zusammen mit der Seriennummer des Microchips und einer Checksumme in ein Datenpaket gepackt und über die DC-Leitung verschickt.

Die ON-OFF Keying-Schaltung benutzt als Referenz den Clock eines separaten, spannungsgesteuerten Oszillators (englisch *voltage-controlled oscillator*, VCO).

Im Master-Gerät wird das Datenpaket entpackt und auf seine Integrität geprüft. Passt die Prüfsumme nicht zu den Daten, wird das Paket verworfen. Sind die Daten intakt (bzw. wird keine Diskrepanz zwischen Prüfsumme und Daten festgestellt), werden Spannung und Seriennummer im zugehörigen Table der Datenbank gespeichert. Zur chronologischen Ordnung der Daten wird noch ein Timestamp abgelegt. Damit man weiss, aus welchem Strang das Paket gekommen ist, wird die Strang-Nummer noch in den Eintrag eingefügt.

Die Messung der Strang-Ströme erfolgt direkt vom Master-Gerät aus; die zugehörigen Messwerte werden in einem separaten Table abgelegt.

Zur Verwaltung der installierten Sensoren und PV-Module wird für jeden Strang ein Table geführt, in dem die Seriennummern der in diesem Strang installierten Sensoren (bzw. deren Microchips) gespeichert sind. Die Einträge in diesen Tables erfolgen automatisch, wenn in einem ankommenden Datenpaket eine bisher noch nicht bekannte Seriennummer detektiert wird.

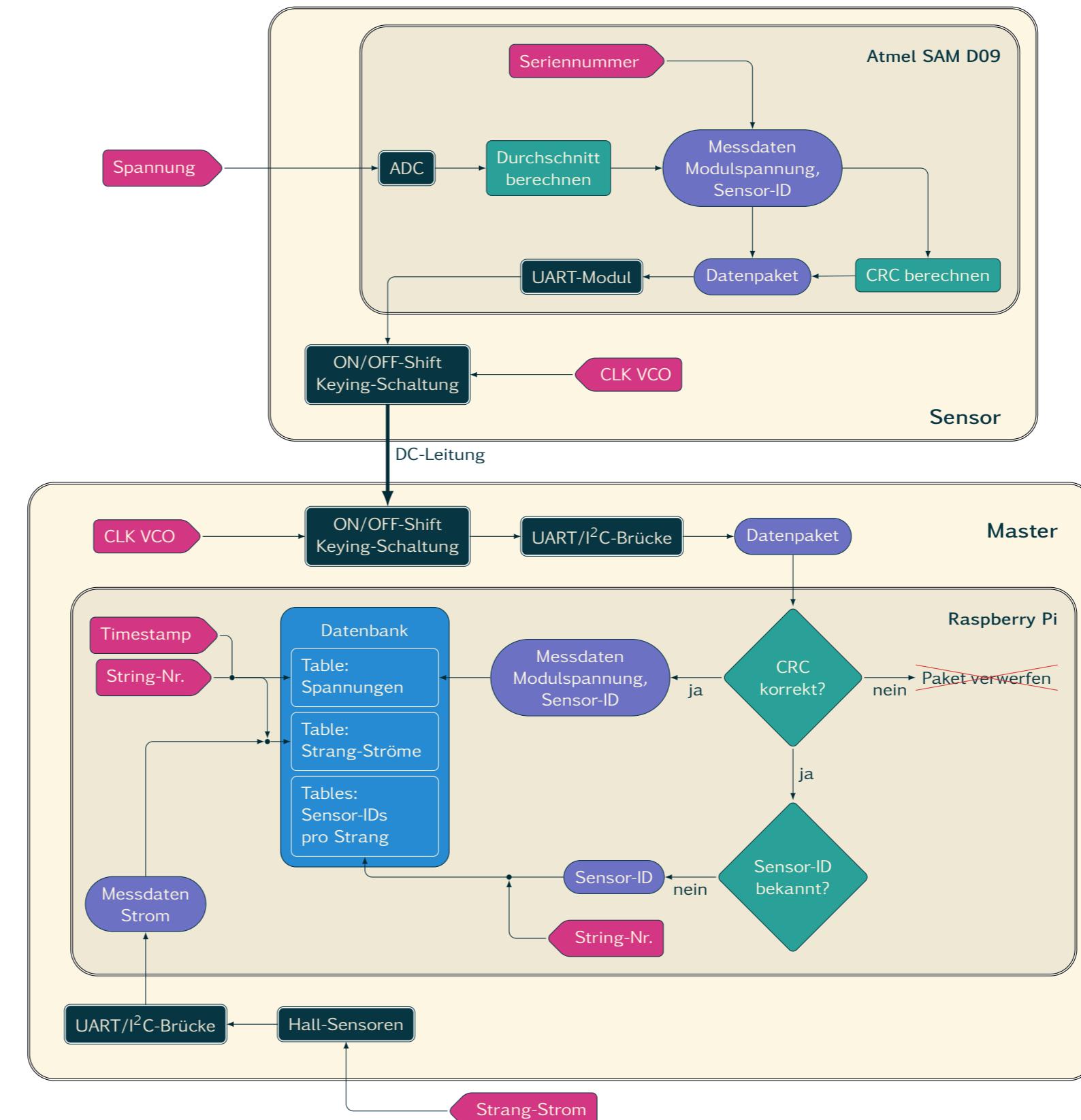


Abbildung 6.1: Datenfluss von den Messungen der Modulspannungen und Strang-Ströme bis zur Speicherung in der Datenbank

6.2 Firmware Sensor

Als CPU auf dem Sensor agiert wie im Abschnitt 5.1 erwähnt ein Atmel Smart ARM Cortex M0+. Die Firmware ist aus Kompatibilitätsgründen zur CPU in C geschrieben.

6.2.1 Benutzte Bibliotheken

Es wird komplett freie Software verwendet, weswegen zum Bauen der Binaries GNU Makefiles benutzt werden.

Die Firmware ist auf dem Atmel Software Framework (ASF) aufgebaut. Das ASF führt einen Hardware Abstraction Layer (HAL) ein, welcher die Hardware-Blöcke der einzelnen Atmel CPUs in einfache Interfaces in Form von C-Funktionen abstrahiert. Um die gängigen ARM-Schnittstellen zu nutzen, wird CMSIS im ASF verwendet. Das ASF darf für Atmel Chips ohne weiteres verwendet werden, solange die Copyright Bemerkungen nicht entfernt werden.

6.2.2 Die Firmware

Die Firmware besteht im Kern aus einer `main()`-Funktion, welche in einer Endlosschleife läuft. Abbildung 6.2 zeigt, wie diese Schleife aufgebaut ist. Zudem zeigt sie den regelmässigen SysTick-Interrupt, welcher den ADC ausliest und die LEDs toggelt.

6.2.2.1 UART

Die Endlosschleife überprüft zuerst, ob Daten über die UART empfangen wurden, sprich Anweisungen vom Master oder Antworten von anderen Sensoren. Ist das der Fall, so wird darauf reagiert. Zuerst wird überprüft ob das Paket auch für den Sensor bestimmt ist. Falls das erste Byte 0 ist, ist das Paket für den Master bestimmt. Falls es 1 ist, so ist das Paket für einen Sensor bestimmt. Um zu bestimmen, ob das Paket für sich selbst bestimmt ist, prüft die Firmware, ob die nächsten 4 empfangenen Bytes der eigenen ID entsprechen. Hier ist wichtig, dass alle Daten Little Endian codiert sind. Falls das Paket tatsächlich für den Sensor bestimmt ist, so wertet er nun den Befehl aus und reagiert darauf. Im Normalfall bedeutet dies, dass die UART die gemittelten Daten der letzten 64 Messwerte an den Master adressiert und verschickt. Hierzu wird ein Datenpaket, wie es in Abbildung 6.3 zu sehen ist, verschickt.

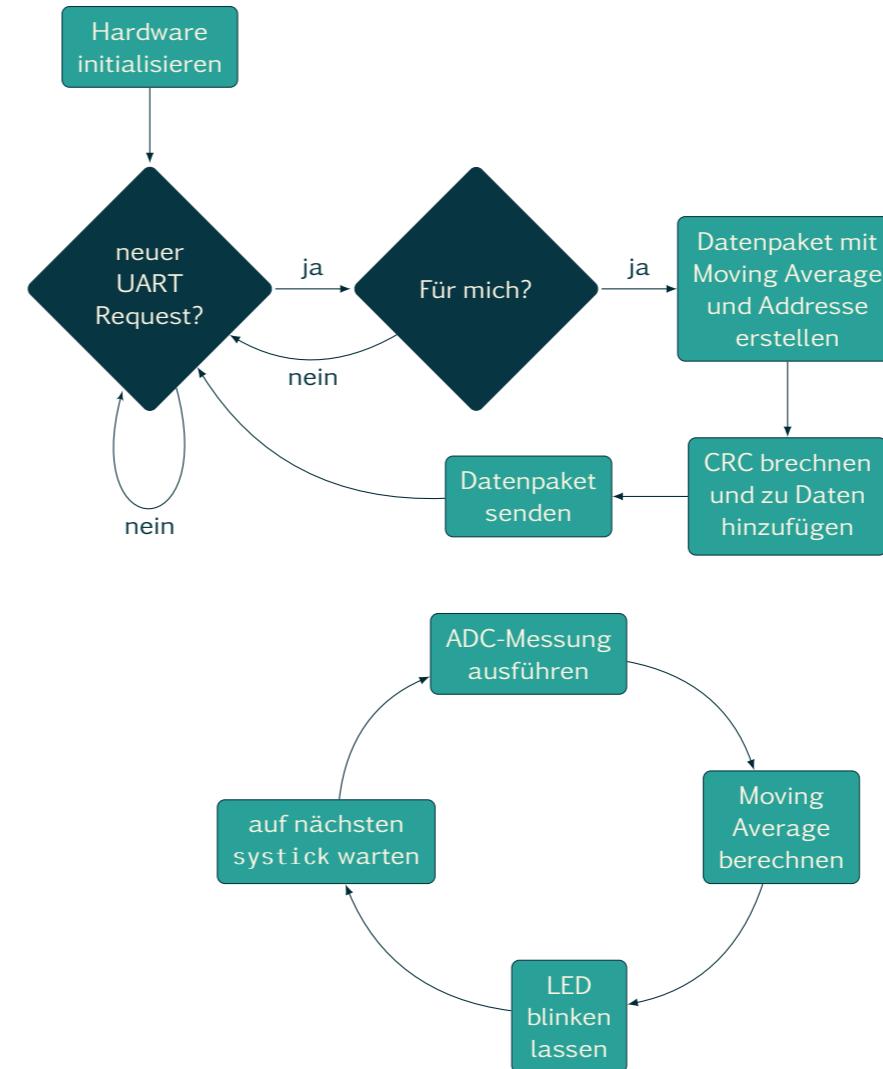


Abbildung 6.2: `main()`-Loop der Sensorfirmware

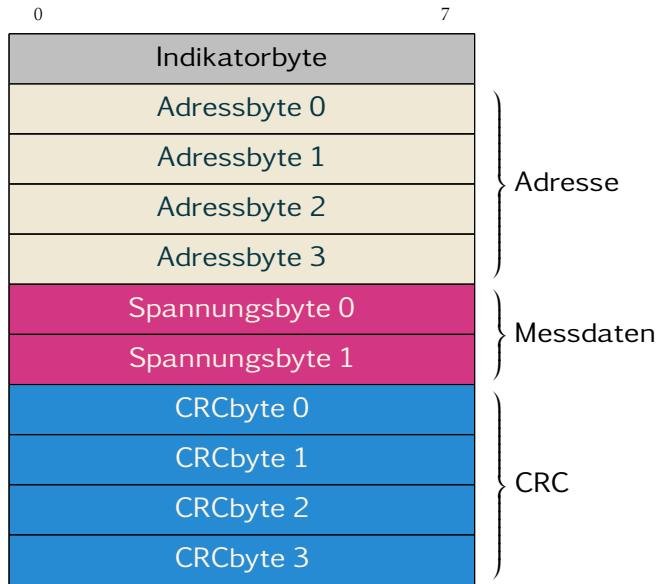


Abbildung 6.3: Aufbau eines Datenpakets

Damit der Empfänger eines Pakets die Integrität der Daten verifizieren kann, wird eine Prüfsumme (CRC) der Daten mitgeschickt. Um die CRC zu berechnen, wird zuerst das Datenpaket zusammengestellt. Davon wird dann mithilfe des ASF eine Prüfsumme erstellt und an das bestehende Datenpaket angehängt. Abschliessend wird das Datenpaket per UART verschickt. Der Vorgang ist auch in den Abbildungen 6.2 und 6.1 gezeigt.

6.2.2.2 Sensor

Als Spannungssensor dient ein Analog Digital Konverter (ADC). Dafür wird mithilfe des ASF ein 12 Bit ADC ausgelesen und von diesen Werten ein laufender Mittelwert (*Moving Average*) erstellt. Dies wird regelmässig innerhalb des SysTick-Interrupts erledigt. Dann wird mithilfe eines sogenannten *Cascaded Integrator-Comb Filters* [36] der aktuelle Moving Average berechnet. Formel 6.1 zeigt die zugehörige Methodik.

$$\begin{aligned}
 y[n] &= \sum_{k=0}^{RM-1} x[n-k] \\
 &= y[n-1] + x[n] - x[n-RM].
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Wobei:

R : Interpolationsrate

M : Anzahl Samples pro Stufe

N : Anzahl Stufen im Filter

6.2.2.3 Statusanzeige

Damit man optisch verifizieren kann, ob der Sensor korrekt funktioniert, wird im SysTick-Interrupt ein Toggeln der LED ausgeführt. Blinkt die LED nicht mehr, kann man daraus schliessen, dass der Sensor nicht mehr korrekt funktioniert (siehe Abschnitt 5.1.5 auf Seite 41).

6.2.3 Open On Chip Debugger

Zum Programmieren der CPUs haben wir OpenOCD gewählt. Auch hier ist wieder anzumerken, dass es ein Stück freie Software ist. OpenOCD ist extrem leicht zu erweitern und unterstützt eine grosse Breite an Programmierschnittstellen wie den STLinkv2 oder den Segger J-Link. Es werden Protokolle wie JTag und SWD ohne spezielle Konfigurationen unterstützt. Ebenfalls gibt es einen Reichtum an Chips, die unterstützt sind.

Da der SAMD09 erst im ersten Quartal 2016 auf den Markt gekommen ist, sind sehr wenige Projekte vorhanden, welche ihn bereits benutzt haben. Daher hat OpenOCD unseren Chip zu Beginn nicht unterstützt. Der bestehende Treiber für Atmel-Chips ist deshalb von uns entsprechend erweitert worden.

Um die Kosten tief zu halten, haben wir einen StLinkv2 als Programmierschnittstelle verwendet. Auch dafür brauchte es einen Patch des Treibers, da der STLinkv2 nur 32 Bit-Schreibbefehle unterstützt, der SAMD09 aber 16 Bit-Schreibbefehle erwartet. Wir haben deshalb einen Patch geschrieben, welcher 16 Bit-Schreibbefehle anstatt 32 Bit-Schreibbefehle sendet.

6.3 Software Master-Gerät

Im Folgenden werden die verwendeten Komponenten der Master-Software beschrieben und es wird auf die Lizenzen dieser Komponenten eingegangen. Anschliessend werden der Aufbau unseres Software-Stacks und die Funktionsprinzipien dokumentiert.

6.3.1 Komponenten

Als Betriebssystem kommt Raspbian zum Einsatz. Raspbian ist eine Variante von Debian-Linux mit einigen Erweiterungen, welche das System auf einem Raspberry Pi lauffähig machen. Als graphische Oberfläche wird LXDE benutzt, aufbauend auf X11. Die wichtigsten Komponenten des Software-Stacks sind in Abbildung 6.4 dargestellt.

Die Funktionalität unserer Software wird mit einigen Python-Libraries implementiert. PyQt wird benutzt, um die graphische Benutzeroberfläche zu programmieren, SQLAlchemy dient als Datenbanktreiber und *WiringPi for Python* ist dafür verantwortlich, die Hardware-Schnittstellen des Raspberry Pi zu abstrahieren und in Python bereitzustellen. Tabelle 6.1 listet die Libraries und ihre Aufgaben in einer Übersicht auf.

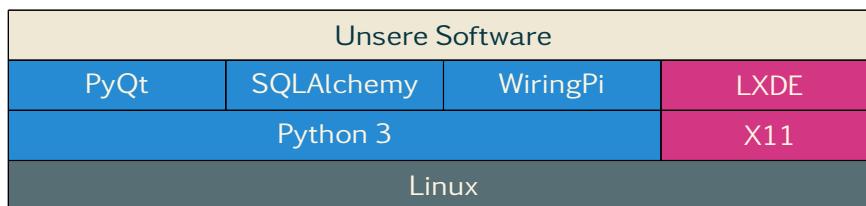


Abbildung 6.4: Software-Stack für unser Projekt

Tabelle 6.1: Liste der verwendeten Python-Libraries

LIBRARY	VERSION	ZWECK	WEBSITE
PyQt	5	Erstellen und verwalten der grafischen Bedienelemente	[37]
SQLAlchemy	1.0	Datenbankabstraktion	[38]
WiringPi for Python	2	Abstraktion der Hardware-Schnittstellen	[39]

6.3.2 Lizenzen

Bei der Auswahl von Drittsoftware wird auf die jeweiligen Lizenzbedingungen geachtet, um keine Konflikte zu verursachen. Die wichtigsten drei Lizenz-Bereiche und ihre Charakteristiken sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.

Tabelle 6.2: Lizenzbereiche

BEREICH	LIZENZ	BEDINGUNGEN
Linux-Kernel	GPL	Quellcode und Änderungen müssen öffentlich sein.
Treiber für Raspberry Pi und Display	Restricted	Quellcode wird vom Hersteller geheim gehalten
Raspbian	DFSG (Sammlung diverser Lizenzen)	Darf frei verwendet, aber nicht unbedingt verkauft, werden.

Grundlage für die Software bildet das angepasste Betriebssystem. Dieses wird von der Raspberry Pi Foundation frei zur Verfügung gestellt und unterliegt den Bedingungen den DFSG (*Debian Free Software Guidelines* [40]). Die darauf aufbauenden Programmabibliotheken zur Abstraktion von Betriebssystemfunktionen und weiteren Hardware-Aufrufen sind alle aus den Raspbian-Repositories verfügbar und unterliegen daher ebenfalls den DFSG. Da die Mastersoftware zwar auf diesen Komponenten aufsetzt, sie aber nicht verändert oder statisch verlinkt wird, entstehen keine Lizenzkonflikte. Zu beachten ist hier, dass diese Drittsoftware im Allgemeinen nicht als Eigenwerk verkauft werden darf. Das heißt, dass sie zwar beliebig verbreitet werden darf, nicht aber zum Produkt hinzugezählt werden kann.

Die DFSG stellen insbesondere folgende Anforderung an alle Programme, welche Teil von Raspbian sind:

- Die Software darf frei verbreitet werden (Regel 1)
- Die Software darf für beliebige Zwecke eingesetzt werden (Regel 6)
- Die Software beschränkt unzusammenhängende Software nicht (Regel 9)

Der eigentliche Mastersoftware-Quellcode dagegen ist nicht öffentlich und kann als Bestandteil des Produkts verkauft werden.

6.3.3 Threads

Die Mastersoftware ist in mehrere Threads gegliedert, unter welchen die Funktionen aufgeteilt sind. Sie werden alle von einem Hauptthread gestartet, welcher die Koordination mittels Semaphoren übernimmt. Dazu initialisiert er alle Ressourcen, auf welche aus mehreren Threads zugegriffen sind. Dies sind Datenbank und Logging-System, welche beide Multithreading beherrschen und threadsafe sind. Die zentrale Koordination bedeutet zudem, dass alle Arbeitsschritte nur sofern nötig und nicht mit veralteten Daten ausgeführt werden.

Um die Threadsicherheit zu gewährleisten, verwenden die beiden geteilten Ressourcen spezielle Mechanismen:

- Die Loggingfunktion setzt eine Queue ein, um Meldungen zu zwischenspeichern und asynchron hintereinander abzuarbeiten.
- SQLAlchemy beinhaltet mit der *ScopedSession* eine Methode, um aus mehreren Threads parallel aufgerufen zu werden. Dazu werden die Anfragen aus jeweils einem Thread gruppiert und dann atomar ausgeführt.

Alle anderen externen Ressourcen (I^2C -bus, UART und GPIO) werden jeweils von nur einem Thread genutzt, wodurch keine Konflikte auftreten können.

Im Detail sieht die Aufgabenteilung folgendermassen aus:

- **Prozesssteuerung:** Der Hauptthread verwaltet Ressourcen und alle weiteren Threads.
- **Datensammlung:** Ein Thread empfängt die Spannungs- und Strommesswerte von den Sensoren und speichert sie in der Datenbank ab.
- **Datenauswertung:** Ein separater Thread untersucht die gespeicherten Messwerte auf defekte Panels und speichert die Ergebnisse ebenfalls in der Datenbank ab.
- **Graphisches Benutzerinterface:** Der GUI-Thread stellt ein Fenster dar, mit welchem der Benutzer die Einstellungen von Alarmierung und Telefonnummer konfigurieren kann und speichert Änderungen in der Datenbank.
- **Ausgabe:** Die Umsetzung der definierten Massnahmen obliegt einem Thread, welcher das Modem verwaltet und bei Bedarf die digitalen Ausgänge zur Steuerung der Relais betätigt

6.3.4 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche ist in PyQt5 implementiert. PyQt5 basiert auf Qt5, welches eine sehr verbreitete Library für GUI-Oberflächen ist. Dadurch ist sie extrem featurereich und bringt alles mit was die Benutzeroberfläche braucht.

In Qt5 gibt es das sogenante **MainWindow**, welches alle weiteren Code-Teile unter sich bündelt. So werden zum Beispiel auch separate Threads wie die Schnittstelle zur UART darüber gesteuert.

Das GUI besteht aus mehreren Views in Form vom **QWidgets**, welche mit einem **QStackedWidget** gruppiert und angezeigt werden. Das **QStackedWidget** erlaubt es, in einem bestimmten Viewport zwischen verschiedenen **QWidgets** und somit verschiedenen Ansichten zu wechseln.

Um einen Fehler anzuzeigen, wird die **ErrorView** im **QStackedWidget** selektiert. Zudem werden die Parameter zum fehlerhaften Modul übergeben und angezeigt.

Über Callbacks können Prozesse ausserhalb des GUIs angestossen und kontrolliert werden.

Die Benutzeroberfläche ist bewusst sehr schlicht gehalten. Sie besteht aus folgenden Ansichten: Hauptmenü, Einstellungen, Eingabe der Telefonnummer und dem Fehlerverlauf, gezeigt in den Abbildungen 6.5 bis 6.9. Die Beschreibung der vollen Funktionalität ist im Kapitel *Benutzerhandbuch* ab Seite 71 zu finden.

Anlagestatus: kein Fehler

Strommessung:

String 1: 100 A

String 2: 200 A

String 3: 300 A

Verlauf

Einstellungen

Abbildung 6.5: Hauptmenu



Abbildung 6.6: Einstellungen

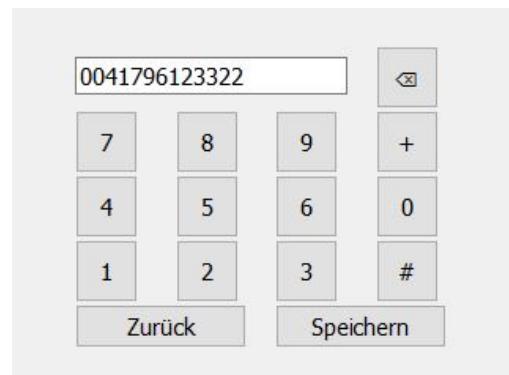


Abbildung 6.7: Eingabe einer Telefonnummer



Abbildung 6.8: Fehler bei einem Modul

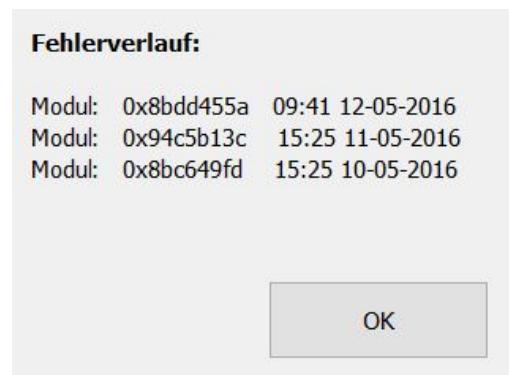


Abbildung 6.9: Fehlerverlauf der Anlage

6.3.5 Datenbank

Um die gesammelten Daten optimal zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder verwenden zu können, wird eine Datenbank verwendet. Dies hat gegenüber der Verwendung von internen Datenstrukturen wie Dictionaries und Arrays zwar die Nachteile von grösserem (Erst-)Implementationsaufwand, höherem Arbeitsspeicherbedarf und grösserem Rechenaufwand für die CPU. Jedoch wird die Wartung der Software und das Ergänzen von zusätzlicher Funktionalität stark vereinfacht. Ebenfalls ist die Auswertung einfacher und flexibler, da schon beim Auslesen der Werte aus der Datenbank nach verschiedenen Kriterien gefiltert werden kann.

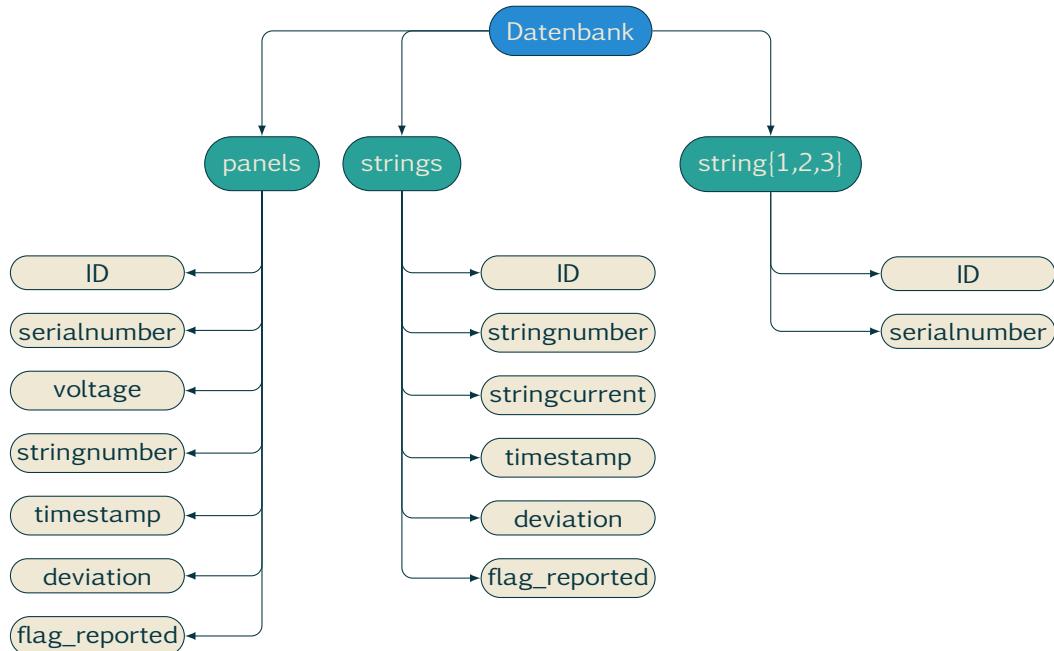


Abbildung 6.10: Datenbank-Layout

Unsere Datenbank umfasst 5 Tabellen (oder *Tables* im Fachjargon), wie auch in Abbildung 6.10 gezeigt:

- `panels`: Speichert die Spannungen der PV-Module
- `strings`: Speichert die Ströme in den Strings
- `string1`: Speichert Sensor-IDs in String 1
- `string2`: Speichert Sensor-IDs in String 2
- `string3`: Speichert Sensor-IDs in String 3

Letztere drei (in Abbildung 6.10 auf der rechten Seite) davon dienen ausschliesslich der Zuordnung aller im System vorhandenen Seriennummern zu den einzelnen Strings. Dies ist notwendig, um bei der Auswertung zu wissen, welche Sensoren sich im selben String befinden und dementsprechend miteinander verglichen werden

müssen. Diese Tables bestehen lediglich aus 2 Spalten, eine für die Seriennummer sowie eine für die ID des Eintrages, welcher benötigt wird, um doppelt eingetragene Zeilen zu verhindern.

Das Table `strings` (Mitte in Abbildung 6.10) dient der Speicherung der gemessenen String-Ströme. Diese Werte werden als Paket mit einigen wichtigen zusätzlichen Daten gespeichert. Dazu gehören neben dem gemessenen Stromwert noch die String-Nummer, um zu wissen, welcher String gemessen worden ist, ein Zeitstempel, um nachvollziehen zu können, wie alt die Einträge sind, ein leeres Feld, um bei der Auswertung die Abweichung zum Durchschnitt eintragen zu können, sowie ein Feld, welches ein Flag beinhaltet, das anzeigt, ob der String bereits als ausserhalb der Toleranz gemeldet worden ist. Zudem wird auch hier wieder eine Spalte für die Eintrags-ID benötigt.

Das letzte und grösste Table ist `panels` (links in Abbildung 6.10), in welchem die Modulspannungen abgespeichert werden. Auch hier wird dies wieder als Paket mit relevanten Daten realisiert. Die Zeile in diesem Table ist grundsätzlich gleich aufgebaut wie jene des Strings-Table, nur dass hier anstelle des String-Stroms die Modulspannung eingetragen sowie ein zusätzliches Feld für die Seriennummer des gemessenen Modul-Sensors verwendet wird. Dies wird hier zusätzlich benötigt, um die gemessenen Daten in direktem Zusammenhang mit den Seriennummern der Sensoren zu bringen, was für die Auswertung der Daten nötig ist.

6.3.6 Implementation

Die Master-Software besteht aus Python-Files, auf welche die anfallenden Aufgaben verteilt werden. Im Folgenden werden vier dieser Files genauer beschrieben.

6.3.6.1 database.py

Dieses File ist dazu da, die Datenbank zu erzeugen und zu verwalten. Mittels SQLAlchemy wird zuerst das Datenbank-File erstellt und die einzelnen Tables gemäss unseren Vorlagen aufgebaut und hinzugefügt. Dabei wird vor dem Erzeugen der einzelnen Tabellen zuerst überprüft, ob eine solche bereits vorhanden ist. Das stellt sicher, dass auch bei einem Neustart des Master-Gerät die vorhandene Datenbank nicht überschrieben wird. Nachdem die Datenbank erstellt worden ist, wird zudem für jedes Table eine eigene Klasse mit zugehörigem Mapper definiert. Diese werden benötigt, damit gleichzeitig ausgelöste Datenbank-Operationen sich nicht gegenseitig blockieren, sondern nacheinander abgearbeitet werden können.

6.3.6.2 input_handler.py

Dieses File hat den Zweck, sämtliche Messwerte abzufragen, einen ersten Teil der Auswertung zu übernehmen und schlussendlich die Einträge in der Datenbank vorzunehmen. Für die Abfrage der Messdaten wird hier die gesamte Kommunikation über I²C implementiert. Da dieses File sehr umfangreich ist, ist der zugehörige Prozess in Abbildung 6.11 grafisch dargestellt.

Hauptlauf startet mit der Methode `stringcurrents_request`. Diese ruft nacheinander mittels der Methode `read_stringcurrents_i2c` die aktuellen Werte der Stringströme ab und speichert diese auch gleich mittels `write_string_into_database` am richtigen Ort in der Datenbank. Anschliessend sollen die soeben ausgelesenen Stromwerte auch gleich ausgewertet werden. Da dies keinen grossen Aufwand darstellt, wird dies ebenfalls im selben File implementiert. Dafür wird im Hauptlauf als nächstes die Methode `string_compare` ausgeführt. Diese berechnet den Durchschnitt der aktuellen Werte sowie die Abweichungen der einzelnen Strings zu diesem. Ist die Abweichung zu gross, wird der String dem Benutzer gemeldet. Dies dient vor allem dazu, grobe Probleme festzustellen und diese zügig melden zu können. Ausfälle einzelner Module dagegen werden vom File `evaluator.py` detektiert.

Nach den Strömen widmet sich das File den Modulspannungen. Im Hauptlauf des Files wird die Methode `modulevoltage_request` aufgerufen, welche in jedem String die vorhandenen Seriennummern durchgeht und dabei für jede mittels `read_modulevoltage_i2c` einen Request aussendet. Wird keine Antwort empfangen, wird die History dieser Seriennummer überprüft – ist während 24 Stunden kein Eintrag gemacht worden, wird das Modul als defekt gemeldet. Bekommt die Software eine Antwort auf den Request, wird der Wert unter Verwendung der Methode `write_panel_into_database` in die Datenbank geschrieben. Zusätzlich wird überprüft, ob die Seriennummer bereits im zugehörigen Stringpanel vorhanden ist. So wird ein neu eingesetztes Solarmodul automatisch erkannt und per `write_stringX_into_database` dem richtigen Table hinzugefügt. Nachdem alle Spannungen abgefragt sind wird auch hier bereits die Grundlage für die Auswertung gelegt. So wird in jedem String der höchste Eintrag der Messreihe gesucht und bei jedem einzelnen Modul im `deviation`-Feld die Abweichung zu diesem eingetragen. Somit wird immer der aktuelle Wert mit dem einer funktionierenden Solarzelle verglichen. Bei einer funktionierenden Zelle treten somit lediglich bei Abschattungen kurzzeitig grosse Differenzen auf, welche aber über den Tag gemittelt keinen sehr grossen Einfluss haben. So kann gut zwischen temporär abgeschatteten Modulen, welche eigentlich einwandfrei funktionieren, und defekten Modulen, die längerfristig grosse Abweichungen aufzeigen, unterschieden werden.

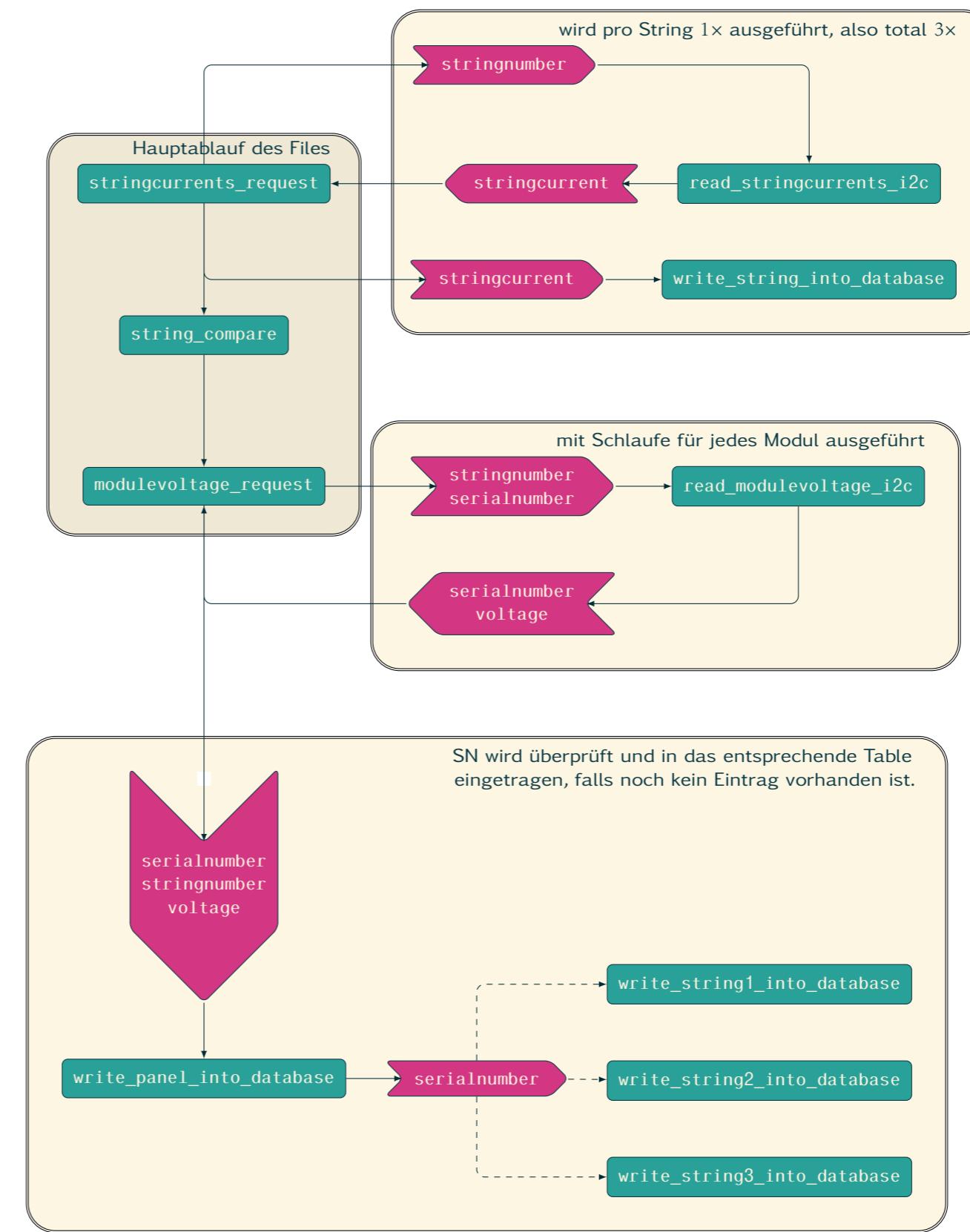


Abbildung
Ablaufdiagramm
`input_handler.py`

6.11:

6.3.6.3 evaluator.py

Der Evaluator ist für die Auswertung der Modulspannungen zuständig. Er wird einmal täglich ausgeführt und kontrolliert die Spannungen aller Module des Systems innerhalb der letzten 24 Stunden.

Dafür wird zuerst für jeden String eine Liste mit den aktuell darin vorhandenen Seriennummern erstellt. Innerhalb jedes Strings wird wiederum für jedes Modul eine Liste mit den Abweichungen jeder einzelnen Messung während der letzten 24 Stunden erstellt. Nun wird über die gesamte Zeit der quadratische Mittelwert der Abweichungen gebildet. Aus allen Mittelwerten der Module innerhalb eines Strings wird nun die Standardabweichung berechnet. Liegt ein Modul ausserhalb dieser Abweichung, wird es als defekt gemeldet. Dieses Vorgehen ist zwar relativ kompliziert, garantiert aber dass nur Module gemeldet werden, welche über längere Dauer zu wenig Leistung bringen. Dies erhöht die Zuverlässigkeit des Systems und reduziert die Wahrscheinlichkeit, eines Fehlalarms, welcher dem Benutzer unnötige Umstände bereiten würde.

6.3.6.4 reporter.py

Der Reporter hat die Aufgabe, bei einem detektierten Fehler den Benutzer über diesen zu informieren. Dies geschieht, indem er einerseits dafür sorgt, dass im GUI das Fehlermeldungs-Display mit der entsprechenden Seriennummer angezeigt wird. Zudem werden die Relaiskontakte angesprochen, um einen beliebigen externen Alarm auszulösen. Letztlich wird auch noch das GSM-Modul aktiviert, um auf die hinterlegte Mobiltelefonnummer eine Textnachricht zu senden.

7

Validierung

Im Folgenden werden Messungen unserer Kopplungsspule, des Modulators und des Demodulators sowie eine Evaluation unseres Gesamtsystems präsentiert.

7.1 Kopplungsspule

Eine Spule leitet nicht alle Frequenzen gleich gut. Zudem sättigt ein Ferritkern ab einem bestimmten Strom. Deswegen werden Frequenzgänge der Spule mit dem Ferritkern und ein Power-Choke Test mit einer Sekundärwindung gemacht.

Es wird die Induktivität einer Spule getestet, welche mehrere Windungen übereinander hat und einer Spule, welche nur eine Schicht mit Wicklungen hat. Beide Spulen haben genau 30 Wicklungen. Wie man Abbildung 7.1 entnehmen kann, ist die Spule mit nur einer Wicklungsschicht bis über 20 Megahertz induktiv (blaue Kurve in Abbildung 7.1), während die Multilayer-Spule schon bei 4 Megahertz kapazitiv wird (rote Kurve in Abbildung 7.1). Für unser Projekt haben wir deswegen die einschichtige Spule gewählt. Eine Messung der Streuinduktivität der gewählten Spule ist ebenfalls gemacht worden, um gut damit rechnen und simulieren zu können (grüne Kurve in Abbildung 7.1).

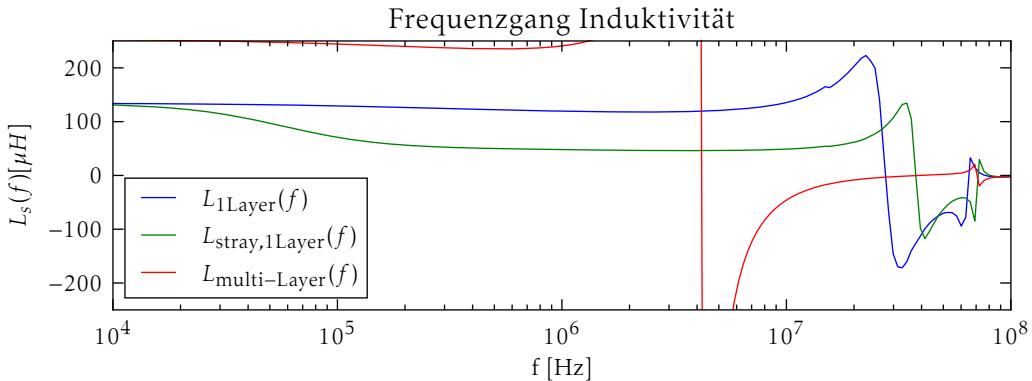


Abbildung 7.1: Induktivitätsmessung der gewählten Spule

Die Power-Choke-Tests sind nur für die gewählte Einlayerspule gemacht worden. Dafür wird durch den Kern eine kurzgeschlossene Primärwicklung geführt, welche dem Aufbau des Endproduktes entspricht. Wie man Abbildung 7.2 entnehmen kann, beginnt der Kern bei ungefähr 2 A, zu sättigen. Die beiden Kurven basieren auf zwei verschiedenen Messmethoden (inkrementelle Messung, blaue Kurve, und Sekantenmessung, grüne Kurve), wobei wir hier eher der inkrementellen Messung Beachtung schenken, da hier der Kurvenverlauf schlechter ausfällt und wir mit dem Worst Case-Szenario planen wollen. Uns interessiert hier primär die Stromabhängigkeit der Induktivität. Das Stromverhältnis im Trafo ist durch Gleichung 7.1 gegeben:

$$I_{\text{secondary}} = \frac{I_{\text{primary}} \cdot N_{\text{primary}}}{N_{\text{secondary}}} \quad (7.1)$$

Somit können wir bei 30 Windungen auf der Primärseite auf der Sekundärseite 60 A führen, ohne den Kern zu sättigen. Bei den 10 A, die die Stromzufuhr maximal etwa führt (Strom eines Modulstrangs), ist dies mehr als ausreichend.

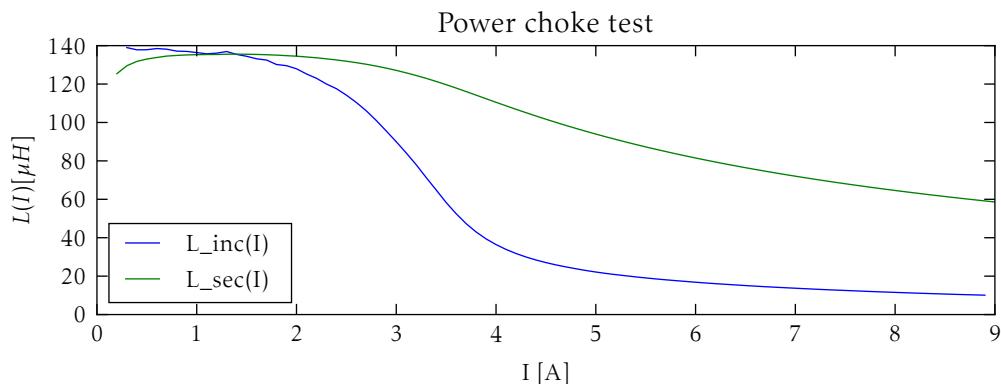


Abbildung 7.2: Kernsättigung der gewählten Spule in Abhängigkeit von I in Form der Induktivität

7.2 Modulator

Bei Modulator ist es besonders wichtig, ein schönes Signal zu haben.

Abbildungen 7.3, 7.4 und 7.5 zeigen die Spannungsverläufe am Ausgang des Oszillators. Wie man an den Kurven erkennen kann, produziert der VCO ein eigentlich schönes Signal. Jedoch gibt es jeweils bei der Flanke Überschwinger. Auch ist das Signal ziemlich eckig, was nicht optimal ist. Dem kann mit einem Tiefpassfilter entgegengewirkt werden.

Leider produziert der VCO ab und zu auch mysteriöse Irregularitäten, wie in Abbildung D.2 gezeigt. Da der 74HC4640, zu dem der VCO gehört, auch sonst nicht so funktioniert, wie es dem Datenblatt zu entnehmen ist, könnte es sein, dass diese Irregularitäten vom Chip stammen. Sehr gut möglich ist aber auch, dass dort ein anderes Signal eingekoppelt wird, oder dass es auf einen Messfehler zurückzuführen ist.

Die Oszilloskop-Einstellungen sind im Anhang D.2 auf Seite 87 zu finden.

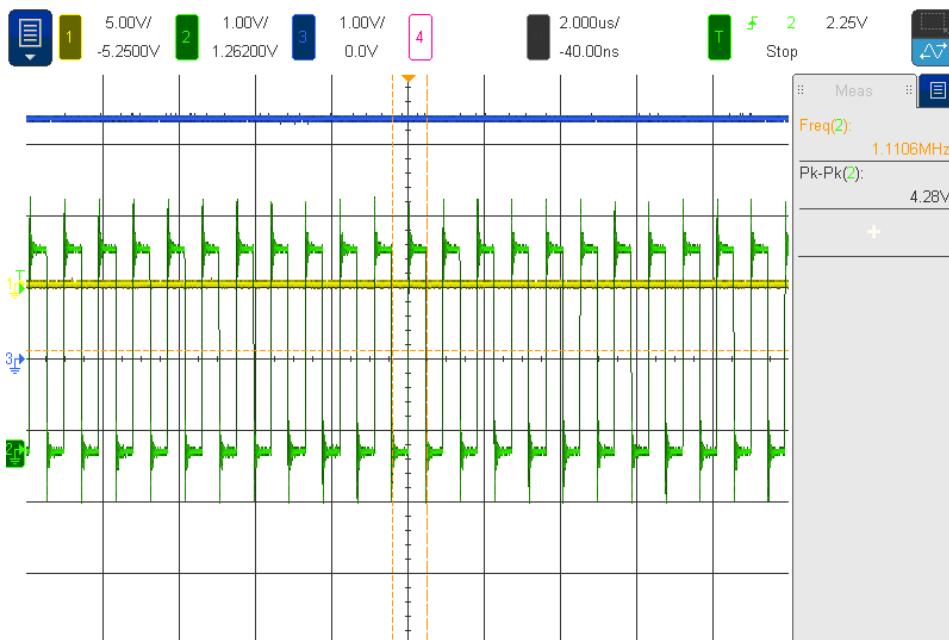
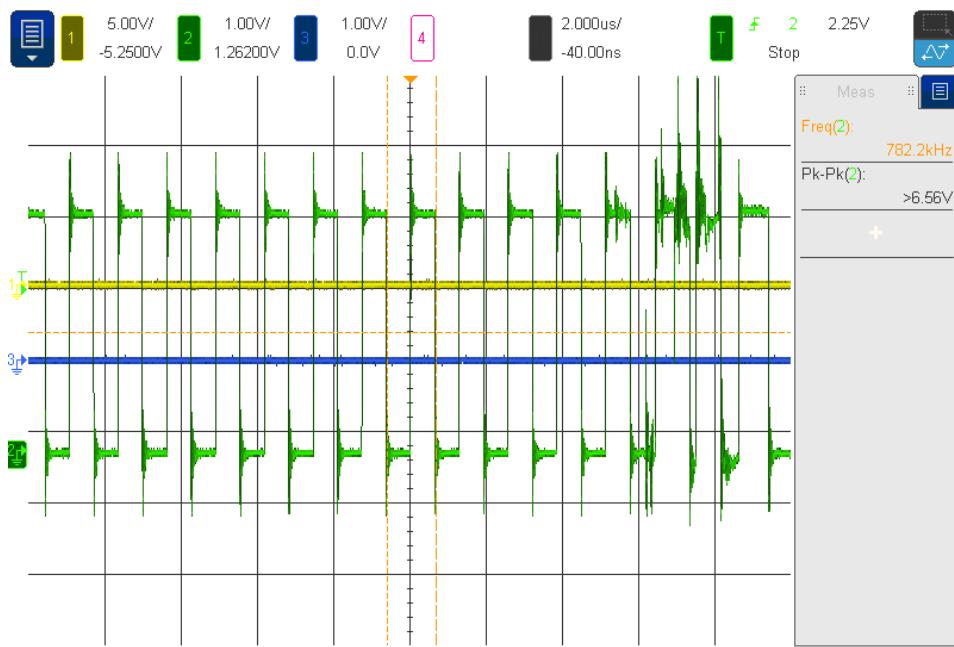
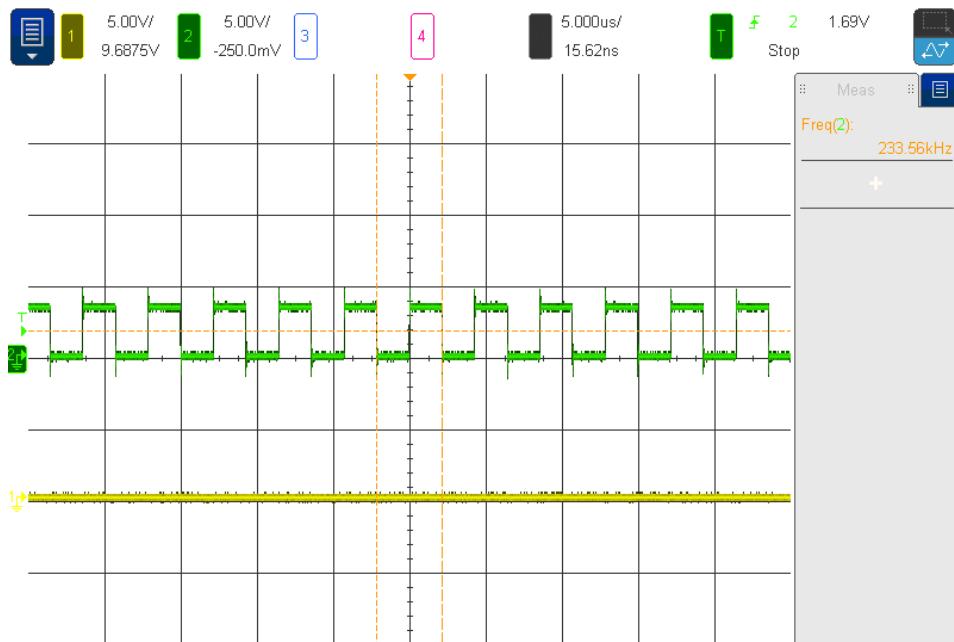


Abbildung 7.3: VCO_{out} zoomed in, Parameter in Listing D.1

Abbildung 7.4: $V_{CO_{out}}$ mit Störungen, Parameter in Listing D.2Abbildung 7.5: $V_{CO_{out}}$ zoomed out, Parameter in Listing D.3

7.3 Demodulator

Beim Demodulator ist es wichtig, dass die Schaltflanken einigermassen steil sind und der Signalverlauf ansonsten konstant. Dass dies der Fall ist, kann den Abbildungen 7.6, 7.7 und 7.8 entnommen werden. Man sieht, dass die Schaltzeit etwa $2\ \mu\text{s}$ beträgt. Wenn man nun mit 9600 Baud empfangen würde, ergäbe dies eine Periode von $104\ \mu\text{s}$. Damit wäre die Schaltzeit lediglich 3.8 Prozent, was reibungslos funktioniert, wie auch gut in Grafik 7.7 zu erkennen ist. Ein Problem, was auf den Grafiken gut sichtbar ist, ist die geringe Amplitude. Dem wird mithilfe eines Verstärkers entgegengewirkt, welcher die Signalamplitude verdoppelt.

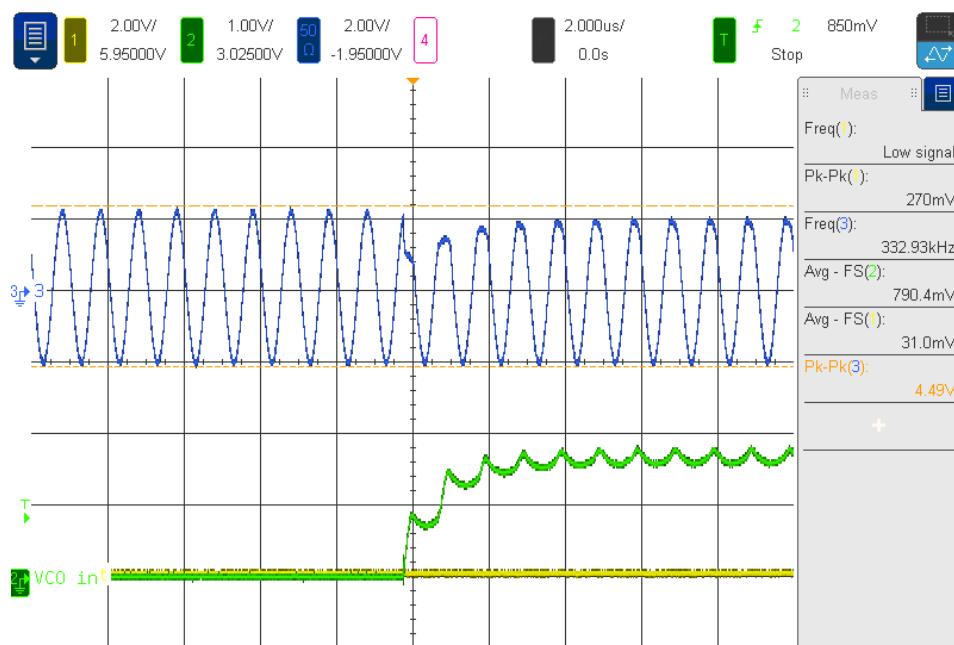


Abbildung 7.6: Steigende Flanke des Demodulators, Parameter in Listing D.4

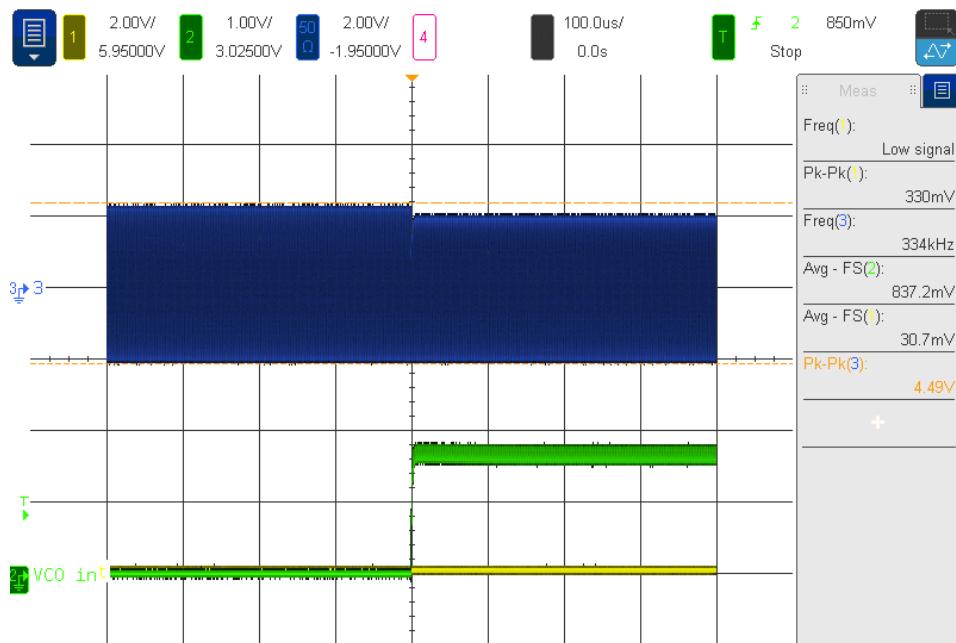


Abbildung 7.7: Steigende Flanke des Demodulators im Makroskopischen, Parameter in Listing D.5

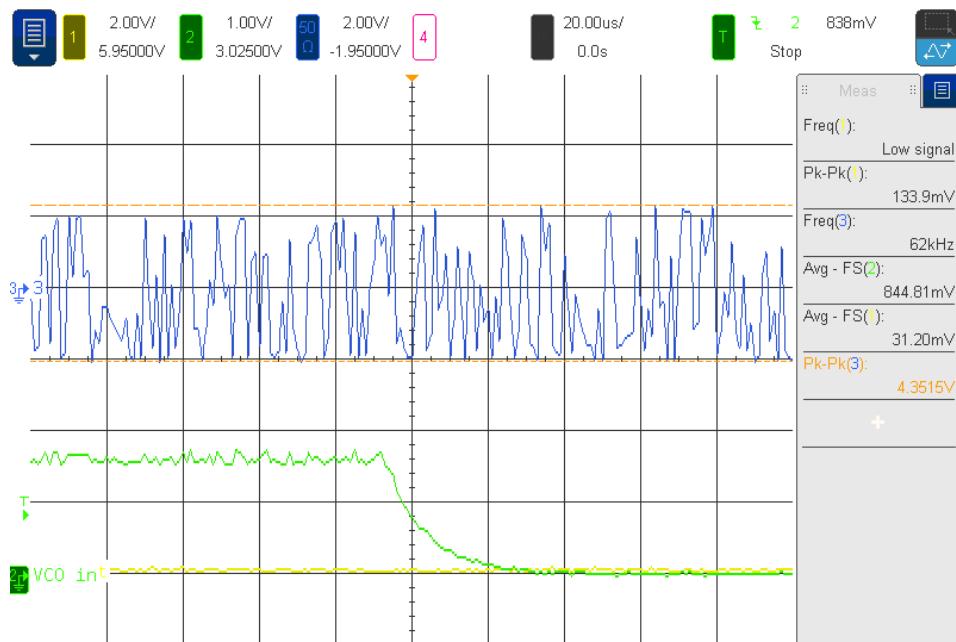


Abbildung 7.8: Steigende Flanke des Demodulators, Parameter in Listing D.6

7.4 Gesamtsystem

Wie in den vorherigen Abschnitten dokumentiert ist, sind alle Teilsysteme getestet und funktionstüchtig. Am Sensorboard müssen einige Anpassungen zum Einstellen der Trägerfrequenz der OOSK gemacht werden. Des Weiteren muss am Demodulator der Verstärker in Betrieb genommen werden, da im Moment die empfangene Signalamplitude zu klein ist, ansonsten aber in Ordnung. Die Modulation und Demodulation sind separat getestet. Nun ist es wichtig, diese im Zusammenspiel zu testen. Dank ansonsten funktionstüchtigem Sensorboard mit kompletter Firmware sollte dies einfach möglich sein.

Beim Master sieht die Lage ähnlich aus. Bis auf die Strommessung sind alle Teilkomponenten erfolgreich getestet. Diese müssen jetzt im Vollbetrieb validiert werden, da dies Aufgrund fehlender Kommunikation der Sensoren bisher weggefalen ist.

Softwareseitig ist der Master auf gutem Wege. Das Auslesen und Auswerten der Sensoren ist über eine normale UART-Verbindung getestet und funktioniert. Das GUI wird angesteuert und eine Fehlermeldung wird ausgelöst, wenn ein Modul defekt ist. Jedoch fehlt ein wenig der Feinschliff. So fehlt noch die Ansteuerungssoftware für das GSM-Modul. Da dieses voll integriert ist, kann dies angenehm über ein two-wire Interface gemacht werden und ist ein einfacher Task, sobald die restlichen Teilsysteme laufen. Die Ansteuerung der Strommessung ist entwickelt, aber noch nicht getestet. Zu guter Letzt ist eine gute Abrundung wichtig. So muss zum Beispiel noch der Button zum Ein- und Ausschalten des Displays angesteuert werden.

8

Benutzerhandbuch



1

Wichtiger Hinweis: Die Installation und Inbetriebnahme darf ausschliesslich durch eine autorisierte Elektrofachkraft ausgeführt werden. Bei der Installation des Systems ist zwingend zu beachten, dass Teile der Photovoltaikanlage ständig unter Spannung stehen können, auch bei abgeschalteter Anlage.

8.1 Installation und Inbetriebnahme

Die Installation des Master-Gerätes erfolgt im Generatoranschlusskasten. Das Master-Gehäuse wird auf einer Hutschiene platziert und innerhalb des GAKs mit 230 V AC gespeist. Die DC-Leitungen von bis zu drei Strängen pro Master-Gerät werden auf die dafür vorgesehenen Anschlussklemmen geführt. Der maximale Leiterquerschnitt der DC-Leitung beträgt 4 mm^2 und ist für gängige Photovoltaikanlagen ausreichend.

Um eine einwandfreie Alarmierung im Fehlerfall zu gewährleisten, wird die Installation mindestens eines externen Meldegeräts empfohlen. Über die beiden Relaiskontakte am Master-Gerät können externe Geräte mit einer Nennspannung bis max. 250 V geschaltet werden.

Nach der Installation und dem Einschalten des Master-Gerätes erfolgt die Installation der Sensorkomponenten. Jedes PV-Modul wird im zugehörigen Anschlusskasten mit einem Sensor ausgestattet. Der Sensor wird über die beiden Kupferdrähte der Platine an den Anschlussklemmen des PV-Moduls angeschlossen. Dabei ist die richtige Polarität zu beachten. Sobald der Sensor mit der DC Leitung verbunden ist, wird die Seriennummer automatisch vom Master-Gerät erfasst und ins System integriert. Jeder Sensor besitzt dabei eine einzigartige Seriennummer. Diese Seriennummer wird jeweils zusätzlich in Form eines Klebstreifens mit dem Sensor

¹ Bildquelle: [41]

mitgeliefert. Um den Standort jedes Sensors zu dokumentieren, sind die Klebstreifen im Anlageplan auf dem jeweiligen Modul aufzutragen. Gleiches Vorgehen für die Installation weiterer Sensoren. Ist ein Sensor defekt, kann die gesamte Platine bequem ausgetauscht werden. Die neue Seriennummer wird dabei automatisch vom Master-Gerät erfasst und ins System integriert. Dabei ist zu beachten, dass der Anlageplan mit den Seriennummern-Klebstreifen stets angepasst wird.

8.2 Regulärer Betrieb

Sämtliche Einstellungen des Systems werden über das Touch-Display des Master-Gerätes getätig. Im regulären Betrieb sind üblicherweise keine Einstellungen vorzunehmen. Der Grüne Knopf, rechts vom Display, dient zum Aus- bzw. Einschalten des Displays. Im regulären Betrieb empfiehlt es sich, aus energietechnischen Gründen das Display ausgeschaltet zu lassen.

Bei Betätigung des grünen Knopfes erscheint das Hauptmenu, dargestellt in Abbildung 8.1. Dieses dient einerseits zur Auflistung aktueller Messwerte der Strangströme und des Anlagestatus, andererseits führt es mittels weiterer Buttons in die jeweiligen Untermenüs. In der obersten Zeile *Anlagestatus* wird dargestellt, ob ein Problem an der Anlage vorliegt. Wird bei Anlagestatus *kein Fehler* angezeigt, liegt an der Anlage keine Störung vor. Wird jedoch die Fehlfunktion eines Moduls detektiert, erfolgt eine Meldung im Hauptmenu (weitere Informationen zum Störbetrieb im folgenden Kapitel).

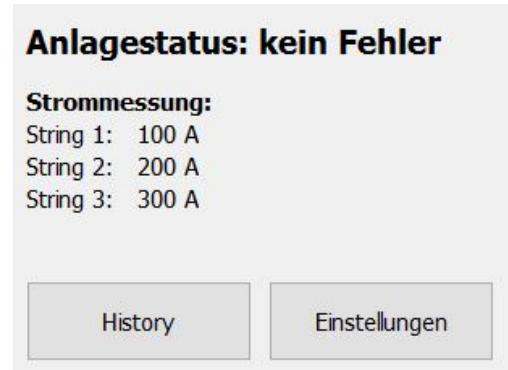


Abbildung 8.1: Hauptmenu



Abbildung 8.2: Einstellungen

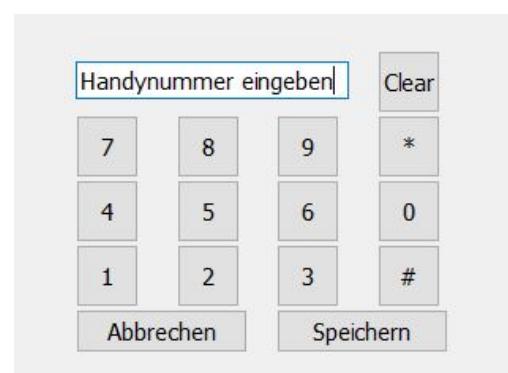


Abbildung 8.3: Eingabe einer Telefonnummer

Im Untermenü *Einstellungen*, dargestellt in Abbildung 8.2, können die SMS-Benachrichtigung und die Relaisausgänge konfiguriert werden. Beim Hinzufügen einer Handynummer mit korrekter Vorwahl (Bsp. 0041 79 612 33 22) und bei Betätigung des entsprechenden Kästchens wird automatisch die Benachrichtigung über SMS aktiviert. Das zugehörige Menu ist in Abbildung 8.3 gezeigt. Analog werden die beiden Relais bei der Aktivierung des jeweiligen Kästchens aktiviert. Über den Button *Speichern* werden die Einstellungen im System übernommen.

8.3 Störbetrieb

Wird die Fehlfunktion eines Moduls detektiert, erfolgt eine Störungsmeldung an das Master-Gerät. Folglich erscheint im Hauptmenu des Master-Gerätes die Seriennummer des entsprechenden Moduls wie auch Datum und Uhrzeit der Fehlererkennung, wie in Abbildung 8.4 gezeigt.

Zeitgleich werden am Master-Gerät zwei Relaiskontakte betätigt, die für externe akustische oder optische Meldegeräte vorgesehen sind. Diese externen Meldegeräte lassen sich mit dem entsprechenden Button im Hauptmenu quittieren. Sofern unter *Einstellungen* eine Handynummer hinterlegt worden ist, erfolgt zusätzlich eine Fehlerbenachrichtigung an das entsprechende Mobiltelefon.

Um Energieverluste zu minimieren, sollte bei einem Fehlerfall umgehend ein Installateur der Photovoltaikanlage konsultiert werden. Sobald das fehlerhafte Modul wieder einwandfrei funktioniert, wird die Fehlermeldung im Hauptmenu des Master-Gerätes automatisch ausgeblendet. Im Untermenü *Fehlerverlauf* (Abbildung 8.5) sind alle bisherigen Fehlermeldungen der Anlage ersichtlich.



Abbildung 8.4: Fehler bei einem Modul

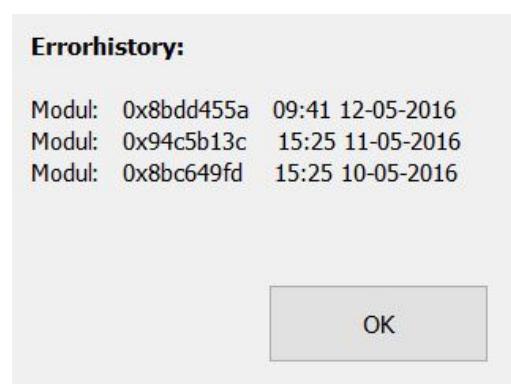


Abbildung 8.5: Fehlerverlauf der Anlage

9

Fazit

Nach Abschluss des Projektes steht dem Auftraggeber ein Produkt zur Verfügung, das als Gesamtsystem die Spannungen an PV-Modulen erfassen und auswerten kann. Die einzelnen Teilsysteme sind mehrheitlich als Prototypen vorhanden, im Labor getestet und funktionsfähig.

Der Sensor kann Spannungen messen und Werte ausgeben. Mit einer Abmessung von knapp $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ bieten wir dem Auftraggeber eine Sensorplatine, die garantiert in jedem Anschlussgehäuse Platz findet. Die Firmware zusammen mit den gewählten Hardwarekomponenten ermöglichen eine saubere Messung der Modulspannung. Die Hauptproblematik im Projekt bestand darin, eine optimale Lösung für die Kommunikation zwischen Sensor und Master-Gerät zu finden. Mit induktiver Einkopplung und OOSK ist eine Variante gewählt worden, die es ermöglicht, die gemessenen Daten der PV-Module dem Mastergerät zu übermitteln. Das Grundprinzip dieser Übertragungsmethode ist validiert.

Mit einem Testaufbau können Signale vom Master-Gerät empfangen und an den Raspberry Pi weitergeleitet werden. Mithilfe der Mastersoftware ist der Raspberry Pi im Stande, die empfangenen Messwerte, auszuwerten, mit anderen Messdaten zu vergleichen und nötigenfalls eine Fehlermeldung auf dem Display auszugeben. Das Master-Gerät bietet einerseits eine benutzerfreundliche Oberfläche, andererseits lässt sich das schlichte Gehäuse bequem in einen bestehenden Generatoranschlusskasten installieren, auch wenn nur wenig Platz vorhanden ist. Die Bedienung und Inbetriebnahme über das 2.5“ Touch-Display ist äusserst komfortabel und selbsterklärend. Ein GSM-Modul für das Versenden einer Textnachricht an ein Mobiltelefon ist ebenfalls vorhanden, lediglich dessen Ansteuerungsfirmware muss noch implementiert werden. Anschliessend ist das Master-Gerät im Stande, im Falle eines Modulfehlers, neben der Betätigung der beiden Relaiskontakte, auch eine Fehlermeldung per SMS zu versenden. Die geplante Zusatzfunktion zur Messung der Strangströme am Master-Gerät ist wegen Zeitmangel noch nicht getestet, jedoch in die Entwicklung integriert.

Als nächster Schritt sollte die Datenübermittlung vom Sensor zum Master-Gerät mittels Powerline getestet werden, wie auch das Zusammenspiel von Tochterboard und Raspberry Pi. Letztlich sollte das gesamten Systems als Ganzes überprüft werden.

Anhänge



Daten von Solarmodulen

Dieser Abschnitt enthält in Tabelle A.1 einige Eckdaten von kommerziell erhältlichen Modulen mit den zugehörigen Quellen. Diese Informationen sollen primär als Anhaltspunkt und Vergleich zwischen Praxis und unseren Simuationen dienen.

Tabelle A.1: Daten für Solarmodule. **pk:** polykristallines Panel, **mk:** monokristallines Panel.
Anmerkung: Die Konfiguration der Module (wieviele Zellen in Serie und wie viele Stränge parallel) ist mit Ausnahme des Solarex MSX-60 nicht angegeben. Es ist aber bekannt, in welcher Größenordnung die Spannung pro Zelle ungefähr liegen sollte, womit man aus den angegebenen Leerlaufspannungen und der Gesamtzahl der Zellen auf die Konfiguration eines Modules schliessen kann.

Quelle	Modell	Kurzschluss- strom I_{SC}	Leerlauf- spannung V_{OC}	Anzahl Zellen (total)	Anzahl Zellen (Strang)	Leerlaufspan- nung pro Zelle
[42]	Solarex MSX-60	3.8 A	21.1 V	36	36	586 mV
[43]	Sunset PX85 (pk)	5.5 A	21.5 V	76	38	566 mV
[44]	Sunset Solargenerator AS150 (mk)	8.7 A	22.3 V	36	36	620 mV
[45]	Sunmodule Pro-Series XL SW320 (mk)	9.41 A	45.9 V	72	72	638 mV

B

LTspice-Schaltungen

Dieses Kapitel beinhaltet LTspice-Schaltungen, welche zu Simulationen benutzt worden sind. Erklärungen zu den jeweiligen Schaltungen sind in den Kapiteln zu finden, welche auf sie verweisen. Zu jeder Schaltung ist angegeben, wo sie auf dem Datenträger gefunden werden kann.

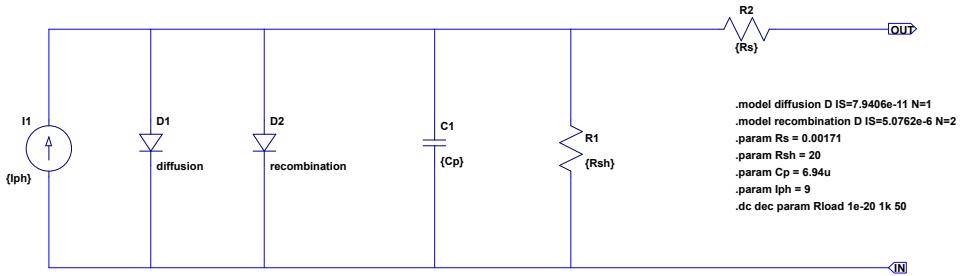


Abbildung B.1: Modell der PV-Zelle, aus welchem das Modul in Abbildung B.3 aufgebaut ist. Die Simulationen aus Abbildung 2.6 auf Seite 7 basieren auf diesem Modell. Gegenüber dem in Abschnitt 3.1 hergeleiteten Modell hat dieses Modell einen höheren Photostrom und einen niedrigeren Shunt-Widerstand. Dies erzeugt etwas anschaulichere Kurven.
Dateipfad: ltspice/generic/cell-9A.asc

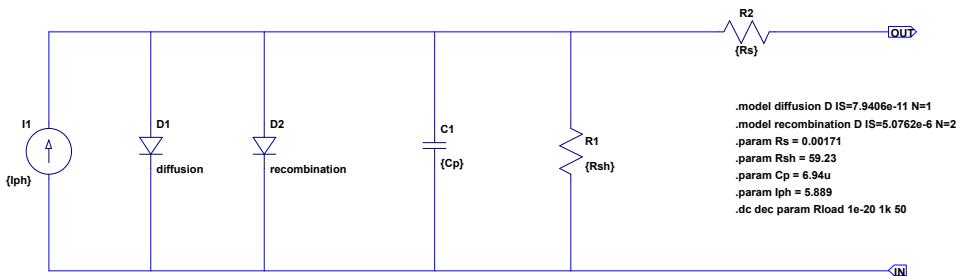


Abbildung B.2: Modell der PV-Zelle, auf welchen die Simulationen in Kapitel 4 ab Seite 21 beruhen. Die Herleitung ist in Abschnitt 3.1 dokumentiert.
Dateipfad: ltspice/jac/jac-cell.asc

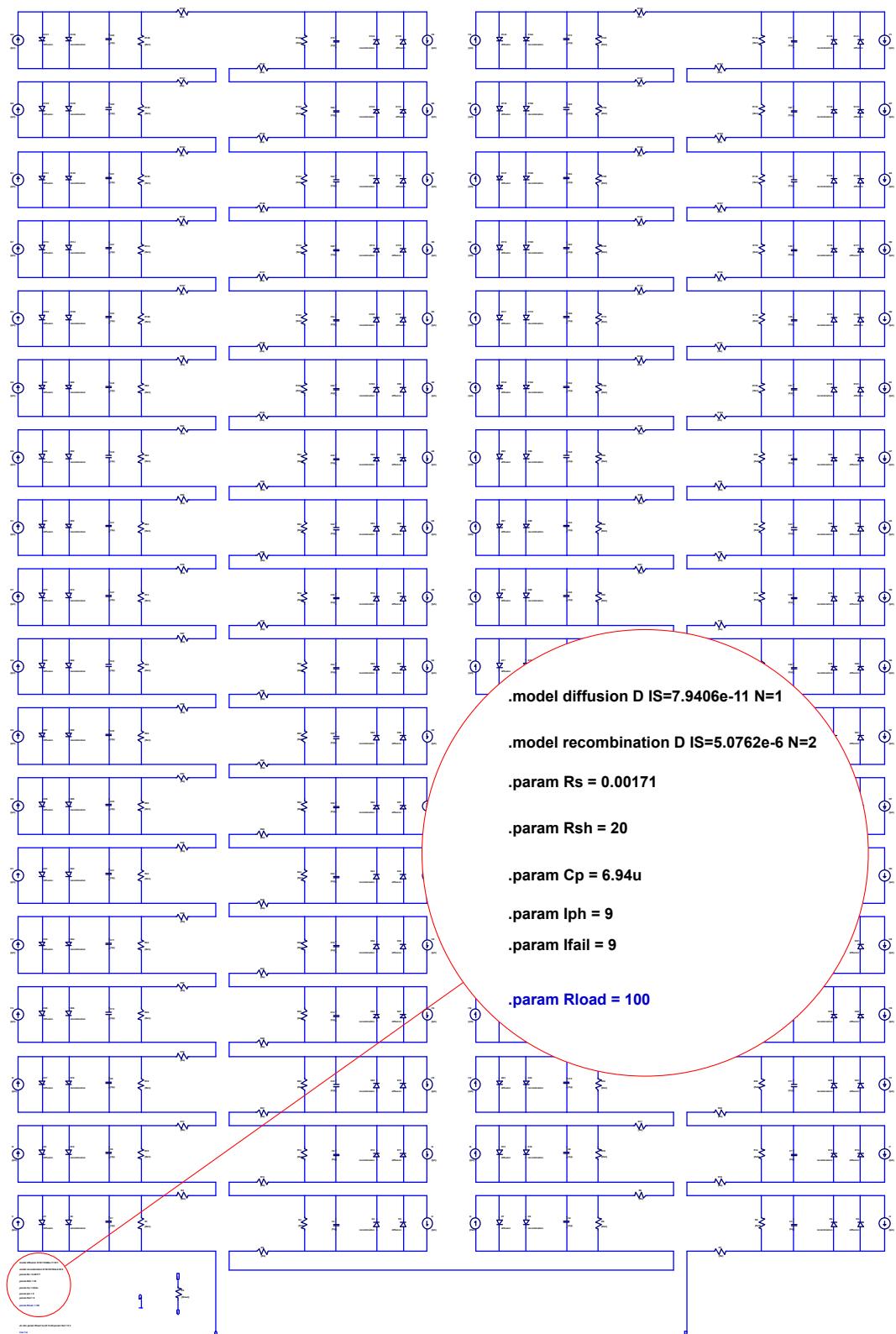


Abbildung B.3: LTspice-Modell, welches zur Erzeugung der Kurven in Abbildung 2.6 auf Seite 7 benutzt worden ist. Das Modell der Zelle, aus welcher dieses Modul aufgebaut ist, ist in Abbildung B.1 abgebildet.

Dateipfad: ltspice/generic/module-9A.asc

Bei Schaltungen mit hunderten oder gar tausenden von Komponenten wird LTspice sehr schwerfällig zum Bedienen, da das Update der Netlist sehr lange dauert und die Netlist bei jeder Änderung der Schaltung aktualisiert werden muss. Zur einfacheren Handhabung von Simulationen mit mehreren Modulen wird deshalb ein neues Symbol für ein Modul definiert, gezeigt in Abbildung B.4, welches je nach Bedarf mit der Schaltung für ein Modul mit oder ohne Freilaufdiode verknüpft werden kann.

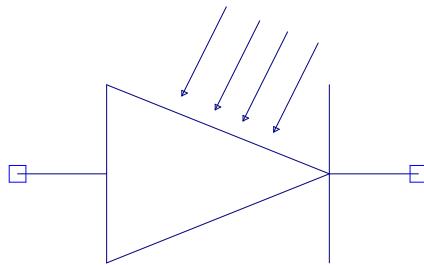


Abbildung B.4: Selbst erstelltes Symbol für PV-Modul

Dateipfad: `ltspice/jac/jacModule.asy` (mit Freilaufdioden, verknüpft mit Modul aus Abbildung B.6)

Dateipfad: `ltspice/jac/jacModuleNoD.asy` (ohne Freilaufdioden, verknüpft mit Modul aus Abbildung B.7)

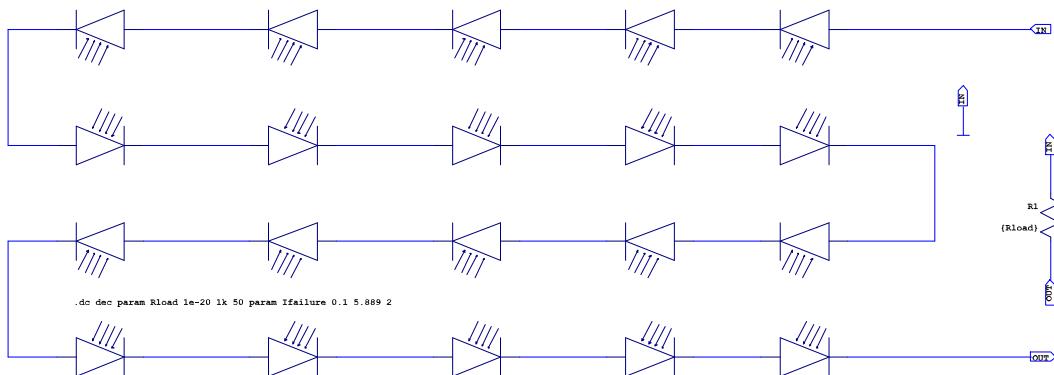


Abbildung B.5: LTspice-Schaltung für einen Modulstrang aus 20 Modulen und variablem Lastwiderstand R_{load} zur Erstellung von Strom-Spannungs-Kurven. Es wird je ein Strang aus Modulen mit Freilaufdiode (Abbildung B.6) und ohne Freilaufdiode (Abbildung B.7) simuliert.

Dateipfad: `ltspice/jac/string.asc` (mit Freilaufdioden)

Dateipfad: `ltspice/jac/stringNoD.asc` (ohne Freilaufdioden)

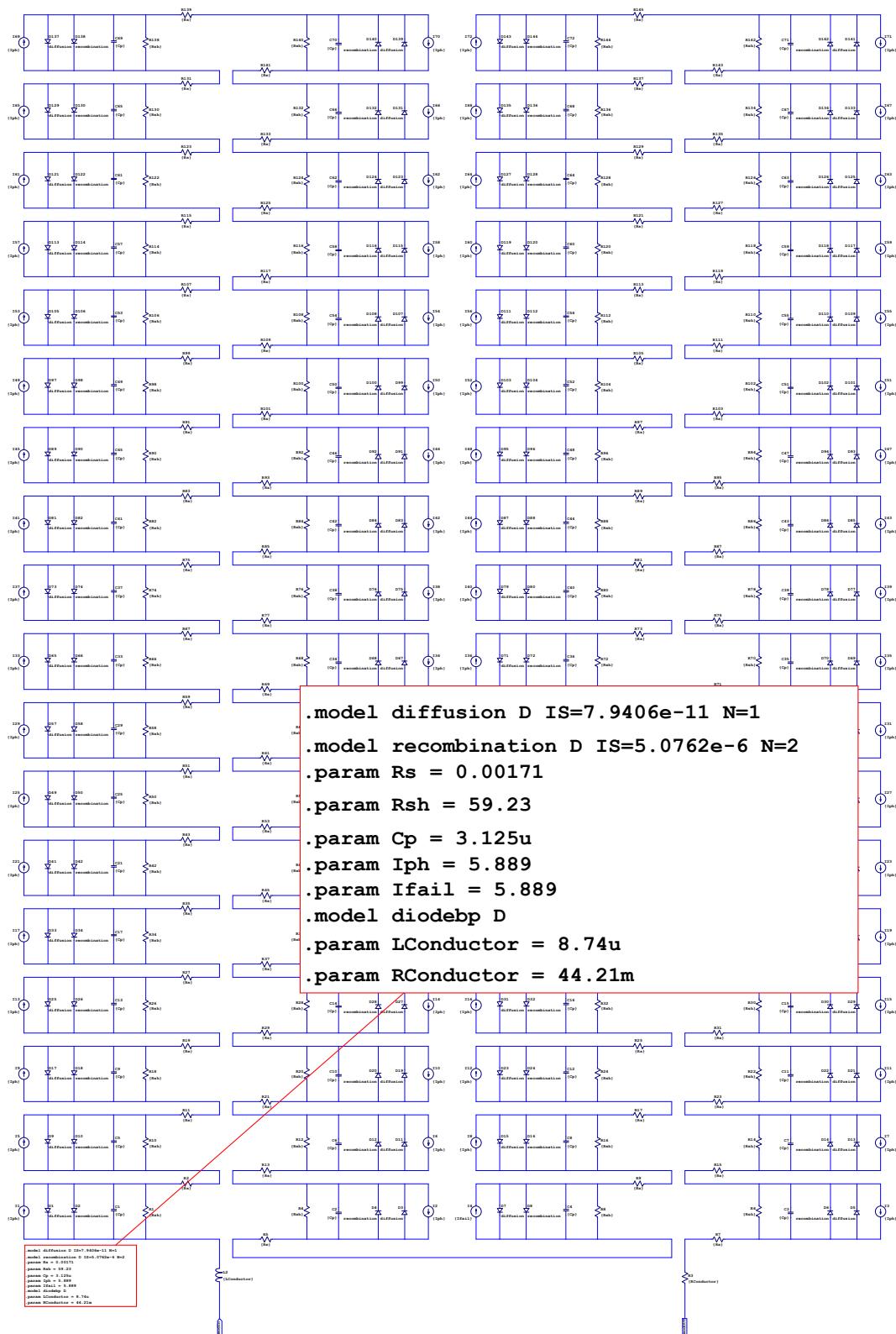


Abbildung B.6: Modul ohne Freilaufdiode, benutzt für die Simulation aus Abbildung 2.7 von Seite 8.

Dateipfad: ltspice/jac/jacModuleNoD.asc

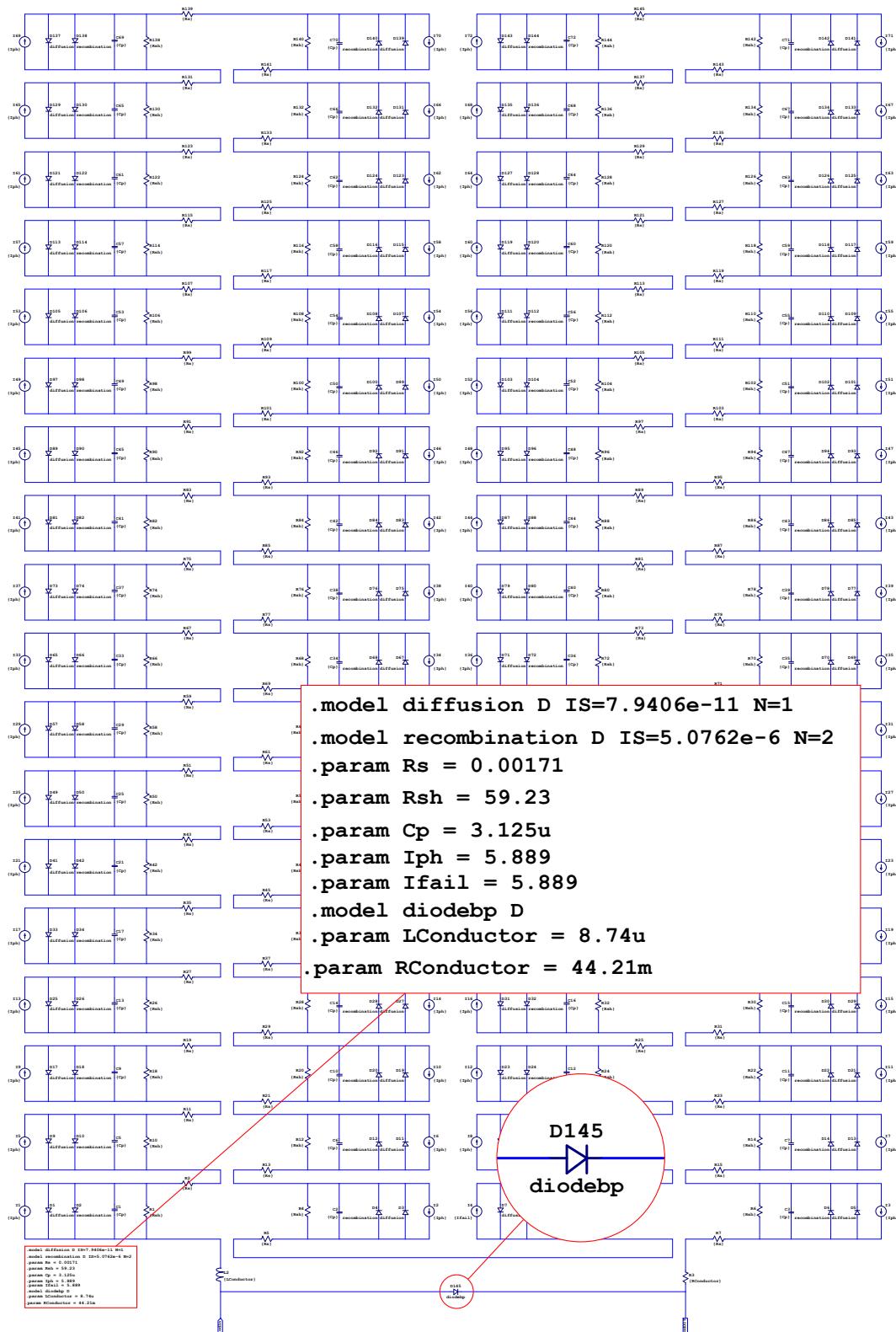
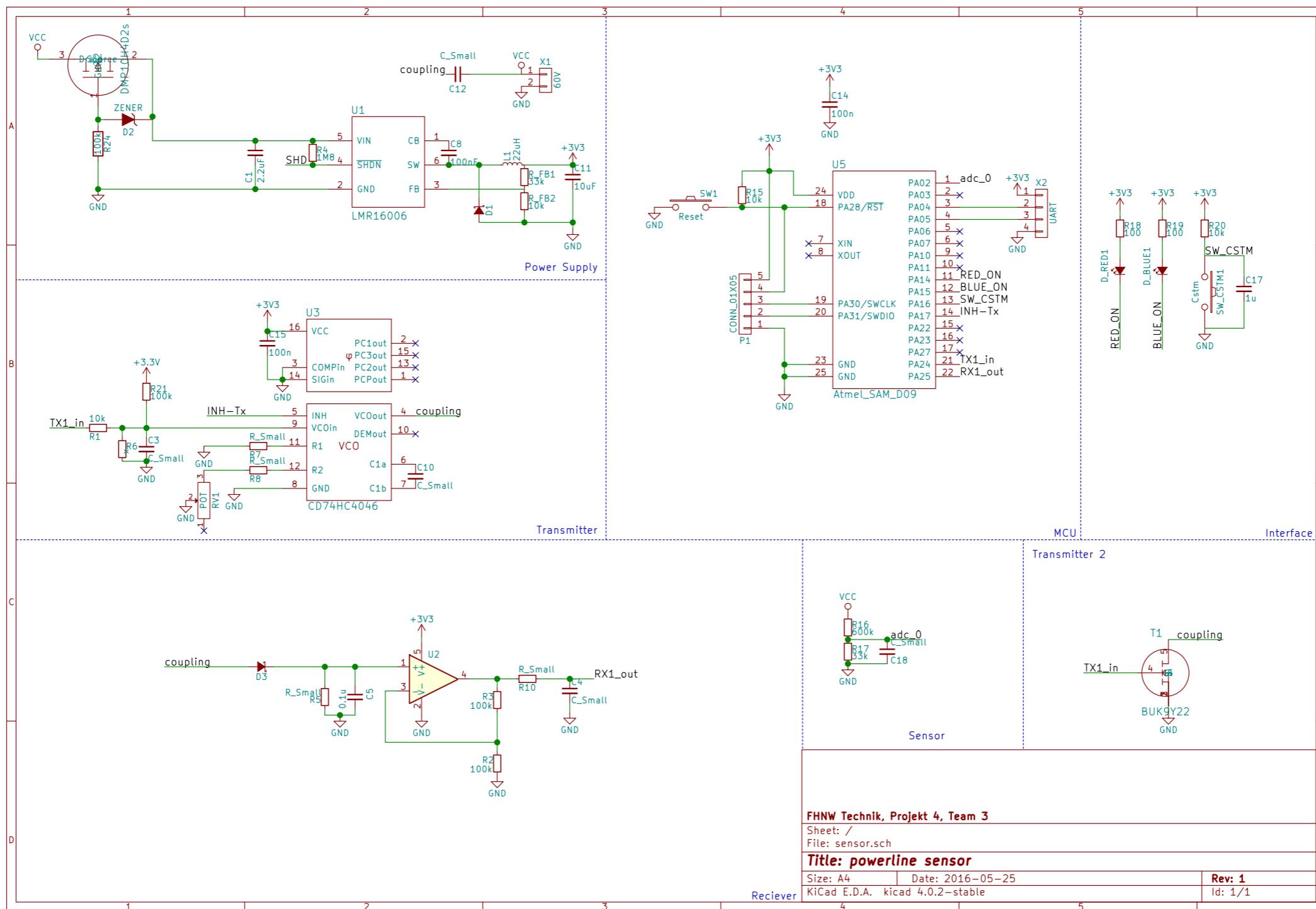


Abbildung B.7: Modul mit Freilaufdiode (unten, Mitte, Diode D145). Benutzt für die Simulation aus Abbildung 2.8 von Seite 9 sowie die Simulationen zu den Lösungsvarianten in Abschnitt 4.1 ab Seite 21, Abschnitt 4.2 ab Seite 27 und Abschnitt 4.3 ab Seite 29. Abbildung B.2 enthält das verwendete Zellenmodell.
Dateipfad: ltspice / jac / jacModule.asc

C

Schemata

Abbildung C.1: Schema Sensor



ANHANG C. SCHEMATA

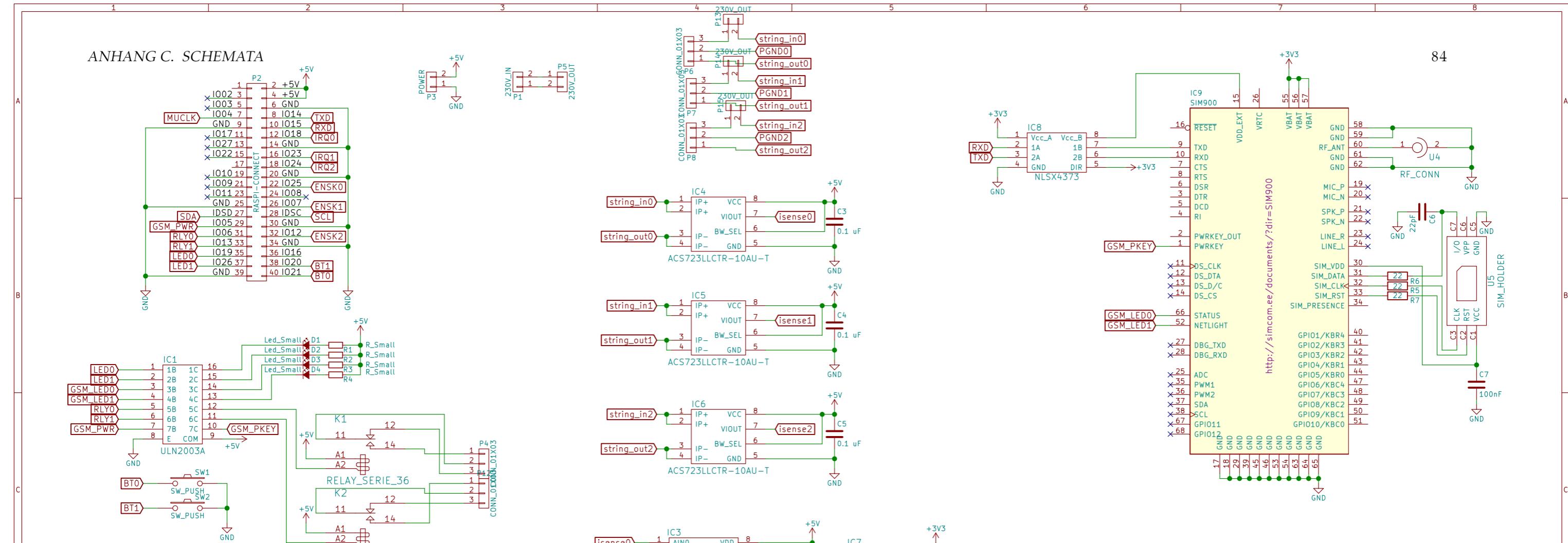
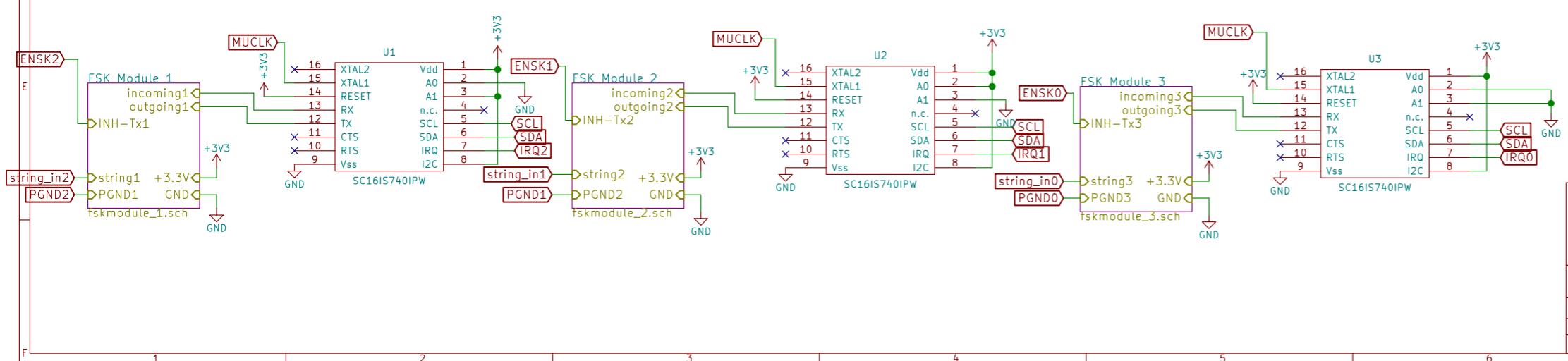


Abbildung C.2: Schema Master



FHNW Technik, Projekt 4E, Team 3

Sheet: / File: supervisor.sch

Title: Master-Geraet

Size: A3 Date: 2016-05-25
KiCad E.D.A. kicad 4.0.2-stable

Rev: 1 Id: 1/4



Zusatzinformationen Validierung

Es sind an dieser Stelle zusätzliche Messergebnisse und die für das Oszilloskop benutzten Einstellungen aufgeführt.

D.1 Zusätzliche Plots für Validierung

Es sind hier der Verlauf des Seriewiderstands unserer Spule über die Frequenz und der Power Choke Test in Abhängigkeit des Flusses aufgeführt.

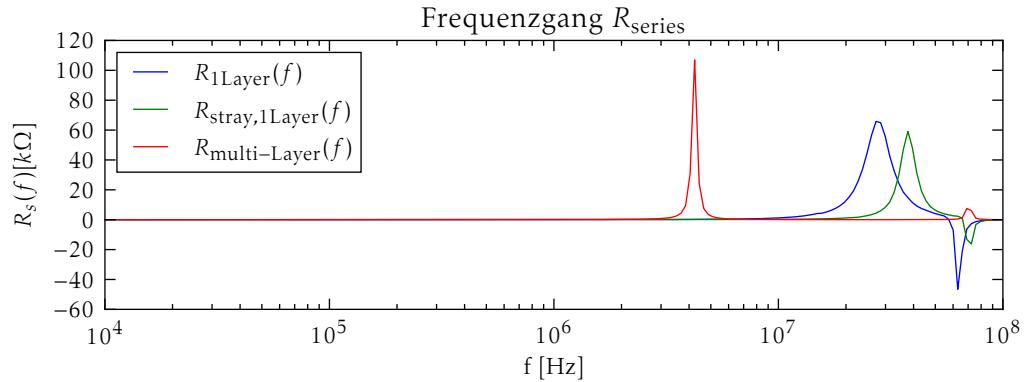


Abbildung D.1: Serienwiderstandsmessung der gewählten Spule

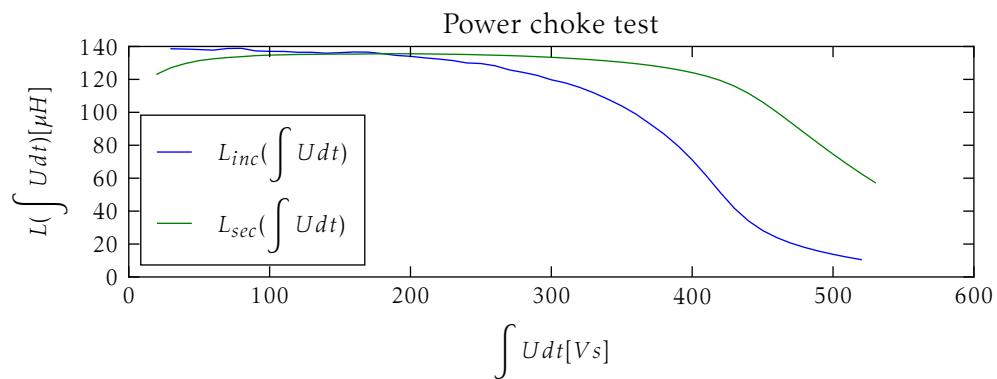


Abbildung D.2: Kernsättigung der gewählten Spule in Abhängigkeit von $\int U dt$ in Form der Induktivität

D.2 Einstellungen Oszilloskop

Im Folgenden sind die Einstellungen aufgelistet, welche für das Oszilloskop für die Messungen in Abschnitt 7.1 benutzt worden sind.

Listing D.1: Oszilloskop-Einstellungen zu Abbildung 7.3

```

1 ANALOG
2 Ch 1 Scale 5.00V/, Pos -5.2500V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
3     Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
4 Ch 2 Scale 1.00V/, Pos 1.26200V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
5     Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
6 Ch 3 Scale 1.00V/, Pos 0.0V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
7     Probe 1.000000 : 1, Skew 0.0s
8
9 TRIGGER
10 Sweep Mode Auto, Coup DC, Noise Rej Off, HF Rej Off, Holdoff 40.0ns
11 Mode Edge, Source Ch 2, Slope Rising, Level 2.2500V
12
13 HORIZONTAL
14 Mode Normal, Ref Center, Main Scale 2.000us/, Main Delay -40.000ns
15
16 ACQUISITION
17 Mode Normal, Realtime On, Vectors On, Persistence Off
18
19 MEASUREMENTS
20 Frequency(2), Cur 1.1106MHz, Mean 8.2872MHz, Min 0Hz, Max 104.00MHz, Std Dev 8.7868MHz,
   Count 179.2k
21 Pk-Pk(2), Cur 4.28V, Mean 1.60V, Min 40mV, Max 12.99V, Std Dev 1.95V, Count 1.103M

```

Listing D.2: Oszilloskop-Einstellungen zu Abbildung 7.4

```

1 ANALOG
2 Ch 1 Scale 5.00V/, Pos -5.2500V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
3     Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
4 Ch 2 Scale 1.00V/, Pos 1.26200V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
5     Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
6 Ch 3 Scale 1.00V/, Pos 0.0V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
7     Probe 1.000000 : 1, Skew 0.0s
8
9 TRIGGER
10 Sweep Mode Auto, Coup DC, Noise Rej Off, HF Rej Off, Holdoff 40.0ns
11 Mode Edge, Source Ch 2, Slope Rising, Level 2.2500V
12
13 HORIZONTAL
14 Mode Normal, Ref Center, Main Scale 2.000us/, Main Delay -40.000ns
15
16 ACQUISITION
17 Mode Normal, Realtime On, Vectors On, Persistence Off
18
19 MEASUREMENTS
20 Frequency(2), Cur 782.2kHz, Mean 8.2571MHz, Min 0Hz, Max 104.00MHz, Std Dev 8.7821MHz, Count
   180.1k
21 Pk-Pk(2), Cur >6.56V, Mean 1.60V, Min 40mV, Max 12.99V, Std Dev 1.95V, Count 1.104M

```

Listing D.3: Oszilloskop-Einstellungen zu Abbildung 7.5

```

1 ANALOG
2 Ch 1 Scale 5.00V/, Pos 9.6875V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
3     Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
4 Ch 2 Scale 5.00V/, Pos -250.0mV, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
5     Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s

```

```

6
7 TRIGGER
8 Sweep Mode Auto, Coup DC, Noise Rej Off, HF Rej Off, Holdoff 40.0ns
9 Mode Edge, Source Ch 2, Slope Rising, Level 1.6875V
10
11 HORIZONTAL
12 Mode Normal, Ref Center, Main Scale 5.000us/, Main Delay 15.620ns
13
14 ACQUISITION
15 Mode Normal, Realtime On, Vectors On, Persistence Off
16
17 MEASUREMENTS
18 Frequency(2), Cur 233.56kHz, Mean 324.78kHz, Min 0Hz, Max 34.700MHz, Std Dev 847.77kHz,
   Count 58.14k

```

Listing D.4: Oszilloskop-Einstellungen zu Abbildung 7.6

```

1 ANALOG
2 Ch 1 Scale 2.00V/, Pos 5.95000V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
3   Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
4 Ch 2 Scale 1.00V/, Pos 3.02500V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
5   Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
6 Ch 3 Scale 2.00V/, Pos -1.95000V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 50 Ohm
7   Probe 1.0000000 : 1, Skew 0.0s
8
9 TRIGGER
10 Sweep Mode Auto, Coup DC, Noise Rej Off, HF Rej Off, Holdoff 40.0ns
11 Mode Edge, Source Ch 2, Slope Rising, Level 850.00mV
12
13 HORIZONTAL
14 Mode Normal, Ref Center, Main Scale 2.000us/, Main Delay 0.0s
15
16 ACQUISITION
17 Mode Normal, Realtime On, Vectors On, Persistence Off
18
19 MEASUREMENTS
20 Frequency(1), Cur Low signal, Mean 14.438MHz, Min 0Hz, Max 93.000MHz, Std Dev 5.336MHz,
   Count 212.8k
21 Pk-Pk(1), Cur 270mV, Mean 470mV, Min 90mV, Max 5.36V, Std Dev 550mV, Count 2.343M
22 Frequency(3), Cur 332.93kHz, Mean 11.331MHz, Min 0Hz, Max 93.000MHz, Std Dev 6.6745MHz,
   Count 1.022M
23 Average - Full Screen(2), Cur 790.4mV, Mean 435.2mV, Min -2.8940V, Max 5.0640V, Std Dev
   1.1827V, Count 1.768M
24 Average - Full Screen(1), Cur 31.0mV, Mean 882.7mV, Min -71.0mV, Max 4.1380V, Std Dev
   1.3520V, Count 893.9k
25 Pk-Pk(3), Cur 4.49V, Mean 2.51V, Min 100mV, Max 4.95V, Std Dev 1.02V, Count 792.4k

```

Listing D.5: Oszilloskop-Einstellungen zu Abbildung 7.7

```

1 ANALOG
2 Ch 1 Scale 2.00V/, Pos 5.95000V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
3   Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
4 Ch 2 Scale 1.00V/, Pos 3.02500V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
5   Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
6 Ch 3 Scale 2.00V/, Pos -1.95000V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 50 Ohm
7   Probe 1.0000000 : 1, Skew 0.0s
8
9 TRIGGER
10 Sweep Mode Auto, Coup DC, Noise Rej Off, HF Rej Off, Holdoff 40.0ns
11 Mode Edge, Source Ch 2, Slope Rising, Level 850.00mV
12
13 HORIZONTAL
14 Mode Normal, Ref Center, Main Scale 100.0us/, Main Delay 0.0s

```

```

15
16 ACQUISITION
17 Mode Normal, Realtime On, Vectors On, Persistence Off
18
19 MEASUREMENTS
20 Frequency(1), Cur Low signal, Mean 14.438MHz, Min 0Hz, Max 93.000MHz, Std Dev 5.336MHz,
   Count 212.8k
21 Pk-Pk(1), Cur 330mV, Mean 470mV, Min 90mV, Max 5.36V, Std Dev 550mV, Count 2.343M
22 Frequency(3), Cur 334kHz, Mean 11.331MHz, Min 0Hz, Max 93.000MHz, Std Dev 6.675MHz, Count
   1.022M
23 Average - Full Screen(2), Cur 837.2mV, Mean 435.2mV, Min -2.8940V, Max 5.0640V, Std Dev
   1.1827V, Count 1.768M
24 Average - Full Screen(1), Cur 30.7mV, Mean 882.7mV, Min -71.0mV, Max 4.1380V, Std Dev
   1.3520V, Count 893.9k
25 Pk-Pk(3), Cur 4.49V, Mean 2.51V, Min 100mV, Max 4.95V, Std Dev 1.02V, Count 792.4k

```

Listing D.6: Oszilloskop-Einstellungen zu Abbildung 7.8

```

1 ANALOG
2 Ch 1 Scale 2.00V/, Pos 5.95000V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
3   Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
4 Ch 2 Scale 1.00V/, Pos 3.02500V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 1M Ohm
5   Probe 10.000000 : 1, Skew 0.0s
6 Ch 3 Scale 2.00V/, Pos -1.95000V, Coup DC, BW Limit Off, Inv Off, Imp 50 Ohm
7   Probe 1.0000000 : 1, Skew 0.0s
8
9 TRIGGER
10 Sweep Mode Auto, Coup DC, Noise Rej Off, HF Rej Off, Holdoff 40.0ns
11 Mode Edge, Source Ch 2, Slope Falling, Level 837.50mV
12
13 HORIZONTAL
14 Mode Normal, Ref Center, Main Scale 20.00us/, Main Delay 0.0s
15
16 ACQUISITION
17 Mode Normal, Realtime On, Vectors On, Persistence Off
18
19 MEASUREMENTS
20 Frequency(1), Cur Low signal, Mean 14.438MHz, Min 0Hz, Max 93.000MHz, Std Dev 5.336MHz,
   Count 212.8k
21 Pk-Pk(1), Cur 133.9mV, Mean 470.5mV, Min 92.1mV, Max 5.3600V, Std Dev 545.1mV, Count 2.343M
22 Frequency(3), Cur 62kHz, Mean 11.330MHz, Min 0Hz, Max 93.000MHz, Std Dev 6.675MHz, Count
   1.022M
23 Average - Full Screen(2), Cur 844.81mV, Mean 435.24mV, Min -2.8940V, Max 5.0640V, Std Dev
   1.1827V, Count 1.768M
24 Average - Full Screen(1), Cur 31.20mV, Mean 882.65mV, Min -71.00mV, Max 4.1380V, Std Dev
   1.3520V, Count 893.9k
25 Pk-Pk(3), Cur 4.3515V, Mean 2.5063V, Min 104.6mV, Max 4.9500V, Std Dev 1.0167V, Count 792.5k

```

Literaturverzeichnis

- [1] AleSpa, „Photovoltaik Dachanlage Hannover - Schwarze Heide - Leistung 1 MW,“ Juli 2012. [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photovoltaik_Dachanlage_Hannover_-_Schwarze_Heide_-_1_MW.jpg (Abrufdatum: 05. Mai 2016).
- [2] FHNW, „Wort-bildmarke (logo),“ März 2012. [Online] Available: <http://web.fhnw.ch/cd/corporate-design/logos-fur-die-hochschulen> (Abrufdatum: 05. Mai 2016).
- [3] WhistlingBird, „File:silicon solar cell (perc) front and back.jpg,“ Juli 2014. [Online] Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicon_solar_cell_\(PERC\)_front_and_back.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicon_solar_cell_(PERC)_front_and_back.jpg) (Abrufdatum: 22. Mai 2016).
- [4] „Photovoltaik: Solarstrom und Solarzellen in Theorie und Praxis,“ Juni 2014. [Online] Available: <http://www.solarserver.de/wissen/basiswissen/photovoltaik.html> (Abrufdatum: 23. Mai 2016).
- [5] „Aufbau von Photovoltaik-Modulen,“ [Online] Available: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Solar_PV-Module_165796.html (Abrufdatum: 23. Mai 2016).
- [6] „PV Junction Box – The Leading Role in Electrical Wiring System,“ [Online] Available: <http://www.qc-solar.com/news/30778.html> (Abrufdatum: 27. Mai 2016).
- [7] „Umweltmesstechnik - Gantner Instruments: Datenlogger,“ [Online] Available: www.gantner-environment.de/datenlogger/qreader_cabinet (Abrufdatum: 26. Mai 2016).
- [8] „Wechselrichter Sunny Boy 2500HF-30,“ [Online] Available: <http://www.iwssolar.ch/wechselrichter-sunny-boy-2500hf-30> (Abrufdatum: 26. Mai 2016).
- [9] „Photovoltaik Wechselrichter,“ [Online] Available: <http://www.photovoltaik-web.de/photovoltaik/wechselrichter/auslegung-wechselrichter.html> (Abrufdatum: 23. Mai 2016).

- [10] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters," *Electronics Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 406–408, May 1984.
- [11] F. Masmoudi, F. B. Salem, and N. Derbel, "Single and double diode models for conventional mono-crystalline solar cell with extraction of internal parameters," in *2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, March 2016, pp. 720–728.
- [12] S. S. Hegedus, "Capacitance studies of a-sige:h p-i-n solar cells," in *Photovoltaic Specialists Conference, 1990., Conference Record of the Twenty First IEEE*, May 1990, pp. 1544–1549 vol.2.
- [13] H. Mandal and S. Saha, "An improved technique of capacitance measurement of solar cells," in *Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), 2015 Third International Conference on*, Feb 2015, pp. 1–4.
- [14] P. H. Mauk, H. Tavakolian, and J. R. Sites, "Interpretation of thin-film polycrystalline solar cell capacitance," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 37, no. 2, pp. 422–427, Feb 1990.
- [15] E. B. Rosa, „The Self and Mutual Inductances of Linear Conductors,“ September 1907. [Online] Available: http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/bulletin/04/nbsbulletinv4n2p301_A2b.pdf (Abrufdatum: 16. Mai 2016).
- [16] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, 17th ed. Fachbuchverlag Leipzig, 2001, tabelle 45, p. 649.
- [17] ——, *Taschenbuch der Physik*, 17th ed. Fachbuchverlag Leipzig, 2001, tabelle 48, p. 653.
- [18] ——, *Taschenbuch der Physik*, 17th ed. Fachbuchverlag Leipzig, 2001, ch. 30.3.3, p. 453.
- [19] ——, *Taschenbuch der Physik*, 17th ed. Fachbuchverlag Leipzig, 2001, ch. 29.3.1, p. 432.
- [20] Linear Technology, „Design Simulation and Device Models,“ [Online] Available: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice> (Abrufdatum: 10. Mai 2016).
- [21] Texax Instruments, „LMR16006 Simple Switcher 60 V 0.6 A Buck Regulators with High Efficiency ECO Mode,“ Oktobert 2014. [Online] Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr16006.pdf> (Abrufdatum: 12. Juni 2016).

- [22] Texax Instruments, „High-Speed CMOS Logic Phase-Locked Loop with VCO,“ Dezember 2003. [Online] Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd54hc4046a.pdf> (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [23] Atmel Corp, „Atmel SAM D09 Smart ARM-Based Microcontroller,“ 2016. [Online] Available: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42414-SAM-D09_Datasheet.pdf (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [24] Simcorp, „SIM900 Reference Design Guide,“ August 2010. [Online] Available: http://simcom.ee/documents/SIM900/AN_SIM900%20Reference%20Design%20Guide_V1.02.pdf (Abrufdatum: 27. Mai 2016).
- [25] Texas Instruments, „LM2596 Simple Switcher® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator,“ April 2013. [Online] Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf> (Abrufdatum: 27. Mai 2016).
- [26] Raspberry Pi Foundation, „What Are the Power Requirements?,“ [Online] Available: <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/#powerReqs> (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [27] 4D Systems, „4DPI-24-Hat,“ [Online] Available: http://www.4dsystems.com.au/productpages/4DPi-24-HAT/downloads/4DPi-24-HAT_datasheet_R_1_6.pdf (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [28] Simcom, „Sim900 Reference Design Guide,“ [Online] Available: http://simcom.ee/documents/SIM900/AN_SIM900ReferenceDesignGuide_V1.02.pdf (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [29] Finder, „36 Series,“ [Online] Available: <http://gfinder.findernet.com//assets/Series/356/S36EN.pdf> (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [30] Farnell, „Enclosed power supplies, txm series, 15–320 watt,“ Mai 2013, [Online] Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1763612.pdf> (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [31] Texas Instuments, „ULN200X, ULQ200X High-Voltage, High-Current Darlington Transistor Arrays,“ [Online] Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf> (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [32] NXP Semiconductors, „Sc16is740/750/760,“ [Online] Available: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SC16IS740_750_760.pdf (Abrufdatum: 04. Juni 2016).

- [33] Allegro MicroSystems, „ACS725 Datasheet,“ [Online] Available: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS725-Datasheet.ashx> (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [34] Maxim Integrated, „MAX11612–MAX11617,“ [Online] Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX11612-MAX11617.pdf> (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [35] Simcom, „Sim900,“ [Online] Available: http://simcom.ee/documents/SIM900/SIM900_SPEC_1405.pdf (Abrufdatum: 04. Juni 2016).
- [36] „Cascaded integrator–comb filter,“ [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cascaded_integrator\T1\textendashcomb_filter (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [37] Riverbank, „Software What Is PyQt?,“ [Online] Available: <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro> (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [38] SQLAlchemy, „SQLAlchemy – The Database Toolkit for Python,“ [Online] Available: <http://www.sqlalchemy.org> (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [39] „Wiringpy/wiringpi-python: Python-wrapped version of gordon henderson’s wiringpi version 2,“ [Online] Available: <https://github.com/WiringPi/WiringPi-Python> (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [40] Software in the Public Interest, Inc., „Debian Social Contract,“ [Online] Available: https://www.debian.org/social_contract#guidelines (Abrufdatum: 12. Juni 2016).
- [41] „Achtung Photovoltaikanlage,“ [Online] Available: <https://www.warnschilder-shop.de/warnschilder-elekrotechnik/warnschilder-achtung-photovoltaikanlage.html> (Abrufdatum: 09. Juni 2016).
- [42] Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in matlab. März 2013. [Online] Available: http://www.ijetae.com/files/Volume3Issue3/IJETAE_0313_84.pdf (Abrufdatum: 10. Mai 2016).
- [43] „PX85,“ [Online] Available: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/110258-da-01-fr-SOLARMODUL_PX_85.pdf (Abrufdatum: 11. Mai 2016).
- [44] „Solargenerator AS150,“ [Online] Available: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/110429-da-01-de-SOLARMODUL_AS_150.pdf (Abrufdatum: 11. Mai 2016).

- [45] „Sunmodule Pro-Series XL SW315-320 Mono,“ [Online] Available: www.solarworld-usa.com/~/media/www/files/datasheets/sunmodule-pro-series/sunmodule-pro-series-solar-panel-xl-mono-ds.pdf (Abrufdatum: 11. Mai 2016).