

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	15. Juni 2016
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 raphael.frey@students.fhnw.ch angefordert werden.

Dieses Dokument hat bisher 2951 Kompilervorgänge durchlaufen.

Version 0.1 06.05.2016 Einleitung, Disposition

Quelle Titelbild : [?]
Quelle Logo FHNW : [?]

Abstract

Note: I have added headings for the five sections of the “abstract hand” to highlight my thinking process; obviously those will be removed in the final version.

Research Question: What does the client expect?

This project’s aim was to develop a system for real-time monitoring of photovoltaic facilities on the level of single panels. 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 announced to the user so that appropriate measures (cleaning, replacement) can be taken.

Relevance

Monitoring individual photovoltaic modules will allow the facility’s operator to run their solar farm at optimal conditions, thus reducing losses in both power output and money.

Background

Current solutions for per-module monitoring of solar facilities are expensive and are therefore often foregone in order to save costs when building new facilities. This approach is short-sighted and more expensive in the long term because not being able to properly monitor a solar facility means that it is often not operating at optimal conditions. As non-renewable sources of energy such as fossil fuels and nuclear power are losing ground to alternative sources of energy such as wind and solar power, the overall losses in the energy industry of power and money incurred due to insufficient monitoring of solar facilities will become unsustainable.

Method

Our system consists of two primary components: A controller is installed centrally near the inverter. Additionally, a sensor is mounted 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), a text message is sent to a user-configurable phone number. Additionally, local alarms such as sirens or warning lights can be connected to our system and are triggered whenever a text message is sent.

Results

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 we have picked is suitable for our uses and allows the of a vast range of frequencies as needed. The system can therefore adapt to conditions in each specific setup.

Question: How negative should we go in the paragraph below? We don't exactly want to sound like depressed failures, but then again, facts are facts, and things just aren't working properly. Should we also add something about how we would proceed if we had the time or is this not the place for that?

The system in its entirety is at this point not operational. The sensor's components do not yet work perfectly in unison; error analysis is still ongoing. The printed circuit board for the master device is not available due to an issue with the manufacturer when ordering. However, development for the master's software is mostly completed. A functioning graphical user interface has been implemented and a database to which it connects is functional.

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	12
3 Modellierung eines Photovoltaik-Systems	14
3.1 Modellierung einer PV-Zelle	14
3.2 Modellierung eines PV-Moduls	17
3.3 Modellierung eines Modulstrangs	20
4 Lösungsansätze und Simulationen	22
4.1 Induktive Einkopplung	22
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	39
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 Benutze 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	54
6.2.3 Open On Chip Debugger	54
6.3 Software Master-Gerät	55
6.3.1 Komponenten	55
6.3.2 Lizenzen	56
6.3.3 Threads	56
6.3.4 Benutzeroberfläche	57
6.3.5 Datenbank	58
6.3.6 Funktionen	58
7 Validierung	59
7.1 Kopplungsspule	59
7.2 Modulator	60
7.3 Demodulator	61
7.4 Gesamtsystem	62
8 Benutzerhandbuch	66
8.1 Installation und Inbetriebnahme	66
8.2 Regulärer Betrieb	67
8.3 Störbetrieb	68
9 Fazit	69
Anhänge	70
A Daten von Solarmodulen	71
B LTspice-Schaltungen	72
C Schemata	77
D Einstellungen Oszilloskop	80
E Kosten	84
F Elektronische Datenträger	85

1

Einleitung

Photovoltaikanlagen sind heutzutage kein Nischenprodukt mehr. Um die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern, werden vielerorts kleine, aber auch grosse Anlagen gebaut. Die Wärme-Energie, welche kostenlos von der Sonne kommt, wird in elektrische Energie umgewandelt und kann gleich vor Ort genutzt werden. Anlagenbesitzer investieren meistens einen grossen Betrag in eine neue Anlage und sind darauf angewiesen, dass diese den maximalen Ertrag liefert. Das ist in der Regel ohne grossen Aufwand der Fall. Doch es gibt Umstände, welche die Effizienz einer Photovoltaikanlage erheblich verringern können und dies meist ohne, dass es jemand bemerkt. In einer Photovoltaikanlage werden üblicherweise mehrere PV-Module zu einem String zusammengefasst, indem sie in Serie geschaltet werden. Dabei kann ein abgeschattetes, verschmutztes oder gar defektes Modul den Strom dieser Serieschaltung und somit auch die Leistung des gesamten Strings und der Anlage stark beeinträchtigen. Was grosse finanzielle Einbussen zur Folge haben kann.

Das Ziel des Projektes P4 war es, ein PV-Überwachungssystem bestehend aus einer Sensorplatine für den Einbau in die Anschlussbox jedes Moduls und einem zentralen Meldegerät für den Einbau im Schaltschrank beim Wechselrichter zu entwickeln, aufzubauen und zu testen. Die Sensorplatine soll die Spannung des jeweiligen PV-Modules messen und sie an das Mastergerät über die bestehende DC-Leitung der Anlage übermitteln. Im Mastergerät werden die gemessenen Spannungen der einzelnen PV-Module gespeichert und ausgewertet. Erkennt das Mastergerät ein fehlerhaftes PV-Modul, soll eine Alarmierung am Gerät selbst und per SMS ausgegeben werden. Zusätzlich wird ein Relais zur externen Signalisation betätigt. Das System soll möglichst energieeffizient und kostengünstig sein, um die wirtschaftlichkeit einer Photovoltaikanlage nicht zu verschlechtern.

Das Hauptproblem liegt bei der Signalübertragung über die DC-Leitung der Photovoltaikanlage. Denn die Spannung darauf schwankt zwischen 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.

Zudem muss auf kleine Leistung beim gesamten System geachtet werden, um keine wertvolle Energie zu verschwenden.

Anhand zahlreicher Simulationen, Lösungsentwürfen und Tests, konnte ein System entwickelt werden, das allen Anforderungen an den Auftrag gerecht wird. Mit dem Master-Gerät als zentrales Gehirn des Systems und den Sensoren als Überwachungskomponente der einzelnen PV-Modulen, wurde ein Überwachungssystem konzipiert, das problemlos in neue, wie auch in bestehende Photovoltaikanlagen eingebaut werden kann.

Der vorliegende Bericht stellt die technische Dokumentation unseres Systems dar. Zuerst wird das Konzept unserer Lösung beschrieben, zusammen mit einer Benutzerführung. Anschliessend wird auf das Hardware- und Firmwaredesign eingegangen, und zuletzt werden die am System durchgeföhrten Tests dokumentiert.

2

Überblick

Dieses Kapitel beschreibt zuerst die grobe Idee unsers Lösungskonzepts. Es wird dargelegt, wie unser System in eine Solaranlage (bestehend oder neu aufgebaut) integriert wird, wie das System mit seiner Umgebung interagiert und wie es zu bedienen ist.

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 [?]. Abbildung 2.1 zeigt die Frontansicht einer PV-Zelle.

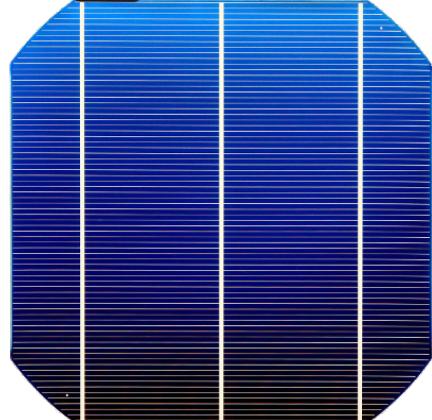


Abbildung 2.1: Solarzelle, Frontalsicht [?]



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

Mehrere identische Module werden üblicherweise mittels Reihenschaltung zu einem 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 auch 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 sind in Anhang A ab Seite 71 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) [?].

Mehrere identische Module werden üb-



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

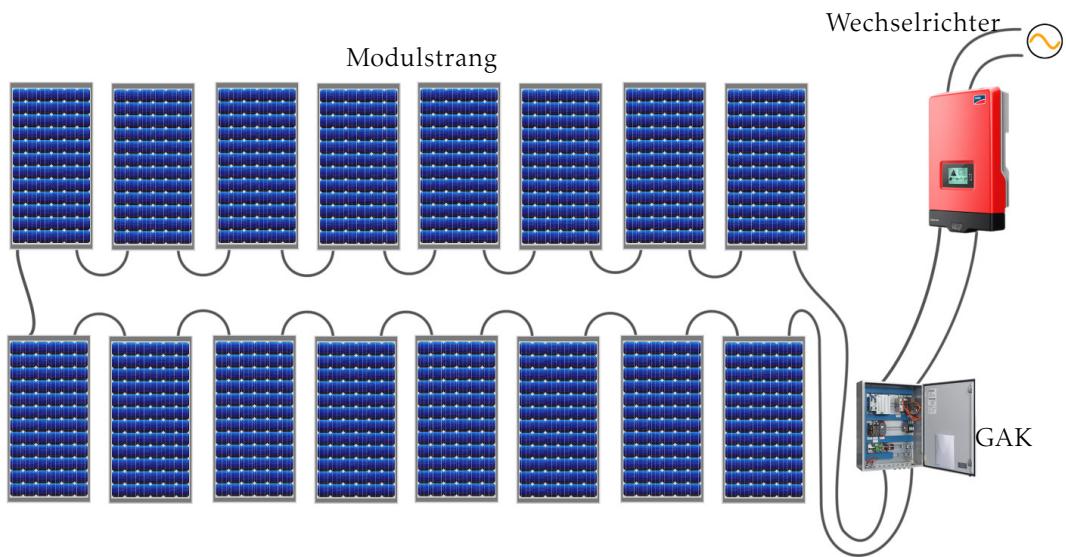


Abbildung 2.4: Modulstrang aus 16 Modulen gemäss Abbildung 2.2, GAK und Wechselrichter. Bild des GAK von [?], Bild des Wechselrichters von [?].

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:

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 [?].

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 bereits ziemlich 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 basiert auf der Simulation eines PV-Moduls, welches aus 72 in Serie geschalteten Zellen besteht (die zugehörige Schaltung ist in Abbildung B.3 auf Seite 73 dargestellt). Gibt schon nur eine Zelle von 72 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 14).

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

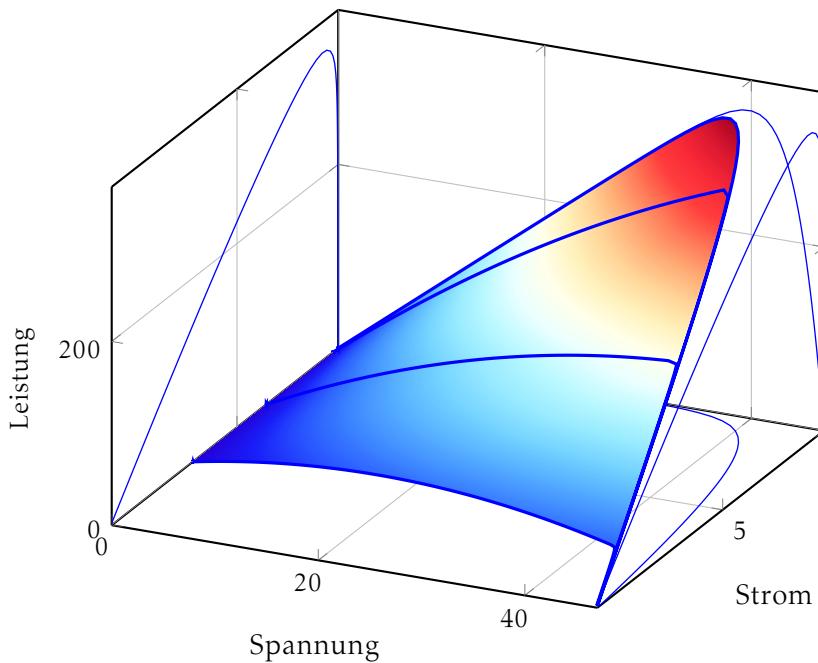


Abbildung 2.5: 3d-Darstellung von Leistung, Spannung und Strom eines PV-Moduls. Abbildung 2.6 zeigt diese Kurven zweidimensional. Die zugehörige LTspice-Schaltung ist in Abbildung B.3 auf Seite 73 abgebildet.

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 massiv übersteigen. Daher werden sie für den Rest dieses Berichts nicht berücksichtigt.

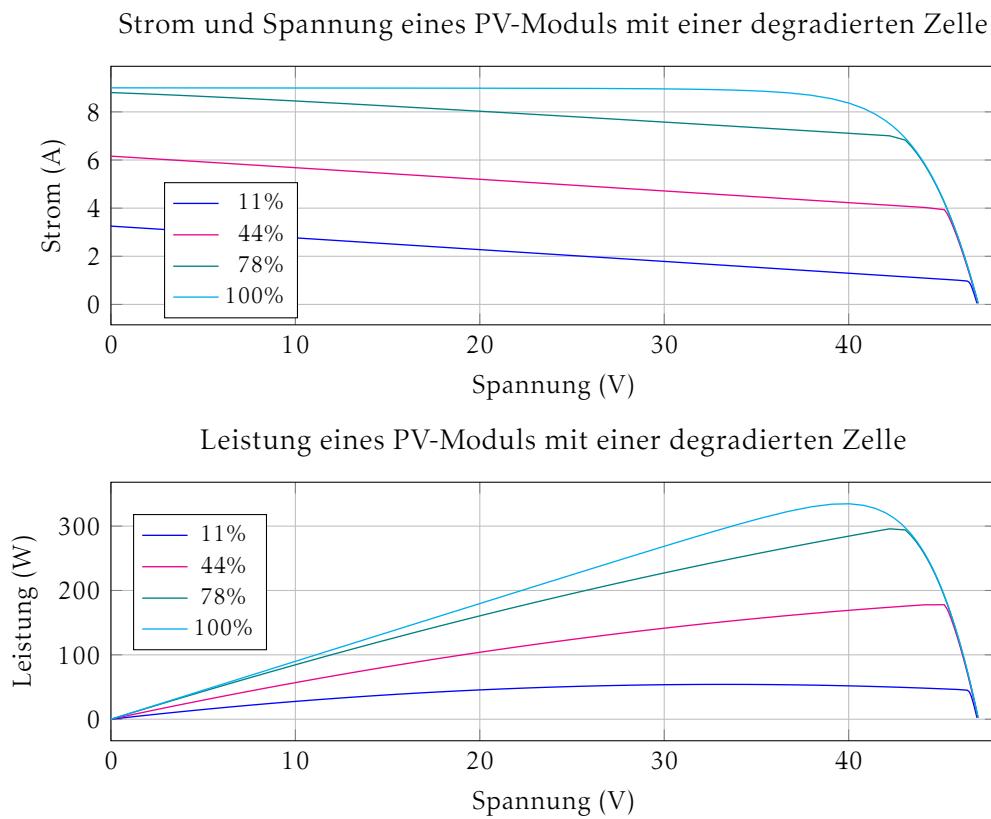


Abbildung 2.6: Verhalten eines Moduls bei Reduktion des Stroms einer einzelnen Zelle. Die zugehörige LTspice-Schaltung ist in Abbildung B.3 auf Seite 73 zu finden. Abbildung 2.5 zeigt die entsprechenden Zusammenhänge dreidimensional.

Bei Serieschaltung von mehreren PV-Modulen in einem Strang kann bereits eine einzige nicht voll funktionsfähige Zelle die Leistung des gesamten Strangs stark beeinträchtigen. Der gesamte von einem Modul und somit auch von einem Strang abgegebene Strom hängt also 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 zum Beispiel drei Freilaufdioden sichtbar, womit z.B. drei mal 24 Zellen mit je einer Freilaufdiode parallel geschaltet werden könnten. Aus Kostengründen wird nicht eine Freilaufdiode pro Zelle verbaut, obwohl dies natürlich 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 Verlustleistung 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 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 einem 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).

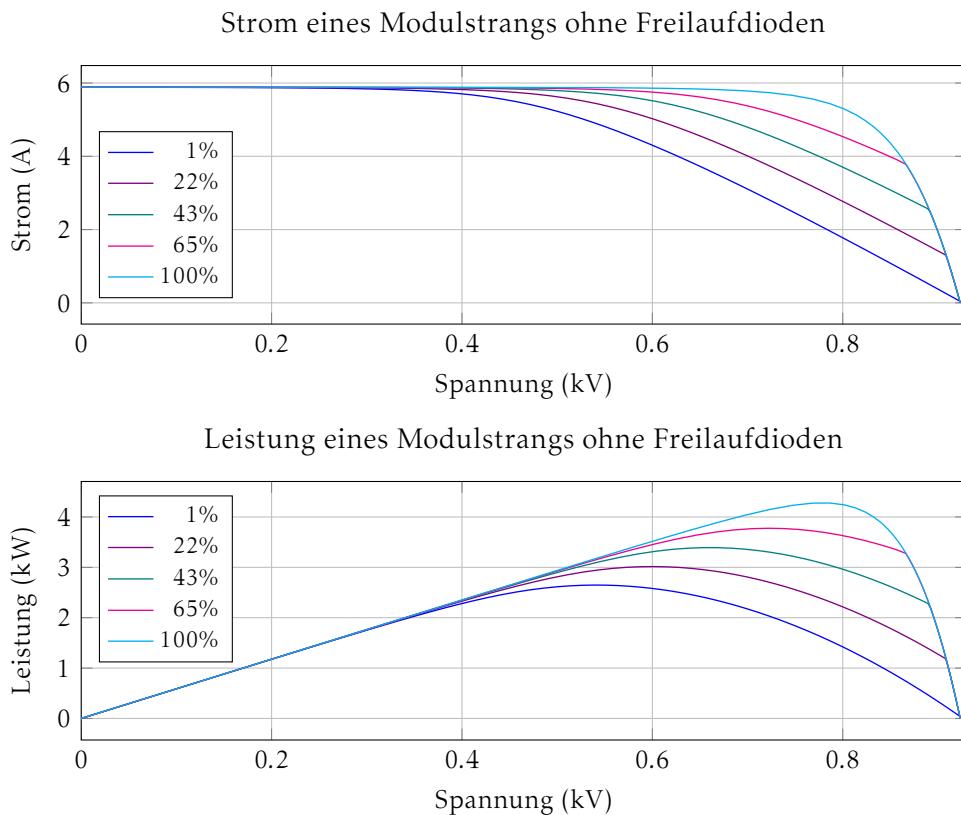


Abbildung 2.7: Verhalten eines Modulstrangs ohne Freilaufdioden bei Reduktion des Stroms einer einzelnen Zelle. Die zugehörigen LTspice-Schaltungen sind im Anhang in Abbildung B.5 auf Seite 74 und in Abbildung B.6 auf Seite 75 dokumentiert.

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).

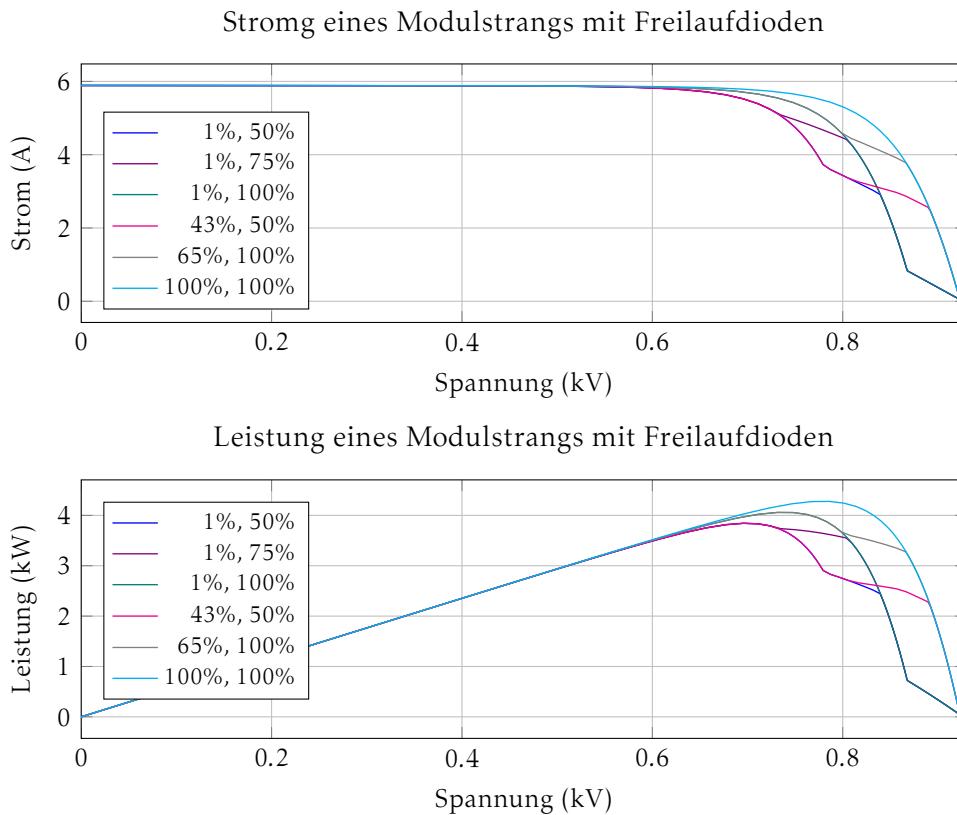


Abbildung 2.8: Verhalten eines Modulstrangs bei einer Freilaufdiode pro Modul. Es werden zwei Zellen in zwei verschiedenen Modulen im gesamten Modulstrang auf reduzierte Kapazität gesetzt. Die Prozentangaben in der Legende beziehen sich auf die Stromabgabe der zwei Zellen bezogen auf ihre maximale Kapazität. Die zugehörigen LTspice-Schaltungen sind im Anhang in Abbildung B.5 auf Seite 74 und in Abbildung B.7 auf Seite 76 dokumentiert.

Die Freilaufdioden leiten den Strom an den nicht korrekt funktionierenden Zellsträngen des Moduls vorbei, und verhindern somit, dass solch grosse Verluste 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.

Keine oder nur schwache Wirkung zeigen die Bypass-Dioden, wenn die Zellen nur schwach abgeschaltet oder verschmutzt sind. Solange die Spannung an den einzelnen Modulen nicht stets überwacht wird, kann es somit trotz dieser Bypass-Dioden zu erheblichen Leistungseinbrüchen im gesamten System kommen, ohne dass man Gegenmassnahmen ergreifen kann, da man ja nicht über den Status der Anlage informiert ist.

weshalb?

2.3 Unser System

Unser System bietet neben einer benutzerfreundlichen Bedienung und Inbetriebnahme, so wie einer einfachen Integration in bestehende Anlagen, ebenfalls 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.

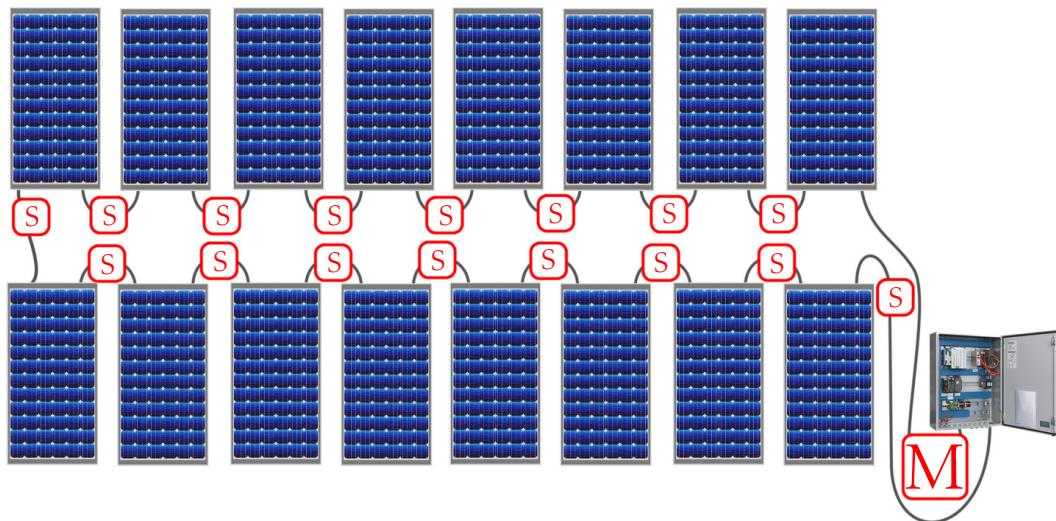


Abbildung 2.9: Modulstrang mit je einem Sensor **S** pro Modul und einem Master-Gerät **M** beim Generator-Anschlusskasten

Die Installation des Master-Gerätes erfolgt im zugehörigen Schaltschrank. Das schlichte Hutschienengehäuse ermöglicht eine einfache Installation in bestehende oder neue Schaltschränke. Die Energieversorgung, wie auch die Ankopplung an die DC-Leitungen erfolgt im Innern Schaltschrankes und wird 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 3.5“ 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 eine Nachricht mittels SMS wird 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-/Schlechtwetter
- 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 zweiadrige Verbindung von der Sensorplatine zu den Klemmen der Anschlussdose ist zuständig für die Energieversorgung des Sensors und die Ankopplung an die DC-Leitung, für die Übertragung der Messresultate an das 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 zwei grundsätzliche Ansätze verfolgt 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. Das Verfahren ist schematisch in Abbildung 2.10 dargestellt.

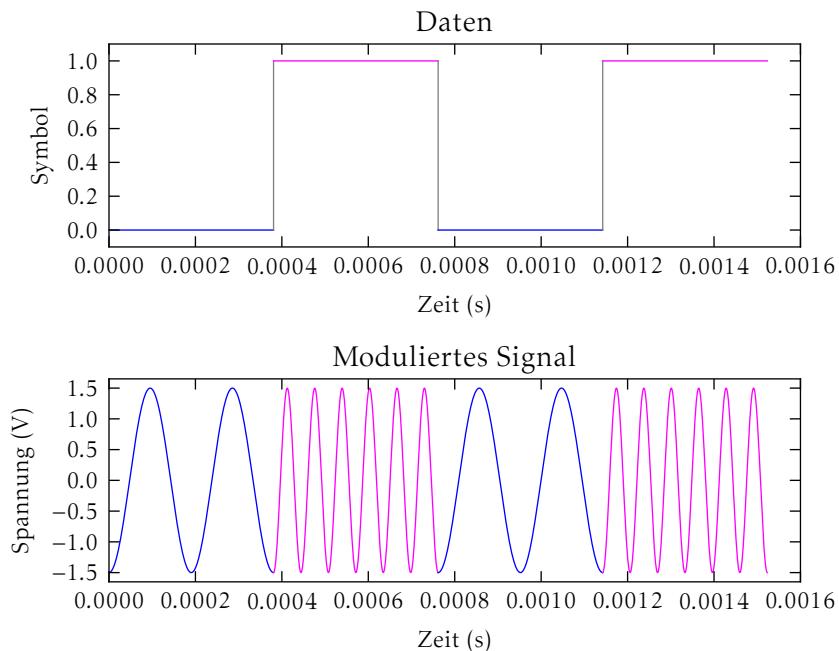


Abbildung 2.10: Frequency-shift keying: Oben sind die zu übertragenden digitalen Daten als 1 und 0 abgebildet, unten das zugehörige Verhalten des modulierten Signals.

Amplitude-shift keying: Die ASK (Amplitudenumtastung auf Deutsch) benutzt statt verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Amplituden, um Symbole zu codieren. Abbildung 2.11 stellt das grundlegende Konzept des Verfahrens schematisch dar.

Unsere Umsetzung unterscheidet sich von einer «normalen» Implementation (mittlere Graphik in Abbildung 2.11) dadurch, dass nicht im eigentlichen Sinne ein zusätzliches Signal auf den DC-Anteil aufmoduliert wird. Stattdessen wird ein Solarmodul mit einer bestimmten Frequenz kurzgeschlossen, was die Spannung auf einem Strang von Modulen kurzzeitig in Intervallen einbrechen lässt. Diese

Spannungseinbrüche werden zur Datencodierung benutzt (unterster Plot in Abbildung 2.11). Dies entspricht im Prinzip einer ASK mit Amplituden null und dem Wert des Spannungseinbruchs mit einem Offset des halben Spannungseinbruchs.

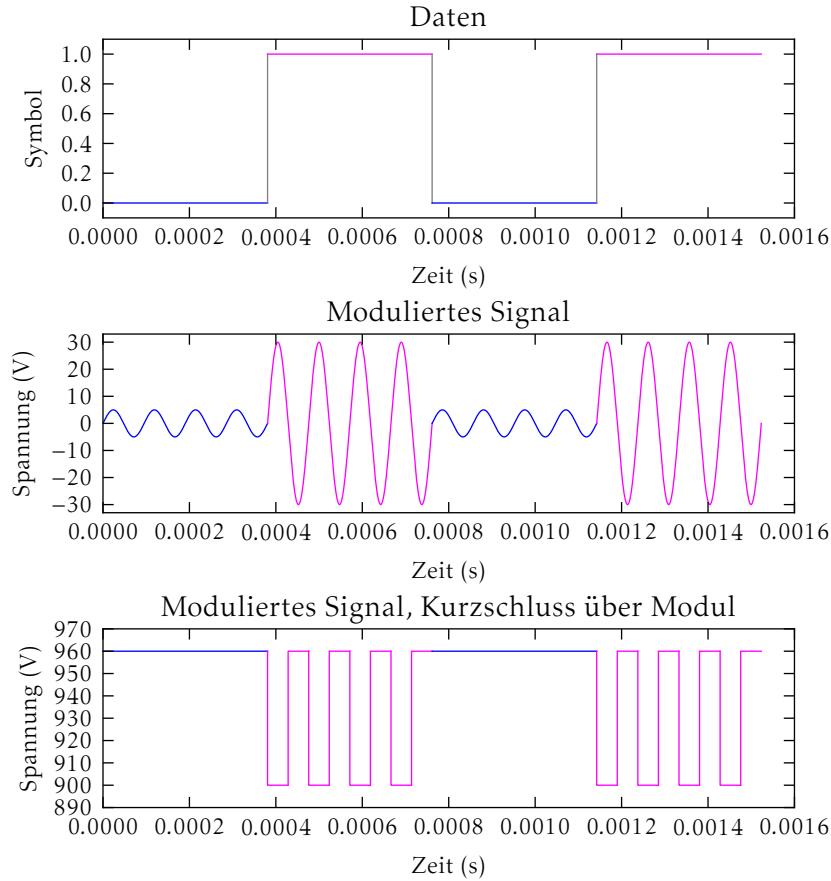


Abbildung 2.11: Amplitude-shift keying: Oben sind die zu übertragenden digitalen Daten als 1 und 0 abgebildet. Die mittlere Abbildung stellt eine typische Umsetzung des Konzepts mit harmonischer Trägerschwingung und zwei verschiedenen Amplituden dar.

Das unterste Signal ist eine vereinfachte Darstellung unserer Variante. Die Gleichspannung an der Leitung ist etwas weniger als 1 kV; beim Kurzschluss eines Moduls erfolgt eine Abfolge von Spannungseinbrüchen auf der Leitung, welche die Daten kodiert.

3

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.

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 Seriowiderstand R_S ergänzt; das resultierende Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Die Genauigkeit dieses Eindiodenmodells ist jedoch häufig nicht besonders gut [?] [?] (besonders bei niedrigen Beleuchtungsgraden), weshalb wir hier ein Zweidiodenmodell benutzen werden. Eine der beiden Dioden modelliert dabei den Sättigungsstrom, welcher von Diffusionsprozessen verursacht wird, die zweite Diode

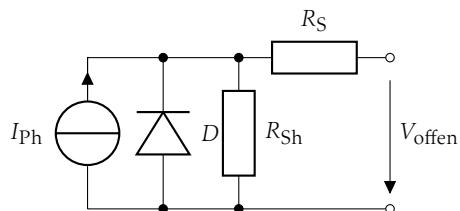


Abbildung 3.1: Eindiodenmodell einer PV-Zelle mit Stromquelle I_{Ph} , Diode D , Shunt-Widerstand R_{Sh} und Seriowiderstand R_S .

modelliert den Sättigungsstrom, welcher von Rekombinationseffekten verursacht wird [?].

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 [?] 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, sollte das Wechselstromverhalten von PV-Zellen in unseren Simulationen berücksichtigt werden.

Das Zweidiodenmodell aus [?] wird deshalb in unseren Simulationen noch durch eine parallele Kapazität ergänzt. Die Größenordnung dieser Kapazität kann stark variieren und wird unter anderem vom Diodenmaterial, der Diodenspannung und der DiodenTemperatur beeinflusst. Basierend auf [?], [?] und [?] soll an dieser Stelle eine flächennormierte Kapazität von $C' = 20 \text{ nF cm}^{-2}$ verwendet werden. Die in [?] 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:

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

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

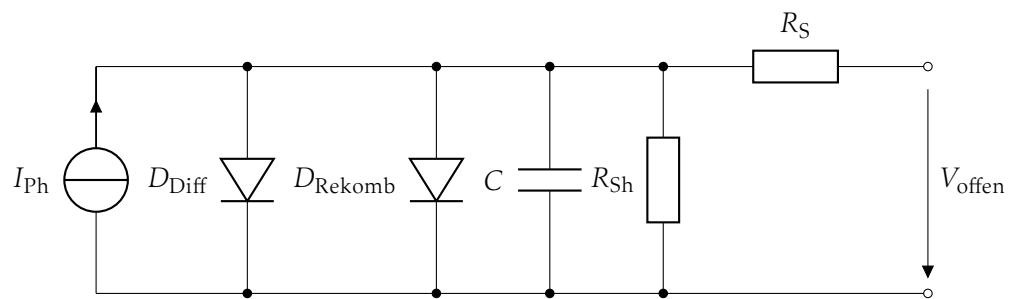


Abbildung 3.2: Schaltschema zur Modellierung einer Solarzelle gemäss Zweidiodenmodell mit zusätzlicher Kapazität. Die zugehörigen Modellparameter sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

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	[?]
Sättigungsstrom Diffusionsdiode	$I_{\text{S},\text{Diff}}$	794.06 pA	[?]
Sättigungsstrom Rekombinationsdiode	$I_{\text{S},\text{Rekomb}}$	5.0762 μ A	[?]
Idealitätsfaktor Diffusionsdiode	n_{Diff}	1	[?]
Idealitätsfaktor Rekombinationsdiode	n_{Rekomb}	2	[?]
Seriewiderstand	R_S	1.71 m Ω	[?]
Shunt-Widerstand	R_{Sh}	59.23 Ω	[?]
Kapazität	C	3.125 μ F	[?], [?], [?], Gl. 3.1
Kantenlänge	s	125 mm	[?]

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 71 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 2.8 gezeigten Effekten und den zugehörigen Anmerkungen.

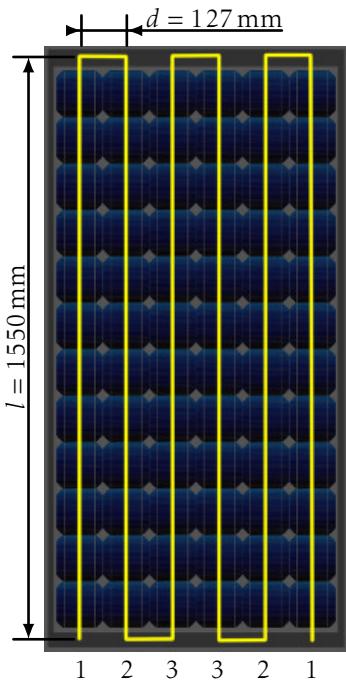


Abbildung 3.3: Solarmodul gemäß Abbildung 2.2 mit Stromleitungen und Längen zur Verbindung der Zellen. Die Nummerierung der Leiterbahnen entspricht der Nummerierung der Koeffizienten in Gleichungen 3.3 bis 3.5 (Seite 18).

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 dargestellt.

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 eines Moduls: 125 mm
- Abstand zwischen zwei Modulen: 2 mm
- Überhang am oberen und unteren Ende des Moduls: 14 mm
- Der Abstand zweier Leiterbahnen ist somit 127 mm und
- die Länge 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 [?]. 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 [?] 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 jeder 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.

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 [?]

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

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.

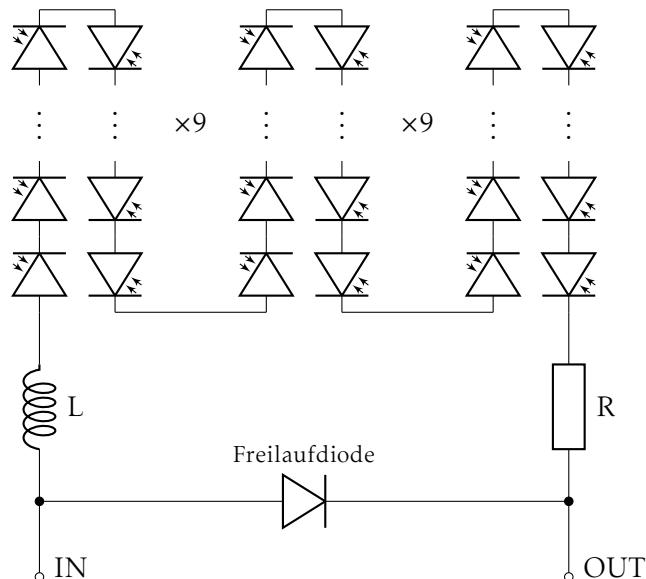


Abbildung 3.4: Ersatzschaltbild für das PV-Modul. Es besteht aus einem Strang mit 72 Zellen in Serie geschaltet und angeordnet wie auf dem Modul in Abbildung 2.2 auf Seite 4. Zusätzlich ist die parasitäre Induktivität der Leiterbahnen im Modul berücksichtigt und eine Freilaufdiode integriert. Die vollständige LTspice-Schaltung ist in Abbildung B.7 auf Seite 76 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 [?]

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 [?] gegebene Formel für die Induktivität eines geraden, parallelen Leiterpaars lautet³:

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

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 [?]:

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

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

Der Ohm'sche Widerstand der Anschlussleitung errechnet sich zu:

³ Auch 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 [?] und kann somit in der Gleichung vernachlässigt werden.

Auch Kuchling gibt in [?] die gleiche Formel.

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

Wobei:

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

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

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

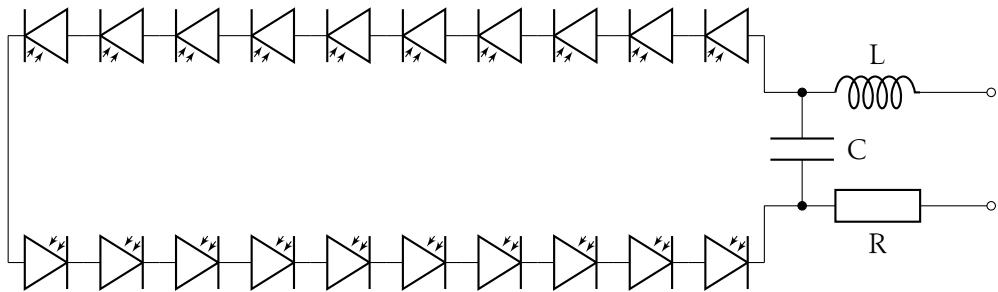


Abbildung 3.5: Modell eines Modulstrangs aus 20 seriell geschalteten Modulen mit Berücksichtigung der Resistivität, Induktivität und Kapazität einer 20 m langen Zuleitung

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. Es werden zuerst die Einkopplung eines Signals in die DC-Leitung via induktive Kopplung, kapazitive Kopplung untersucht. Letztlich wird evaluiert, ob das gesteuerte Kurzschliessen eines PV-Moduls mitteles eines Transistors sich allenfalls dazu eignen könnte, ein Signal mit den entsprechenden kurzen Spannungseinbrüchen zu codieren.

Zur Simulation wird LTspice IV [?] von *Linear Technologies* verwendet. Es ist zu jeder LTspice-Schaltung angegeben, wo die zugehörige Datei auf dem Datenträger gespeichert ist.

4.1 Induktive Einkopplung

Eine induktive Einkopplung legt eine Spule um die DC-Leitung. 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-Gerätausgewertet werden können. Der entsprechende Schaltkreis ist schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt.

LTspice modelliert diese Situation als gekoppelte Spulen mit je einer Induktivität (L_1 und L_2 in Abbildung ??) und einem Kopplungsfaktor K . Es gilt also, diese drei Parameter zu bestimmen.

Wir werden für unsere Simulationen von einer Toroidspule gemäss Abbildung 4.2 mit 20 Primärwicklungen und einer Sekundärwindung (die 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.

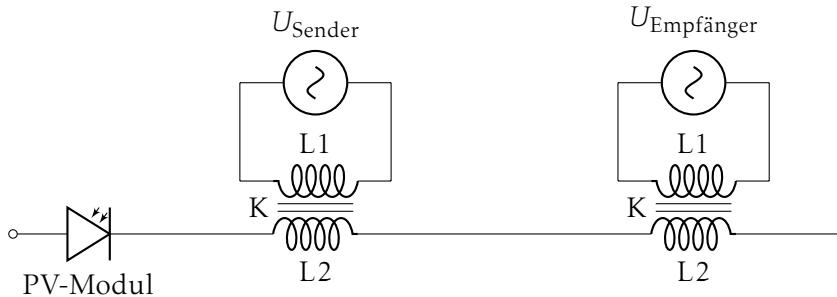


Abbildung 4.1: Induktive Einkopplung

Die Selbstinduktivität unserer Toroidspule errechnet sich gemäss:

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

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 berechnet sich gemäss:

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

Wobei:

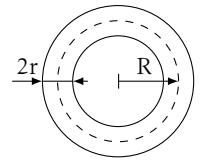
- $L_1 = 200 \mu\text{H}$: Selbstinduktivität der Primärseite (Gl. 4.1)
- $N_1 = 20$: Windungen Primärseite (Transmitter/Receiver)
- $N_2 = 1$: Windungen Sekundärseite (DC-Leitung)

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.

Es wird zuerst eine vereinfachte Schaltung untersucht, bestehend aus einem Modul, dem Sender und dem Empfänger, dargestellt in Abbildung 4.4.

Abbildung 4.4 zeigt den Spannungsverlauf am Empfänger für die Schaltung aus Abbildung 4.4. Das Signal kommt sauber an, ist aber nicht sehr stark.

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 20

Abbildung 4.2:
Geometrie der Spule

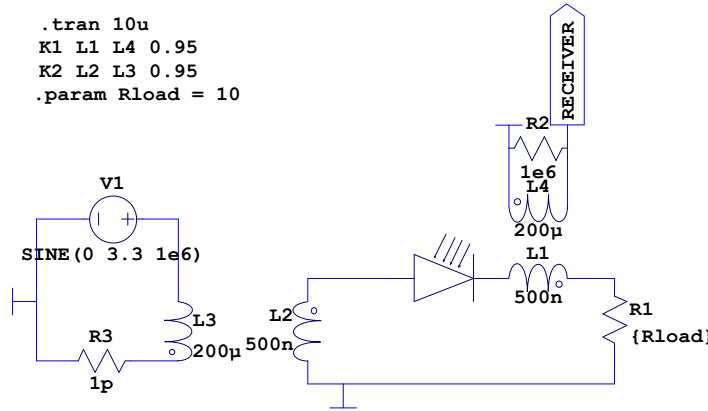


Abbildung 4.3: LTspice-Schaltung für den vereinfachten Schaltkreis zur Simulation der induktiven Einkopplung
Dateipfad: 1tspice/inductive/singleModule.asc

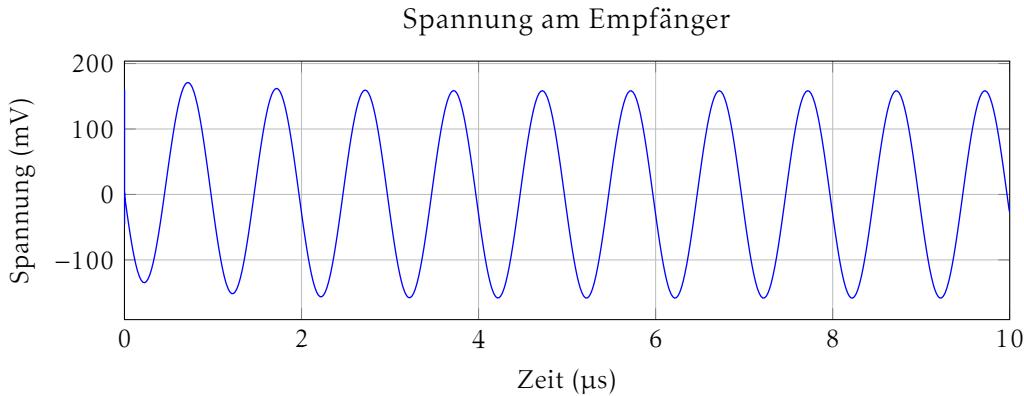


Abbildung 4.4: Simulationsergebniss für die Spannung am Empfänger aus Abbildung

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. Positiv gewertet kann aber werden, dass das Signal trotz der kleinen Amplitude immer noch sehr sauber aussieht. Allerdings kann es natürlich sein, dass sonstige Störungseffekte auf der Leitung (welche in der Simulation nicht berücksichtigt worden sind) das Signal überdecken würden. Dies

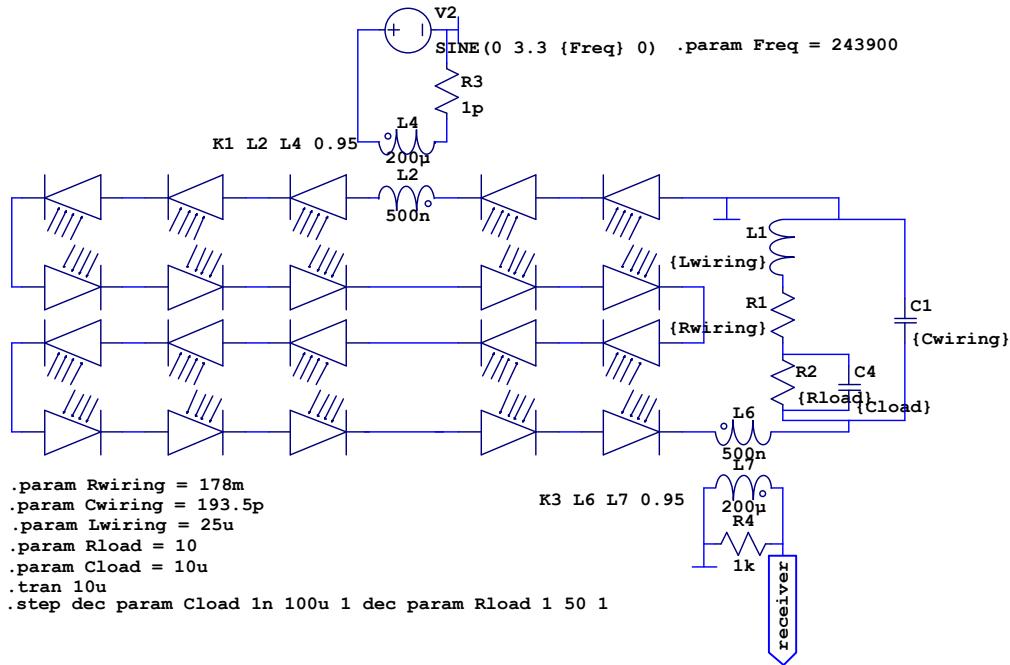


Abbildung 4.5: Schaltung zur Simulation eines Modulstranges mit parasitären Impedanzen in der Zuleitung und komplexer Lastimpedanz.
Dateipfad: ltspice/inductive/string.asc

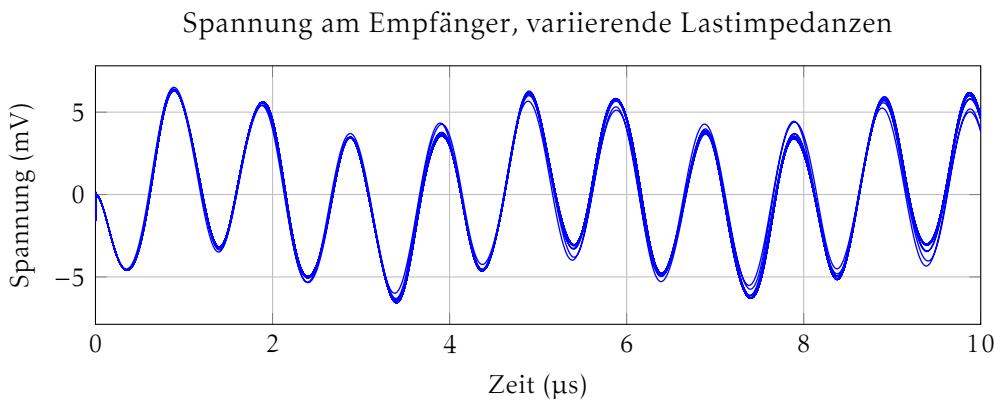


Abbildung 4.6: Simulationsergebniss für die Spannung am Empfänger aus Abbildung 4.5

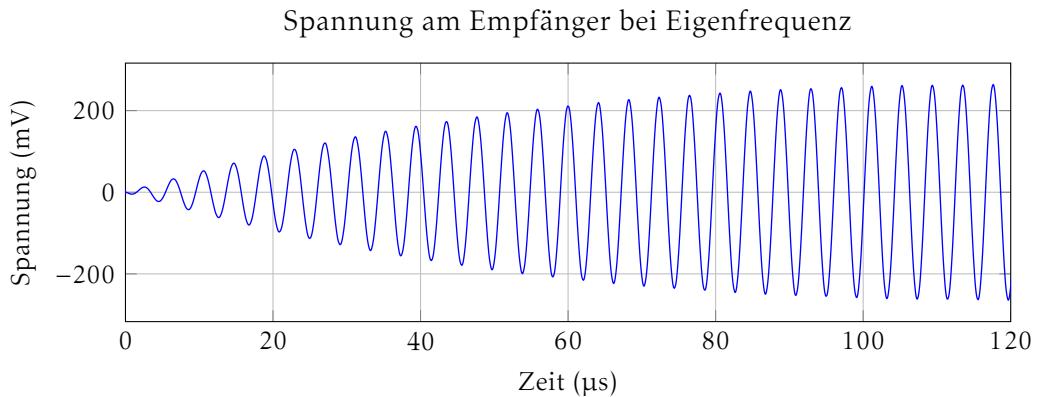
ist allerdings im Rahmen dieses Projektes nicht wirklich zu verifizieren, da wir weder einen genügend grossen Modulstrang noch die zur gründlichen Untersuchung erforderliche Zeit zur Verfügung haben.

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-

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

lerdings benötigt das Signal etwa 100 µs, 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.

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.

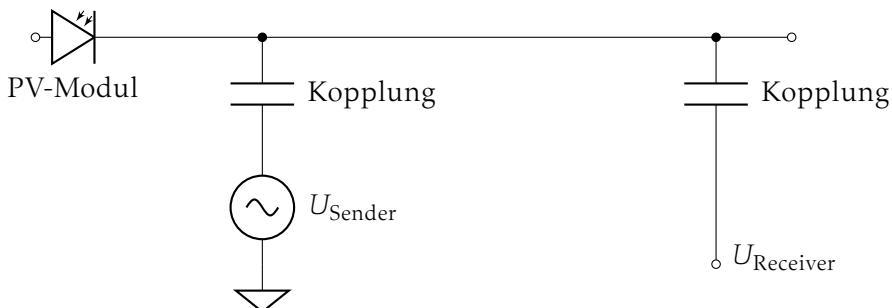


Abbildung 4.8: Vereinfachte Darstellung der kapazitiven Einkopplung mit Sender auf der linken Seite und Empfänger auf der rechten Seite. Prinzipiell ist das Verfahren jedoch bidirektional.

Zur Simulation in LTspice wird die Schaltung in Abbildung 4.9 benutzt. Sie basiert auf dem Modell eines Modulstrangs von Abbildung 3.5 (Seite 21), 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 ist hier allenfalls mit Verzerrungen und/oder Abschwächungen des Signals zu rechnen.

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

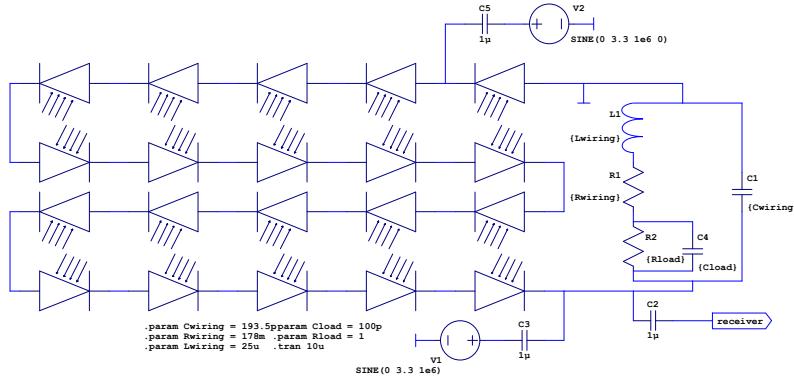


Abbildung 4.9: Simulationsschaltung eines Modulstrangs mit kapazitiver Einkopplung eines Signals. Zur einfacheren Handhabung in LTspice wird ein eigenes Symbol für ein Modul verwendet (siehe Abbildung B.4 auf Seite 74 und die zugehörigen Anmerkungen). Jedes Modulsymbol repräsentiert dabei ein Modul gemäss Abbildung B.6 im Anhang auf Seite 75 mit Freilaufdiode und parasitären Leitungsimpedanzen.
 Die Sender werden durch Sinus-Spannungsquellen simuliert. Es ist jeweils nur ein Sender aktiv in der Simulation, der andere wird abgehängt.
 Dateipfad: ltspice/capacitive/string.asc

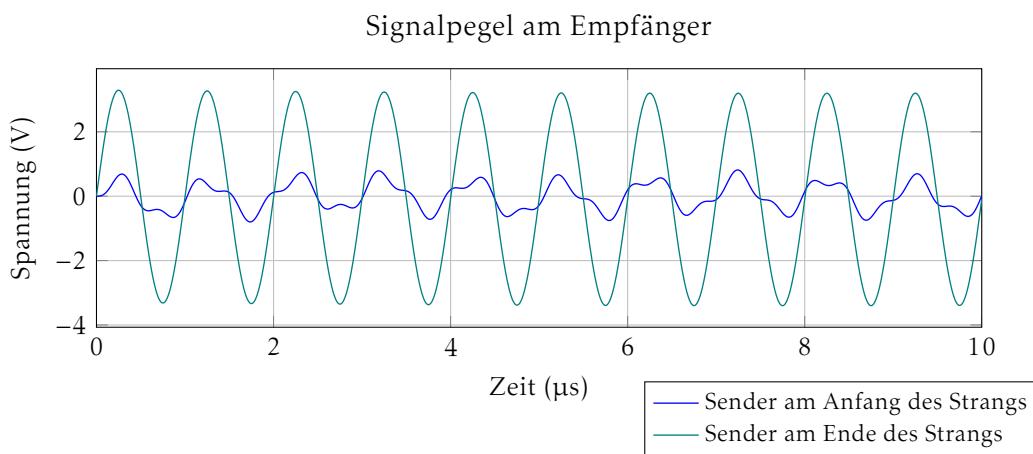


Abbildung 4.10: Transientensimulation der kapazitiven Einkopplung am Anfang des Modulstrangs und am Ende des Modulstrangs. Ist der Sender am Anfang des Strangs, wird das Signal merklich abgeschwächt und verzerrt, ist aber noch als Signal am Empfänger (Knoten *receiver* in Abbildung 4.9) erkennbar.

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 2.11 auf Seite 13 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.

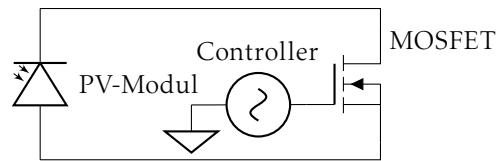


Abbildung 4.11: Gesteuerter Kurzschluss eines Solarmoduls mit einem microcontroller-gesteuerten Transistor.

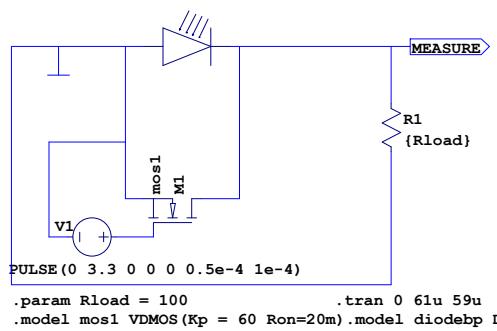


Abbildung 4.12: Simulationsschema für ein einzelnes Modul mit kurzschliessendem Transistor und angeschlossener Last von 1 kΩ.
Dateipfad: ltspice/short/single.asc

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.

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 an-

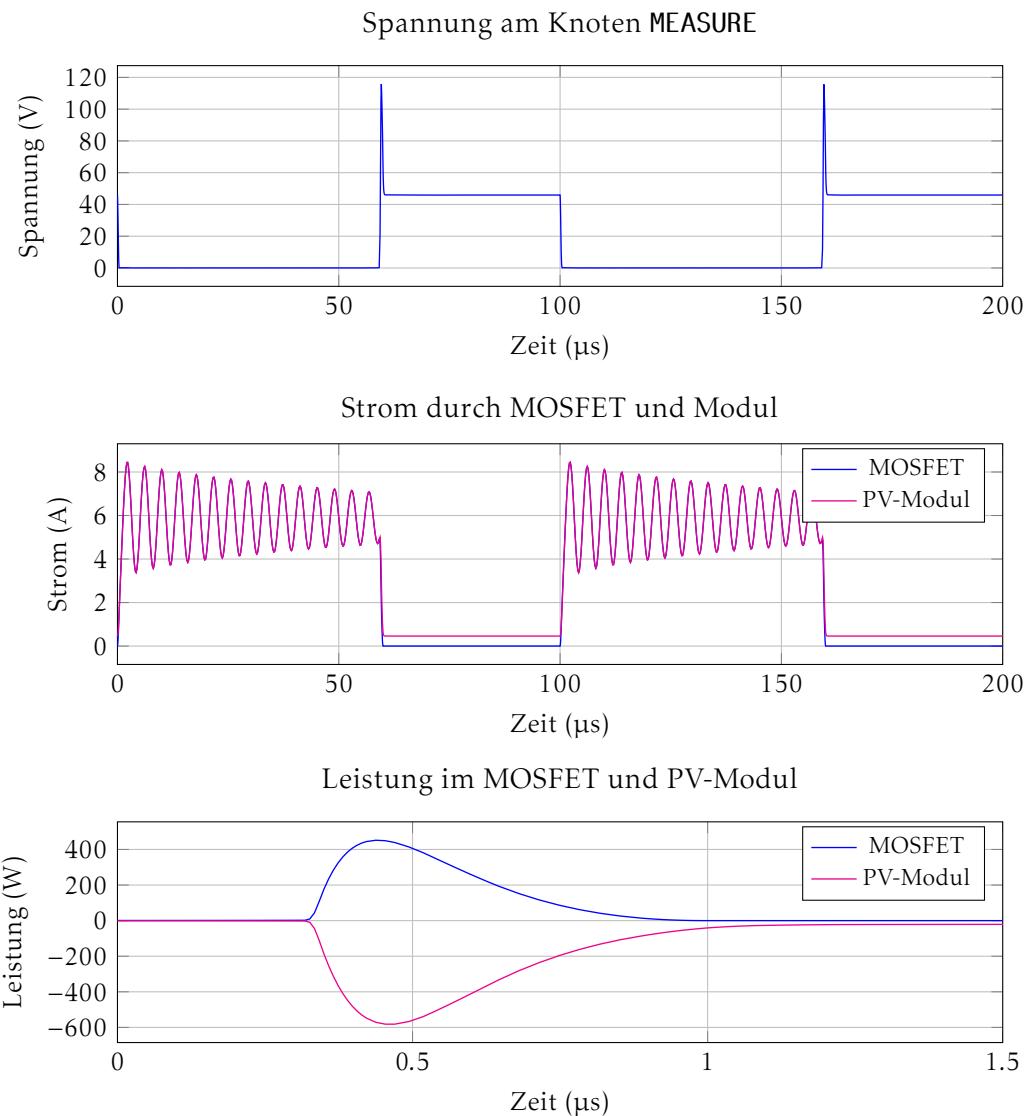


Abbildung 4.13: Transientensimulation für einen gesteuerten Kurzschluss über ein Solarmodul mit einer rein Ohm'schen Last von 100Ω gemäss der Schaltung in Abbildung 4.12. Positives Vorzeichen bedeutet aufgenommene Leistung (also thermische Verluste).

gegebenen Strom. Auffallend sind die Spannungs- und Leistungsspitzen, welche beim Deaktivieren des Transistors auftreten. Das PV-Modul gibt für kurze Zeit sogar 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 Mittel bei einem Sendevorgang von 1 ms lediglich etwa 1 W.

4.3.2 Master-Gerät (Empfänger)

Die Empfängerschaltung 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 ankommenen Signal auszukoppeln und den Pegel des verbleibenden AC-Signals in definierte Grenzen zu konvertieren, 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.

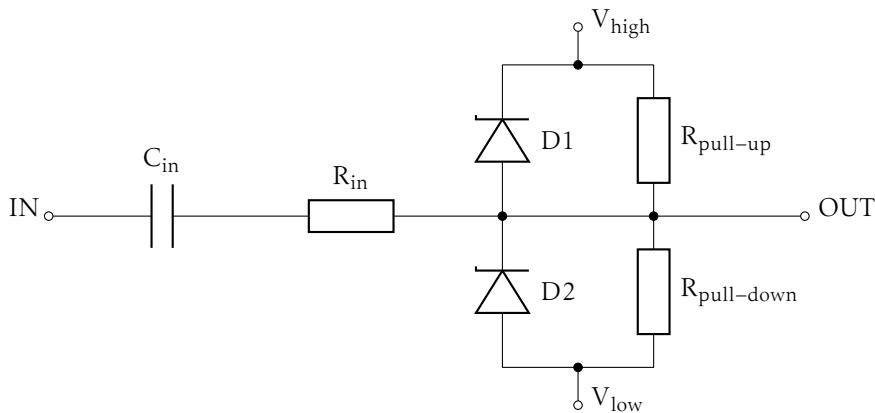


Abbildung 4.14: Die hier verwendete Klemmenschaltung

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 fliesst, sollte also hochohmig sein.
- $R_{pull-up}$ und $R_{pull-down}$ sorgen dafür, dass die Spannung auf dem mittleren Schaltungsabschnitt 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, der über $V_{low} + V_{breakdown,D2}$ liegt, 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 zwischen 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.

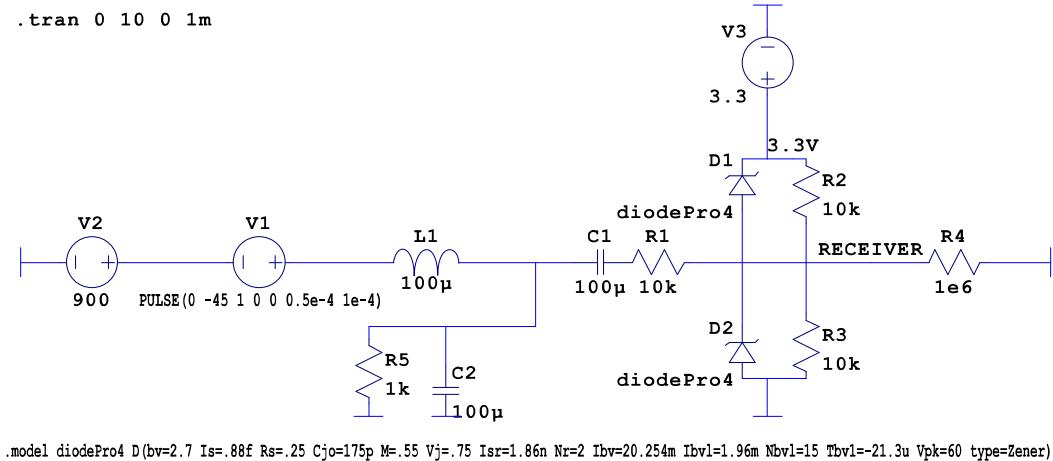


Abbildung 4.15: Simulationsschema für die Simulation der Klemme am Empfänger.
Dateipfad: ltspace/short/receiver.asc

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.

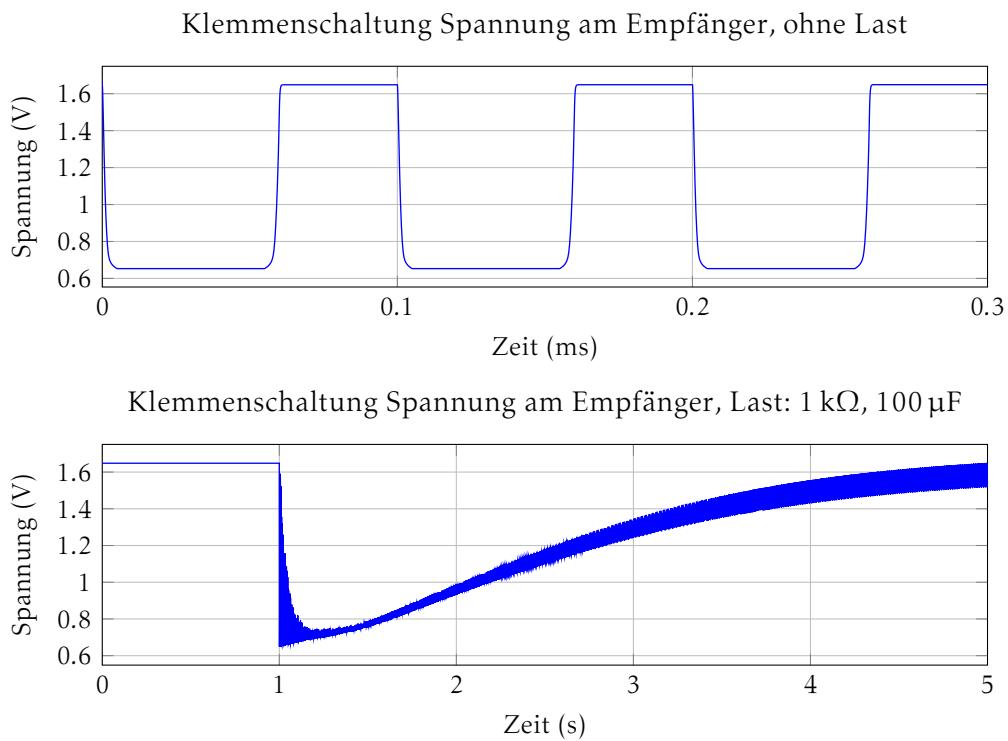


Abbildung 4.16: Simulation Empfänger. Die obere Kurve ist das Signal am Empfänger ohne angeschlossene Last. Der Übertragungsvorgang im unteren Bild beginnt bei einer Sekunde. Die Schaltungsfrequenz ist 10 kHz

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 20 vorgestellten Modulstrang aus 20 Modulen mit einer 20 m langen Anschlussleitung (pro Richtung) eingebaut und das Verhalten des Gesamtsystems untersucht.

Die zugehörige Simulationsschaltung für LTspice ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

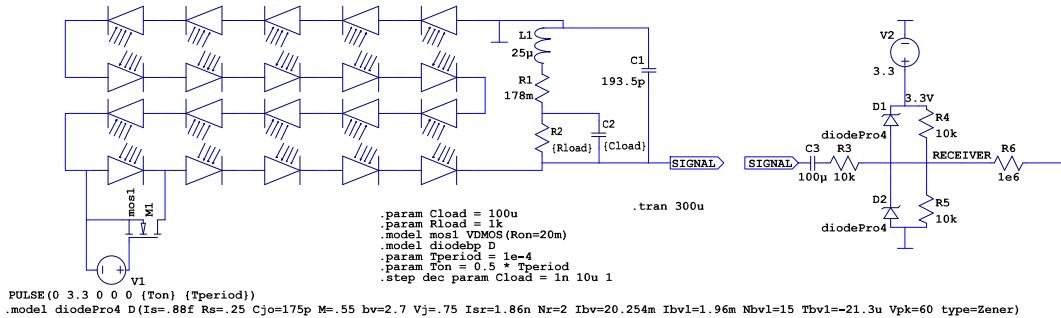


Abbildung 4.17: Gesamte Simulationsschaltung für die Kurzschlussmethode
Dateipfad: ltspice/short/string.asc

Wie in Abbildung 4.18 zu sehen, hat die angeschlossene Last einen beträchtlichen Einfluss auf das Signal (wie auch schon im vorigen Abschnitt beobachtet), welches beim Empfänger ankommt. 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 können, und auf die wir keinen Einfluss haben, oder deren genaue Untersuchung im Rahmen dieses Projekts aus Zeit- und Materialgründen nicht möglich ist.

Sollte diese Lösungsvariante implementiert werden, müssten noch detaillierte 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

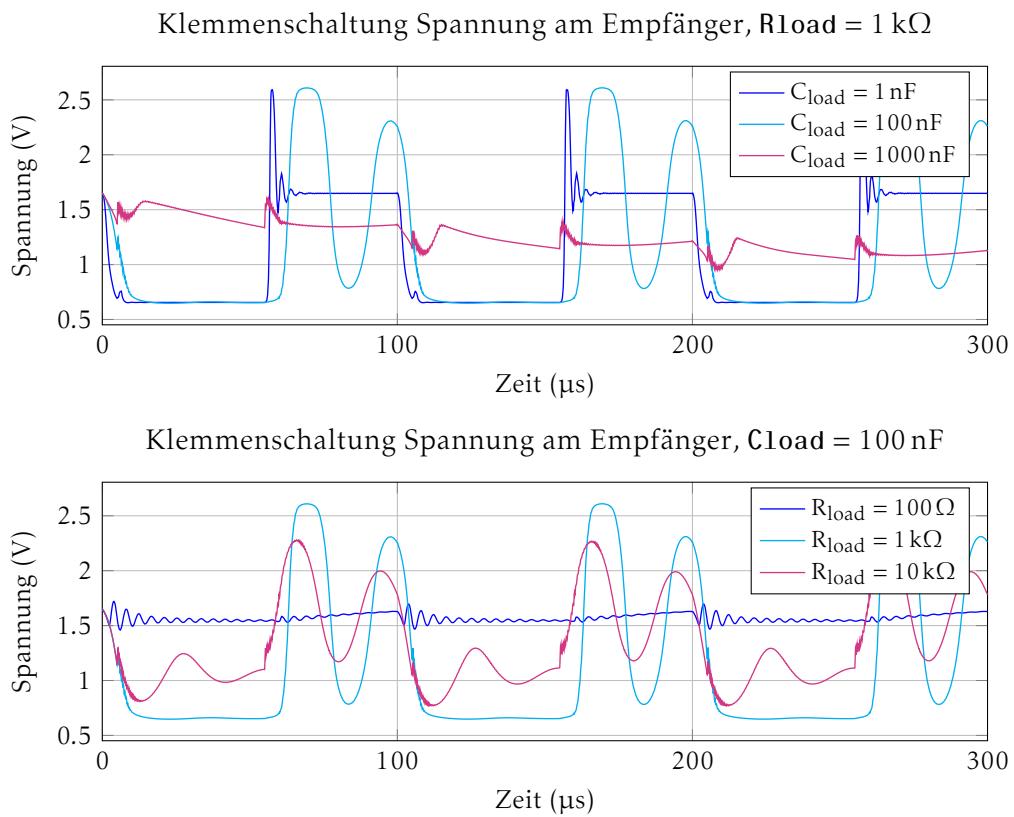


Abbildung 4.18: Simulationsergebnisse für das Signal am Knoten RECEIVER aus Abbildung 4.17 für Lasten mit verschiedenen kapazitiven Anteilen C_{load} (obere Plots) und resistiven Anteilen R_{load} (untere Plots). Die Übertragungsfrequenz beträgt 10 kHz.

werden, 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 wirklich genau zu untersuchen (also ausmessen statt lediglich simulieren), beurteilen wir die Erfolgsschancen im Rahmen eines Semesterprojekts für diese Methode als zu gering, um sie weiter zu verfolgen.

4.4 Schlussfolgerungen

Es folgt an dieser Stelle eine zusammenfassende Gegenüberstellung der in den vorigen Abschnitten untersuchten Lösungsvarianten und ein Entschluss, welche Variante weshalb weiterverfolgt wird. Tabelle 4.2 enthält eine Übersicht einiger Merkmale der verschiedenen Ansätze.

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 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 natürlich) sendet.

Tabelle 4.2: Gegenüberstellung der drei Lösungsvarianten

Kriterium	induktive Kopp- lung	kapazitive Kopp- lung	Kurzschluss
Komplexität der Schal- tung	mittel	mittel	simpel
Neuartigkeit des Kon- zepts	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 Verzer- rung	variiert mit Po- sition im Strang, Signal kann sehr stark verzerrt wer- den	variiert stark mit Last

5

Hardware

Das folgende Kapitel dokumentiert die Implementation unserer Lösungsansätze in Hardware. In einem ersten Teil wird die Elektronik des Sensor vorgestellt, in einem zweiten Teil wird der Master genauer erklärt.

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 Features 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 zwischen wenigen Kiloherzt 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 sind die einzelnen Teilschaltungen dokumentiert und die Komponentenwahl ihre Wahl begründet.

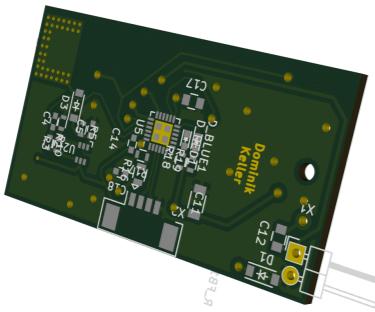


Abbildung 5.1: PCB, Vorderseite

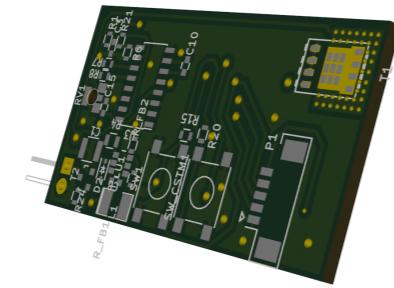


Abbildung 5.2: PCB, Rückseite

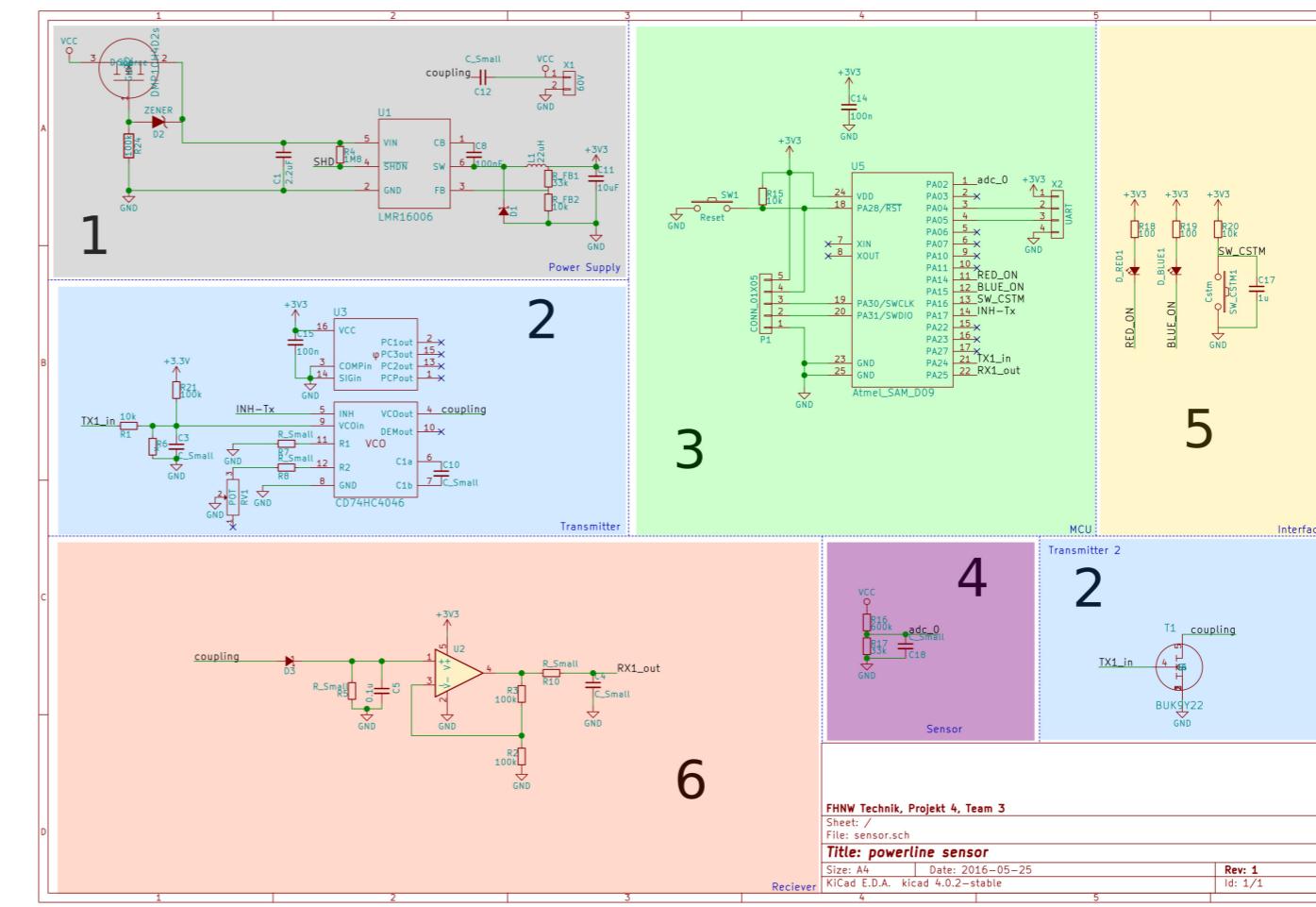


Abbildung 5.3: Schema des Sensors. Eine Grossversion ist in Anhang zu finden, die einzelnen Baugruppen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben und grösser abgebildet.

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 71). 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.

Zudem hat dieser Spannungsregler einen typischen Quiescent Current von nur $28\text{ }\mu\text{A}$. Damit ist er auch extrem stromsparend. Die Beschaltung wurde nach Empfehlung des Datenblatts [?] 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.

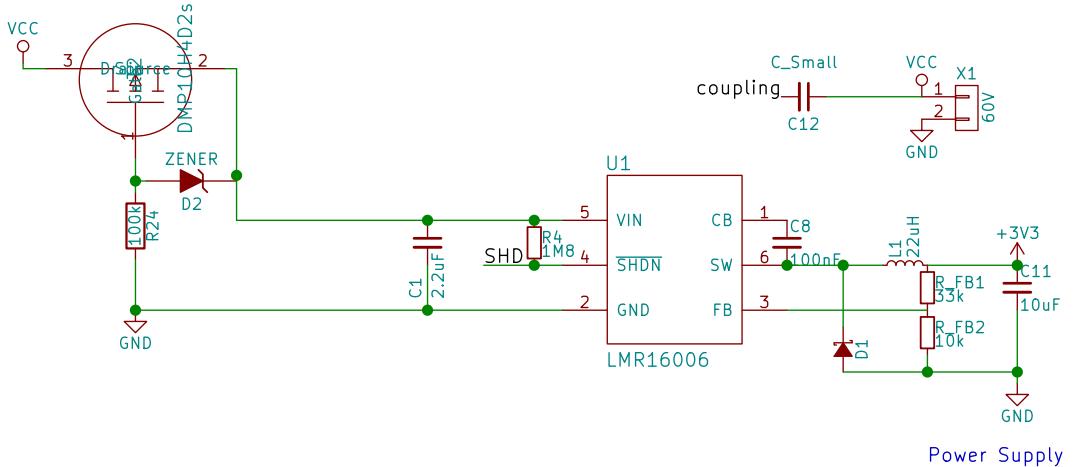


Abbildung 5.4: Speisung Sensor

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 Datasheet zeigen. Es

Source Datasheet

wurde eine Frequenz von 20 MHz ausgewählt, da diese bei Leitungen unserer Länge optimal sind. Das Signal wird dann moduliert, indem der UART TX Pin direkt am INH Pin den VCO ein- und ausschaltet und somit eine OOSKzustände bringt. Hier ist wichtig, dass der Pin Active High ist.

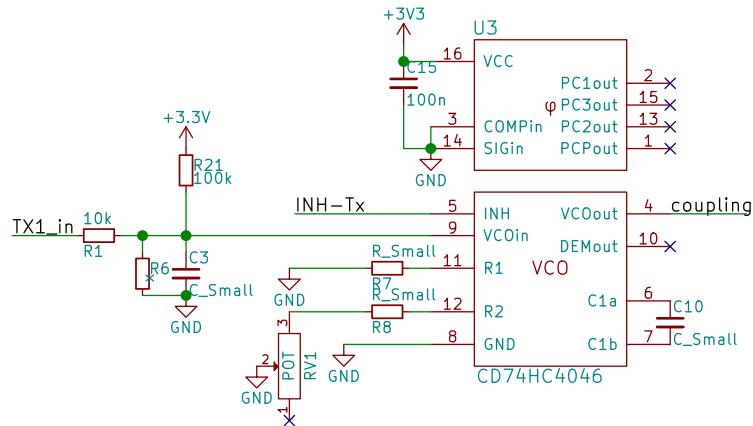


Abbildung 5.5: Transmitter Sensor

5.1.3 Microcontroller

Der Mikrokontroller braucht bis auf einen Pull-Up Widerstand am Active Low Reset und einen Stabilisierungskondensator an der Spannungsversorgung keine spezielle Be- schaltung. 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 ver- bunden ist die Programmier- schnittstelle (SWD).

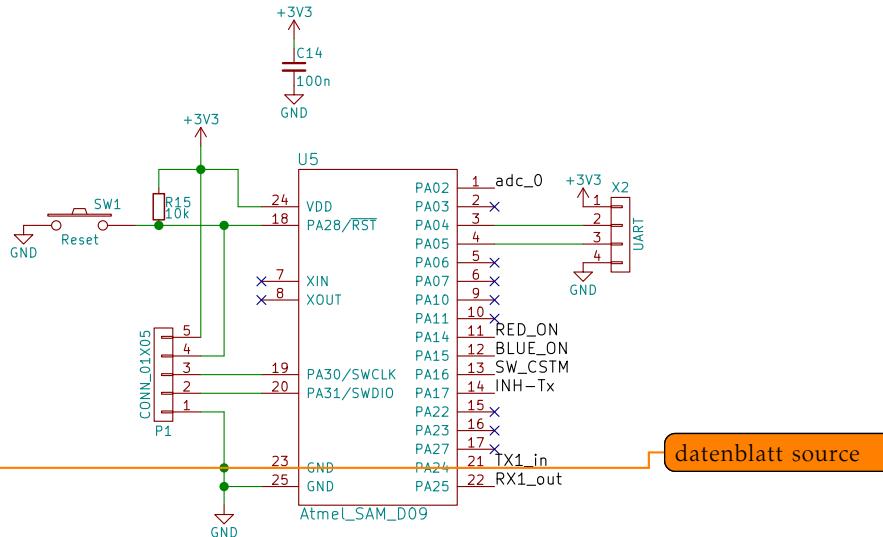


Abbildung 5.6: Microcontroller Sensor

Weshalb?

datenblatt source

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.

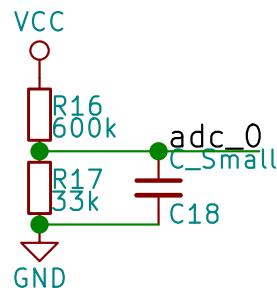


Abbildung 5.7: Spannungsmessung Sensor

5.1.5 Interface

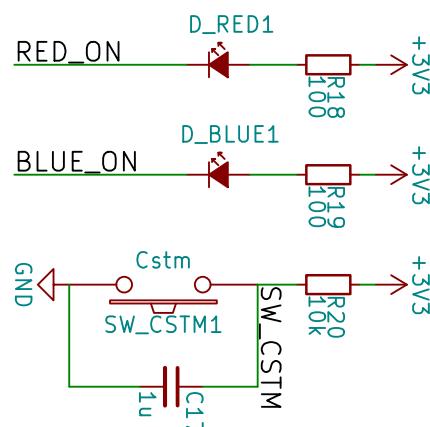


Abbildung 5.8: Interface Sensor

Am Sensor sind zwei LEDs und ein Schalter angebracht, welche zu Statusanzeigen und Debuggen benutzt werden können.

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.

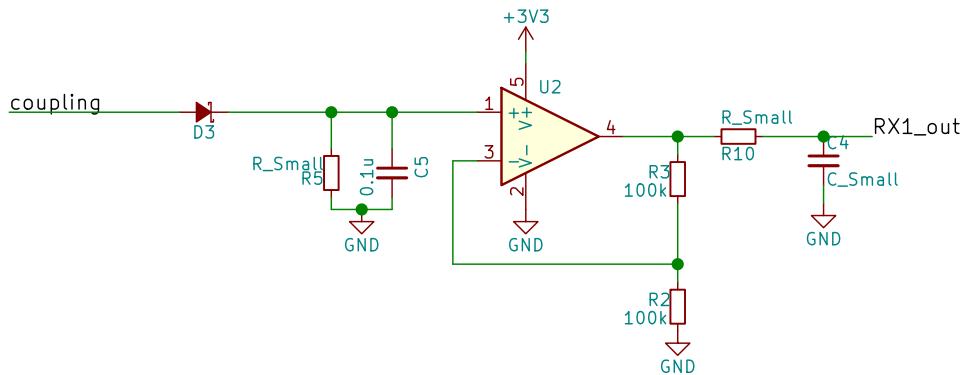


Abbildung 5.9: Empfänger Sensor

R5, D3, C5, R3, R2,
R10, C4, U2

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 in dem Gehäuse untergebracht werden kann, ist eine eigene Frontplatte entwickelt und gefertigt worden (Abbildung 5.13).

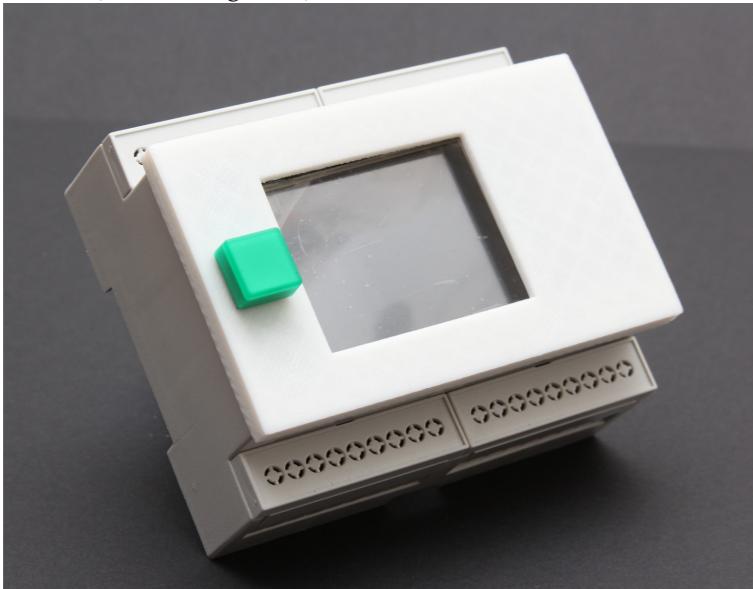


Abbildung 5.10: Master-Gerät, zusammengesetzt



Abbildung 5.11: Raspberry Pi mit Touchscreen-Modul

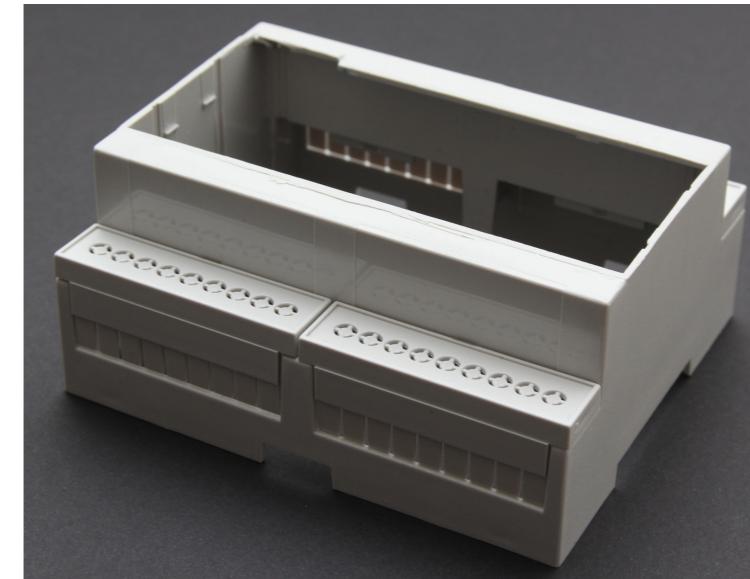


Abbildung 5.12: Hutschienengehäuse

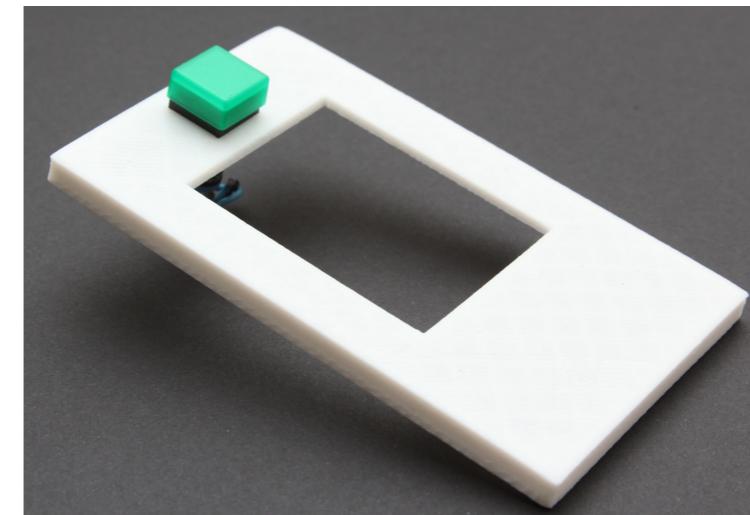


Abbildung 5.13: 3D-degruckte Abdeckung für das Hutschienengehäuse

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) der Strom wird 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.

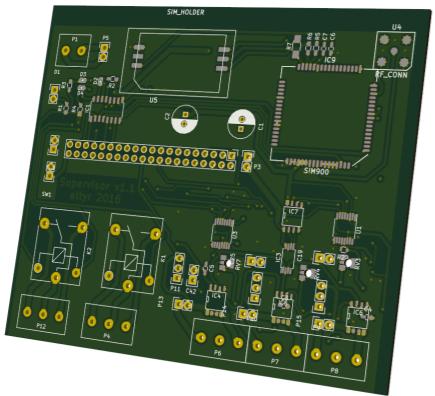


Abbildung 5.14: PCB, Vorderseite

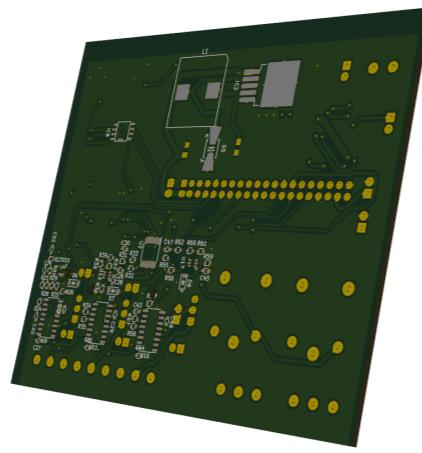


Abbildung 5.15: PCB, Rückseite

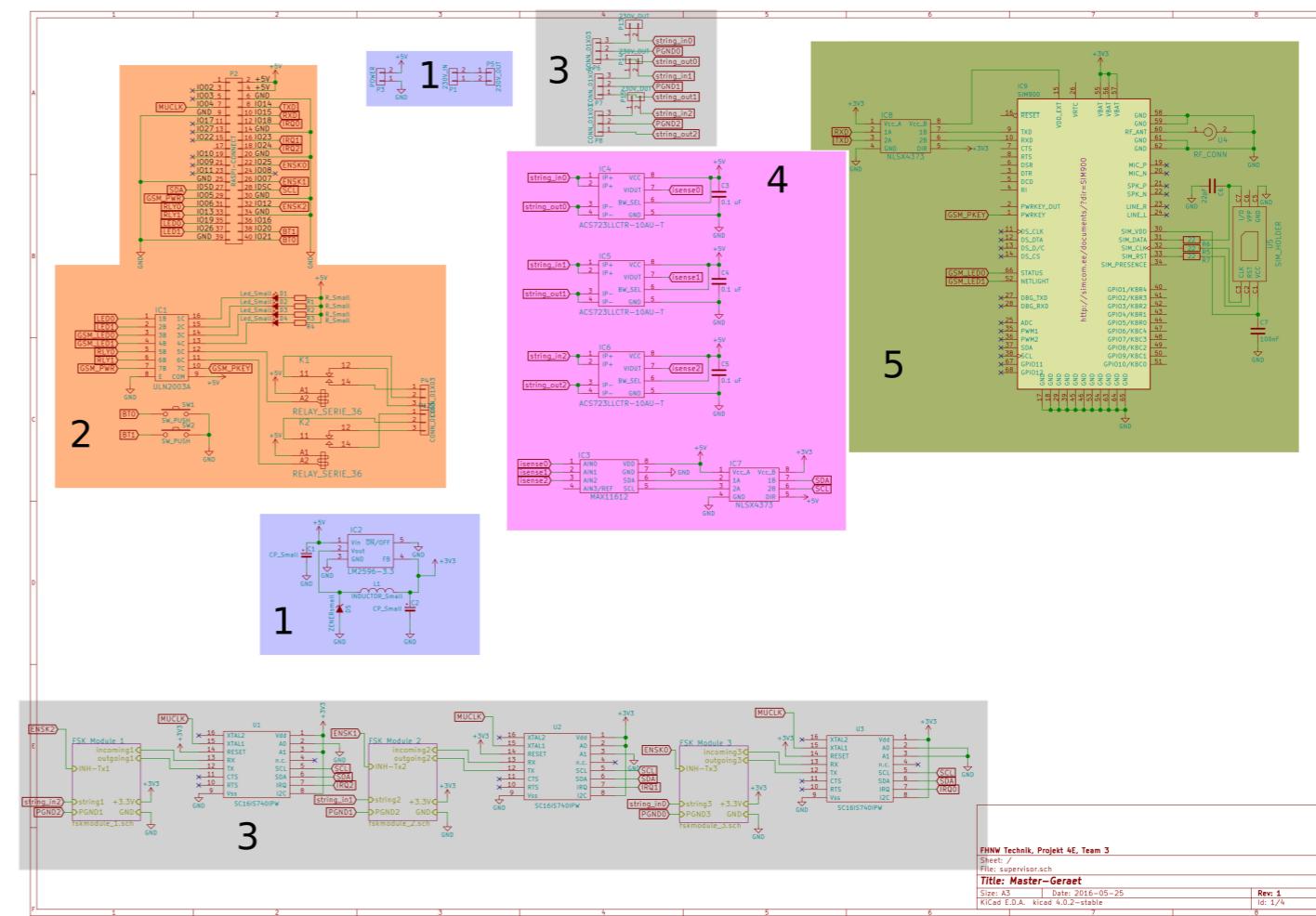


Abbildung 5.16: Schema des Master-Geräts. Eine Grossversion ist in Anhang zu finden, die einzelnen Baugruppen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben und grösser abgebildet.

5.2.1 Speisung

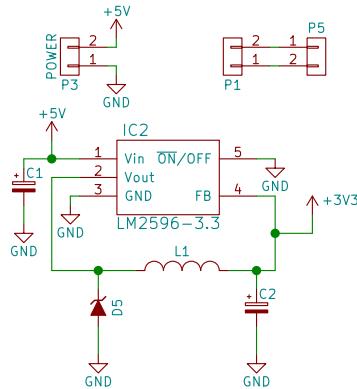


Abbildung 5.17: Stromversorgung Master-Gerät

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 Netzanschluss dabei zuerst auf das PCB geführt, anschliessend zum Netzgerät weggeführt, welches dann 5 V zurückliefert.

Für Bauteile, welche 3.3 V Versorgungsspannung benötigen (GSM-Modem, ...), ist eine Spannungswandlung 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 [?] 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 möglich. 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 [?] 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 Bedingungen, unter den dieser maximale Verbrauch auftreten kann.

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

Tabelle 5.1: Hauptsächliche Leistungsverbraucher

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

5.2.2 Ein-/Ausgänge (GPIO)

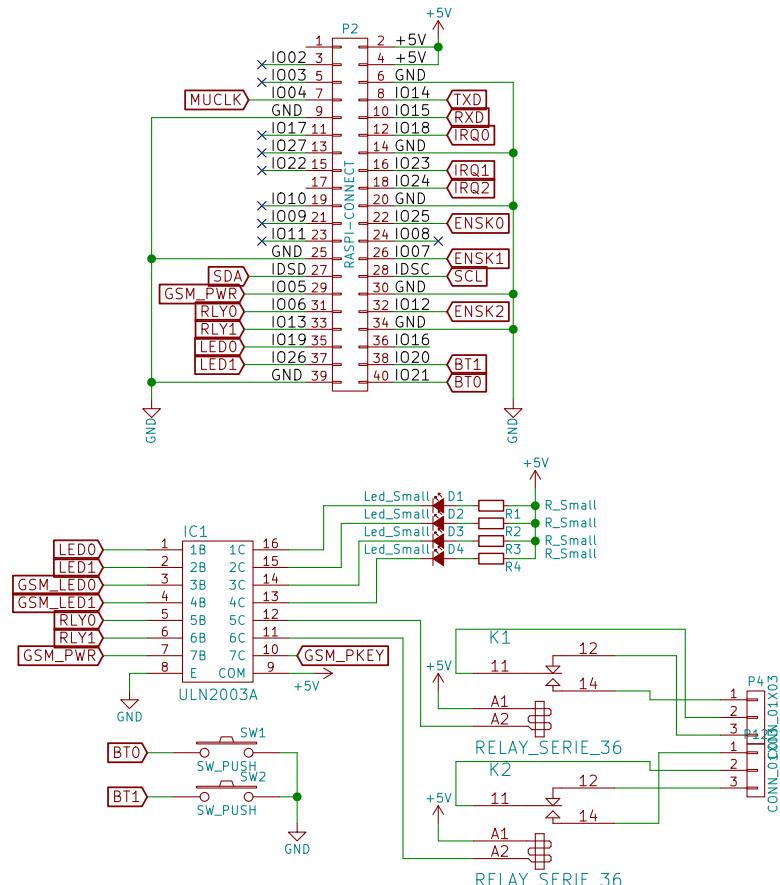


Abbildung 5.18: GPIO Master-Gerät

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 und 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 Pivia Flachbandkabel.

Als IO-Verstärker wird ein ULN2003A von Texas Instruments gewählt [?]. 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 [?] 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 [?]. 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

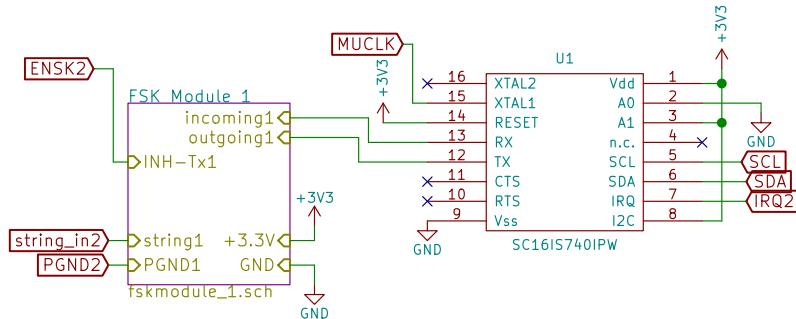


Abbildung 5.19: Kommunikation zu Sensorauf Master-Gerät

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 39.

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 Semiconructors [?] verwendet. Der Sensorsendet 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 79 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.

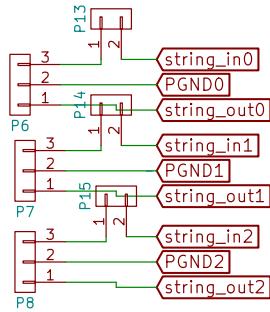


Abbildung 5.20: Anschlüsse zur Einkopplung

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 1 kV und können sowohl mit 3.3 V wie auch 5 V betrieben werden [?].

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 der 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 [?]. Dieser besitzt ein I²C-Interface, drei Kanäle und ist mit dem Ausgangspegel der Hall-Sensoren kompatibel. Allerdings liefert er ein

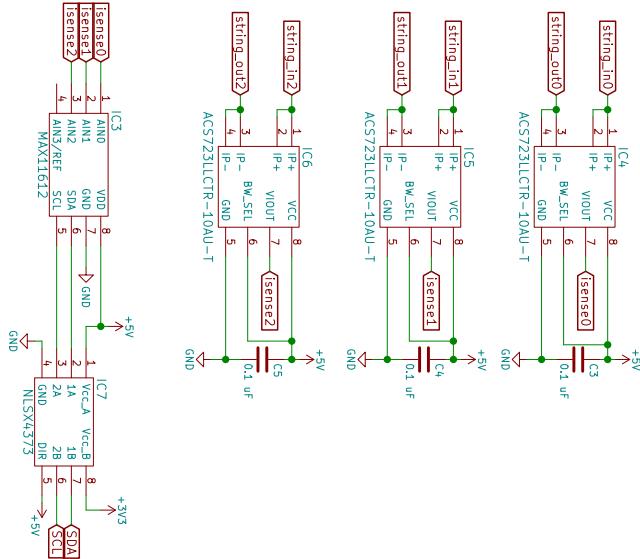


Abbildung 5.21: Strommessung

Ausgangssignal mit einem 5 V-Pegel, was nicht mit dem Raspberry Pi kompatibel ist, dessen Eingänge mit einem Pegel 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 [?], vor.

5.2.5 GSM-Modem

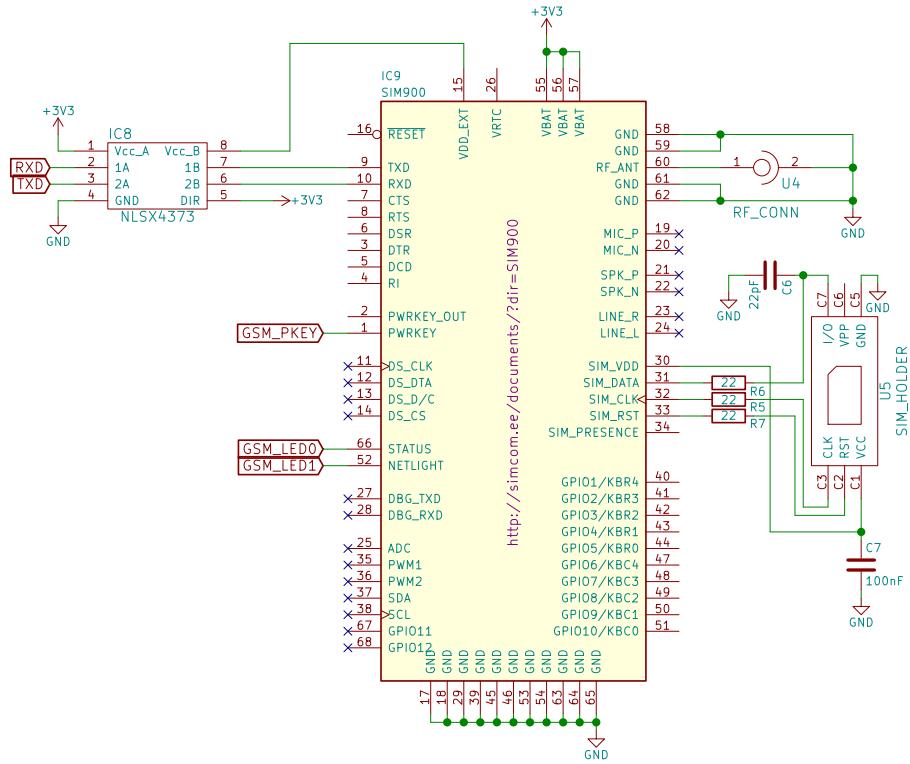


Abbildung 5.22: GSM-Modem Schaltung

Das GSM-Modem ist ein integrierter Baustein, der alle nötigen Funktionen bereitstellt; ein Baustein der SIM900-Serie von Simcom [?]. Er ist zusammen mit seiner Beschaltung in Abbildung 5.22 dargestellt. Wie auch bei der Strommessung wird auch 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 Pavia 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 ist die Antenne und der Adapter für die SIM-Karte zu sehen.

Gemäss Referenzdesign auf Seite 9 des Modem-Guides [?] 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 konzeptuell 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 dazu auch 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-Shift 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.

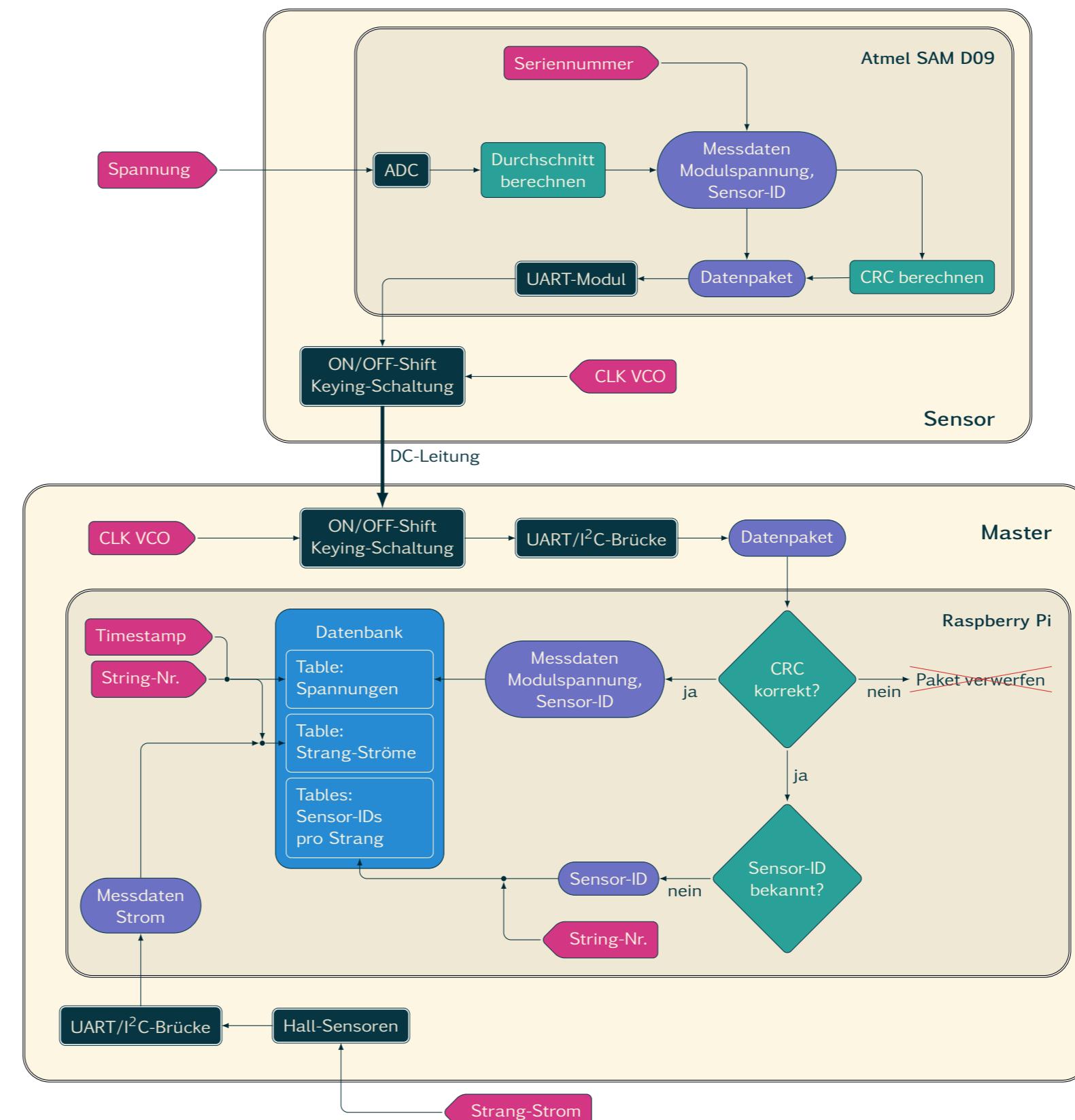


Abbildung 6.1: Datenfluss von den Messungen der Modulspannungen und Strang-Ströme bis zur Speicherung in der Datenbank

6.2 Firmware Sensor

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

6.2.1 Benutze 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 CMSISim 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 simplen main() Funktion welche in einer Endlosschleife läuft.

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. Dies heisst dass die UART die gemittelten Daten der letzten x Samples an den Master adressiert und verschickt. Hierzu wird ein Datenpakt wie es in Abbildung 6.2 zu sehen ist verschickt:

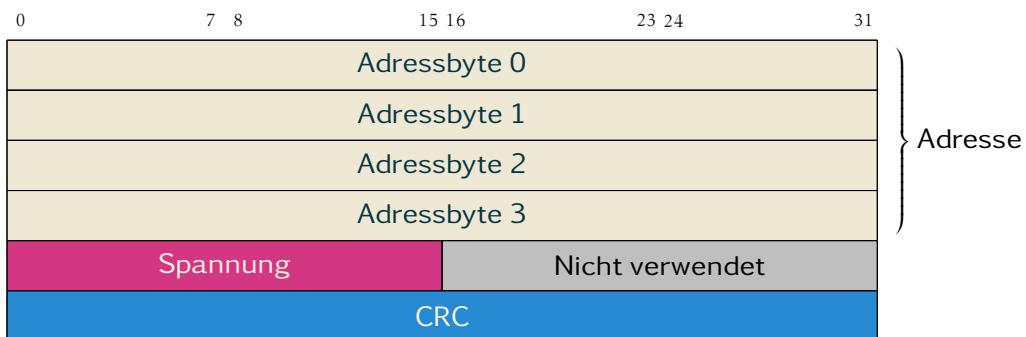


Abbildung 6.2: Aufbau eines Datenpakets

Damit der Empfänger eines Paketes erkennen kann dass es keine Technische Störung beim übertragen gab und er falsche Daten liest, wird eine Prüfsumme (CRC) der zu verschickenden 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. Dann wird das Datenpaket per UART verschickt.

6.2.2.2 Sensor

Der Spannungssensor selbst wird mittels Analog Digital Konverters (ADC) verwirklicht. Dafür wird mithilfe desASF ein 12 Bit ADC ausgelesen und von diesen Werten ein Moving Average erstellt. Deshalb kommt an zweiter Stelle in der Endlosschleife ein Lesevorgang auf dem ADC. Dann wird mithilfe des sogenannten Cascaded Integrator-Comb Filters der aktuelle Moving Average berechnet. Die Formel 6.1 zeigt gut wie dies berechnet wird.

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

Dieser Moving Average wird nun per UART verschickt.

6.2.2.3 Statusanzeige

Damit man gut sieht ob der Sensor noch korrekt leuchtet, kommt an letzter Stelle der Endlosschleife noch ein simples Toggeln der LED, so dass man sieht, ob etwas nicht stimmt, falls es einmal nicht mehr toggeln sollte.

6.2.3 Open On Chip Debugger

Zum Programmieren der CPUs haben wir OpenOCD gewählt. Auch hier ist wieder anzumerken, dass es einStück 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. Deshalb hat OpenOCD unseren Chip zu Beginn nicht unterstützt. Deshalb ist der bestehende Treiber für Atmel-Chips 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

Es wird im Folgenden auf die Software des Master-Gerät genauer eingegangen. Die verwendeten Komponenten werden beschrieben und es wird auf die Lizenzen ebendieser 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 gesamten Software-Stacks sind in Abbildung 6.3 dargestellt.

Die Funktionalität unserer Software wird mit einigen Python-Libraries implementiert. PyQt wird benutzt, um die graphische Benutzeroberfläche zu programmieren, SQLAlchemy ist dafür dient als Datenbanktreiber verantwortlich 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.

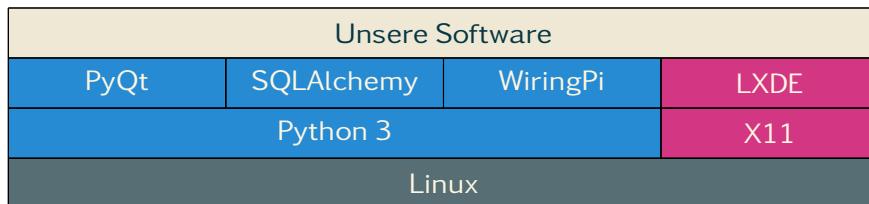


Abbildung 6.3: Software-Stack für unser Projekt

Tabelle 6.1: Liste der verwendeten Python-Libraries

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

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 ?? 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 Lizzenzen)	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* [?]). Die darauf aufbauenden Programmbibliotheken 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 zwischenzuspeichern und asynchron hintereinander abzuarbeiten.
- SQLAlchemy beinhaltet mit der `SScopedSession` 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, dies sind I²C-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 wurde bewusst sehr schlicht gehalten. Sie besteht aus folgenden Ansichten: Hauptmenü, Einstellungen, Eingabe der Telefonnummer und dem Fehlerverlauf. Im regulären Betrieb ist das Hauptmenü ersichtlich. Es informiert über den Anlagestatus sowie den gemessenen Strom der Stränge. Vom Hauptmenü aus kann durch drücken des Feldes *Einstellungen* zu den Einstellungen gelangt werden. In den Einstellungen können die Relaiskontakte 1 und 2 aktiviert oder deaktiviert werden. Sie dienen zur Betätigung einer externen Signalisation im Fehlerfall. Weiter kann die SMS Benachrichtigung ebenfalls aktiviert oder deaktiviert werden. Durch betätigen des Feldes *Speichern* wird die aktuelle Auswahl gespeichert. Falls die SMS Benachrichtigung gewählt wird, muss eine gültige Telefonnummer hinterlegt werden. Die Ansicht Eingabe einer Telefonnummer wird vom Feld *Telefonnr. hinzufügen* aufgerufen. Nach der Eingabe einer gültigen Nummer, wird mittels *Speichern* die Telefonnummer gespeichert und es kann mit dem Feld *Zurück* zu den Einstellungen zurückgekehrt werden. Diese Ansichten sind im regulären Betrieb ersichtlich und können nach Belieben eingestellt werden.

unterliegender aufbau
statt benutzerführung?

Folgend werden die Störbetrieb Ansichten erläutert. Wird ein Modulfehler erkannt, signalisiert dies die Ansicht *Modulfehler*. Es wird die Modulseriennummer

und die Zeit mit Datum angezeigt. Damit ist es möglich ein fehlerhaftes Modul zu erkennen und entsprechend zu handeln. Durch betätigen des Feldes *OK* wird der externe Alarm der Relais 1 und 2 (falls aktiviert) quittiert und das Hauptmenü wird wieder angezeigt. Das Feld *Fehlerverlauf* führt zu einer Übersicht aller bis zu diesem Zeitpunkt aufgetretenen Modulfehler. Jeweils wird die Modulnummer, die Zeit und das Datum in einer Zeile angezeigt.

6.3.5 Datenbank

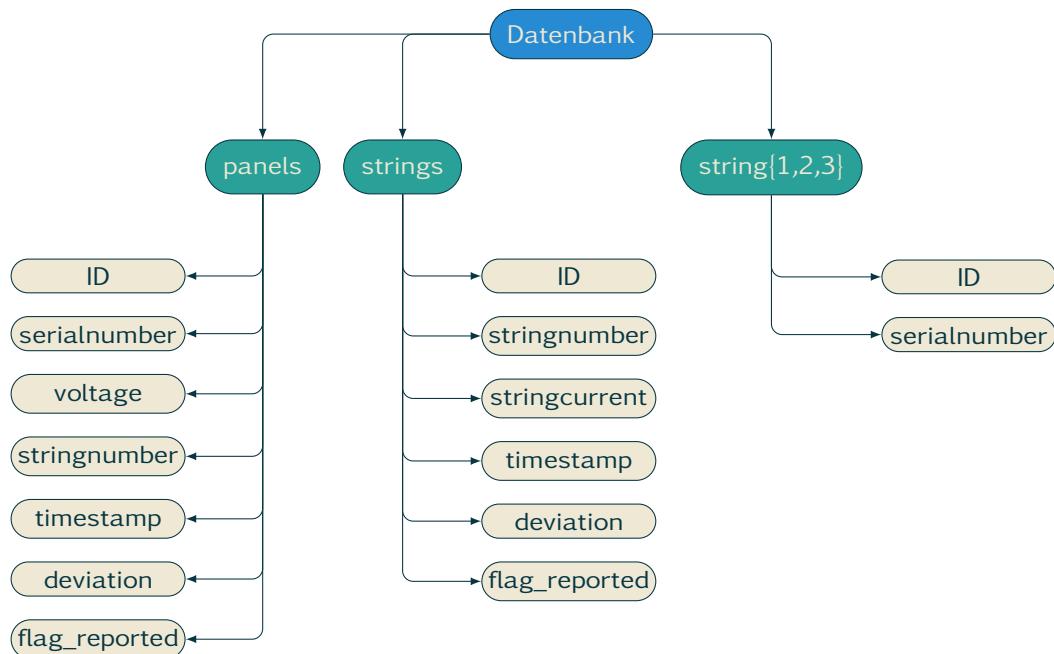


Abbildung 6.4: Datenbank-Layout

6.3.6 Funktionen

7

Validierung

Im Folgenden wird dargelegt, welche Tests an unserem System durchgeführt worden sind, weshalb die durchgeführten Tests relevant sind und welche Ergebnisse erzielt werden konnten.

7.1 Kopplungsspule

Eine Spule leitet nicht alle Frequenzen gleich gut. Zudem sättigt ein Ferritkern bei 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, während die Multilayer-Spule schon bei 4 Megahertz induktiv wird. 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.

To Appendix

Die Power-Choke Tests sind nur für die gewählte Einlayerspule genutzt worden. Dafür wird durch den Kern eine kurzgeschlossene Primärwicklung geführt, welche dem Aufbau des Endproduktes entspricht. Wie man Grafik ?? entnehmen kann, fängt der Kern bei ungefähr 2 A zu sättigen an. Die beiden Kurven sind zwei verschiedene Messmethoden (inkrementelle Messung und Sekantenmessung), wobei wir hier eher der inkrementellen Messung Beachtung schenken, da hier der Kurvenverlauf schlechter ausfällt und wir mit dem Worst Case-Szenario rechnen. Uns interessiert hier vor allem die Stromabhängigkeit der Induktivität. Da das Stromverhältnis im Trafo durch 7.1 gegeben ist, 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 führt, ist dies mehr als ausreichend.

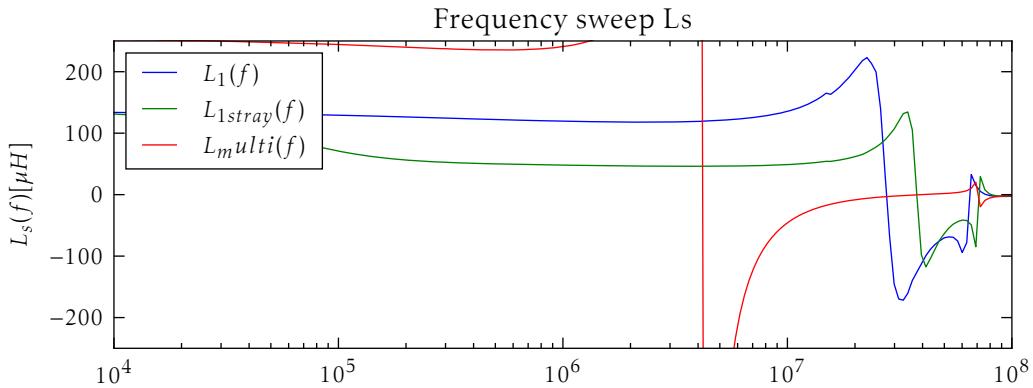


Abbildung 7.1: Induktivitätsmessung der gewählten Spule

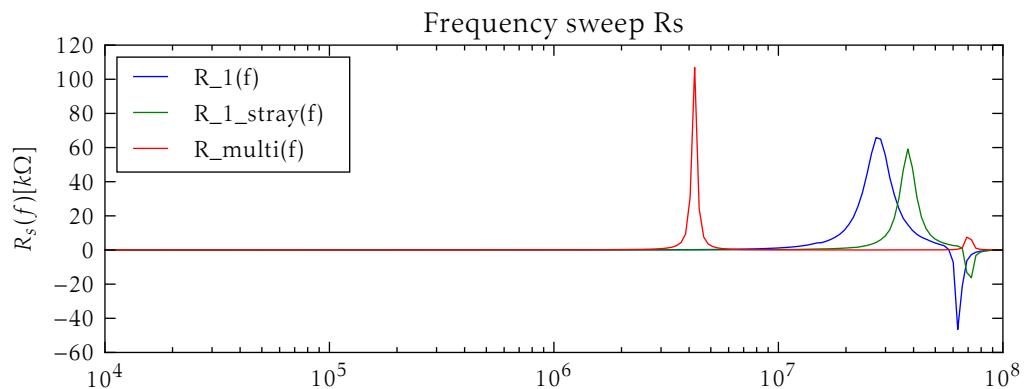


Abbildung 7.2: Serienwiderstandsmessung der gewählten Spule

$$I_S = \frac{I_P * N_P}{N_S} \quad (7.1)$$

To Appendix

7.2 Modulator

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

Wie man den Kurven aus den Abbildungen D.1, D.2 und D.3 entnehmen kann, produziert der VCO ein eigentlich schönes Signal. Jedoch gibt es bei der Flanke Überschwinger jeweils. Auch ist das Signal ziemlich eckig, was nicht optimal ist. Dem kann mit einem Tiefpassfilter entgegengewirkt werden.

Leider produziert der VCO ab und an auch mysteriöse Irregularitäten wie in Abbildung D.2 gezeigt. Da der 74HC4640, wovon der VCO Teil ist, auch sonst nicht so funktionierte 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 es auf einen Messfehler zurückzuführen ist.

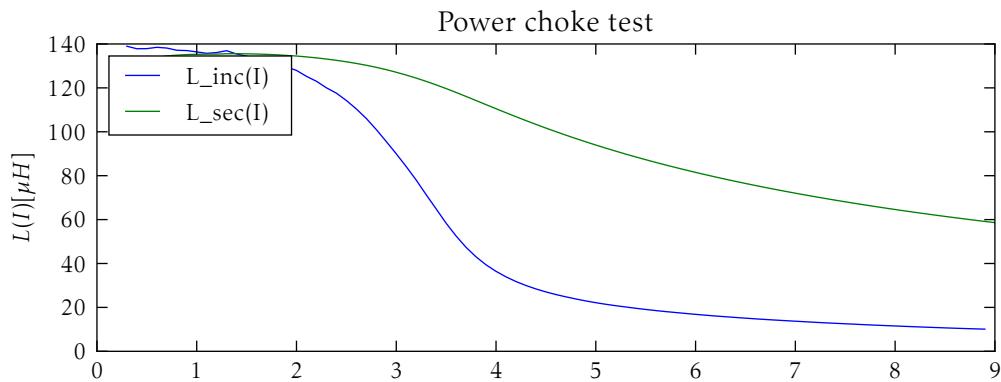


Abbildung 7.3: Kernsättigung der gewählten Spule in Abhängigkeit von I in Form der Induktivität

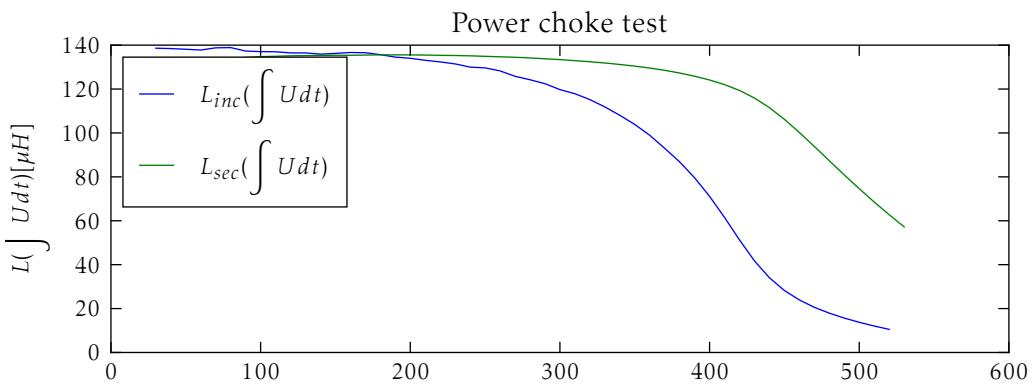


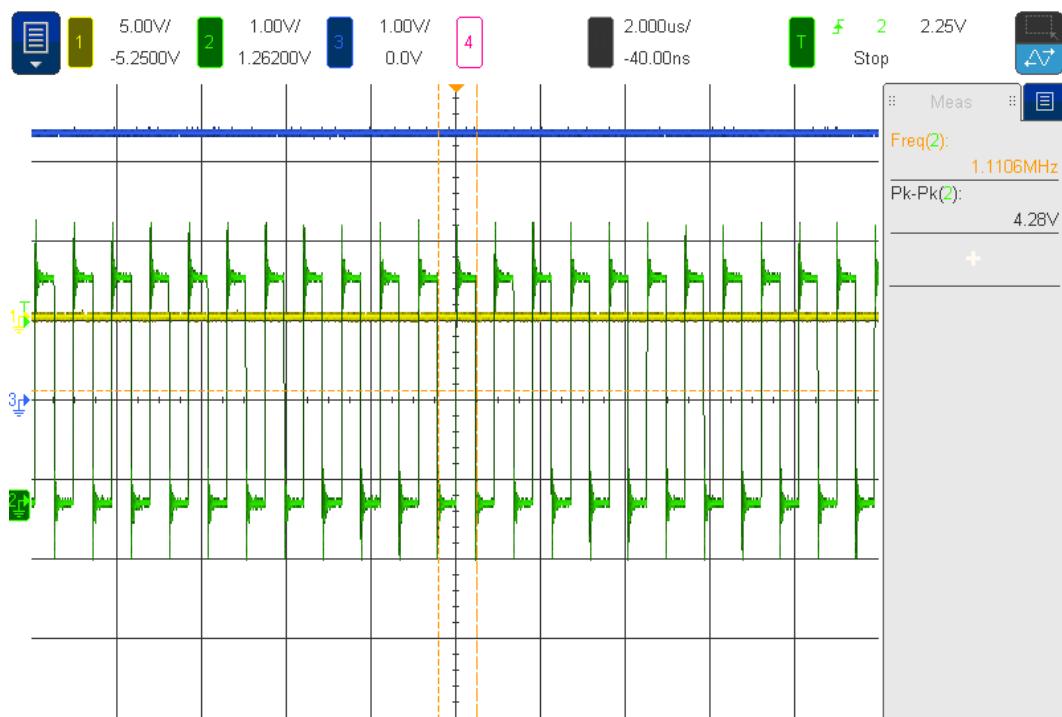
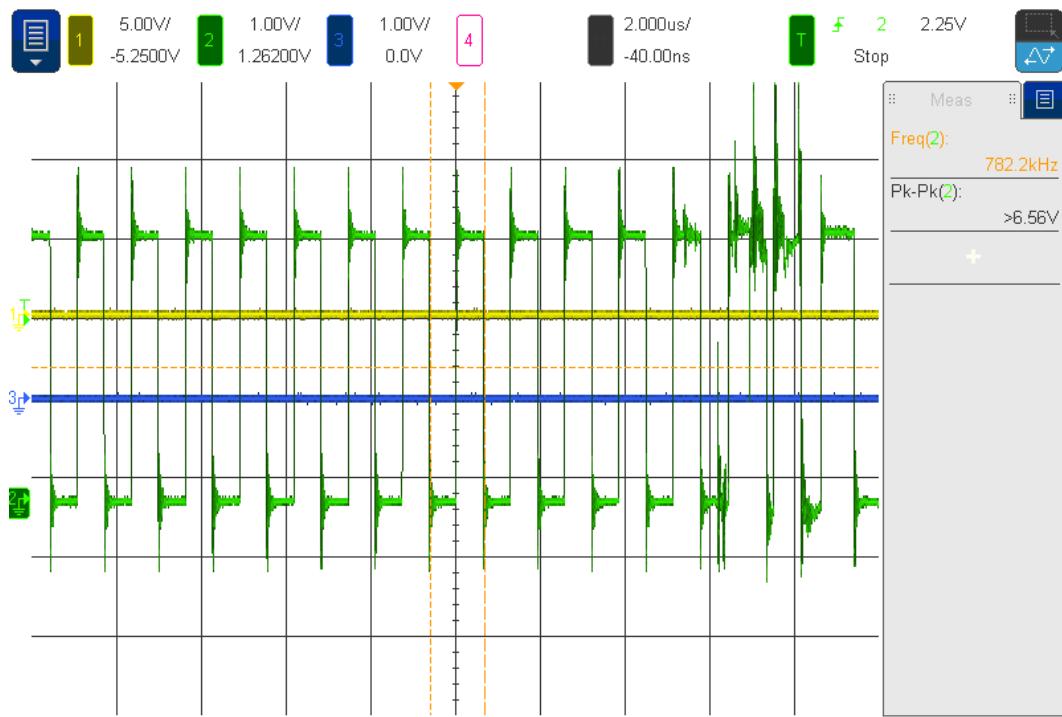
Abbildung 7.4: Kernsättigung der gewählten Spule in Abhängigkeit von $\int U dt$ in Form der Induktivität

Die Oszilloskop-Einstellungen sind im Anhang ?? zu finden.

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 D.4, D.5 und D.6 entnommen werden. Man sieht, dass die Schaltzeit etwa 2 μs beträgt. Wenn man nun mit 9600 Baud empfangen würde, ergäbe dies eine Periode von 104 μs . Damit wäre die Schaltzeit lediglich 3.8 Prozent, was reibungslos funktioniert, wie auch gut in Grafik D.5 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.

7.4 Gesamtsystem

Abbildung 7.5: VCO_{out} zoomed in, Parameter in Listing D.1Abbildung 7.6: VCO_{out} mit Störungen, Parameter in Listing D.2

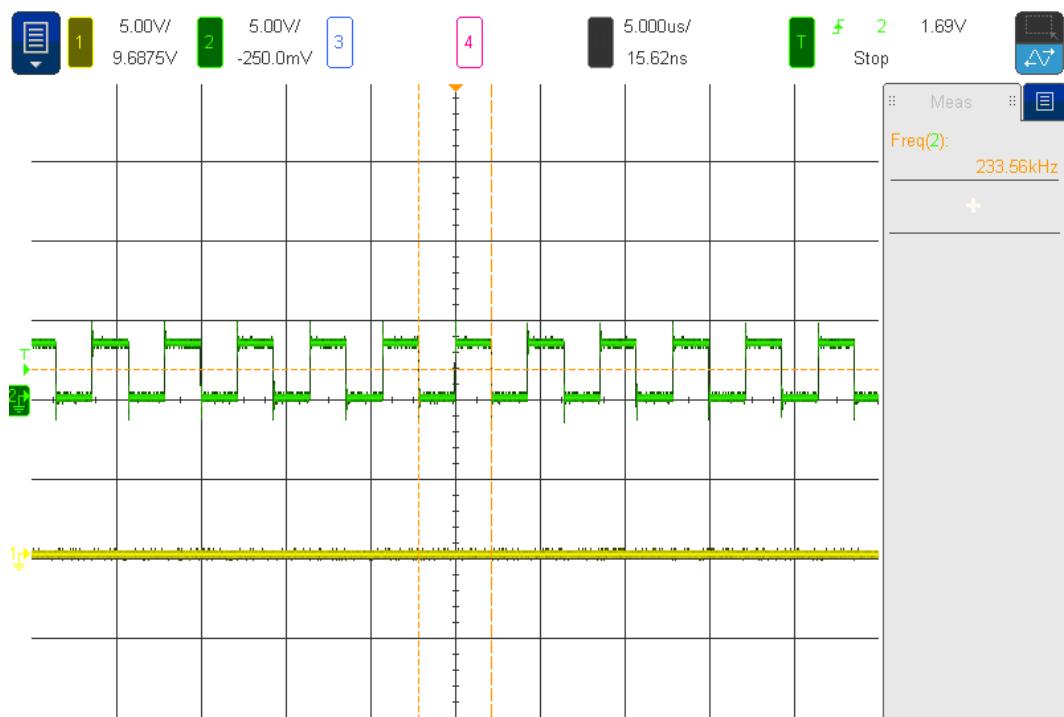
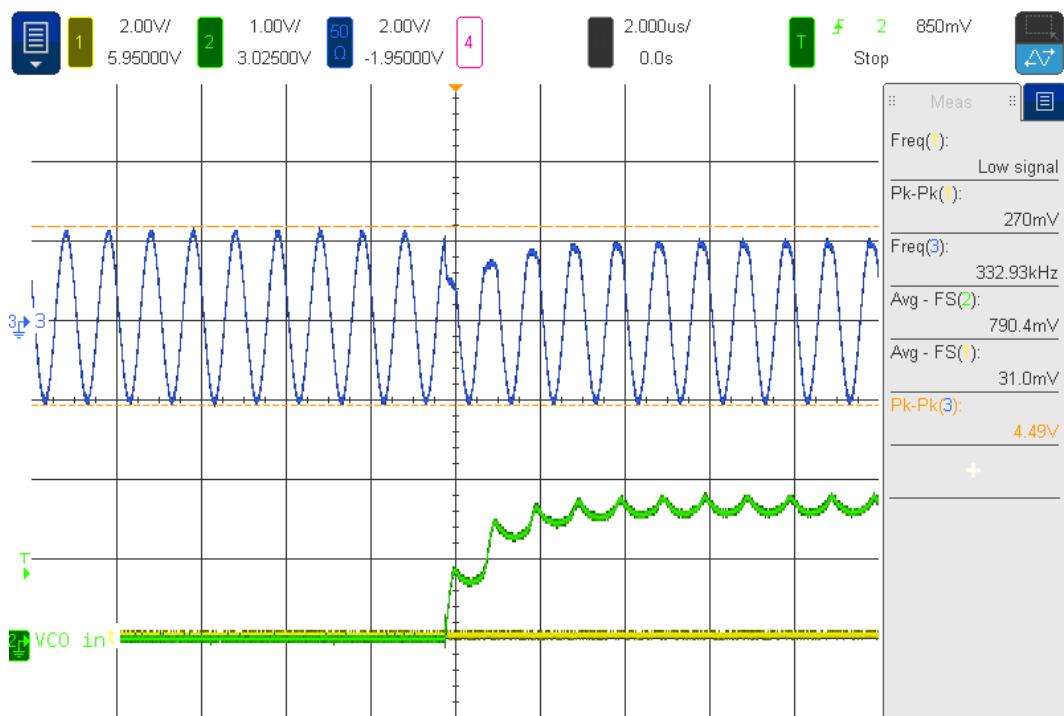
Abbildung 7.7: VCO_{out} zoomed out, Parameter in Listing D.3

Abbildung 7.8: Rising Edge des Demodulators, Parameter in Listing D.4

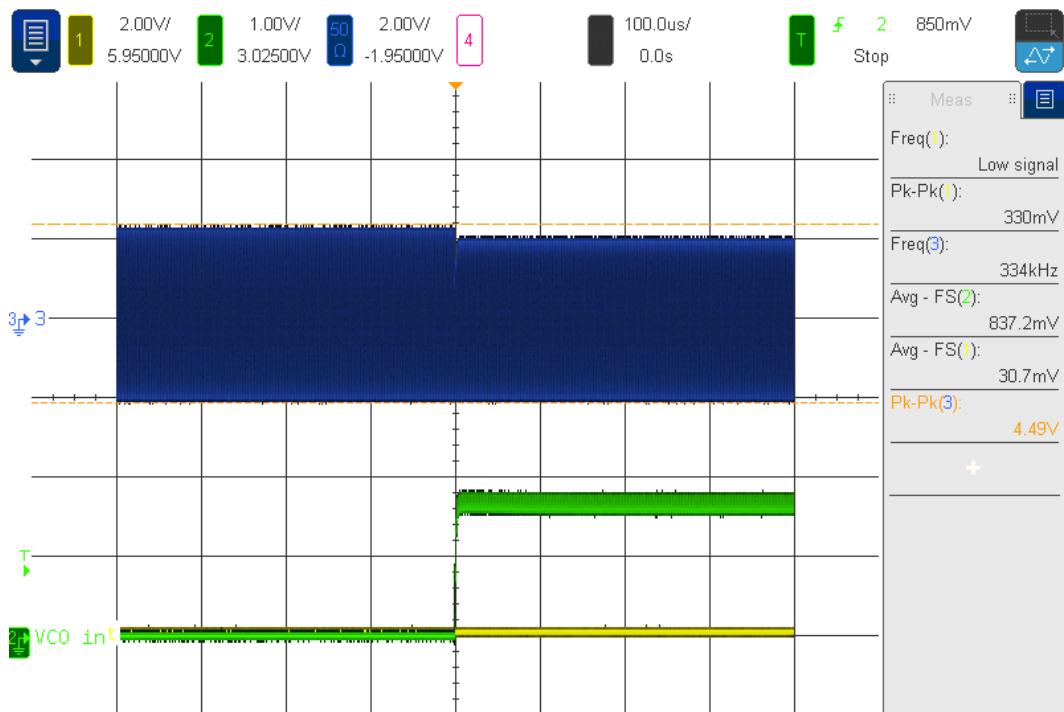


Abbildung 7.9: Rising Edge des Demodulators im Makroskopischen, Parameter in Listing D.5

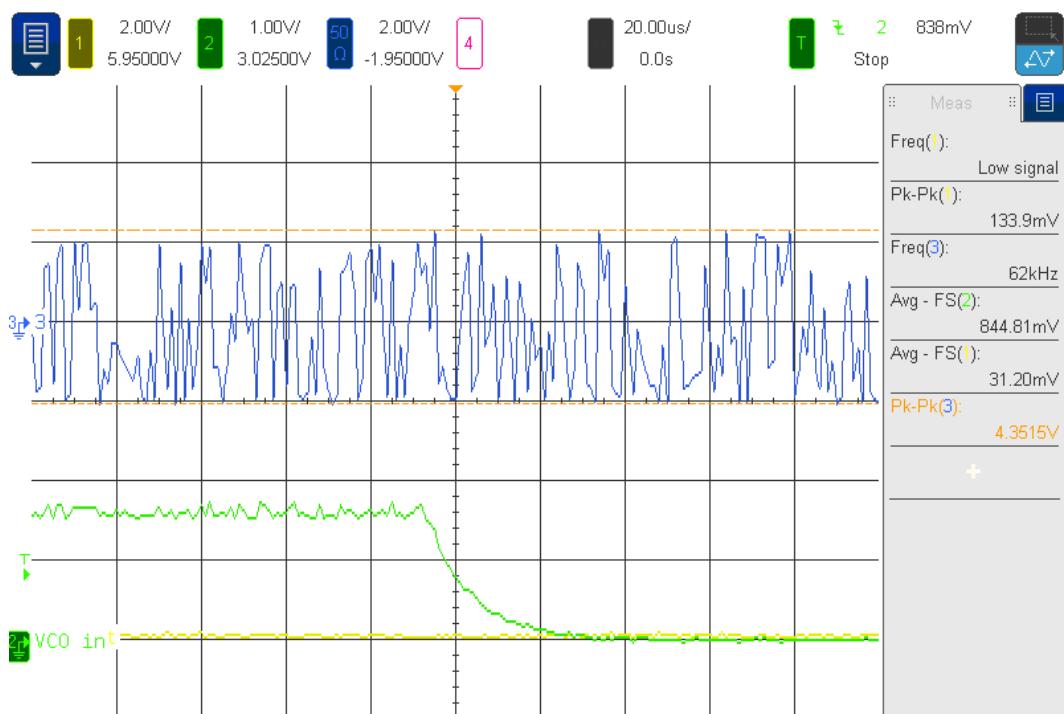


Abbildung 7.10: Falling Edge des Demodulators, Parameter in Listing D.6

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. Wie auch die DC-Leitungen von bis zu drei Strängen werden auf die dafür vorgesehenen Anschlussklemmen geführt. Der maximale Leiterquerschnitt beträgt 4 mm².

satz scheint etwas komisch?

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.

korrekt?

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: [?]

mitgeliefert. Um den Standort jedes Sensors zu dokumentieren, sind die Klebstreifen im Anlageplan auf dem jeweiligen Modul aufzutragen. Gleches 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 jedoch 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 Auf-listung 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. (Weiter Infos zum Störbetrieb im Kapitel weiter unten).

Anlagestatus: kein Fehler

Strommessung:

String 1: 100 A

String 2: 200 A

String 3: 300 A

History

Einstellungen

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. Wie auch die beiden Relais 1 und Relais 2 werden bei der Betätigung 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 wurde, erfolgt zusätzlich eine Fehlerbenachrichtigung an das entsprechende Mobiltelefon.

Um die 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 *History* (Abbildung 8.5) sind alle bisherigen Fehlermeldungen der Anlage ersichtlich.



Abbildung 8.4: Fehler bei einem Modul

Abbildung 8.5: Fehler-History der Anlage

9

Fazit

Was läuft? Was läuft nicht? Weshalb? Weiteres Vorgehen bei genügend Zeit? Schwierigkeiten währen des Projekts?

Anhänge

A

Daten von Solarmodulen

Dieser Abschnitt enthält in Tabelle ?? einige Eckdaten von kommerziell erhältlichen Modulen mit den zugehörigen Quellen. Diese Informationen sollen primär als Anhaltspunkt und Vergleich des in unseren Simulationen benutzten Moduls aus Abschnitt 3.2 (ab Seite 17) mit der Praxis.

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 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
[?]	Solarex MSX-60	3.8 A	21.1 V	36	36	586 mV
[?]	Sunset PX85 (pk)	5.5 A	21.5 V	76	38	566 mV
[?]	Sunset Solargenerator AS150 (mk)	8.7 A	22.3 V	36	36	620 mV
[?]	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.

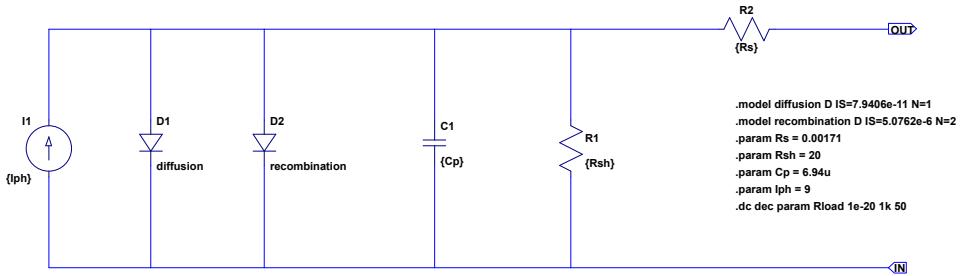


Abbildung B.1: Modell der PV-Zelle, aus welchem das Modul in Abbildung aufgebaut ist. Die Simulationen aus Abbildung 2.6 auf Seite 7 basieren auf diesem Modell. Gegenüber in Abschnitt 3.1 hergeleiteten Modell hat dieses Modell einen höheren Photostrom und einen niedrigeren Shunt-Widerstand. Dies erzeugt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

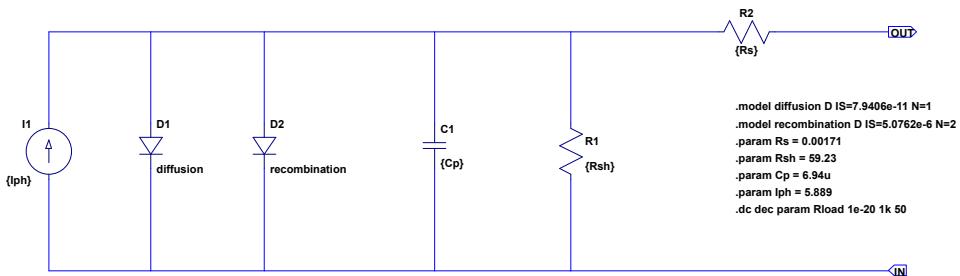


Abbildung B.2: Modell der PV-Zelle, auf welchen die Simulationen in Kapitel 4 ab Seite 22 beruhen. Die Herleitung ist in Abschnitt 3.1 dokumentiert.
Dateipfad: ltspice/jac/jac-cell.asc

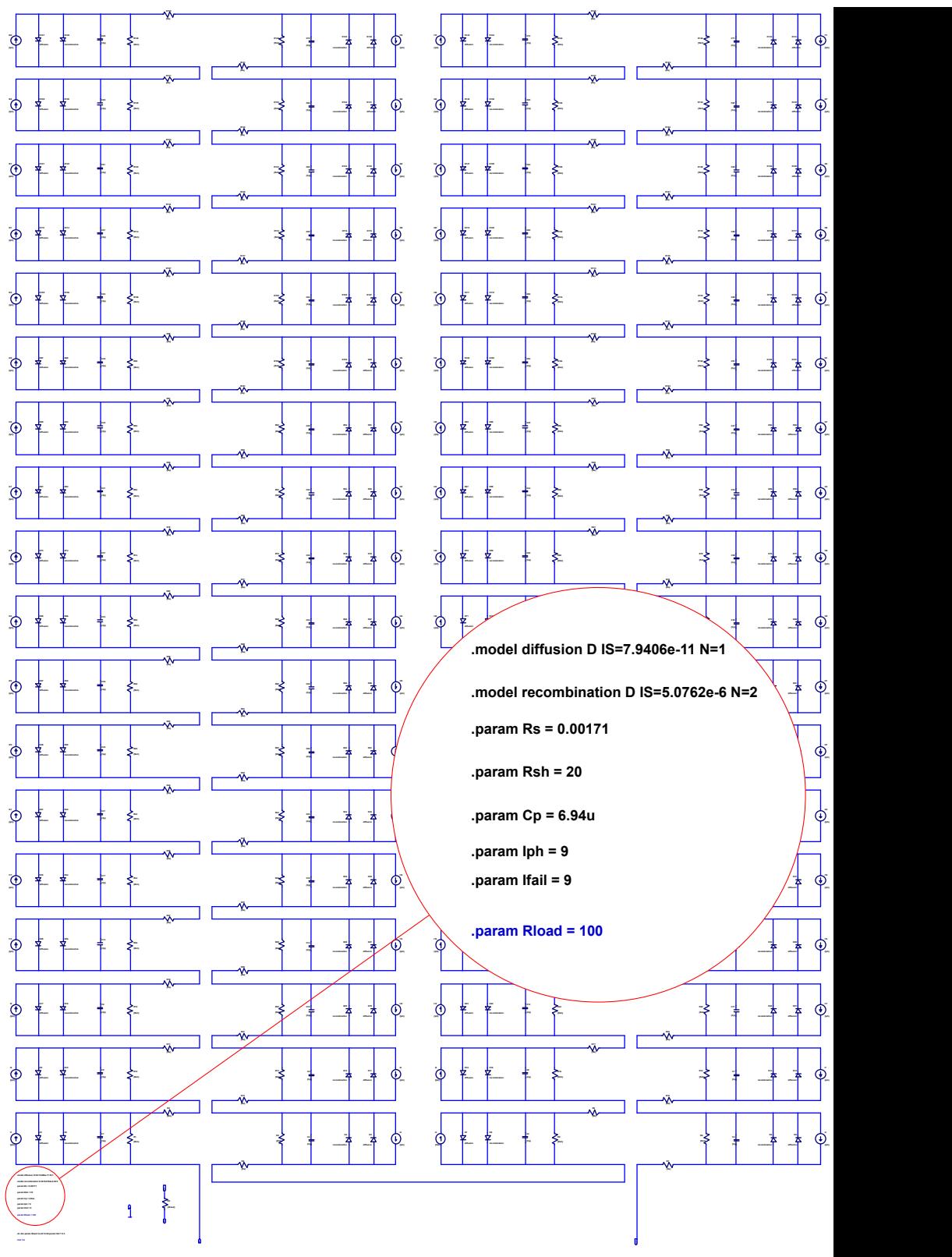


Abbildung B.3: LTspice-Modell, welches zur Erzeugung der Kurven in Abbildung 2.6 auf Seite 7 benutzt worden ist. Das Modell der Zelle, aus welcher dieses Modul aufgebaut ist, ist in Abbildung B.1 abgebildet.

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

Bei Schaltungen mit hunderten oder gar tausenden von Komponenten wird LTspice sehr schwierig zum Bedienen, da das Updaten 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.

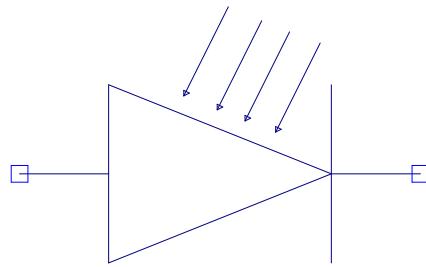


Abbildung B.4: Selbst erstelltes Symbol für PV-Modul

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)

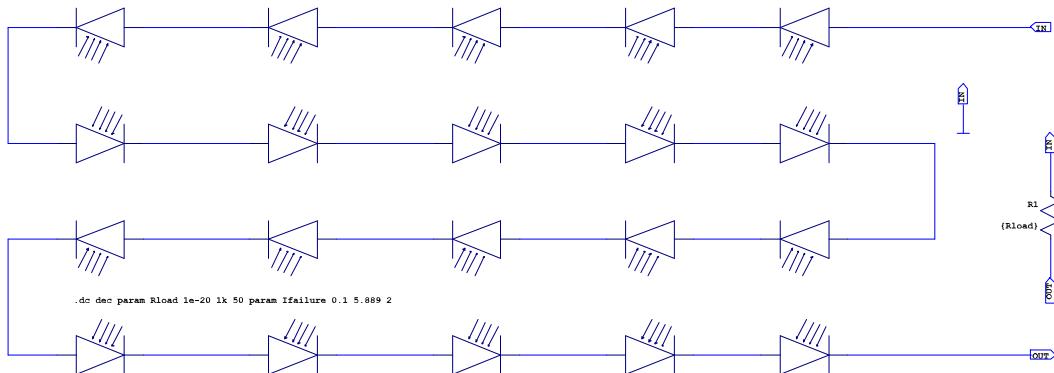


Abbildung B.5: LTspice-Schaltung für einen Modulstrang aus 20 Modulen und variablem Lastwiderstand R_{load} zur Erstellung von Strom-Spannungs-Kurven. Es wird je ein Strang aus Modulen mit Freilaufdiode (Abbildung B.6) und ohne Freilaufdiode (Abbildung B.7) simuliert.

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

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

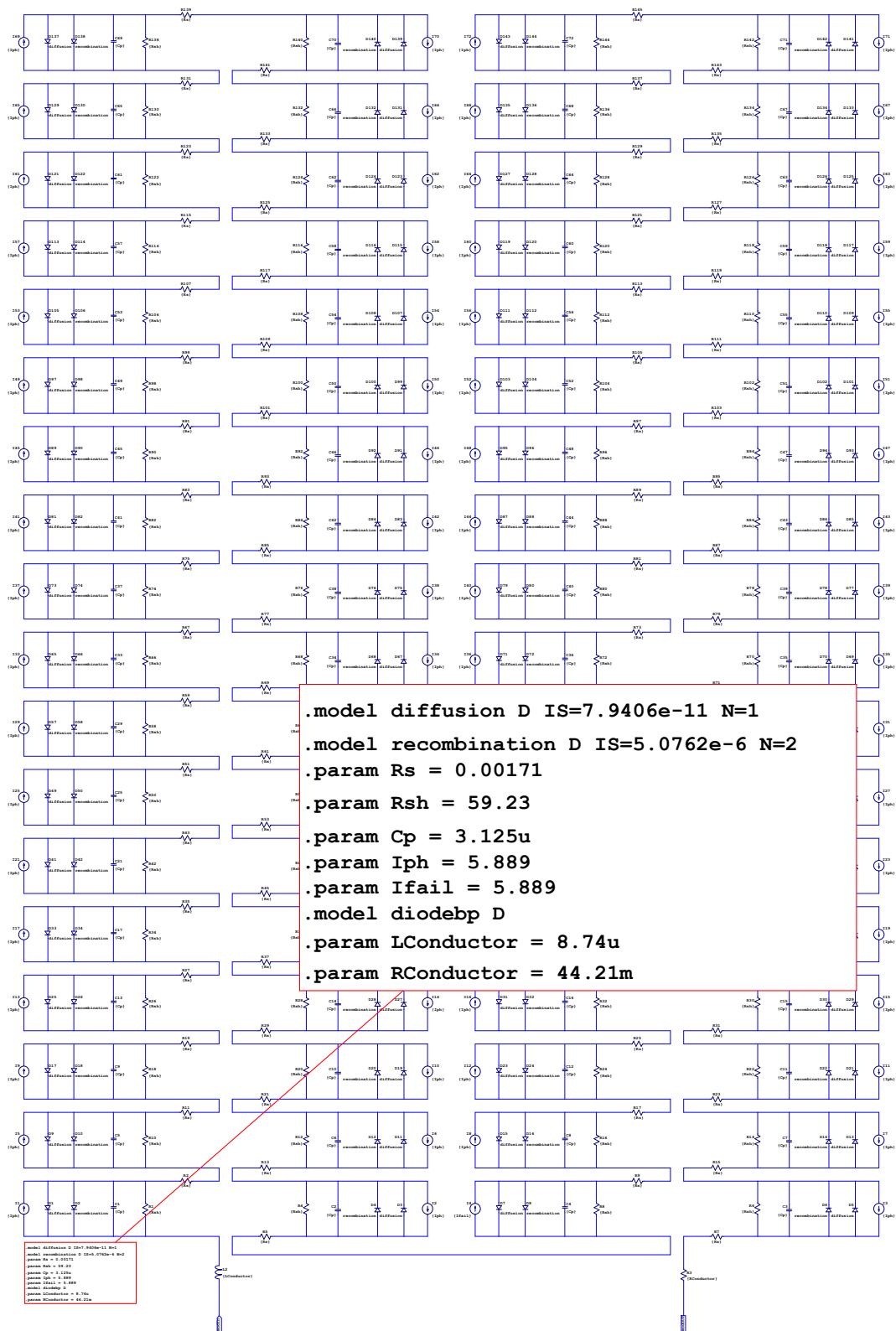


Abbildung B.6: Modul ohne Freilaufdiode, benutzt für die Simulation aus Abbildung 2.7 von Seite 8.

Dateipfad: ltspice/jac/jacModuleNoD.asc

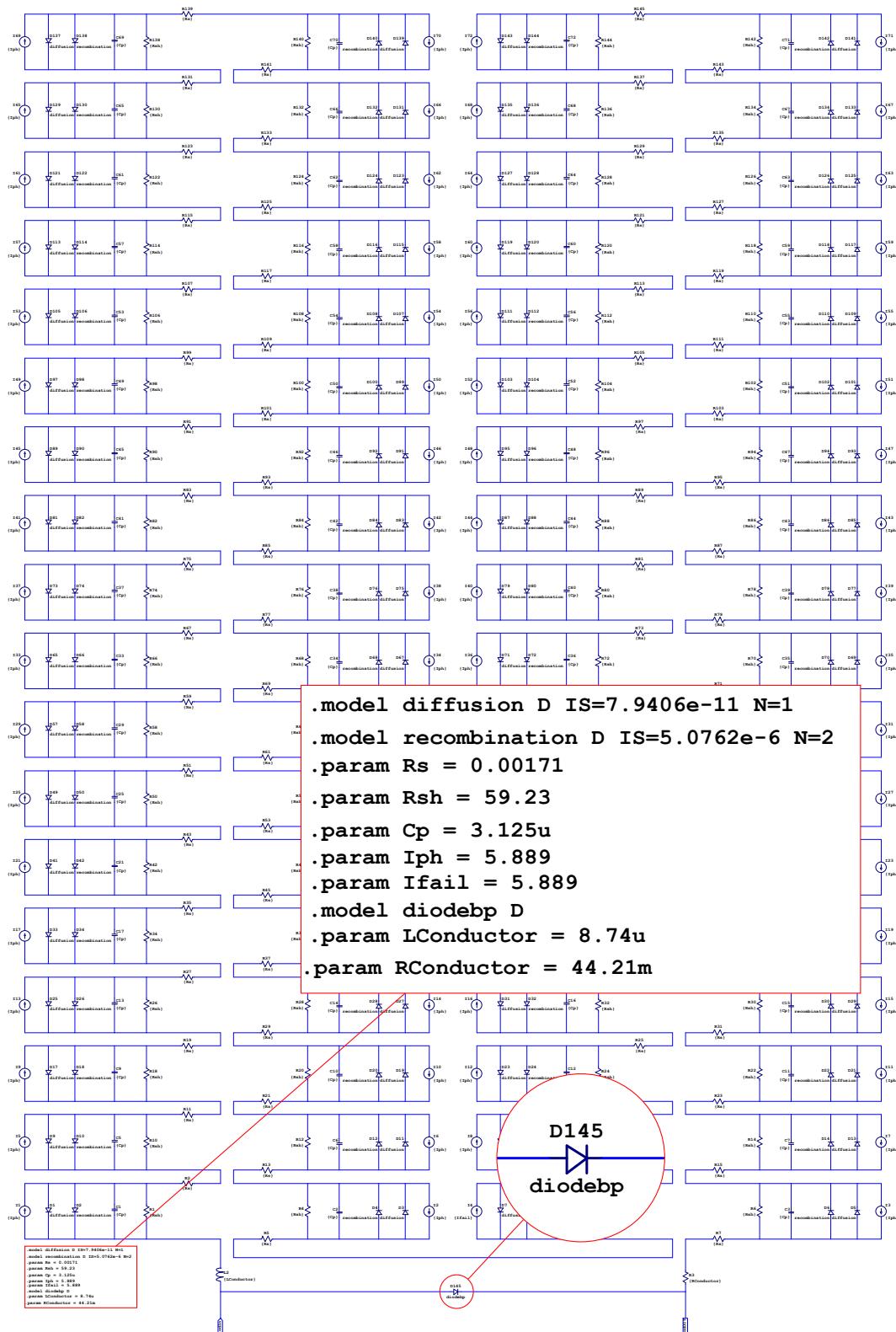
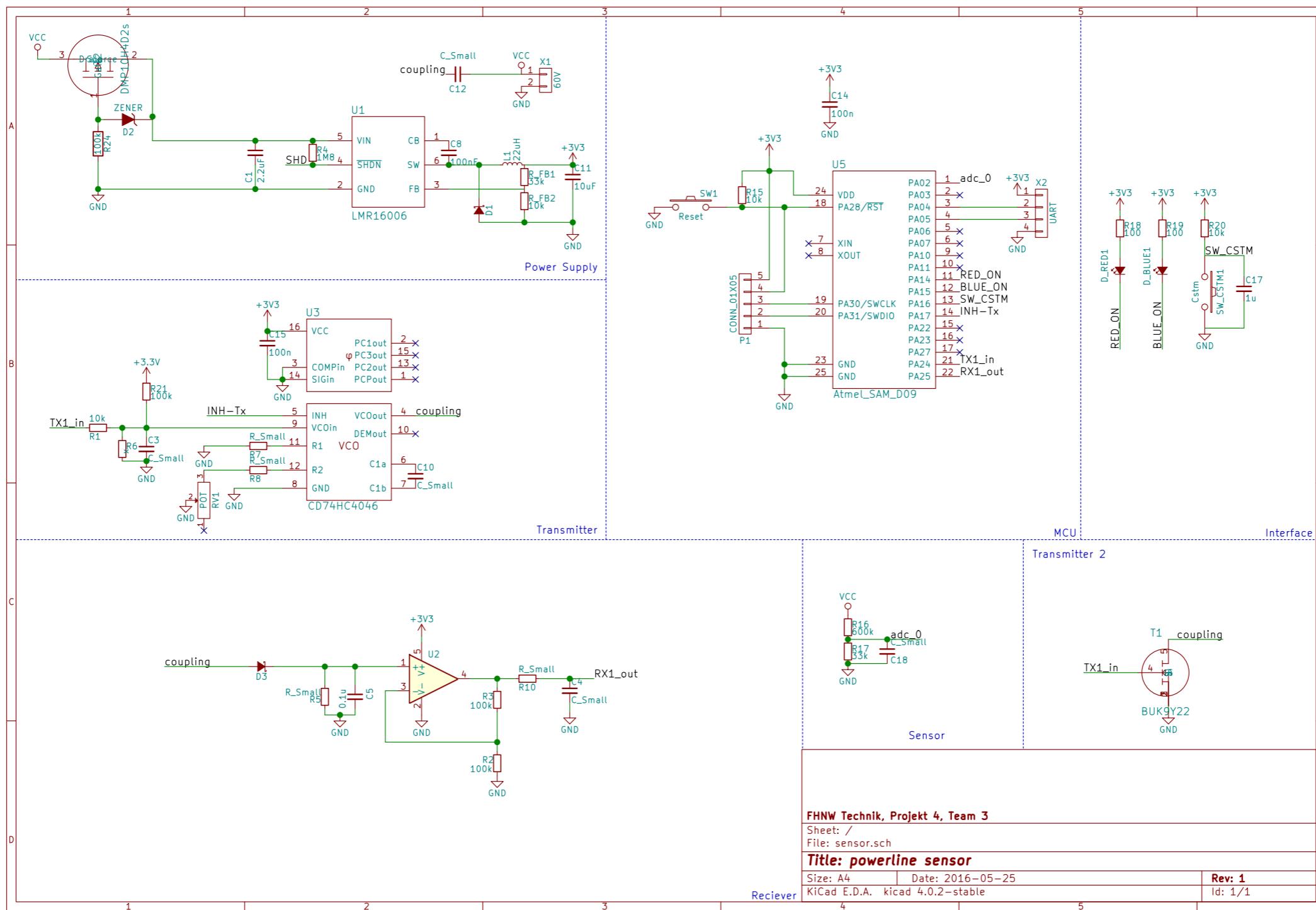


Abbildung B.7: Modul mit Freilaufdiode (unten, Mitte, Diode D145). Benutzt für die Simulation aus Abbildung 2.8 von Seite 9 sowie die Simulationen zu den Lösungsvarianten in Abschnitt 4.1 ab Seite 22, Abschnitt 4.2 ab Seite 27 und Abschnitt 4.3 ab Seite 29. Abbildung B.2 enthält das verwendete Zellenmodell.
Dateipfad: ltspice / jac / jacModule.asc

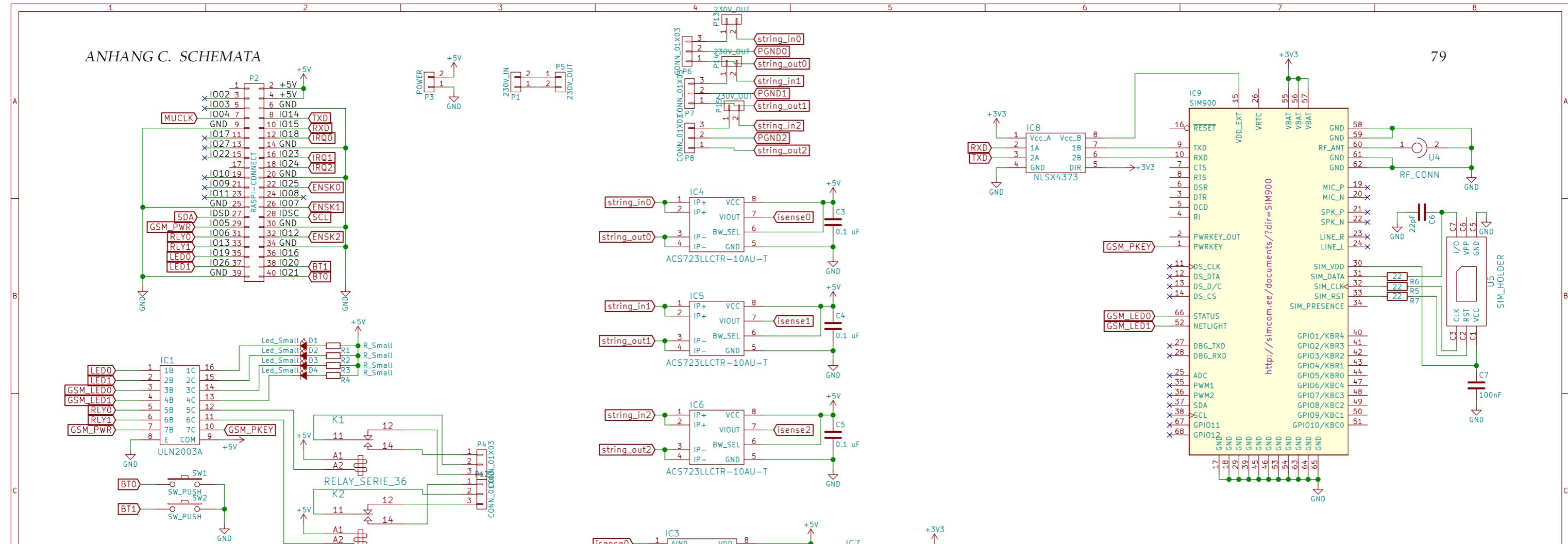
C

Schemata

Abbildung C.1: Schema Sensor



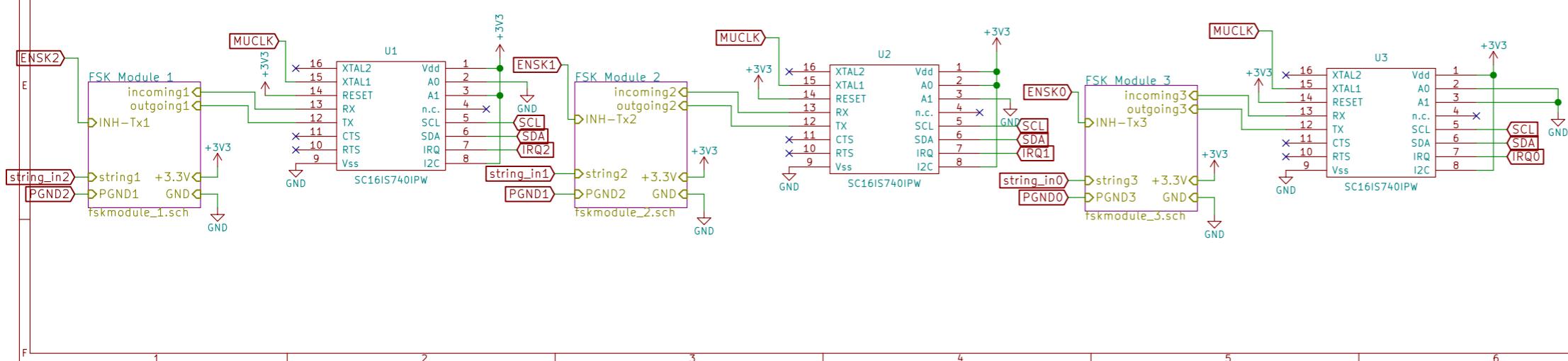
ANHANG C. SCHEMATA



79

<http://simcom.ee/documents/?dir=SIM900>

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



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 [7.5](#)

```
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 1.0000000 : 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 2.25000V
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 [7.6](#)

```
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 1.0000000 : 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 2.25000V
```

```

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 7.7

```

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 7.8

```

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 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 7.9

```

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 1.000000 : 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 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

```

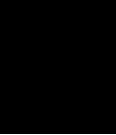
Listing D.6: Oszilloskop-Einstellungen zu Abbildung 7.10

```

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 1.000000 : 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 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

E 

Kosten

F

Elektronische Datenträger