

Project Powerline

Fachbericht

STUDIENGANG	Elektro- und Informationstechnik
MODUL	Projekt 4
AUFTRAGGEBER	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	14. Mai 2016
VERSION	0.1

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

Design © 2016 Raphael Frey

Erstellt im Frühlingsemester 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 698 Kompilervorgänge durchlaufen.

Version 0.1 06.05.2016 Einleitung, Disposition

Quelle Titelbild : [1]

Quelle Logo FHNW : [2]

Abstract

Entwurf, 14. Mai 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Überblick	3
2.1	Aufbau einer Solaranlage	3
2.2	Einbettung in Umwelt	3
2.3	Kernproblem: Kommunikation über DC-Leitung	3
3	Lösungsansätze und Simulationen	6
3.1	Frequenzumtastung: Kapazitive Einkopplung	6
3.1.1	Sender	6
3.1.2	Empfänger	6
3.1.3	Gesamtsystem	6
3.2	Frequenzumtastung: Induktive Einkopplung	6
3.2.1	Sender	7
3.2.2	Empfänger	7
3.2.3	Gesamtsystem	7
3.3	Amplitudenumtastung	7
3.3.1	Sender	8
3.3.2	Master-Gerät (Empfänger)	11
3.3.3	Gesamtsystem	11
4	Hardware	12
4.1	Sensorplatine	13
4.1.1	Energieversorgung	13
4.1.2	PCB	13
4.2	Master-Gerät	13
4.2.1	Speisung	13
4.2.2	Benutzer-Interface	13
4.2.3	PCB	13
4.2.4	Montage/Gehäuse	13
4.3	Kommunikation	13
5	Firmware	15
5.1	Sensorplatine	15
5.2	Master-Gerät	15

5.3 Kommunikation/Protokoll	15
6 Validierung	16
6.1 Sensorplatine	16
6.2 Master-Gerät	16
7 Benutzerhandbuch	17
7.1 Installation und Inbetriebnahme	17
7.2 Reguläre Benutzung	17
7.3 Störungsbehebung	17
8 Fazit	18
Appendices	19
A Herleitungen Modelle	20
A.1 Modellierung einer PV-Zelle	20
A.1.1 Zellenstrom und Zellenspannung	20
A.1.2 Bestimmung der Zellenfläche	21
A.2 Modellierung eines PV-Moduls	22
A.3 Vereinfachtes Modell für ein PV-Modul	25
A.4 DC-Leitung	25
B Ergänzende Simulationsergebnisse	29
B.1 Modul mit zwei parallelen Strängen	29
B.2 Modul mit einem Strang	31
C Elektronische Datenträger	33
Literaturverzeichnis	34

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.

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 durchgeführten Tests dokumentiert.

Beschreibung unseres
Produkts

Entwurf, 14. Mai 2016

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 Solaranlage

Grundsätzlicher Aufbau einer Solaranlage: Zelle -> Modul -> Strings -> Anlage

2.2 Einbettung in Umwelt

Hier wird beschrieben, wie unser System physisch mit einer Solaranlage integriert wird und welche Schnittstellen es zu welchem Zweck zur Anlage hat.

kein eigener Abschnitt
mehr nötig

2.3 Kernproblem: Kommunikation über DC-Leitung

Es sind zwei Lösungsansätze untersucht worden, um ein Signal über die Gleichstromleitung zu senden:

Referenz auf Konzept
aus obigem Kapitel

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 2.1 dargestellt.

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

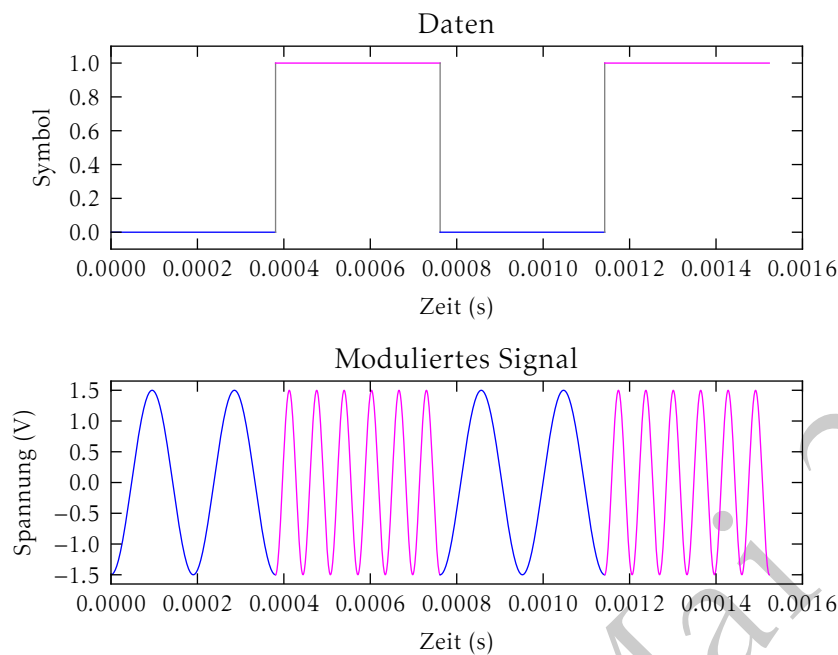


Abbildung 2.1: *Frequency-shift keying*: Oben sind die zu übertragenden digitalen Daten als 1 und 0 abgebildet, unten das zugehörige Verhalten des modulierten Signals.

zu codieren. Abbildung 2.2 stellt das grundlegende Konzept des Verfahrens schematisch dar.

Unsere Umsetzung würde einen Transistor benutzen, um jeweils ein Solarmodul bei einer Trägerfrequenz von etwa 10 kHz kurzzuschliessen. Dadurch bricht die Spannung auf einem Strang von seriell geschalteten Modulen kurz ein, was als Signal codiert und ausgewertet werden kann. Grundsätzlich handelt es sich bei diesem Prinzip um eine ASK mit den zwei Amplituden 0 V und dem Betrag des Spannungsabfalls durch Kurzschliessen eines Moduls.

Zahlen in Ticks auf Achsen weglassen?

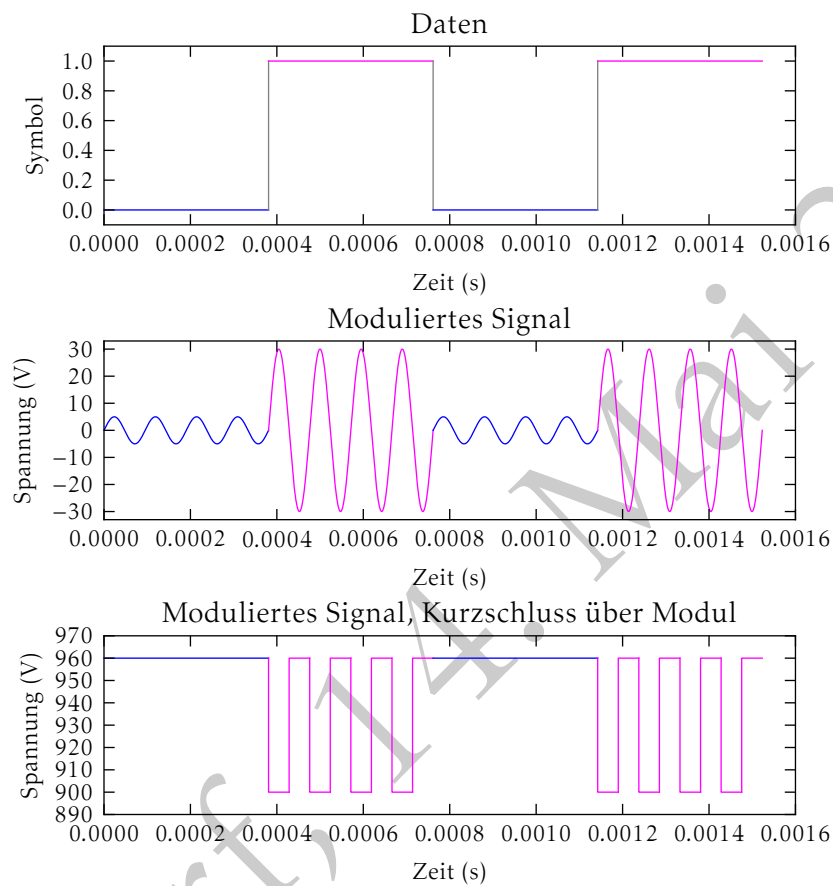


Abbildung 2.2: *Amplitude-shift keying*: Oben sind die zu übertragenden digitalen Daten als 1 und 0 abgebildet. Die mittlere Abbildung stellt eine typische Umsetzung des Konzepts mit harmonischer Trägerschwingung und zwei verschiedenen Amplituden dar.

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.

Lösungsansätze und Simulationen

In diesem Abschnitt werden Schaltungen für drei Lösungsansätze (zwei zur FSK, eine zur ASK) vorgestellt, mit LTspice IV simuliert und beurteilt.

LTspice: source

Es werden jeweils die Schaltung für den Sender, den Empfänger und das Gesamtsystem untersucht.

3.1 Frequenzumtastung: Kapazitive Einkopplung

3.1.1 Sender

3.1.2 Empfänger

3.1.3 Gesamtsystem

3.2 Frequenzumtastung: Induktive Einkopplung

Eine induktive Einkopplung legt eine Spule um die DC-Leitung. Auf diese Spule wird von der FSK-Schaltung das zu übertragende Signal gegeben und die Spule induziert in der DC-Leitung entsprechende Spannungs-Rippel, die vom Master-Gerät ausgewertet werden können. Der entsprechende Schaltkreis ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt.

Verglichen mit Kondensatoren sind Spulen relativ gross und teuer. Allerdings ist das Prinzip der induktiven Einkopplung gut dokumentiert und die Aussicht auf Erfolg (bei vernünftigem Aufwand) somit gut.

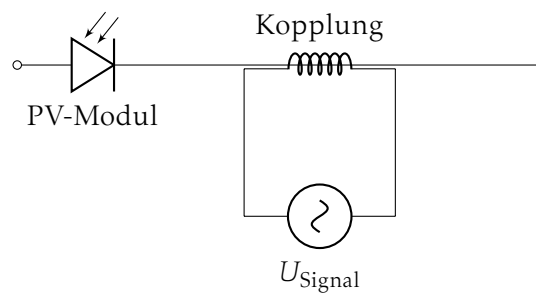


Abbildung 3.1: Induktive Einkopplung

3.2.1 Sender

3.2.2 Empfänger

3.2.3 Gesamtsystem

3.3 Amplitudenumtastung

Wie in Abschnitt erwähnt, wird bei dieser Lösungsvariante jeweils ein Modul gesteuert kurzgeschlossen. Dies verursacht kurze Spannungseinbrüche auf der DC-Leitung, welche vom Empfänger ausgewertet werden können, wie in Abbildung vereinfacht dargestellt.

reference

Potentielle Probleme sind bei dieser Lösungsvariante in folgenden Bereichen zu suchen:

reference

Induktivität der Leitung: Der Spannungsabfall auf der DC-Leitung wird bei geschlossenem Stromkreis zu Stromänderungen auf der DC-Leitung führen. Dies wird eine Spannungsänderung auf der DC-Leitung bewirken¹.

Gemäss Lenz'scher Regel wird diese Spannungsänderung so gerichtet sein, dass sich der zugehörige Strom der aufgezwungenen Änderung widersetzt.

reference

Es kann also sein, dass die Induktivität der DC-Leitung das zu übertragende Signal so stark kompensiert, dass es nicht mehr detektierbar ist. Je höher die Frequenz, mit der das Modul kurzgeschlossen und wieder geöffnet wird, um so höher die zugehörigen Stromänderungen $\frac{di}{dt}$ und somit Impedanz der Induktivität (gemäss $Z_L = j\omega L$).

Kapazität des Solarmoduls: Dem Solarmodul wird bei diesem Vorgehen das Verhalten einer Wechselstromquelle aufgezwungen. Besitzt es interne parasitäre Kapazitäten, können diese bei den abrupten Än-

¹Spannung in Abhängigkeit der Stromänderung: $v = L \cdot \frac{di}{dt}$

derungen der Spannung hohe Ströme im kurzgeschlossenen Pfad und seinen Bauteilen verursachen.²

Besitzen diese Bauteile Ohm'sche Widerstände, entstehen entsprechende thermische Verluste, welche die Bauteile beschädigen können.

3.3.1 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 3.2 zeigt diesen Aufbau schematisch.

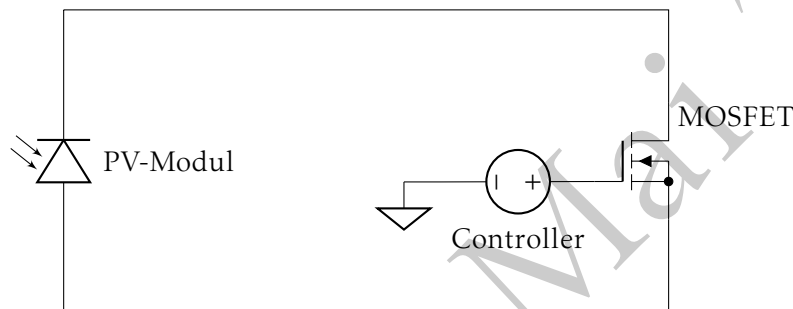


Abbildung 3.2: Gesteuerter Kurzschluss eines Solarmoduls mit einem microcontroller-gesteuerten Transistor. Die vollständigen LTspice-Schaltungen sind in Anhang ?? ab Seite ?? dokumentiert.

Die Resultate der Simulation für ein 36×2 -Modul sind in Abbildung 3.3 für einen Zeitbereich von $3 \mu s$ dargestellt, die Ergebnisse für das 72×1 -Modul in Abbildung 3.4. Tabellen 3.1 ?? fassen die wichtigsten Eckdaten der Simulationen zusammen, inklusive Durchschnittswerte für Strom und Leistung.

Aus Abbildung ?? und Tabelle 3.1 ziehen wir folgende Schlussfolgerungen:

1. Der Spitzenwert für den Strom ist hoch, aber Transistoren, die solche Ströme verkraften können, sind zu vernünftigen Preisen erhältlich.
2. Die Spitzenwerte der Leistungen zwar nur sehr kurz (etwa $2 \mu s$), aber sehr hoch. Auch wenn der Durchschnittliche Leistungswert weit unter der Grenze von günstig erhältlichen MOSFETs liegt, könnte die Leistungsspitze den Transistor irreversibel beschädigen.
3. Der durchschnittliche Leistungsverbrauch ist weit über dem im Pflichtenheft angestrebten Wert von 100 mW .

korrekte Schlussfolgerungen?

²Stromänderung in Abhängigkeit der Spannungsänderung: $I(t) = C \cdot \frac{V(t)}{dt}$

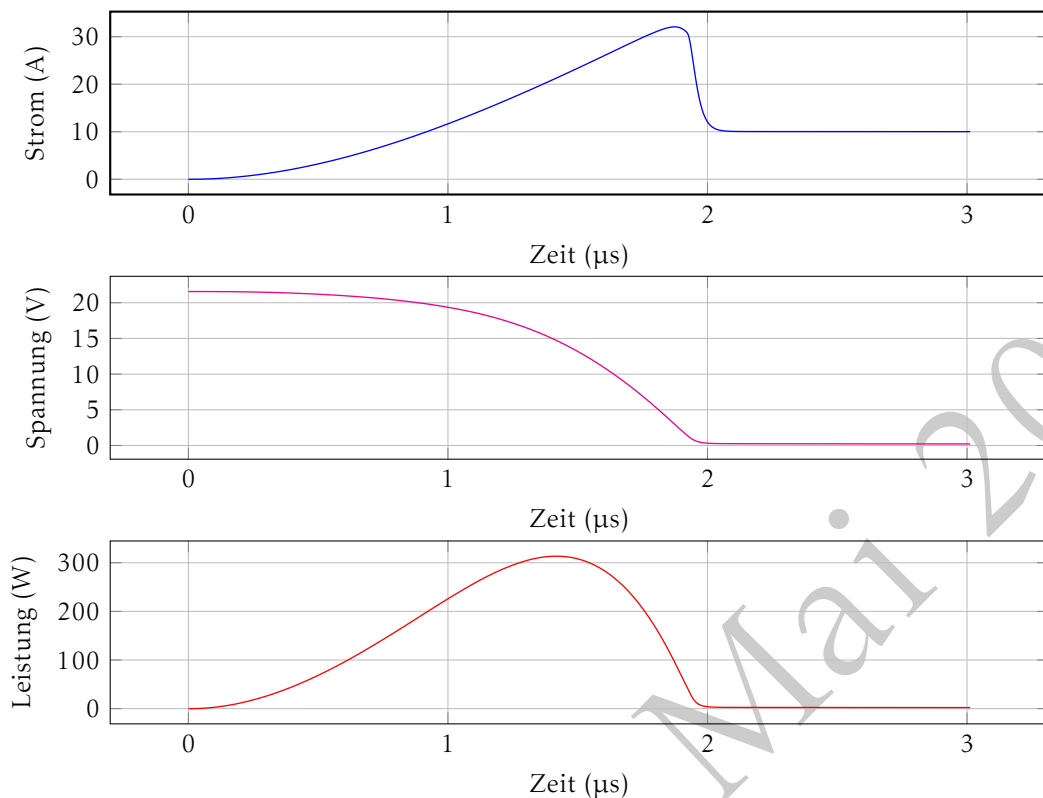


Abbildung 3.3: Verlauf von Strom, Spannung und Leistung am MOSFET bei einer Schaltfrequenz von 10 kHz bei einer Modulkonfiguration von 36×2 Zellen gemäss Schema in Abbildung ?? auf Seite ?. Der MOSFET wurde mit 3.3 V angesteuert, da dies die grösste vom Microcontroller zur Verfügung stehende Spannung ist. Anhang B.1 auf Seite 29 beinhaltet zum Vergleich noch Simulationen für den Zeitraum von einer Millisekunde.

Tabelle 3.1: Eckdaten zur Simulation des Kurzschlussverfahrens für ein Solarpanel mit 36×2 Zellen und ein Panel mit 72×1 Zellen.

Bei den Durchschnittswerten sind sowohl Ergebnisse für 1 ms wie auch 1 s angegeben, um zu zeigen, dass sich die Konfiguration bereits bei einer Millisekunde stabilisiert hat (auch zu sehen in Anhang B.1 auf Seite 29 und Anhang B.2 auf Seite 31).

Die Dauer der Spitze ist beim 36×2 -Modul $2 \mu\text{s}$ und $1.78 \mu\text{s}$ beim 72×1 -Modul (siehe unterste Plots in den Abbildungen 3.3 respektive 3.4).

Kriterium	36×2 -Modul	72×1 -Modul
Spitzenwert Strom:	32 A	24 A
Spitzenwert Leistung:	310 W	535 W
\bar{P} für Dauer der Spitze	158.77 W	267.46 W
\bar{P} für 1 ms	4.312 W	6.0577 W
\bar{P} für 1 s	4.3047 W	6.0433 W

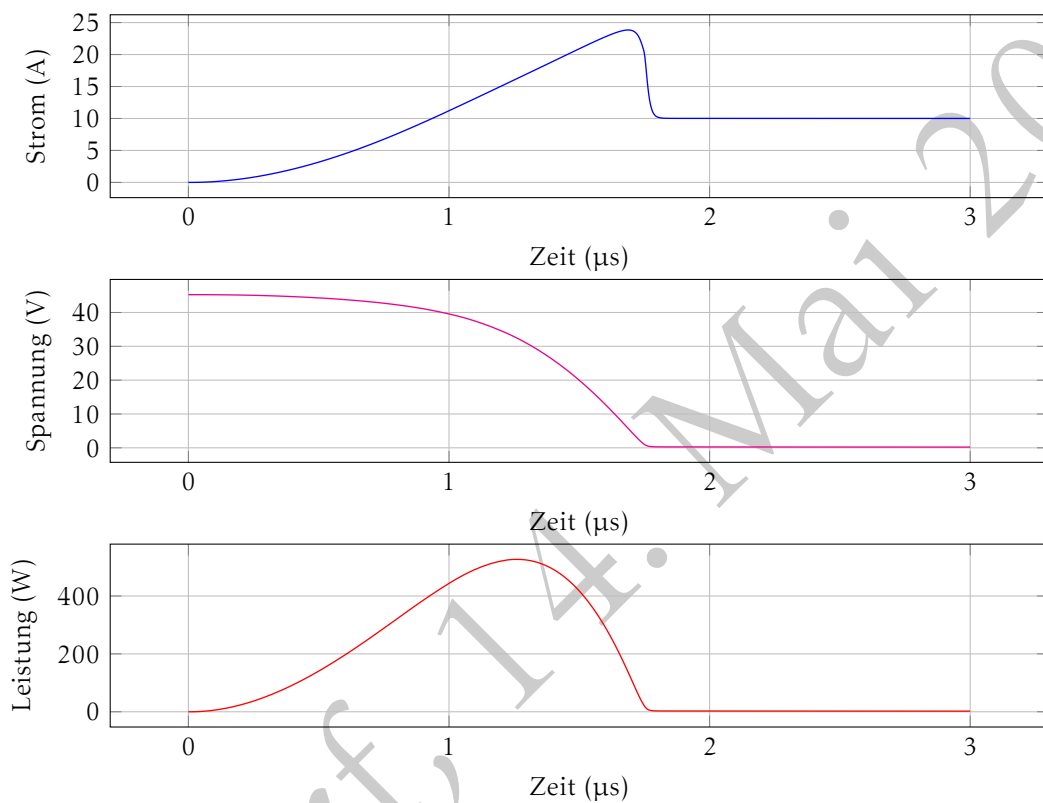


Abbildung 3.4: Verlauf von Strom, Spannung und Leistung am MOSFET bei einer Schaltfrequenz von 10 kHz bei einer Modulkonfiguration von 72×1 Zellen gemäss Schema in Abbildung ?? auf Seite ?. Der MOSFET wurde mit 3.3 V angesteuert, da dies die grösste vom Microcontroller zur Verfügung stehende Spannung ist.

Anhang B.2 auf Seite 31 beinhaltet zum Vergleich noch Simulationen für den Zeitraum von einer Millisekunde.

3.3.2 Master-Gerät (Empfänger)

3.3.3 Gesamtsystem

Entwurf, 14. Mai 2016

Hardware

Das folgende Kapitel dokumentiert unseren Lösungsfindungsprozess im Bereich Hardware. Zuerst wird auf die Problematik der Kommunikation über die DC-Leitung zwischen Solarmodul und Master-Gerät eingegangen. Es werden unsere Lösungsansätze erläutert und auf Stärken und Schwächen untersucht, um daraus anschliessend eine Entscheidung abzuleiten.

In einem nächsten Schritt werden die Lösungskonzepte für die Sensor-Platine und das Master-Gerät genauer erklärt.

Anmerkung für Autoren: Verifizierbare Angaben machen, nicht allgemeine Floskeln. Zahlen, Fakten, theoretische Hintergrundinformationen, daraus gezogene Konsequenzen etc. Bezug auf das Pflichtenheft, wo möglich.

Anmerkung für Autoren: Bilder, Diagramme, Formeln etc.

4.1 Sensorplatine

Was ist der Zweck der Sensorplatine? Welche Aufgaben muss sie erfüllen können?
Wie ist sie aufgebaut? PCB-Layout? Energieversorgung?

Anmerkung für Autoren: Dimensionierung der Bauteile: Berechnungen

4.1.1 Energieversorgung

Energiebezug, Leistungsanforderungen, Standby, Verhalten bei ungenügender Leistungszufuhr, ...

4.1.2 PCB

Wie sieht das PCB aus, und weshalb?

4.2 Master-Gerät

Was ist der Zweck des Master-Geräts? Aufgaben? Aufbau?

Anmerkung für Autoren: Dimensionierung der Bauteile: Berechnungen

4.2.1 Speisung

Woher bezieht das Master-Gerät seine Energie, weshalb? Wieviel Energie wird benötigt?

4.2.2 Benutzer-Interface

Anmerkung für Autoren: Das Benutzerinterface ist schon in der Anleitung im vorigen Kapitel beschrieben worden. Es soll hier um die Komponentenwahl gehen, nicht um eine Rekapitulation bereits gemachter Informationen.

4.2.3 PCB

Wie sieht das PCB aus, und weshalb?

4.2.4 Montage/Gehäuse

Einbindung in die Umgebung, Wahl des Gehäuses.

4.3 Kommunikation

Die Kommunikation zwischen Sensor und Master-Gerät ist eines der Herzstücke des ganzen Systems und betrifft beide Sub-Systeme. Daher in einem eigenen Abschnitt.

- Grundsätzliches Problem

- Verfolgte Lösungsansätze
- Ausgewählter Lösungsansatz (mit Begründung(en))
- Genauere Beschreibung dieses Lösungsansatzes

Entwurf, 14. Mai 2016

Firmware

An dieser Stelle wird genauer erläutert, welche Überlegungen in die Firmware unseres Systems geflossen sind. Weil Sensor und Master-Gerät jeweils eine eigene Firmware benötigen, ist auch dieser Abschnitt entsprechend aufgeteilt.

Anmerkung für Autoren: Diagramme zur Erklärung des Aufbaus der Firmware verwenden. Trockener Text über Software ist nicht besonders leserfreundlich.

Anmerkung für Autoren: Bei der Verwendung von Libraries sollen diese kurz beschrieben und der Grund ihrer Wahl erläutert werden.

Anmerkung für Autoren: Unterkapitel entsprechend Gliederung der Firmware sinnvoll ergänzen.

5.1 Sensorplatine

Sinnvolle Beschreibung der Firmware des Sensors.

5.2 Master-Gerät

Unterbau, GSM-Modul, Benutzeroberfläche. Wichtigster Punkt: Datenauswertung.

5.3 Kommunikation/Protokoll

Wie im Abschnitt zur Hardware wird in einem separaten Abschnitt beschrieben, welche Überlegungen in die Entwicklung des Protokolls eingeflossen sind und wie das Ergebnis aussieht.

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.

Anmerkung für Autoren: Welche Tests sind überhaupt notwendig, um die korrekte Funktionalität der jeweiligen Subsysteme zu verifizieren?

Anmerkung für Autoren: Allenfalls mehr Unterkapitel hinzufügen, falls sinnvoll.

6.1 Sensorplatine

6.2 Master-Gerät

Benutzerhandbuch

7.1 Installation und Inbetriebnahme

Wie wird das Gerät installiert, was gibt es dabei zu beachten? Wie wird das Überwachungssystem nach der Installation in Betrieb genommen? Diese Fragen sollen an dieser Stelle beantwortet werden.

7.2 Reguläre Benutzung

Hier wird beschrieben, was der Benutzer von der Anlage im regulären Betrieb erwarten kann.

7.3 Störungsbehebung

Fazit

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

Appendices

Entwurf, 14. Mai 2016

Herleitungen Modelle

Dieser Abschnitt beinhaltet die Herleitungen zu den in den Simulationen benutzten Modellen, welche aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Hauptteil zu finden sind.

A.1 Modellierung einer PV-Zelle

Zur Herleitung der Zellenparameter werden vier Quellen herangezogen, um ein einigermaßen gut abgestütztes Ergebnis zu erhalten. Die gesuchten Parameter sollen für am Markt erhältliche Module gültig sein, weshalb Datenblätter von *Solarmodulen* und nicht Zellen verwendet werden.

Zuerst werden Zellenstrom und Zellenspannung bestimmt, anschliessend die Fläche einer Zelle, um damit auf die im Modell verwendete Kapazität, den Shunt-Widerstand und den Seriewiderstand schliessen zu können.

A.1.1 Zellenstrom und Zellenspannung

Tabelle A.1 auf Seite 21 enthält die Daten zu Kurzschlussströmen und Leerlaufspannungen von vier Modulen. Die Spannung $U_{OC,Zelle}$ pro Zelle (letzte Spalte) errechnet sich gemäss:

$$U_{OC,Zelle} = \frac{U_{OC,Strang}}{\text{Anzahl Zellen pro Strang}} \quad (A.1)$$

Wir verwenden für die Simulation einer Zelle den gerundeten Mittelwert der Zellenspannungen aus der letzten Spalte von Tabelle A.1:

$$\underline{\underline{U_{OC,Zelle,Simu} = 600 \text{ mV}}} \quad (A.2)$$

Polykristalline Zellen liefern bedeutend kleinere Kurzschlussströme als monokristalline Zellen. Jedoch werden bei monokristallinen Zellen weniger Stränge parallel geschaltet, womit der Gesamtstrom des Moduls immer noch unter 10 A bleibt.

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	Kurzschlussstrom I_{SC}	Leerlaufspannung V_{OC}	Anzahl Zellen (total)	Anzahl Zellen (Strang)	Leerlaufspannung pro Zelle
[6]	Solarex MSX-60	3.8 A	21.1 V	36	36	586 mV
[7]	Sunset PX85 (pk)	5.5 A	21.5 V	76	38	566 mV
[8]	Sunset Solargenerator AS150 (mk)	8.7 A	22.3 V	36	36	620 mV
[9]	Sunmodule Pro-Series XL SW320 (mk)	9.41 A	45.9 V	72	72	638 mV

Unabhängig vom genauen Aufbau eines Moduls gehen wir daher davon aus, dass es nicht mehr als 10 A liefern wird.

A.1.2 Bestimmung der Zellenfläche

Das PX-85-Modul aus [7] verwendet 76 Zellen, angeordnet in einer 4×19 - Konfiguration. Seine Abmessungen betragen 1477 mm×660 mm, was sich herunterrechnen lässt auf eine ungefähre Modulgrösse von 165 mm×75 mm. Dabei werden die Abmessungen des Rahmens und die Abstände zwischen den Modulen vernachlässigt.

Die Fläche des AS-150-Moduls wird analog aus Quelle [8] zu 155 mm×164 mm bestimmt. Das XL-320-Modul aus [9] hat die Zellgrösse direkt angegeben, sie beträgt 156 mm×156 mm. Es ist naheliegend dass aufgrund von Standardisierung das AS-150-Modul die gleiche Zelldimension hat wie das XL-320-Modul, nämlich den verbreiteten 6-Zoll-Formfaktor.

Da eine grössere Zelle eine grössere Kapazität und somit grössere Probleme im Falle der Kurzschlussvariante bedeutet, wird mit einer Zellgrösse von 156 mm×156 mm gerechnet, womit sich die Fläche der Zelle bestimmt zu:

$$\underline{\underline{A_{Zelle} = 156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm} = 243.36 \text{ cm}^2}} \quad (\text{A.3})$$

Dies entspricht ungefähr der 600-fachen Fläche des 0.43 cm²-Modules aus Quelle [3].

A.2 Modellierung eines PV-Moduls

Es wird ein Modell für eine einzelne Zelle entwickelt, auf dem das Modell eines Moduls aufbauen kann.

Als Grundlage dient das Eindiodenmodell einer PV-Zelle, erweitert um eine parallele Kapazität C (basierend auf Informationen aus [3] und [4]), dargestellt in Abbildung A.1.

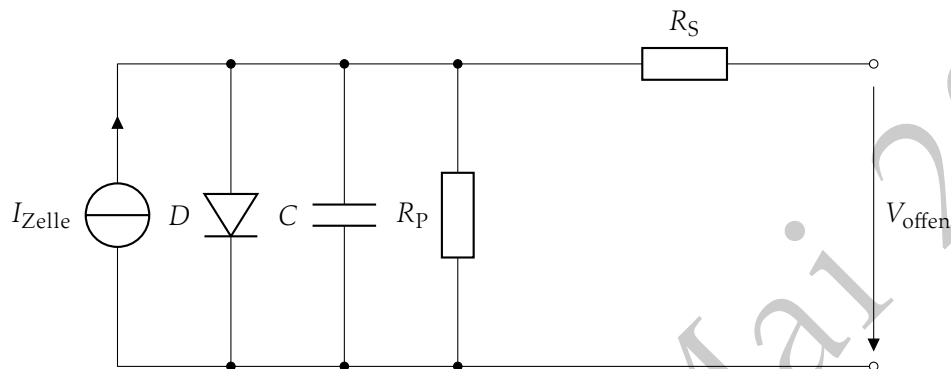


Abbildung A.1: Schaltschema zur Modellierung einer Solarzelle gemäss Eindiodenmodell mit zusätzlicher Kapazität

In [3] wurden C , R_S und R_P einer Solarzelle der Grösse 0.43 cm^2 über einen Frequenzbereich von 1 kHz bis 1 MHz gemessen. Die Resultate waren:

$$C_{\text{Messung}} = 8 \text{ nF} \quad \text{bis} \quad 20 \text{ nF} \quad = (14 \pm 6) \text{ nF} \quad (\text{A.4})$$

$$R_{S,\text{Messung}} = 0.2 \Omega \quad \text{bis} \quad 20 \Omega \quad = (10.1 \pm 9.9) \Omega \quad (\text{A.5})$$

$$R_{P,\text{Messung}} = 0.5 \text{ k}\Omega \quad \text{bis} \quad 500 \text{ k}\Omega \quad = (250.25 \pm 249.75) \text{ k}\Omega \quad (\text{A.6})$$

Um die obigen Werte für unsere Zwecke verwenden zu können, müssen sie auf eine Zelle der Fläche 240 cm^2 (zur Herleitung dieses Werts siehe Anhang ?? ab Seite ??) um ungefähr einen Faktor 600 hochskaliert werden.

R_P und R_S skalieren umgekehrt proportional zur Zellfläche, wogegen C bei grösser werdender Fläche ansteigt [3]. Das schlimmstmögliche Szenario für unseren Fall tritt ein, wenn der Ausgangsstrom der Zelle maximal wird:

korrekt?

C

Beim Kurzschliessen der Zelle treten Stromspitzen auf, wenn sich der Kondensator C entlädt. Je grösser dessen Kapazität, umso höher diese Stromspitzen. Wir nehmen also 20 nF aus Gleichung A.4 als Ausgangswert.

R_S

Der aus der Solarzelle fliessende Strom wird grösser, je kleiner der Seriewiderstand vor dem Ausgang ist. Es wird daher der niedrigere Wert von 0.2Ω aus Gleichung A.5 gewählt.

R_P Je grösser der Parallelwiderstand im Verhältnis zum Seriewiderstand ist, um so mehr Strom fliesst aus dem Ausgang der Zelle. Es wird deshalb der Wert Höchste Wert von 500 k Ω aus Gleichung A.6 als Ausgangswert verwendet.

Die skalierten Werte sind somit:

$$C = C_{\text{Messung}} \cdot 600 = 12 \mu\text{F} \quad (\text{A.7})$$

$$R_S = R_{S,\text{Messung}} \div 600 = 333 \mu\Omega \quad (\text{A.8})$$

$$R_P = R_{P,\text{Messung}} \div 600 = 833 \Omega \quad (\text{A.9})$$

Wie in Anhang A.2 (ab Seite 23) erwähnt, gehen wir davon aus, dass ein Modul nicht mehr als 10 A abgibt. Abhängig davon, ob wir mehrere Stränge mit polykristallinen Zellen parallel schalten oder ein Modul haben, welches lediglich aus einem Strang monokristalliner Zellen besteht, wird der Strom einer Zelle entsprechend angepasst:

$$I_{SC,\text{polykristallin}} = 5 \text{ A} \quad (2 \text{ parallele Stränge}) \quad (\text{A.10})$$

$$I_{SC,\text{monokristallin}} = 10 \text{ A} \quad (\text{A.11})$$

Die vom Modell zu erzielende Leerlaufspannung V_{offen} einer Zelle ist ebenfalls in Anhang hergeleitet:

$$V_{\text{offen}} = 600 \text{ mV} \quad (\text{A.12})$$

Es bleiben noch die Parameter der Diode zu bestimmen. Ausgangslage für das Diodenmodell ist die Diodengleichung:

$$I_D = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) \quad (\text{A.13})$$

Wobei:

I_D : Diodenstrom

I_S : Reverse saturation current

q : Elementarladung eines Elektrons ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$)

V : Diodenspannung

n : Idealitätsfaktor

k : Boltzmannkonstante ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

T : Diodentemperatur

Der Reverse Saturation Current ist der Strom, der beim Anlegen einer negativen Spannung über die Diode fliesst, bevor die Diode durchbricht [5]. Er liegt bei kleinen Dioden üblicherweise Bereich von Nano-Ampère bis Femto-Ampère, bei einer Solarzelle wird er höher liegen, da diese grösser ist.

Wie man an Gleichung A.13 erkennen kann, steigt der Diodenstrom für eine gegebene Spannung, wenn der Reverse Saturation Current ansteigt.

source?

Für käufliche Dioden,
nicht Solarzellen

Der Idealitätsfaktor ist ein Indikator für den Spannungsabfall über der Diode in Abhängigkeit des durchfliessenden Stromes und liegt normalerweise zwischen 1 (ideale Diode) und 2. Je grösser der Idealitätsfaktor, umso höher der Spannungsabfall über der Diode für einen gegebenen Strom (bzw. umso kleiner der Strom bei einer fixen Spannung). Abbildung A.2 zeigt das Strom-Spannungsverhalten einer Diode sowie den Einfluss von I_S und n schematisch.

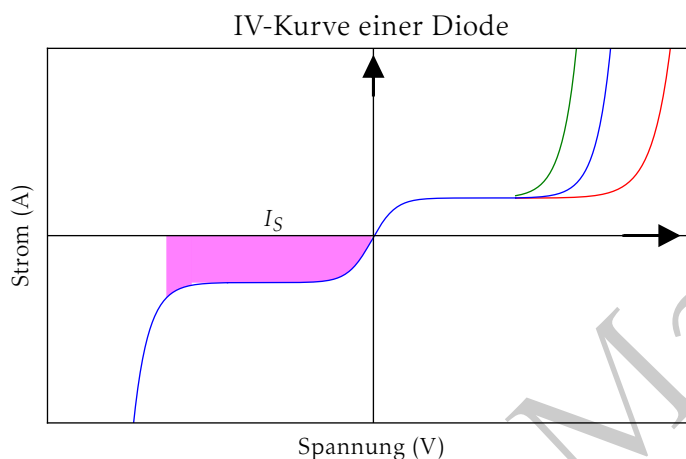


Abbildung A.2: Vereinfachte Strom-Spannungs-Kurve einer Diode. Der Reverse Saturation Current I_S tritt im magenta eingefärbten Bereich auf. Der angegebene Zahlenwert bezieht sich auf den Bereich der Kurve, in der I_S relativ konstant ist.

Die blaue Kurve dient als Referenz. Die rote Kurve zeigt den Einfluss eines ansteigenden Idealitätsfaktors (also stärkeres Abweichen von einer idealen Diode) auf die IV-Kennlinie. Die grüne Kurve zeigt den Einfluss eines ansteigenden Reverse Saturation Current: Der Diodenstrom steigt bei einer gegebenen Diodenspannung.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die abweichenden Kurven nur im positiven Bereich geplottet, natürlich ändert sich auch das Verhalten im Reverse-Betrieb analog.

Zur Simulation in LTspice wird das Diodenmodell auf den Reverse Saturation Current und den Idealitätsfaktor reduziert, und folgende geschätzte Parameter als Ausgangslage für den Iterationsprozess benutzt:

```
.model diode1 D(IS=1e-6 N=2)
```

Es wird die Schaltung gemäss Abbildung A.1 von Seite 22 aufgebaut und die oben bestimmten Werte für R_S , R_P und C eingesetzt.

Mit einer Transientensimulation (.tran 1m) wird die Zelle simuliert, ihre Leerlaufspannung V_{offen} gemessen und mit dem Zielwert aus Gleichung A.12 verglichen. Anschliessend werden die Werte für I_S und N angepasst, bis die gewünschte

Reverse-Betrieb-Kurven: analog?

„wird“ nur einmal oder wiederholen?

Leerlaufspannung erreicht wird.

Nach einigen Iterationen liefert dieser Prozess¹:

$$I_s = 4\mu\text{A} \quad (\text{A.14})$$

$$N = 1.65 \quad (\text{A.15})$$

Somit ist das Modell einer einzelnen Zelle bestimmt und kann dazu benutzt werden, ein Modul zu modellieren. Wie in Anhang ?? ab Seite ?? erwähnt, werden zwei verschiedene Module simuliert: Ein Modul mit zwei parallelen Strängen zu je 36 seriell geschalteten Zellen (Abbildung ??, Seite ??) und ein Modul mit 72 in Serie geschalteten Zellen (Abbildung ??, Seite ??). Die 36×2 -Konfiguration hat eine höhere Kapazität als die 72×1 -Anordnung, liefert dafür aber nur die halbe Ausgangsspannung. Der Ausgangsstrom beider Module wurde auf 10 A festgelegt, die Stromquellen im 36×2 -Modul geben also lediglich 5 A ab. Basierend auf Tabelle A.1 von Seite 21 mit Informationen zu kommerziell erhältlichen Solarmodulen scheint uns dieser Ansatz gerechtfertigt.

Bindestrich?

A.3 Vereinfachtes Modell für ein PV-Modul

Vereinfachtes LTspice-Modell, Verifikation anhand von verschiedenen Plots.

A.4 DC-Leitung

Induktivität

Kapazität

¹Dies ist eine mögliche Lösung. Es gibt natürlich noch beliebig viele weitere Kombinationen von I_s und N , welche die gegebenen Bedingungen erfüllen. Wir sind hier lediglich an einer Lösung interessiert, von der wir zuversichtlich sind, dass sie ein hinreichend gutes Modell liefert.

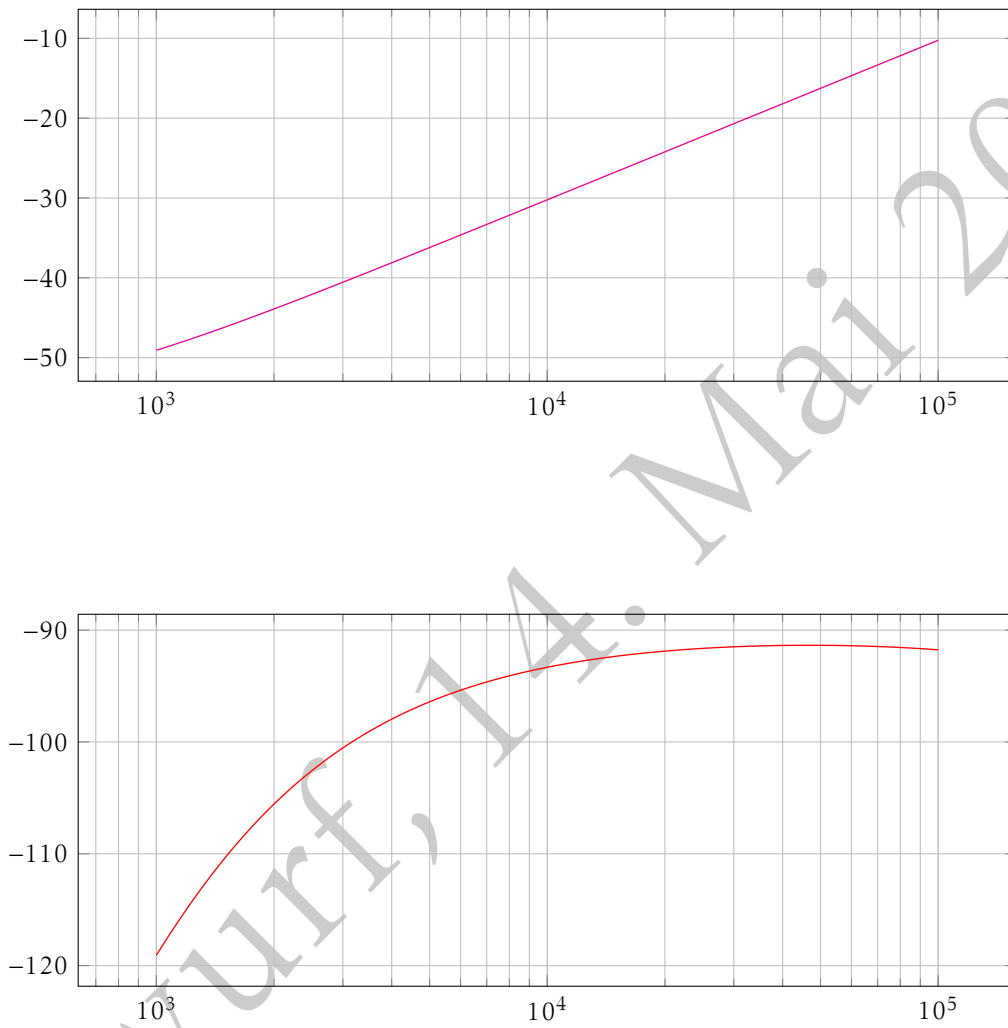


Abbildung A.3: Frequenzgang für den Strom durch den MOSFET des vereinfachten Modells für ein Modul.

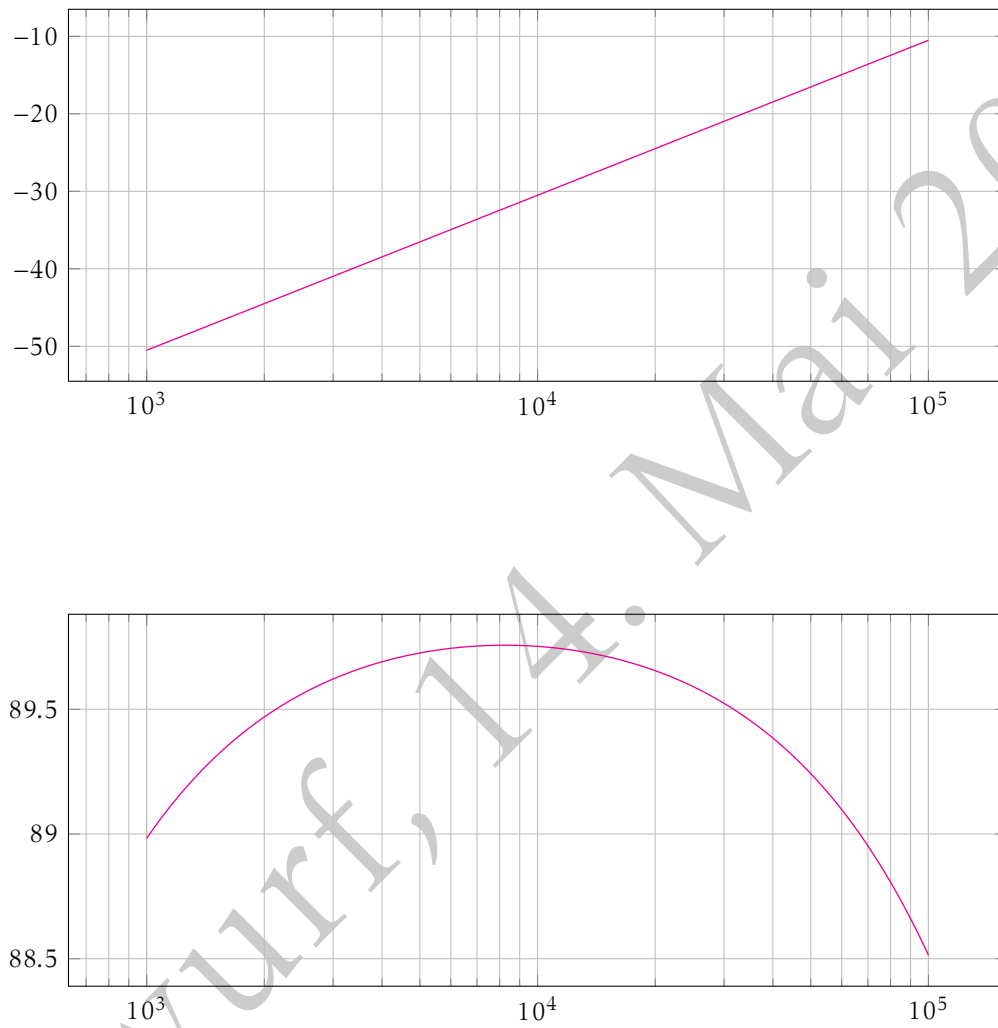


Abbildung A.4: Frequenzgang für den Strom durch den MOSFET des Modells für ein Modul mit 72 Zellen

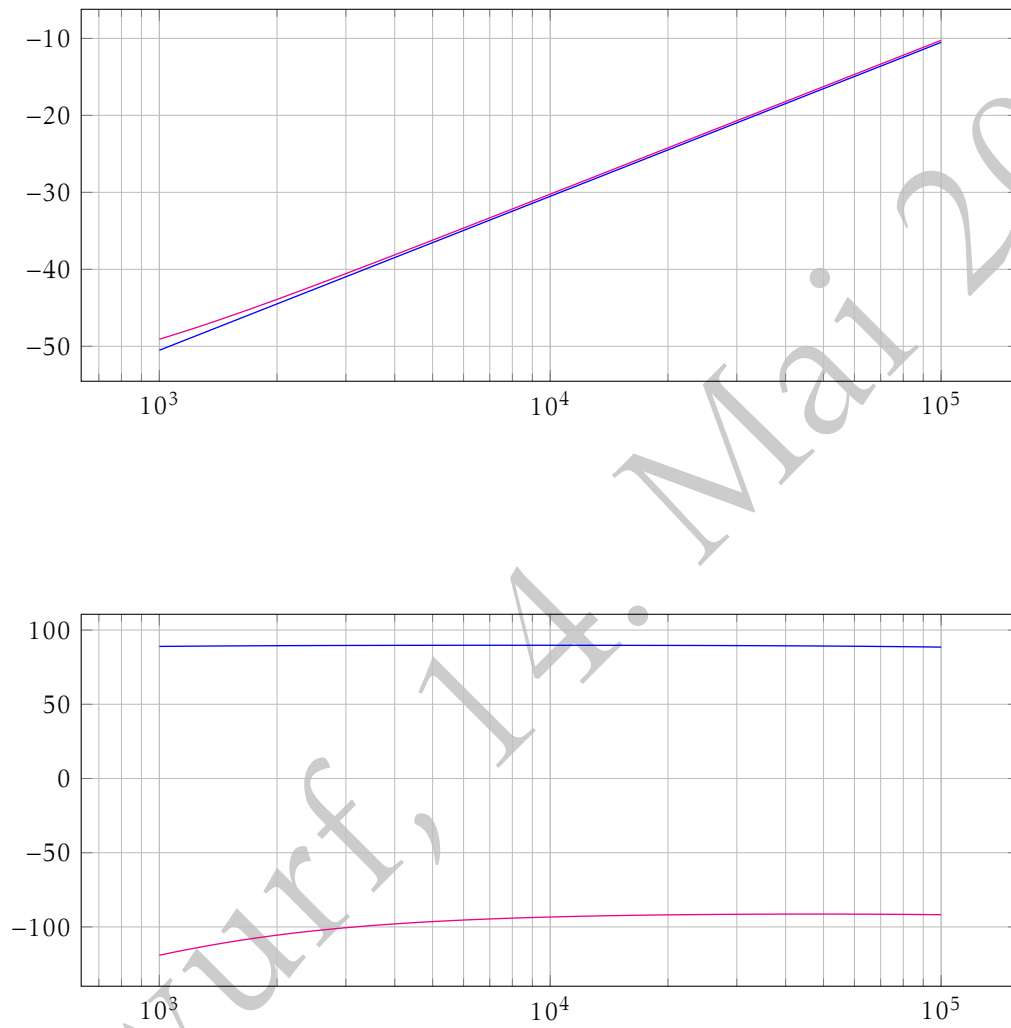


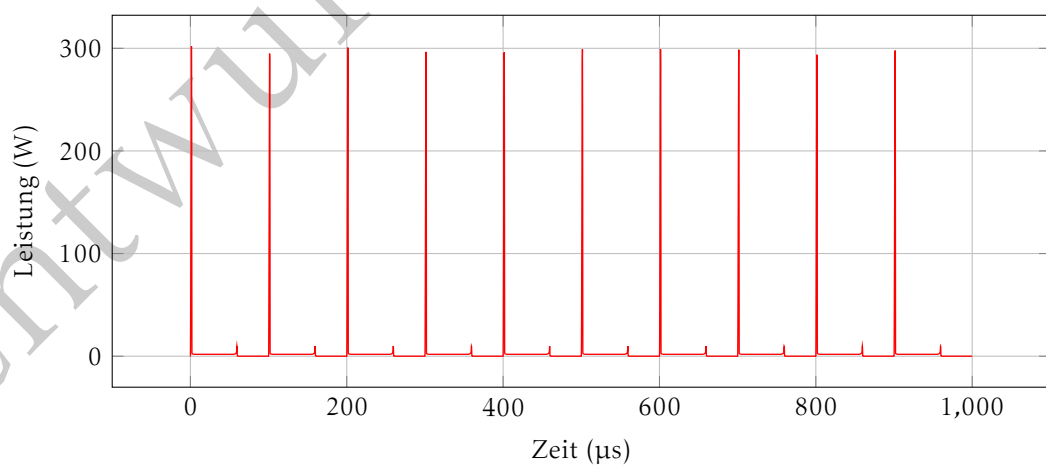
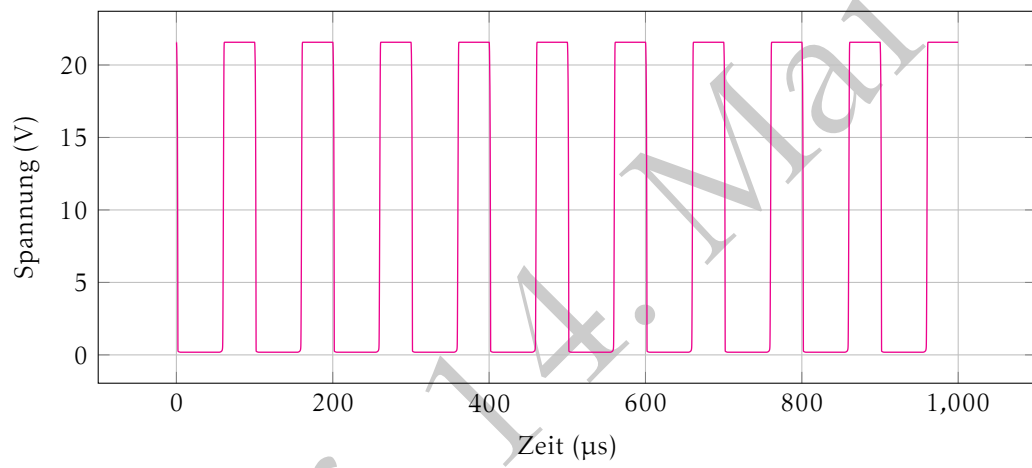
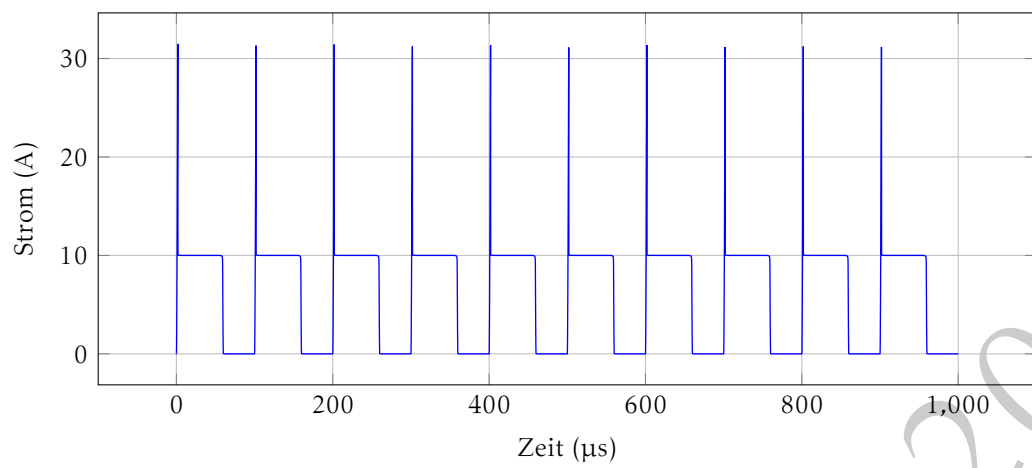
Abbildung A.5: Frequenzgang für den Strom durch den MOSFET des vereinfachten Modells für ein Modul.

B

Ergänzende Simulationsergebnisse

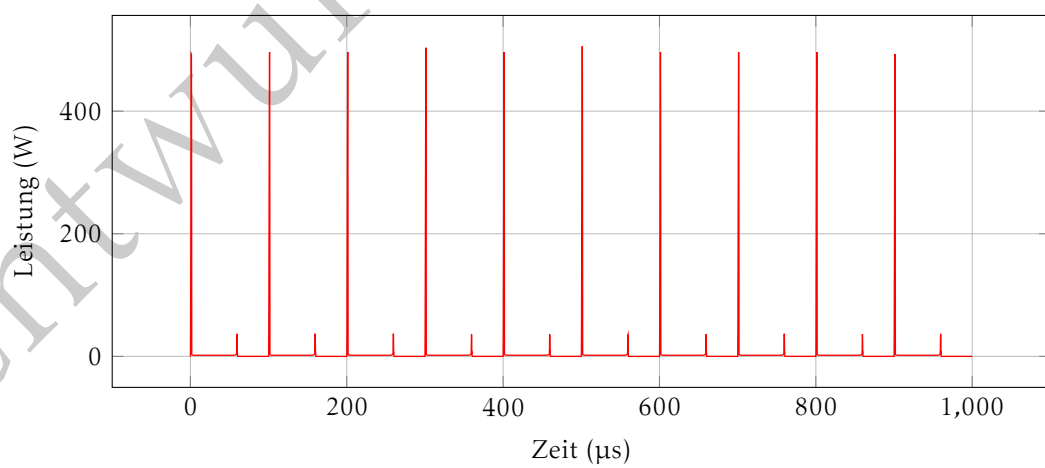
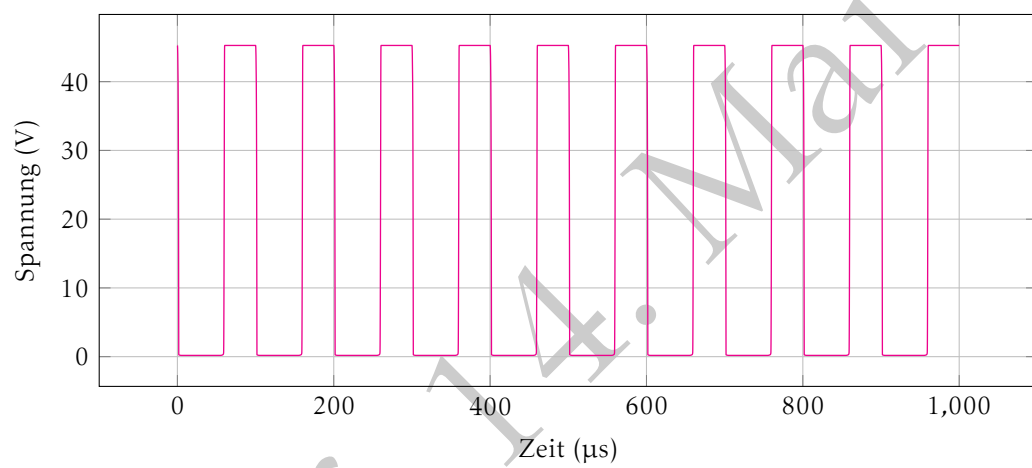
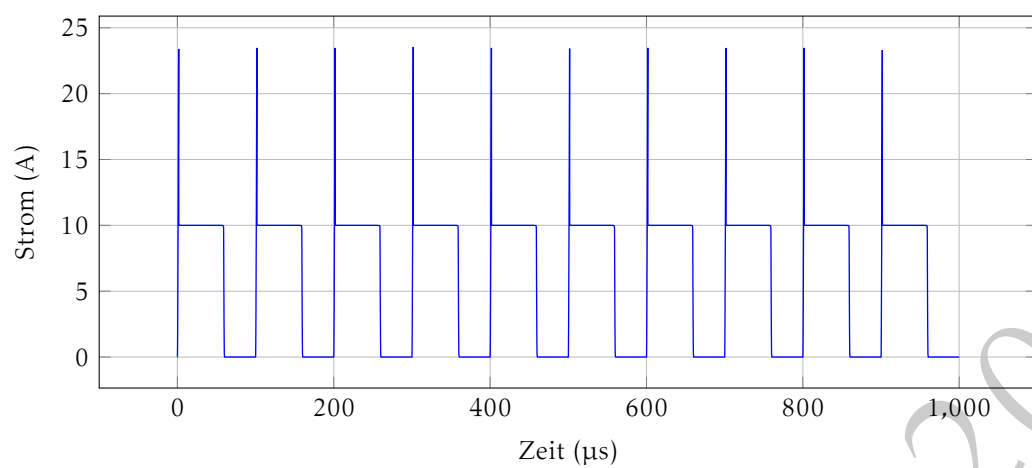
Führungstext, captions,
labels

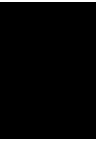
B.1 Modul mit zwei parallelen Strängen



B.2 Modul mit einem Strang

Entwurf, 14. Mai 2016





Elektronische Datenträger

Entwurf, 14. Mai 2016

Literaturverzeichnis

- [1] AleSpa. (2012, Juli) Photovoltaik dachanlage hannover - schwarze heide - leistung 1 mw. [Stand: 05. Mai 2016]. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Photovoltaik_Dachanlage_Hannover_-_Schwarze_Heide_-_1_MW.jpg
- [2] (2012, März) Wort-bildmarke (logo). [Stand: 05. Mai 2016]. [Online]. Available: <http://web.fhnw.ch/cd/corporate-design/logos-fur-die-hochschulen>
- [3] (1994, April) Effects of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements. [Stand: 10. Mai 2016]. [Online]. Available: http://www.oberlin.edu/physics/Scofield/pdf_files/semsc-95.pdf
- [4] (1997) Capacitance effects in high-efficiency cells. [Stand: 10. Mai 2016]. [Online]. Available: http://ac.elsa-cdn.com/S092702489700072X/1-s2.0-S092702489700072X-main.pdf?_tid=7c806870-1695-11e6-b7c5-00000aabb0f01&acdnt=1462874377_a951b2f16881ddb34bca8914ef598404
- [5] K. A. Kuhn. (2009, September) Diode characteristics. [Stand: 11. Mai 2016]. [Online]. Available: http://www.kennethkuhn.com/students/ee351/diode_characteristics.pdf
- [6] (2013, März) Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in matlab. [Stand: 10. Mai 2016]. [Online]. Available: http://www.ijetae.com/files/Volume3Issue3/IJETAE_0313_84.pdf
- [7] Px85. [Stand: 11. Mai 2016]. [Online]. Available: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/110258-da-01-fr-SOLARMODUL_PX_85.pdf
- [8] Solargenerator as150. [Stand: 11. Mai 2016]. [Online]. Available: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/110429-da-01-de-SOLARMODUL_AS_150.pdf
- [9] Sunmodule pro-series xl sw315-320 mono. [Stand: 11. Mai 2016]. [Online]. Available: www.solarworld-usa.com/~media/www/files/datasheets/sunmodule-pro-series/sunmodule-pro-series-solar-panel-xl-mono-ds.pdf