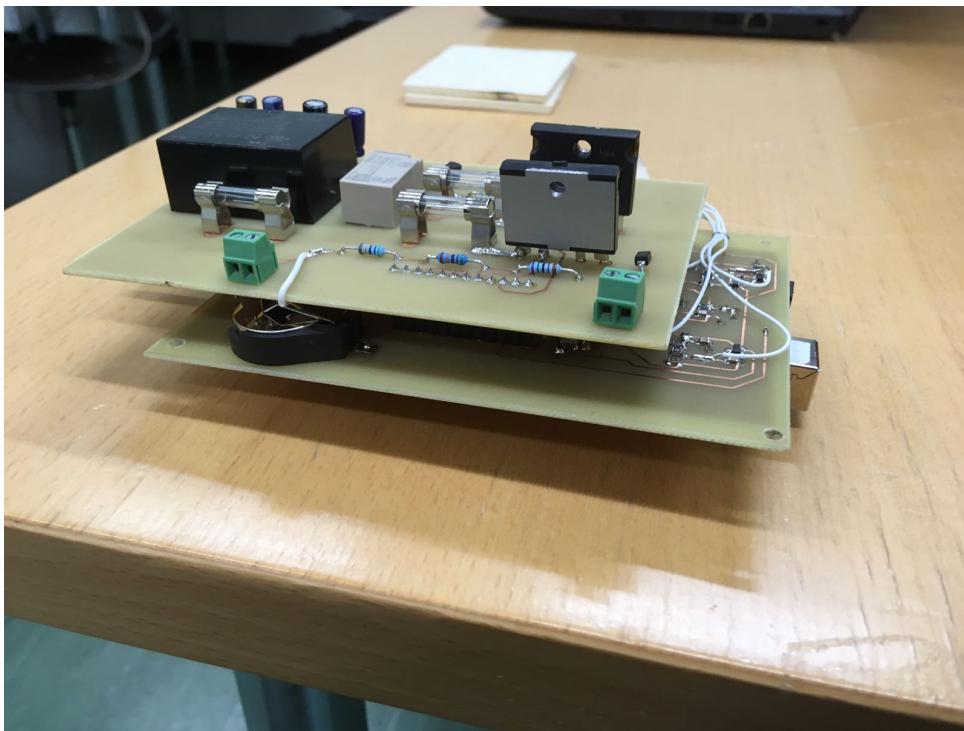


PROJEKTARBEIT 3 TEAM 7

LEISTUNGSMESSUNG MIT DATEN-LOGGER

B. EBELING, M.D. BEVER, D. HILTBRUNNER, E. v. DÄNIKEN

17. Januar 2018



AUFTRAGGEBER:	H. GYSIN
BETREUER:	M. MEIER, H. GYSIN, A. GERTISER, B. DOMENGHINO, P. SCHLEUNIGER
STUDIENGANG:	ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

Abstract:

In our society, the importance of electrical power consumption has been steadily increasing. In order to keep the economy growing at a constant pace, either more and more energy must be produced or the efficiency of our energy use must be increased. To reduce the power consumption of a single device, it is first necessary to know its power consumption. Therefore, a power measurement device, called P3T7, for individual single-phase devices was designed. To understand the power consumption, P3T7 records the power used over a certain period of time. The device then transmits the data to a program which processes and visualizes the data. To measure the voltage, a voltage divider circuit is used and with two instrument shunts the current measurement can be realized. The circuit for the signal preparation includes amplifiers as well as first-order filters. LT Spice was used to simulate this circuit. The pre-processed signals are then sent to a microcontroller (ATMEGA2560), where the software prepares the data and writes it on an EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory). By using a Bluetooth module, the data is transmitted to a java application which visualizes the data. P3T7 can detect power up to 5W with an uncertainty of 0.5W. Up to a power of 2.3 kW, P3T7 has an uncertainty of 10W. Harmonics can be detected until 1400 Hz. Consumer safety is guaranteed due to a plastic casing which prevents the user from coming into contact with any electrical parts. In conclusion P3T7 could be an advantage for households to trace power consumption and minimize them.

Keywords:

P3T7, Single-Phase Power Measurement, Power Measurement Device, Power Consumption, Wireless Transmission

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Konzept	5
2.1	Mechanischer Aufbau	5
2.2	Elektrischer Aufbau	6
2.3	Firmware Aufbau	7
2.4	Software Aufbau	7
3	Technische Grundlagen	9
3.1	Hintergrund Messung	9
3.2	Signalaufbereitung	10
4	Analoge Schaltung	11
4.1	Layer 1	11
4.2	Filter	12
4.3	Einkoppelung	14
4.4	Sicherheitsschaltung	15
4.5	Genauigkeit	16
5	Software	18
5.1	Berechnungskonzept	18
5.2	Übertragungskonzept	21
5.3	Peripherie und Algorithmen	21
5.4	Bediensoftware	28
6	Messungen	30
7	Schlusswort	32
8	Echtheitserklärung	33
9	Verzeichnisse	34
10	Anhang	36

1 Einleitung

Das Thema Energieverbrauch wird in unserer Gesellschaft immer wichtiger. Um den Energieverbrauch zu reduzieren, werden stets neue Ziele von einzelnen Ländern festgelegt. In der Schweiz zum Beispiel soll der heutige Energieverbrauch um den Faktor drei reduziert werden. Um dies zu erreichen, soll die sogenannte Standby-Energie reduziert und die Wirkungsgrade der einzelnen Verbrauchskomponenten verbessert werden. Für dies ist es notwendig den Verbrauch der einzelnen Komponenten über einen längeren Zeitraum nachvollziehen zu können. Um dies zu bewerkstelligen wird im Projekt 3 des Studienganges Elektrotechnik ein Leistungsmessgerät erstellt, welches nicht nur die momentane Effektivleistung anzeigt, sondern die Messdaten bis zu einer Woche aufzeichnen kann.

Ziel ist es ein Leistungsmessgerät zu entwickeln, welches über eine Strommessung und eine Spannungsmessung die Leistung errechnen kann. Diese Daten gilt es drahtlos an ein multimediafähiges Gerät zu senden, von wo aus die aufgezeichneten Messdaten ausgelesen und grafisch dargestellt werden. Das Leistungsmessgerät muss für die normale Netzspannung ausgelegt sein und den spezifischen Sicherheitsnormen entsprechen.

Um die Leistungsmessung umzusetzen werden zwei Signale, das Spannungs- und Stromsignal, gemessen. Die Eingangssignale werden zuerst in einem analogen Schaltungsteil aufbereitet, danach an einem Mikrocontroller digitalisiert und schliesslich softwaremässig verarbeitet. Die errechnete Leistung wird zusammen mit einem Zeitstempel lokal abgespeichert. Diese Daten können auf Wunsch durch eine Bluetooth Verbindung an eine Java Applikation gesendet und dort visualisiert werden. Um die Sicherheit zu gewährleisten, wird ein verschlossenes Kunststoffgehäuse erstellt, welches keine Berührung an elektrisch leitendes Material zulässt.

Das Messgerät P3T7 kann die Leistung von Haushaltsgeräten messen. Das Gerät signalisiert mit Hilfe von 3 LEDs, in welcher Betriebssituation es sich befindet. Durch die Umschaltmöglichkeit von zwei Messbereichen ist es möglich eine genauere Messung zu erreichen. Die gemessenen Daten können durch ein mitgeliefertes Programm abgerufen und visualisiert werden. Der nachfolgende Bericht ist in fünf Teile aufgeteilt. Durch die Konzept Erklärung sowie den Technischen Grundlagen werden die Überlegungen für das Leistungsmessgerät dargelegt. In zwei Kapiteln werden Analog sowie Software Teil behandelt. Die Validierung sowie die Schlussfolgerungen werden zum Schluss beschrieben.

2 Konzept

Die Auftraggeber verlangen ein Gerät das folgenden Anforderungen gerecht werden soll. Die Anforderungen wurden dem Pflichtenheft entnommen, welches sich im Anhang befindet.

- Das Messgerät muss mit den SEV 1011 Steckverbinder kompatibel sein.
- Durch ein Kunststoffgehäuse muss die Schutzart IP 20 gewährleistet werden.
- Wenn das Gerät nicht der Schutzklasse 2 entspricht muss eine Potenzialtrennung vorhanden sein.
- Die Peripherie enthält im Minimum ein Status LED und ein Reset-Schalter.
- Die Messung muss für $U=360V$ und $I=15A$ (Netzspannung) ausgelegt sein.
- Messbereiche: bis 0.5A; 0.5 bis 5A; 5 bis 15A
- Auflösung: bis $1A \pm 2W$; bis $10A \pm 20W$
- Harmonische Schwingungen bis 5kHz müssen detektiert werden.
- Der Log Intervall der Leistung muss 10s sein.
- Firmware für die Signalwandlung, Leistungsberechnung, Datenspeicherung und den Transfer zum Empfangsgerät.
- Es muss eine Software mitgeliefert werden, welche den Empfang und die Darstellung des Leistungsgerätes sicherstellt.
- Die Daten werden über Bluetooth an eine Computer-Applikation gesendet, welcher als Empfänger dient.

Aus diesen Anforderungen wurden die folgenden Konzepte abgeleitet.

2.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau ist durch das Printdesign geprägt. P3T7 besteht aus einem ATmega2560-Board, welches mit 2 «Shields» bestückt wurde. Auf dem obersten Layer befinden sich unter anderem die benötigten Messshunts, der Spannungsteiler, das Netzteil für die $\pm 5V$ Versorgung sowie Sicherungen, welche bei zu hohen Strömen auslösen. Auf dem 2. Layer werden die Messsignale aufbereitet und anschliessend an den Mikrocontroller weitergeben. Das Mikrocontrollerboard ist mit den Massen 54 x 100 der kleinste Layer und wird vom zweiten Print (90 x 125) komplett «verdeckt». Der oberste Print ist um 20 mm seitwärts zum zweiten Layer versetzt und zudem 5 mm schmaler. Durch dies kann durch Distanzbolzen im Gehäuse der Print befestigt werden. Das Gehäuse besitzt eine Kabelverschraubung, durch welche ein SEV 1011 Stecker Typ 12 befestigt ist. Auf der entgegengesetzten Seite können Verbraucher über eine SEV 1011 Steckdose angeschlossen werden. Das Gehäuse wird durch 4 Schrauben geschlossen. Durch das Kunststoffgehäuse werden jegliche Berührungen mit elektrisch leitenden Teilen verhindert. Falls die Sicherung ansprechen sollte, muss das Gerät vom Netz getrennt werden, bevor die Sicherung ausgewechselt werden kann.

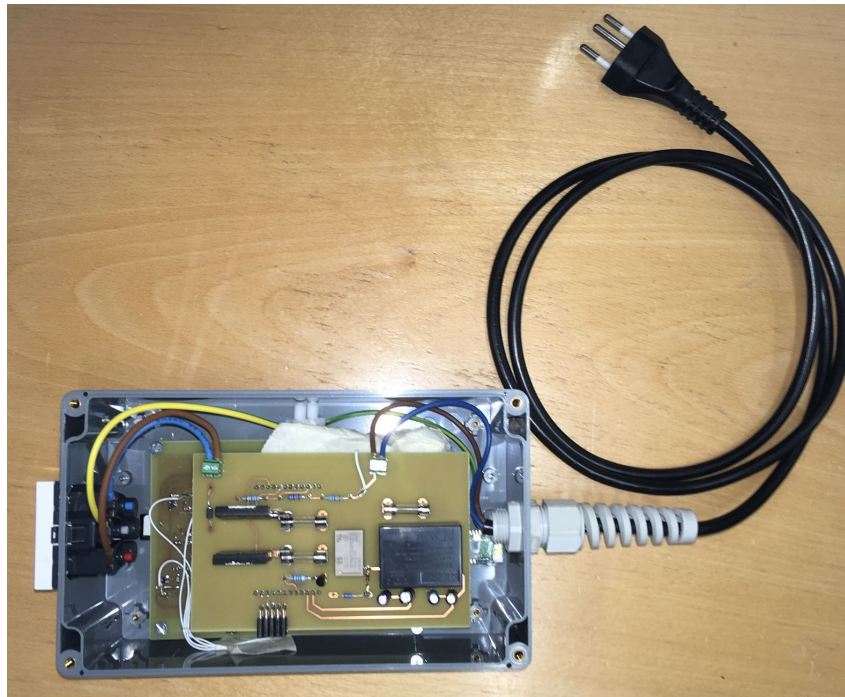


Abbildung 1: Mechanischer Aufbau

2.2 Elektrischer Aufbau

Der elektrische Aufbau gliedert sich in vier verschiedene Teile. Auf dem obersten Print wird mit Netzspannung gearbeitet. Auf dem folgenden Print befindet sich der Digitalbereich und der Analogbereich. Im Digitalbereich ist die Verbindung zu den verschiedenen Bauteilen realisiert. Es sind eine Realtimeclock(RTC), ein Flashspeicher und ein Bluetooth-Modul vorhanden. Die RTC wird gebraucht, um einen Zeitstempel den Daten beizugeben. Der Flashspeicher wird verwendet, um Daten über einen längeren Zeitraum zu speichern sowohl als auch um die Daten nicht nicht-flüchtig zu speichern. Und das Bluetooth Modul wird gebraucht, um eine drahtlose Verbindung zum PC herzustellen. Im Analogbereich wird die Signalaufbereitung gemacht, diese wird im Kapitel 4 behandelt. Die unterste Schicht ist ein Arduino Mega, welcher die Recheneinheit des P3T7 darstellt.

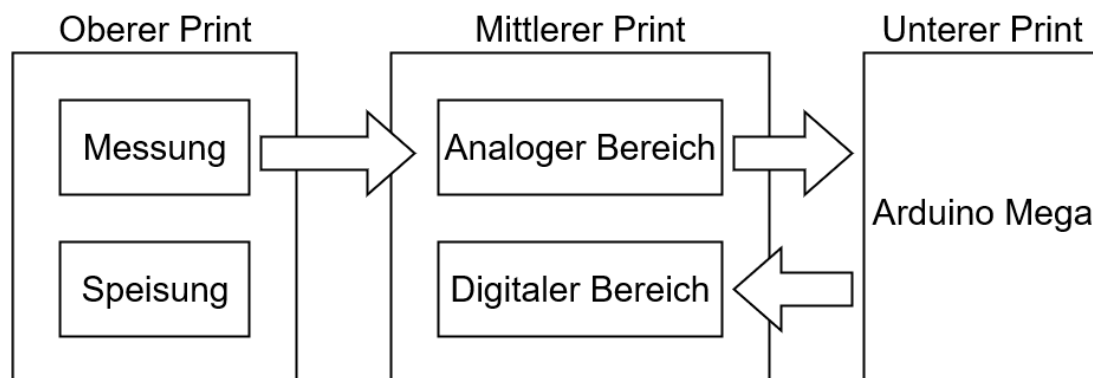


Abbildung 2: Konzept Elektrischer Aufbau

2.3 Firmware Aufbau

Das Messgerät kann drei Betriebszustände unterscheiden: dem Echtzeitmodus, dem Übertragungsmodus und dem normalen Modus. Im normalen Modus misst das Messgerät für jeweils 10 Sekunden und speichert die mittlere Leistung zusammen mit einem Zeitstempel auf einen Speicher. Im Echtzeitmodus wird zusätzlich zur Speicherung die mittlere Leistung einmal pro Sekunde auf die Java-Applikation zur Visualisierung übertragen. Befindet sich das Gerät im Übertragungsmodus, wird die Messung temporär deaktiviert, der gesamte Speicher ausgelesen und auf die PC-Software übertragen.

Die Steuerung der Messungen erfolgt durch einen softwaregenerierten Timer, welcher im Hauptprogramm einen Interrupt auslöst. Erfolgt dieser, so wird die Momentanleistung gemessen und das Ergebnis in einem Buffer gespeichert. Bei jedem weiteren Interrupt wird die Leistung erneut gemessen und im Buffer aufsummiert. Die Anzahl an Interrupts wird von der Software gezählt. Nach 10 Sekunden wird die mittlere Leistung berechnet und im Flashspeicher des Messgerätes abgelegt. Abbildung XXX zeigt eine schematische Abbildung des Grobkonzeptes der Firmware.

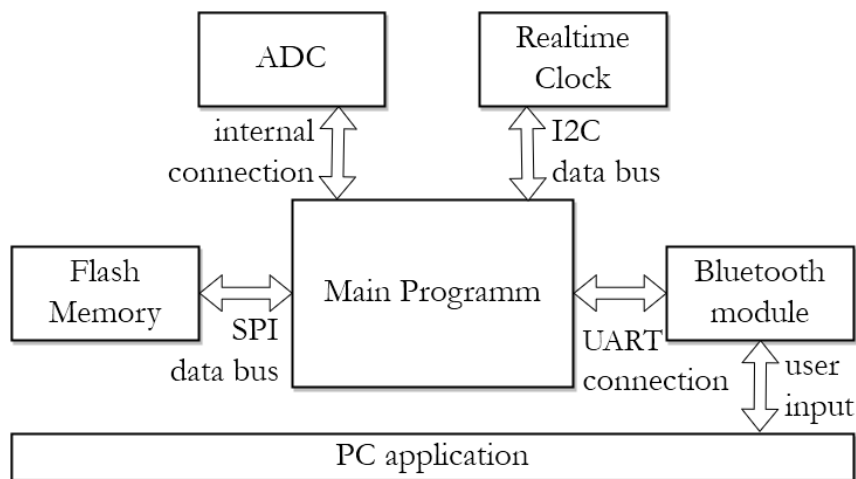


Abbildung 3: Firmware Aufbau

2.4 Software Aufbau

Die Software stellt die Schnittstelle zwischen dem Menschen und dem P3T7 dar. Sie hat die Aufgabe die Daten aus dem P3T7 zu lesen und sie für weitere Berechnungen bereitzustellen. Damit die Daten einfach weiterverarbeitbar sind, generiert die Software ein CSV-File. Dieses kann leicht in Excel oder Matlab importiert werden. Des Weiteren werden Berechnungen mit der Software gemacht, für welche der Controller zu schwach ist und um Speicherplatz auf dem P3T7 zu sparen.

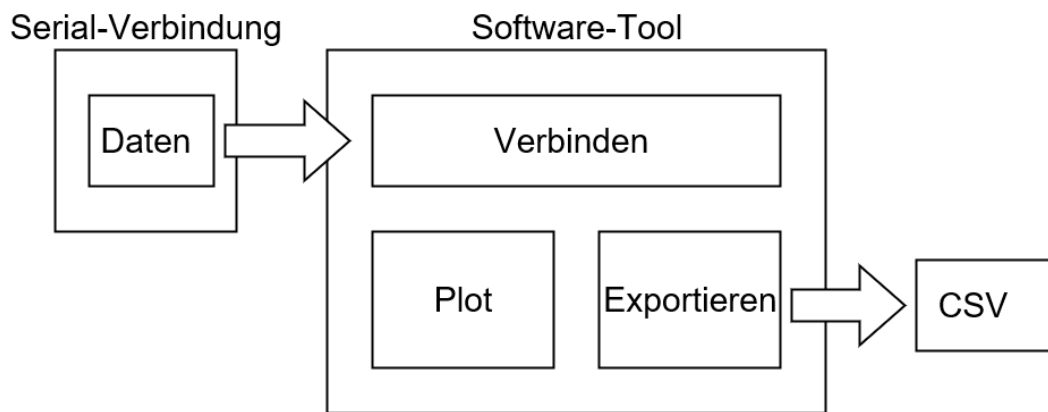


Abbildung 4: Konzept Software

Die Software stellt auch einen Plot mit den ausgelesenen Daten zur Verfügung. Der Plot soll dem User die Möglichkeit geben, die Daten zu validieren, bevor er sie weiterverarbeitet.

3 Technische Grundlagen

In den technischen Grundlagen wird zuerst der physikalische Zusammenhang für das Messprinzip erläutert. Nachfolgend wird gezeigt wie die Signalaufbereitung funktioniert.

3.1 Hintergrund Messung

Die Leistung kann auf verschiedene Arten gemessen werden. Für das Projekt wurde ein indirektes Messverfahren gewählt. Das Gerät misst die Leistung über den Momentanstrom und die Momentanspannung. Dabei wird folgende Formel verwendet.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

Damit kann die Leistung an einem bestimmten Zeitpunkt t berechnet werden. Das Leistungsmessgerät soll jedoch die mittlere Leistung über zehn Sekunden berechnen. Um dies zu erreichen berechnet der Mikrocontroller die mittlere Leistung. Die folgende Grafik zeigt den dafür verwendeten Algorithmus.

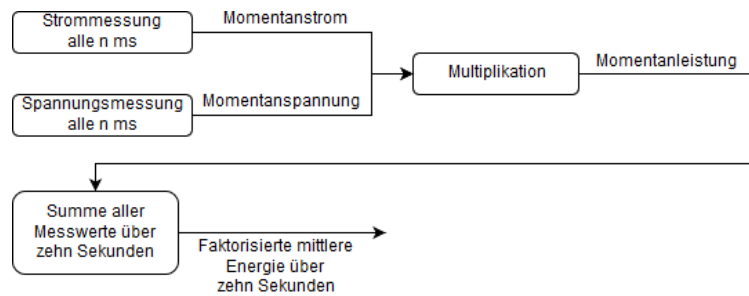


Abbildung 5: Algorithmus um mittlere Leistung zu berechnen

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, wird der Momentanstrom und die Momentanspannung alle n Sekunden miteinander multipliziert und die dabei erhaltene Momentanleistung über zehn Sekunden aufsummiert. Dieser Wert entspricht der faktorisierten geflossenen Energie über zehn Sekunden. Begründet ist dies durch folgende mathematische Umformung.

$$E = p(t) \cdot \Delta t \quad (2)$$

Mit der Annäherung, dass die Leistung $p(t)$ im Zeitraum zwischen zwei Messungen Δt konstant ist, und unter Berücksichtigung der Formel 3.1, ergibt sich folgende Berechnung der Energie.

$$E_n = u_n \cdot i_n \cdot \Delta t \quad (3)$$

mit $u_n, i_n = n$ te Messung des Stromes und der Spannung.

Wenn nun alle E_n aufaddiert werden, ergibt sich die Energie über zehn Sekunden. Dabei kann Δt ausmultipliziert werden.

$$E_{10s} = \sum_{n=1}^{\frac{10s}{\Delta t}} E_n = \sum_{n=1}^{\frac{10s}{\Delta t}} u_n \cdot i_n \cdot \Delta t = \Delta t \sum_{n=1}^{\frac{10s}{\Delta t}} u_n \cdot i_n \quad (4)$$

$$\frac{E_{10s}}{\Delta t} = \sum_{n=1}^{\frac{10s}{\Delta t}} u_n \cdot i_n = aE$$

Aus der vom Mikrokontroller berechneten Wert aE lässt sich unter der Verwendung der Formel $\bar{P} = \frac{E}{t}$ die mittlere Leistung über zehn Sekunden \bar{P} wie folgt berechnen.

$$\bar{P}_{10s} = \frac{aE}{\Delta t \cdot 10s} \quad (5)$$

3.2 Signalaufbereitung

Die Signalaufbereitung passt die Messsignale an die Anforderungen des Analog-Digital-Wandlers, kurz ADC, an. Dieser erwartet ein Signal 0V bis 5V. Jedoch ist der Spannungsabfall über den Mess-Schunts um Faktor 10 bis 160 kleiner. Diese Signalaufbereitungs-Strecke ist für die Strommessung und die Spannungsmessung identisch. Der einzige Unterschied zwischen den verschiedenen Signalen liegt in der Verstärkung.

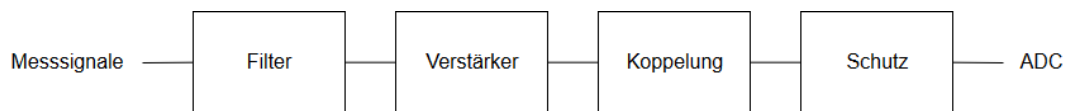


Abbildung 6: Signalaufbereitungsstrecke

Filter

Die Filter befreien das Messsignal von unerwünschten Signalanteilen. Da im Projektauftrag gefordert wird, dass harmonische Oberwellen ab 5kHz nicht gemessen werden, werden Filter diese Oberwellen entfernen. Dafür wurden Tiefpass-Filter 1. Ordnung verwendet.

Verstärkung

Um die Messsignale auf eine brauchbare Grösse zu bringen, sind nicht-invertierende Verstärker verwendet worden. Diese bringen den Vorteil, dass pro Messstrecke nur ein Operationsverstärker benötigt wird.

Koppelung

Das erwartete Messsignal ist eine sinusartige Schwingung. Dadurch wird das Signal keinen DC-Anteil besitzen. Da der ADC Spannungen von 0 bis 5V fordert, muss das Messsignal angehoben werden.

Schutz

Es ist eine Schutzschaltung eingebaut, um den ADC gegen Über- und Unterspannungen zu schützen. Diese entstehen in der Verstärkerschaltung bei den Messbereichen für kleine Ströme, wenn grosse Ströme gemessen werden.

4 Analoge Schaltung

Im Kapitel werden die verschiedenen analogen Schaltungsteile näher erläutert. Zuerst werden die verschiedenen Schaltungsteile auf dem Layer 1 erläutert. Dies beinhaltet die Speisung, Sicherheitsaspekte und die Messung. Danach werden die Bestandteile der Signalaufbereitung näher betrachtet.

4.1 Layer 1

Der erste Layer ist für alle Schaltungsteile mit 230V, sowie für die Verbindung nach aussen zuständig. Abbildung 7 zeigt den groben Aufbau. Das genaue Schema befindet sich im Anhang.

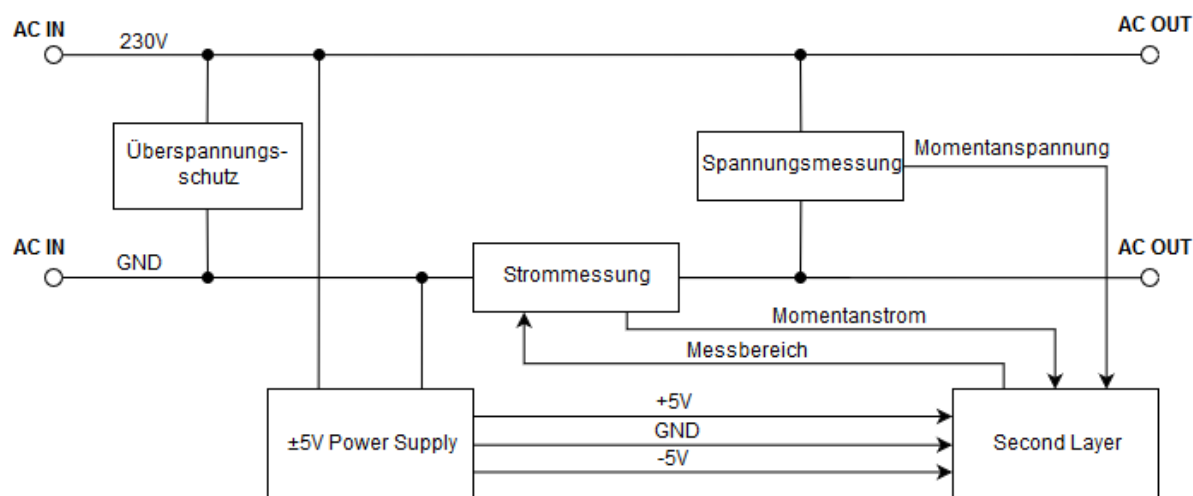


Abbildung 7: Blockschaltbild des ersten Layers des Leistungsmessgerätes

Überspannungsschutz:

Der Überspannungsschutz schützt das Gerät vor Spannungen über 400V. Der Rest des Gerätes ist somit für bis 400V ausgelegt. Da das Gerät mit Wechselstrom betrieben wird, ist ein Verpolungsschutz unnötig. Einzig wird die Masse des Gerätes auf 230VAC schweben, falls das Gerät verpolt betrieben wird.

Strommessung:

Für die Strommessung stehen zwei Mess-Schunts zu Verfügung. Zum einen ein $50m\Omega$ Widerstand und zum anderen ein $1m\Omega$ -Widerstand, welcher mit einem Relais parallel zum Ersten geschaltet wird. Durch die Parallelschaltung kann der Messbereich bei Betrieb umgeschaltet werden, ohne einen Unterbruch zu provozieren. Aufgrund induktiven Lasten könnten hohe Spannungen entstehen, die die Schaltung zerstören würden. Zudem kann somit eine unterbruchsfreie Versorgung der Last gewährleistet werden. Für die Messung wird die Spannung vor dem Shunt bezüglich Masse (GND) gemessen.

Spannungsmessung:

Die Spannung wird durch einen Spannungsteiler mit dem Verhältnis $\frac{7.5}{1000}$ gemessen, was bei einer Spannung von $\pm 400V$ zu einem Messsignal von $\pm 3V$ führt. Da der Messbereich des ADCs $\pm 2.5V$ beträgt, können maximal Spannungen von $\pm 333V$ gemessen werden.

Power Supply:

Das Netzteil versorgt den gesamten Gleichstromteil der Schaltung. Es stellt einen maximalen Strom von $400mA$ zur Verfügung.

4.2 Filter

Wie schon im Kapitel technische Grundlagen 3.2 erwähnt, werden die Filter benötigt um harmonische Oberwellen herauszufiltern. Gemäss Lastenheft sollen Oberwellen ab $5kHz$ nicht mehr im Signal sichtbar sein. Darum müssen Oberwellen die eine höhere Frequenz haben, unterdrückt werden damit diese nicht die Messung verfälschen.

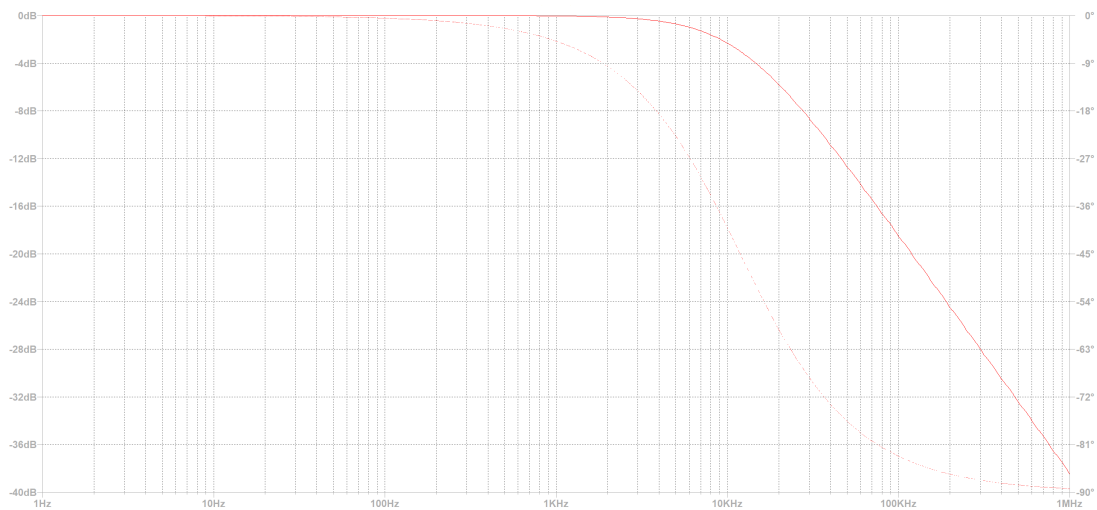


Abbildung 8: Frequenzgang Tiefpass-Filter 1. Ordnung

Tiefpass-Filter sind geeignet, weil sie höhere Frequenzen unterdrücken und tiefe Frequenzen passieren lassen. Auf dem nebenstehenden Bild ist ein typischer Frequenzgang eines Tiefpass-Filters 1. Ordnung zu sehen. Da für das Projekt die Signale auch verstärkt werden müssen, sind aktive Filter naheliegend.[1]

Dimensionierung

Die Wahl fiel auf Butterworth-Filter mit Sallen/Key-Topologie 2. Ordnung. Diese Topologie bietet den Vorteil, dass sie nicht invertierend ist. Dadurch ist ein Operationsverstärker ausreichend pro Signalpfad. Die Butterworth-Koeffizienten bieten den Vorteil, dass sie flach sind im Durchlassbereich und einen relativ eckigen Übergang haben.[2]

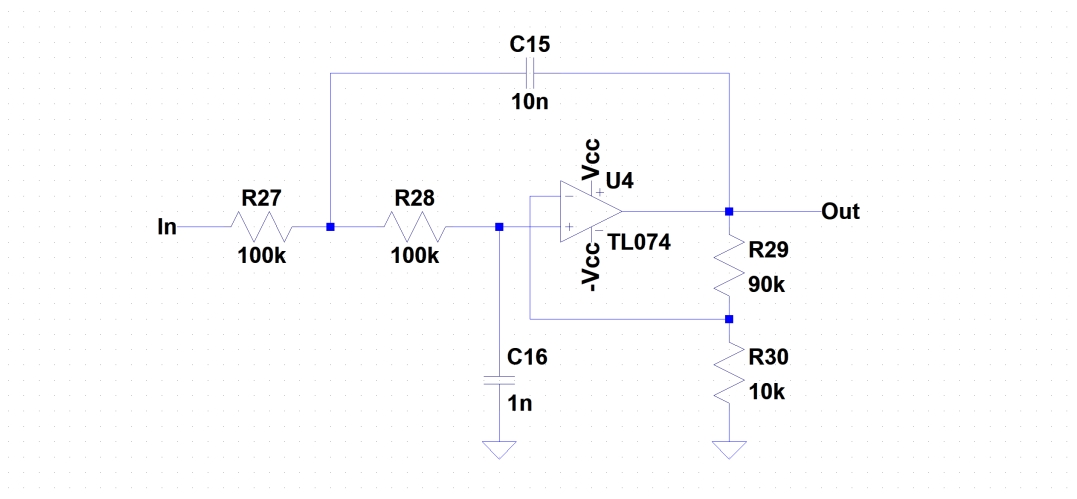


Abbildung 9: Sallen/Key-Topologie Tiefpass-Filter 2. Ordnung

Auswahl Operationsverstärker

An den Operationsverstärker wurden praktisch keine Anforderungen gestellt. Er soll ein GWP[2] von mindestens 800kHz besitzen und nicht Rail-to-Rail sein. Ausserdem werden vier Operationsverstärker benötigt. Dies ist der **TL074**, der praktischerweise 4 Operationsverstärker in einem Gehäuse vereint. Die passiven Bauteile wurden mithilfe einer Formel[3] aus dem Internet erstellt, die sich im Laufe des Projektes als falsch herausstellte.

Falsche Filter

Nachdem der Print gefertigt war, wurde beim Testen festgestellt, dass die Filter instabil laufen. Es wurde überlesen, dass mit der Sallen/Key-Filtertopologie nur Verstärkungen bis drei realisierbar sind. Bei höheren Verstärkungen können diese instabil werden. Diesen schwerwiegenden Fehler wurde gemacht. Aus der Not wurden die Filter umgebaut in einen passiven Filter 1. Ordnung, gefolgt von einer Verstärkerschaltung. Dafür musste nur der Kondensator C15 entlötet werden, damit ein Unterbruch entsteht, und für den R27 wurde eine Drahtbrücke eingelötet.

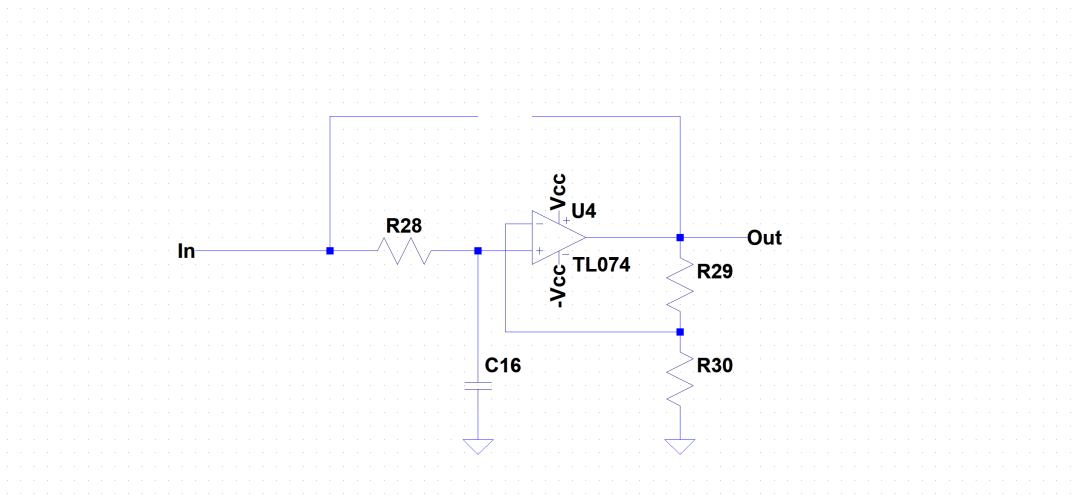


Abbildung 10: Umgebautes Sallen/Key zu passivem Filter 1. Ordnung

Die Dimensionierung der neuen Schaltung ist mithilfe der nachfolgenden Formeln geschehen. Die Verstärkungen konnten beibehalten werden. Die passiven Filter mussten neu berechnet werden.[2]

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{28} \cdot C_{16}} \quad (6)$$

$$A = 1 + \frac{R_{29}}{R_{30}} \quad (7)$$

4.3 Einkoppelung

Das Signal nach der Filterung und der Verstärkung beträgt $\pm 2.5V$. Um dieses Signal anzuheben auf eine für den Mikrocontroller angepasste Grösse, wird eine DC-Spannung eingekoppelt. Nach der Einkoppelung von $2.5V$ bewegt sich das Signal innerhalb von $0V$ bis $5V$. Dies wurde mit folgender Schaltung realisiert, siehe Abbildung 11.

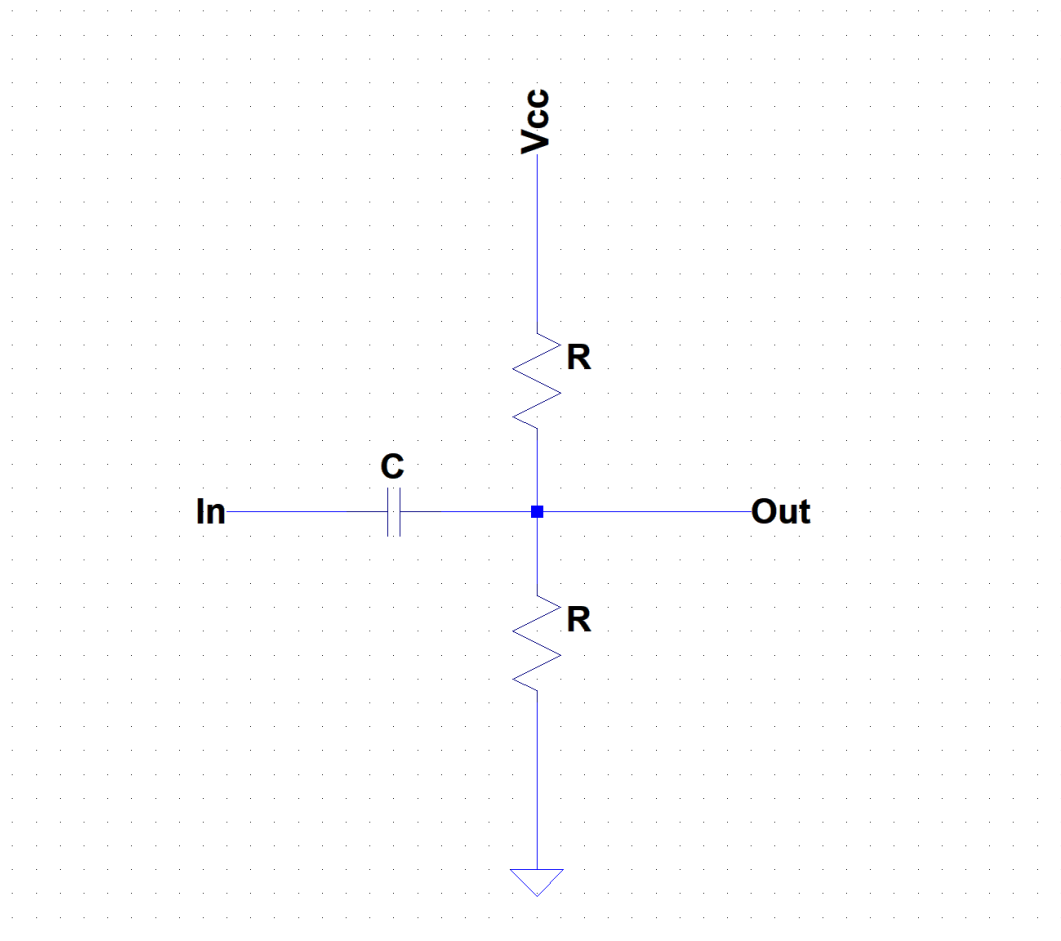


Abbildung 11: Einkoppelung

Um diese Schaltung zu dimensionieren, muss eine AC- und eine DC-Betrachtung gemacht werden.

Für die AC-Betrachtung ist sie ein Hochpassfilter 1. Ordnung. Dieses Hochpassfilter soll alle Frequenzen passieren lassen ausser Gleichstrom. Für die Dimensionierung kann dieselbe Formel

(6) wie für die Tiefpass-Filter verwendet werden. Jedoch wird die Grenzfrequenz f_g auf 0.5Hz gesetzt. R_{28} setzt sich aus den zwei parallel gesetzten Widerständen zusammen.

Für die DC-Betrachtung entspricht die Schaltung einem Spannungsteiler. Der Kondensator stellt in dieser Betrachtung einen Unterbruch dar. Die Widerstände sollten gross gewählt werden, damit die Verluste klein bleiben. Gleichzeitig muss mit den Anforderungen des Hochpassfilters einen Kompromiss gefunden werden. Für unser Projekt war schlussendlich die Grösse des Kondensators ausschlaggebend. Je grösser der Kondensator ist desto kleiner wird die Verlustleistung. Der grösste Kondensator der als SMD[4] erhältlich ist wurde verwendet.

4.4 Sicherheitsschaltung

Um die Eingänge des Mikrocontroller zu schützen, wurde eine Sicherheitsschaltung realisiert. Diese schützt den Eingang vor Überspannungen und Unterspannungen. Die obere Diode schaltet, sobald das Eingangssignal oberhalb von V_{cc} plus der Forward-Voltage der Diode ist. In diesem Fall entsteht ein Kurzschluss zwischen GND und V_{cc} durch den Operationsverstärker. Um den Strom zu begrenzen, ist der Widerstand vorhanden. Gleichzeitig bildet der Widerstand mit dem Kondensator zusammen ein weiteres Tiefpass-Filter, das hochfrequente Störungen abhalten soll. Die Grenzfrequenz dieses Filters muss höher sein, als die Grenzfrequenz des ersten Filters, damit es nicht das Signal verfälscht.

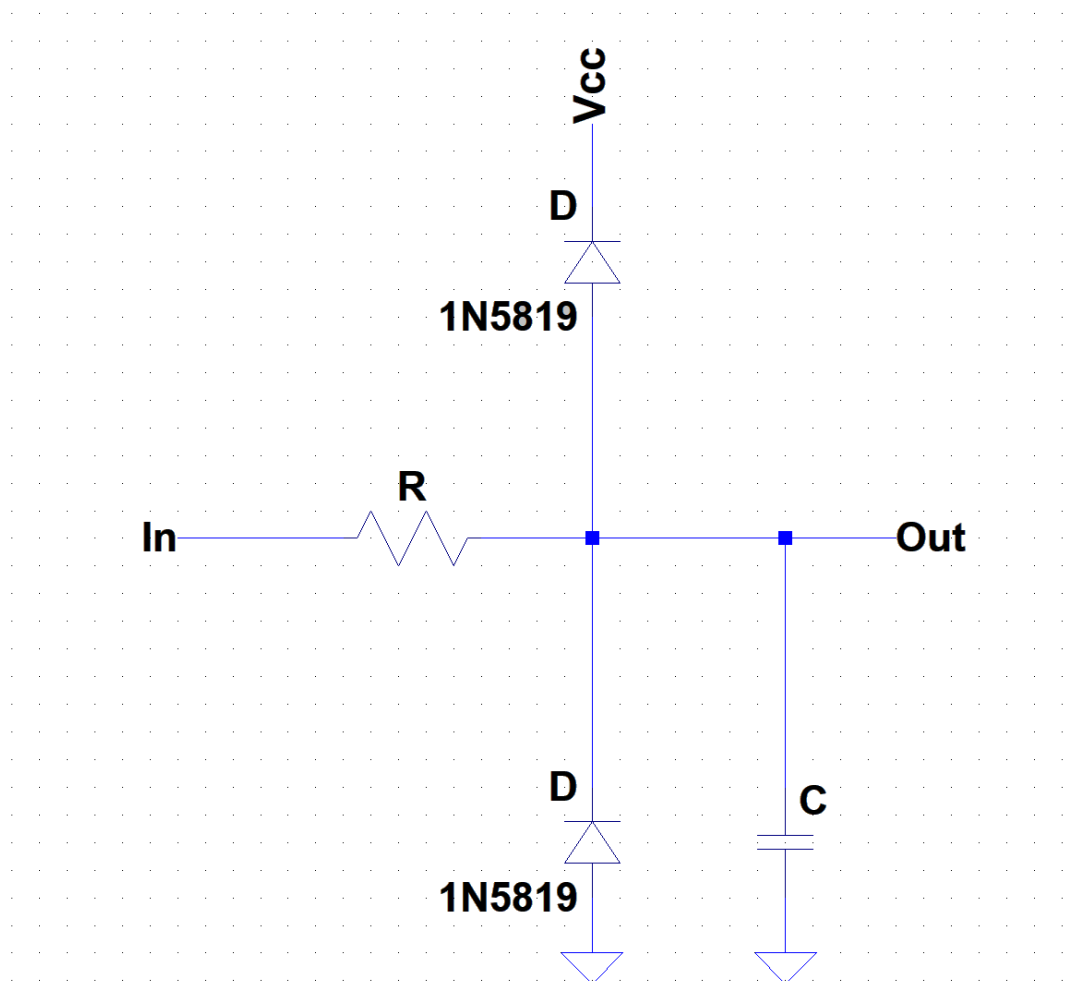


Abbildung 12: Sicherheitsschaltung

4.5 Genauigkeit

Die Genauigkeit im analogen Schaltungsteil hängt zum einen von den Toleranzen und Ungenauigkeiten der verwendeten Bauteile und zum anderen von der Auflösung des ADCs ab, welcher die Grenze zwischen analog und digital bildet. Abbildung 13 zeigt den Messpfad mit den möglichen Teilen, in welchen Ungenauigkeiten entstehen können und werden.

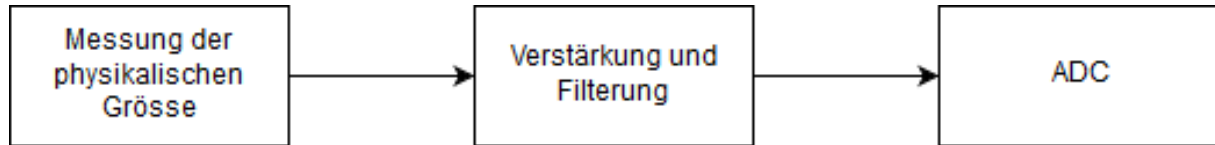


Abbildung 13: Messpfad

Nachfolgend werden die möglichen Fehler der einzelnen Blöcke in Abbildung 13 erläutert.

Messung der physikalischen Grösse

Der Strom und die Spannung werden jeweils als Spannung über einen bestimmten Widerstand gemessen. Wie aus dem Schema im Anhang ersichtlich, lässt sich der Strom über das Ohmsche Gesetz berechnen und die Spannung über einen Spannungsteiler.

$$I = \frac{U_{mess}}{R_{mess}} \rightarrow I = \frac{U_{mess}}{R_{mess} + R_{toleranz}} = \frac{U_{mess}}{R_{mess}} \cdot \frac{1}{a} \quad (8)$$

$$a = \frac{R_{mess} + R_{toleranz}}{R_{mess}}$$

$$U = U_{mess} \cdot \frac{R_{tot}}{R_{mess}} \rightarrow U = U_{mess} \cdot \frac{R_{tot} + R_{toleranz1,2}}{R_{mess} + R_{toleranz2}} = U_{mess} \cdot \frac{R_{tot}}{R_{mess}} \cdot \frac{1}{b} \quad (9)$$

$$b = \frac{\frac{R_{tot} + R_{toleranz1,2}}{R_{tot}}}{\frac{R_{tot} + R_{toleranz2}}{R_{tot}}}$$

Somit ergeben die Toleranzen der Widerstände konstante faktorielle Fehler a und b , welche durch eine Multiplikation während der digitalen Weiterverarbeitung des Messsignals behoben werden können.

Verstärkung, Einkopplung und Filterung

Der Strom und die Spannung werden im jeweiligen Kanal verstärkt, um 2.5V angehoben und gefiltert. Da die Filterung erst ab 10kHz abschneidet, sind die Fehler im Durchlassbereich vernachlässigbar. Die Verstärkung wird durch einen nicht invertierenden Operationsverstärker erreicht.

$$U_{out} = U_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \rightarrow U_{out} = U_{in} \left(1 + \frac{R_2 + R_{toleranz1}}{R_1 + R_{toleranz2}} \right) = U_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{1}{a} \quad (10)$$

Somit kann der Fehler wie im vorherigen Abschnitt durch eine Multiplikation mit einer Konstante kompensiert werden.

Bei der Einkopplung wird die Spannung an einem Spannungsteiler zum Signal hinzuaddiert (siehe Schema im Anhang).

$$U_{out} = U_{in} + \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow U_{out} = U_{in} + \frac{V_{CC} \cdot (R_2 + R_{toleranz2})}{R_1 + R_2 + R_{toleranz1,2}} = U_{in} + \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} + b \quad (11)$$

Daher wird bei diesem Fehler im Gegensatz zu den anderen eine zusätzliche Konstante dazu addiert, um den durch die Widerstandstoleranzen entstandenen Fehler zu entfernen.

Analog-Digital-Wandler

Bei der Konvertierung eines analogen Signals zu einem Digitalen gibt es zwingendermassen einen Informationsverlust durch die Quantisierung des Signals. Da für dieses Gerät ein 10 Bit ADC verwendet wird, hat das digitale Signal eine Auflösung von 1024 Werten. Für die vier Messkanäle ergeben sich folgende Toleranzen in der Tabelle 1.

Messung	Spannung	Strom		
Messbereich	$\pm 333V$	$\pm 15A$	$\pm 5A$	$\pm 0.5A$
Auflösung	$0.65V$	$29mA$	$9.8mA$	$0.98mA$

Tabelle 1: Auflösung der Messbereiche

Resultierende Genauigkeit

Die Ungenauigkeit setzt sich zum einen durch den Informationsverlust der Quantisierung am ADC zusammen. Zum Anderen werden zusätzliche Ungenauigkeiten durch elektromagnetische Einkopplungen der umgebenden Schaltung und nicht einberechnete Faktoren der Schaltung wie zum Beispiel Leitungswiderstände entstehen. Die Fehler, welche durch die Toleranzen der Bauteile entstehen, können wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben durch Multiplikationen und Additionen kompensiert werden.

5 Software

Die Firmware des Messgerätes ist eine in C geschriebene Software für die AVR-Prozessorarchitektur. Sie besteht aus einem Hauptprogramm zur Ablaufsteuerung und mehreren C-Modulen für die Kommunikation mit den Peripheriegeräten sowie diverse Algorithmen. Die Bediensoftware ist eine Java-Applikation für Windows.

5.1 Berechnungskonzept

Einer der Hauptaugenmerke der Firmware ist die Effizienz. Je schneller der Code arbeitet, desto höher kann die Abtastfrequenz sein und desto genauer wird die Messung. Eigens für das Messgerät wurde deshalb ein schlankes Übertragungsprotokoll sowie eine Berechnungsgrundlage entwickelt, dessen Ziel eine möglichst effiziente Verarbeitung der Messdaten ist. Nachfolgend erfolgt die Herleitung und Funktionsweise dieses Konzepts. Der verwendete Mikrocontroller besitzt eine einfache 8Bit CPU ohne Floating Point Unit. Das heisst, er besitzt keine Recheneinheit, die Operationen auf Gleitkommazahlen direkt anwenden kann. Deshalb sorgt erste Optimierung dafür, dass die Firmware möglichst nur mit Ganzzahlen arbeitet und eine Umrechnung in die Leistung mit Nachkommastellen erst ganz am Schluss erfolgt.

Zunächst muss eine Grenze gezogen werden bezüglich der Genauigkeit der Messdaten. Die erste Einschränkung erfolgt durch die Quantisierung des ADC. Dieser hat beim ATmega2560 eine Auflösung von 10Bit. Digitalisiert werden drei Strombereiche und die Spannung. Je nach Bereich ergibt sich dadurch eine (theoretische) Genauigkeit pro Bit. Die Daten können aus Tabelle 2 entnommen werden.

Analoger Eingang	Beschreibung	Wertebereich	r_{ADC} Auflösung pro Bit
ADC0	Spannung	-400V bis 400V	$0.78125 \frac{V}{Bit}$
ADC1	Kleinsten Strombereich	-0.5A bis 0.5A	$0.0009765625 \frac{A}{Bit}$
ADC2	Mittlerer Strombereich	-5A bis 5A	$0.009765625 \frac{A}{Bit}$
ADC3	Grösster Strombereich	-15A bis 15A	$0.029296875 \frac{A}{Bit}$

Tabelle 2: theoretische Genauigkeit der Messbereiche

Das Messgerät speichert keine Strom- oder Spannungswerte ab, sondern nur die Leistung. Die Werte von Abbildung 2 können deshalb noch für jeden Bereich multipliziert werden. Man erhält dadurch die Genauigkeit der Leistung pro Bit.

$$R_{ADC1} = r_{ADC0} \cdot r_{ADC1} = 0.000762939 \frac{W}{Bit} \quad (12)$$

$$R_{ADC2} = r_{ADC0} \cdot r_{ADC2} = 0.007629394 \frac{W}{Bit} \quad (13)$$

$$R_{ADC3} = r_{ADC0} \cdot r_{ADC3} = 0.022888184 \frac{W}{Bit} \quad (14)$$

Die Analogschaltung bildet die verschiedenen Wertebereiche in ein Intervall von 0V bis 5V ab. Der AD-Wandler ist so eingestellt, dass dieser die Eingangsspannung bezogen auf eine Referenzspannung von 5V digitalisiert. Der zugewiesene Dezimalwert ist durch Formel 15 gegeben. Die

Eingangsspannung variiert je nach Wertebereich und kann durch Formel 16 reproduziert werden. Zur übersichtlicheren und allgemeinen Darstellung wurde dem realen Signal die Variable x zugeordnet.

$$ADC = \frac{U_{IN} \cdot 2^{10}}{U_{ref}} \quad (15)$$

$$U_{IN} = \frac{U_{ref}}{x_{max} - x_{min}} \cdot \left(x + \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \right) = \frac{U_{ref} \cdot x}{x_{max} - x_{min}} + \frac{U_{ref}}{2} \quad (16)$$

ADC: Registerwert dezimal []
 U_{IN} : Eingangsspannung am ADC [V]
 x : Realer Signalwert [V] oder [A]
 U_{ref} : Referenzspannung entspricht 5V

Die Schreibweise $x_{max} - x_{min}$ bezeichnet den Wertebereich des entsprechenden Eingangs, wie er in Abbildung 2 gezeigt ist. Da die Analogschaltung ein offsetbelastetes Eingangssignal liefert (2.5V am ADC entsprechen 0A bzw. 0V), muss dieser entfernt werden. Die beiden Gleichungen 15 und 16 werden kombiniert und algebraisch umgeformt.

$$ADC = \frac{U_{IN} \cdot 2^{10}}{U_{ref}} = \frac{U_{ref} \cdot x}{x_{max} - x_{min}} + \frac{U_{ref}}{2} \cdot \frac{2^{10}}{U_{ref}} = \frac{x \cdot 2^{10}}{x_{max} - x_{min}} + \frac{2^{10}}{2}$$

$$ADC - \frac{2^{10}}{2} = ADC - 512 = x \cdot \frac{2^{10}}{x_{max} - x_{min}}$$

Es genügt somit, nur den Dezimalwert des ADCs abzüglich des Offsets in den Buffern zu speichern. Der gesamte rechte Teil ist vorerst redundant und kann am Ende wieder hinzugefügt werden. Dies bedingt jedoch auch, dass man für jeden Wertebereich einen eigenen Buffer benötigt, da jeder Buffer eine andere Wertigkeit pro Bit aufweist. Möchte man aus dem Dezimalwert des ADC den realen Wert zurückbilden, so muss die Gleichung nur auf x umgeformt werden.

$$x = (ADC - 512) \cdot \frac{x_{max} - x_{min}}{2^{10}} = (ADC - 512) \cdot r_{ADCn}$$

Dieser Skalierungsfaktor entspricht genau der in Abbildung 2 gezeigten Genauigkeit pro Bit. Da nach der Offsetentfernung das System nun linear ist, können die Dezimalwerte der einzelnen Eingänge ebenfalls multipliziert werden. Somit gilt:

$$p_i = (ADC0 - 512) \cdot (ADCn - 512) \cdot r_{ADC0} \cdot r_{ADCn} = (ADC0 - 512) \cdot (ADCn - 512) \cdot R_{ADCn} \quad (17)$$

Wie bereits erwähnt basiert das Berechnungskonzept auf das Aufsummieren der Momentanleistung über eine bestimmte Zeit. Physikalisch betrachtet wird also zwischenzeitlich die Energie gespeichert und nicht die Leistung. Ist wie in unserem Fall die Messung zeitdiskret, so gilt:

$$E = \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} p_i \cdot \Delta t = \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} (ADC0 - 512) \cdot (ADC1 - 512) \cdot R_{ADCn} \cdot \frac{1}{f_s} \quad (18)$$

E:	Energie [J]
p_i :	Eingangsspannung am ADC [V]
Δt :	Zeitdifferenz [s]
f_s :	Abtastfrequenz [Hz]
R_{ADCn} :	Wertigkeit des Buffers [$\frac{W}{Bit}$]
t_s :	Abtastzeit [s]

Formel 18 wird nun auf beiden Seiten erweitert und wieder algebraisch umgeformt.

$$E = \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} p_i \cdot \frac{1}{f_s}$$

$$\frac{f_s}{R_{ADCn}} \cdot E = \frac{f_s}{R_{ADCn}} \cdot \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} p_i \cdot \frac{1}{f_s} = \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} \frac{p_i}{R_{ADCn}} = \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} (ADC0 - 512) \cdot (ADC1 - 512)$$

Innerhalb des Summenoperators befindet sich nun genau der in Formel 17 hergeleitete Wert des Buffers. Da Leistung bekanntlich Energie durch Zeit ist, muss man den Term nur noch auf diesen Ausdruck umformen und man erhält die reale Leistung des Eingangssignals. Dem gesamten rechten Ausdruck der Gleichung wurde die Variable B zugewiesen. B ist der Dezimalwert im Buffer, nachdem dieser 10 Sekunden lang aufsummiert wurde.

$$\bar{P} = \frac{E}{t_s} = B \cdot \frac{R_{ADCn}}{f_s \cdot t_s} \quad (19)$$

Das Problem dieses Konzeptes ist der grosse Dynamikbereich. Wenn man die Messwerte aufsummiert, können im "worst case" bis zu 35Bit grosse Zahlen im Buffer entstehen (bei 10kHz Abtastfrequenz und 10s Abtastzeit). Als Alternative könnte man die einzelnen Buffer abspeichern und die Rückskalierung erst in der Java-Applikation vornehmen. Um Speicherplatz zu sparen, könnte man nur einen signifikanten Teil davon abspeichern. Trotzdem müsste man die Werte von drei Buffern permanent speichern. Man hat sich gegen dieses Konzept entschieden. Einerseits, um Speicher zu sparen und die Übertragung zu beschleunigen, andererseits, um in jedem Leistungsbereich eine gleich grosse Genauigkeit zu ermöglichen. Als Kompromiss nimmt man die langsame Berechnung mit Fließkommazahlen in Kauf.

Zusammenfassen lässt sich der ganze Prozess wie folgt beschreiben:

Es werden immer zwei analoge Eingänge ausgewertet, einmal Spannung und einmal Strom. Vom Dezimalwert des AD-Wandlers wird der Offset entfernt. Die beiden Werte werden multipliziert und in einem Buffer gespeichert. Während 10 Sekunden wird dieser Vorgang wiederholt und der Buffer stetig aufsummiert. Erst jetzt nimmt man den langsamen Vorgang des Fließkomma-rechnens in Kauf und wandelt den Dezimalwert gemäss Formel 19 in eine reale Leistung um. Dieser Wert wird zusammen mit einem Zeitstempel auf dem Flashspeicher abgelegt. Um die korrekte Leistung zu berechnen, müssen im Programm folgende Konstanten hinterlegt sein: der Offset aller vier analogen Eingänge, die Genauigkeit in Watt pro Bit für alle drei Buffer, die Abtastfrequenz und die Abtastzeit. Die hier hergeleiteten Werte sind theoretisch und werden später durch experimentelle Bestimmung nachkorrigiert.

Anmerkung: Da das Messgerät über drei Strombereiche verfügt, werden während des Messens auch drei Buffer aufsummiert. Je nachdem, welcher Eingang ausgewertet wurde, wird das Ergebnis in den dazugehörigen Buffer gespeichert. Nach der Abtastzeit werden alle 3 Buffer mit ihren eigenen Skalierungsfaktoren umgerechnet und die Ergebnisse addiert.

5.2 Übertragungskonzept

Die zweite Optimierung befasst sich mit dem sparsamen Speichern und Übertragen der Daten, um den Übertragungszeit zu verkürzen. Gespeichert werden die Uhrzeit sowie der Wochentag, gefolgt von der eigentlichen Messung. Diese Daten sollen möglichst kompakt in ein kleines Protokoll gepackt werden. Die Daten werden ohne Codierung, also keine ASCII Charakter oder Ähnliches, als Bitstrom gespeichert. Es ist später Aufgabe der Software, diesen Bitstrom wieder zu trennen und korrekt zu interpretieren. In Abbildung 14 ist die Aufteilung des Bitstroms zu sehen.

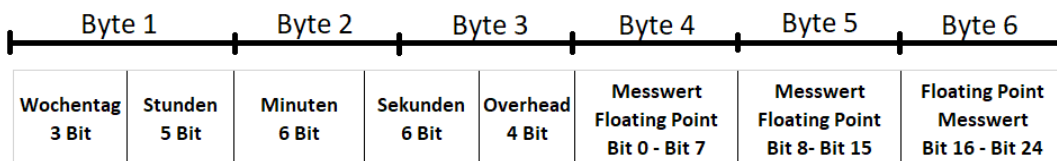


Abbildung 14: Übertragungskonzept

Ein Datenpaket besteht somit aus 6 Byte bzw. 48 Bit. Die Zeitinformationen sind so codiert, dass nur genau so viele Bits zur Verfügung stehen, wie benötigt werden. Im Overhead können zusätzliche Statusinformationen dem Programm übergeben werden bzw. wird dieser benötigt, um ungültige Messdaten zu detektieren (Erklärung später). Ausserdem wird damit der Datenstrom auf ein ganzzahliges Vielfaches von Acht aufgefüllt. Bei den Messdaten spart man sich das letzte Byte der eigentlich 4Byte grossen Fliesskommazahl, da es sich bei diesen Bits um die Grössenordnung 4. - 8. Nachkommastelle handelt. Diese Genauigkeit kann gar nicht erreicht werden, weshalb diese Information auch nicht gespeichert wird.

5.3 Peripherie und Algorithmen

Die Funktionen für die Kommunikation mit der Peripherie sowie einige kleine Algorithmen sind zwecks Programmübersicht in externe C-Module gepackt. Auf die Verwendung von externen Bibliotheken ist komplett verzichtet worden. Einerseits um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, andererseits, um den Code möglichst optimiert zu gestalten, da dies einer der Hauptprioritäten bei der Erstellung der Firmware war. Es war also nicht Ziel, eine möglichst universell einsetzbare Bibliothek zu schreiben, sondern einen schlanken und effizienten Treiber zu erstellen, der nur gerade die Funktionen beinhaltet, welche das Messgerät benötigt.

Der Prozessor muss mit drei Peripheriegeräten kommunizieren. Das erste Modul ist eine RTC, welche am I2C-Bus betrieben wird. Zur Speicherung steht ein Flashspeicher mit SPI Schnittstelle zur Verfügung. Zuletzt das Bluetooth-Modul, über das eine serielle Schnittstelle (USART) emuliert wird. Alle drei Schnittstellen hat der ATmega2560 bereits eingebaut. Sie können mit relativ geringem Aufwand genutzt werden. Die Nutzung dieser Schnittstellen auf „Registerebene“ wird in diesem Bericht nicht erläutert, dafür wird auf das Datenblatt des Prozessors bzw. den Peripheriegeräten verwiesen, welches im Anhang zu finden ist.

Das letzte C-Modul beinhaltet die Funktionen zur Auswertung der analogen Eingänge sowie die softwaremässige Erkennung der Strombereiche. Der AD-Wandler ist beim Prozessor bereits integriert und gehört nicht zur Peripherie. Trotzdem sind zwecks Codeübersicht diese Funktionen ausgelagert. Die Funktionsweise aller Module wird im Folgenden erläutert.

Bluetooth-Kommunikation via USART

Die Kommunikation der Firmware mit der PC Software besteht aus zwei Teilen. Erstens vom PC zum Bluetooth-Modul und zweitens vom Modul zum Prozessor. Der PC und das Modul emulieren eine serielle Schnittstelle. Diese Kommunikation ist unabhängig von der zweiten Stufe und erlaubt sogar Verzögerungen, da das Bluetooth-Modul über einen kleinen Datenbuffer verfügt. Die Konfiguration der beiden Übertragungsstufen (Datenrate, Wortbreite, usw.) ist ebenfalls unabhängig und muss nicht übereinstimmen.

Die Datenrate bzw. Baudrate muss von beiden Partnern mit einer Genauigkeit von ca. 2% übereinstimmen, damit die Kommunikation funktioniert. Dies gilt für beide Stufen. Da die USART-Schnittstelle nicht mit einem externen Taktgeber betrieben wird, muss die Baudrate für die Kommunikation von Prozessor zu Bluetooth Modul ein ganzzahliger Teiler der CPU-Clock (16 MHz) sein. Die höchstmögliche Übertragungsrate, welche die Bedingung erfüllt und von beiden Geräten unterstützt wird, ist 38400. Die Wortbreite wird auf dem Standardwert von acht Bit belassen, da sowohl die CPU als auch der Speicher mit dieser Wortbreite arbeiten. Wie die Daten übertragen werden, ist in Kapitel 5.2 beschrieben. Die Java-Applikation muss diesen Datenstrom auseinander zu trennen und die Werte korrekt abbilden.

I2C Realtime Clock

Das verwendete RTC-Modul DS3231 ist ein IC mit integriertem Quarz und I2C-Schnittstelle. Es kann direkt an diesem Datenbus angeschlossen werden. Das dazugehörige C-Modul stellt alle Funktionen zur Verfügung, um die Uhrzeit auszulesen und bei Bedarf eine neue Uhrzeit einzustellen. Das RTC-Modul arbeitet mit BCD-Codierung, weshalb beim Lesen und Speichern der Uhrzeit diese stets in Dezimalwerte gewandelt werden muss.

4-Channel-ADC

Der Mikrocontroller verfügt über diverse analoge Eingänge, welche über einen Multiplexer umgeschaltet und anschliessend quantisiert werden. Insgesamt vier solcher Eingänge werden für das Messgerät benötigt. Welchem Eingang welche Bedeutung zukommt, ist in Abbildung 2 zu sehen. Da das Wandeln ein vergleichsweise langsamer Prozess ist, werden bei einer Messung immer nur zwei Eingänge gewandelt: einer für die Spannung und einer der Strombereiche. Die Messbereiche werden softwaremässig ausgewertet und umgeschaltet. Ob sich ein Eingang im Grenzbereich befindet (Overflow bzw. Underflow), wird von einem Algorithmus detektiert. Dieser reagiert bei Bedarf und schaltet den Multiplexer auf einen anderen Messbereich um. Der Algorithmus wird anhand eines Beispiels erläutert.

An den Messshunts sind drei Verstärkerschaltungen für die Strommessung angebracht. Mathematisch betrachtet bilden diese eine Abbildung, welche ein Sinussignal im Wertebereich \hat{I} bis $-\hat{I}$ in den Bereich 0V bis 5V abbilden. Daraus folgt, dass je nach Eingangssignal am Ausgang der Verstärkerstufe ein übersteuertes oder ein zu schwaches Signal auftritt. Da das Signal einen Offset aufweist, bedeutet ein Eingangssignal von 2.5V, dass im Moment kein Strom fliesst. In Abbildung 15 ist dieses Verhalten visualisiert.

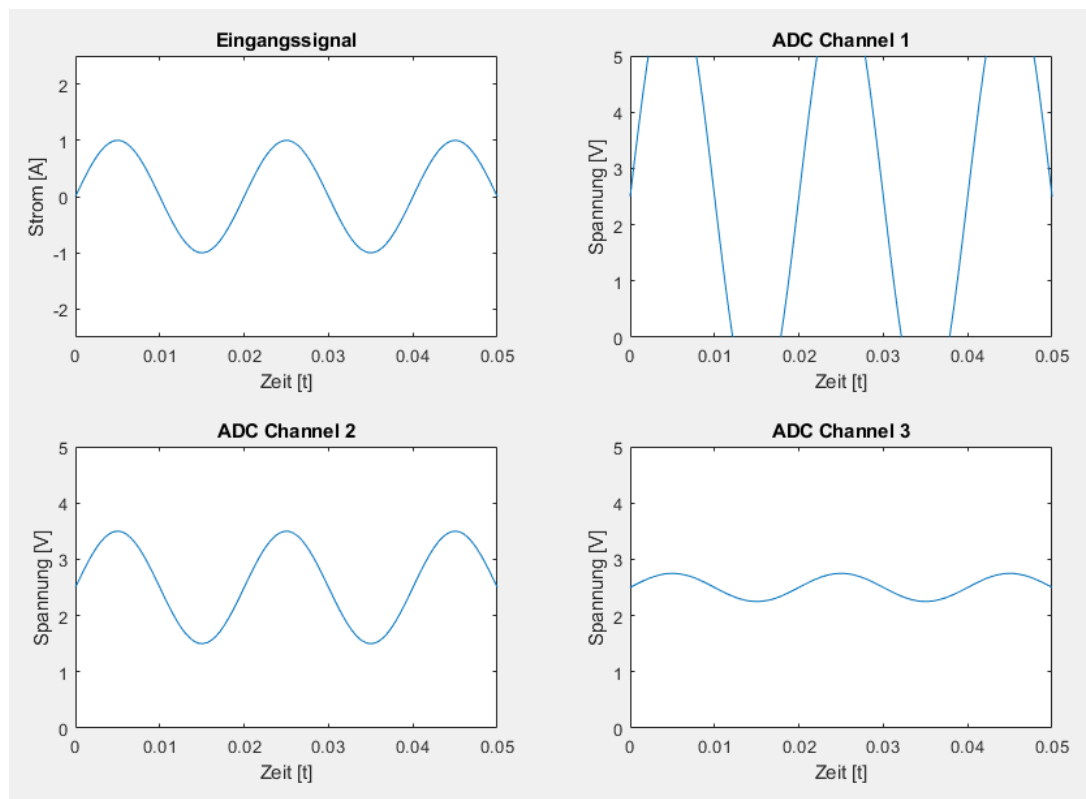


Abbildung 15: Messbereiche

Gegeben ist ein Eingangssignal mit einer Amplitude von 1A. ADC1, der Eingang für den kleinsten Bereich, übersteuert in diesem Fall und ADC3 schwankt nur gerade so um den Mittelwert. Im Falle eines Overflows liefert der ADC Werte in der Nähe von 0 und 1023 zurück. Im Underflow sind es Werte im Bereich 512. Dieses Verhalten kann von der Software detektiert werden. Sie verfügt über zwei Zähler, welche inkrementiert werden, sollte das Signal eine vordefinierte Schwelle überschreiten (roter Balken in Abbildung 15). Ist das Signal ausserhalb dieses Bereiches, werden die jeweiligen Zähler dekrementiert (können aber nicht negativ werden). Überschreitet einer der Zähler einen bestimmten Wert, so schaltet die Software den Messbereich um und setzt beide Zähler zurück.

Sinnvolle Werte für die Schaltschwelle sowie der Obergrenze des Zählers wurden experimentell bestimmt. Insbesondere problematisch sind nichtlineare Lasten, deren Stromkennlinie kein sinusförmiges Signal aufweist. In Abbildung 16 ist diese Problematik visualisiert.

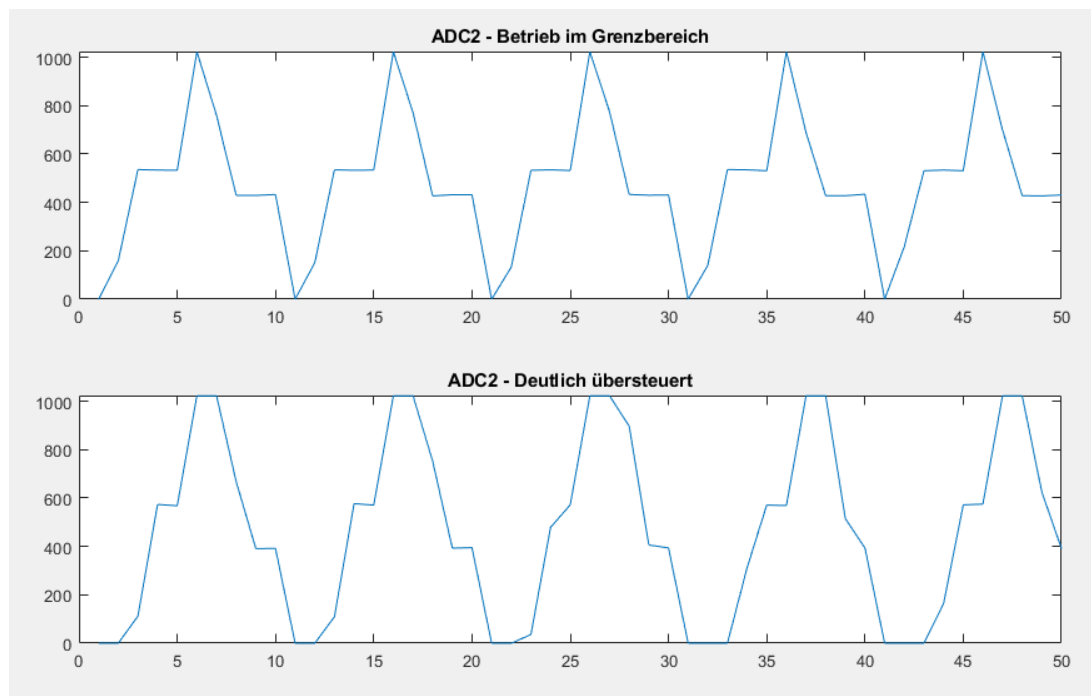


Abbildung 16: Stromkennlinie induktive Last

Zu sehen sind reale Messungen mit induktiven Lasten. Man sieht, dass ein stark übersteuertes Signal einen vordefinierten Schwellbereich deutlich seltener überschreitet. Die Obergrenze für den Zähler muss dementsprechend gering gewählt werden, damit auch bei solchen Lasten die Software den Mesbereich rechtzeitig umschaltet. Gleichzeitig dürfen die Werte nicht zu niedrig sein, damit die Software nicht zwischen zwei Messbereichen hin und her springt. Die für gut befundenen Werte sind in Tabelle 3 zu sehen. Die Zahlen der Wertebereiche sind die dezimalen Rückgabewerte der ADCs.

Schaltbereich	Overflow-Zähler	Underflow - Zähler	Overflow-Wertebereich	Underflow-Wertebereich
ADC1 - ADC2	20	20	$820 < X < 200$	Offset +/- 30
ADC2 - ADC3	20	20	$820 < X < 200$	Offset +/- 90

Tabelle 3: Threshold-Values

SPI Flashspeicher

Dieses C-Modul hat die Aufgabe, den Speicher des Messgerätes zu jeder Zeit konsistent zu halten. Beim Speichern von neuen Messwerten muss die Speicheradresse immer wieder inkrementiert werden. Im Falle, dass der Speicher voll ist, müssen neue Sektoren wieder gelöscht und bereitgestellt werden. Beim Aufstarten muss der Code den zuletzt verwendeten Speicherplatz wiederfinden, unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt das Messgerät vom Strom getrennt wurde. Um all dies sicherzustellen, sind diverse Mechanismen entwickelt und implementiert. Die grösste Aufmerksamkeit gebührte der Effizienz des Codes.

Der erste Schritt wird mit der Organisation des Speichers getätigt. Der insgesamt 221 Bit (2 MBit) grosse Speicher wird in 64 4KByte-Sektoren unterteilt. Dies ist zugleich die kleinste Einheit, welche gelöscht werden kann (Flashspeicher können nicht byteweise gelöscht werden). Der gesamte Speicher kann mit einer 24Bit-Adresse adressiert werden, wobei effektiv nur 18

Bit benötigt werden. Eine Adresse adressiert jeweils 8 Bit des Speichers. Die Aufteilung ist in Abbildung 17 zu sehen.

Sektor 0 0x00xxx 4096 Byte	Sektor 1 0x01xxx 4096 Byte	Sektor 2 0x02xxx 4096 Byte	Sektor 3 0x03xxx 4096 Byte	...	Sektor 62 0x3Exxx 4096 Byte	Sektor 63 0x3Fxxx 4096 Byte
---	---	---	---	-----	--	--

Abbildung 17: Aufteilung des Speichers

Jeder Sektor wird gleich beschrieben: Jeweils die ersten und letzten zwei Bytes sind reserviert und werden nicht mit Messdaten belegt. Das erste Byte eines jeden Sektors wird genutzt, um Statusinformationen über den Sektor zu speichern. Ab Byte Nr. 2 (Indexierung bei 0) beginnen dann die Messdaten, welche nach dem definierten Protokoll jeweils 6 Byte gross sind. Der Sektor endet somit bei Byte Nr. 4093, gefolgt von zwei leeren Speicherplätzen. Insgesamt können somit 682 Messungen pro Sektor abgelegt werden. Sind alle Sektoren voll, wird der erste Sektor gelöscht und darauf weitergeschrieben. In Abbildung 18 ist die Aufteilung eines einzelnen Sektors zu sehen.

Byte 0 0x00000 Status Flags	Byte 1 0x00001 Reserve	Byte 2 - Byte 7 0x00002 - 0x00007 1. Messung	Byte 8 - Byte 13 0x00008 - 0x0000D 2. Messung	...	Byte 4088 - Byte 4093 0x00FF8 - 0x00FFD 682. Messung	Byte 4094 0x00FFE Reserve	Byte 4095 0x00FFF Reserve
--	-------------------------------------	---	--	-----	---	--	--

Abbildung 18: Aufteilung eines Sektors

Der Gewinn dieser Organisation liegt in der Beschleunigung des Initialisierungsvorgangs. Um den zuletzt genutzten Sektor zu finden, ist es ausreichend, jeweils das erste Byte eines Sektors einzulesen. Um den aktuellen Speicherplatz zu finden, muss nur ein Byte pro Messung gelesen werden, nämlich das Byte mit der Overheadinformation. Somit muss bei der Suche des Speicherplatzes nur jedes 6. Byte gelesen werden. Im „worst case“ ist der Initialisierungsvorgang also nach 746 Lesevorgängen beendet (64 Statusbytes und 682 Overheads).

Die 4Bit des Overheads wurden so definiert, dass eine Einsfolge einen ungültigen Datensatz signalisiert. Ein leerer Speicherplatz im Flashspeicher ist logisch mit Einsen gefüllt. Das Lesen eines leeren Speicherplatzes gibt den Wert „1111 1111“ zurück. Stösst der Algorithmus beim Aufstarten auf eine Einsfolge im Overhead, ist der leere Speicherplatz gefunden.

Die Handhabung der Statusinformation eines Sektors ist etwas komplexer und wird im Folgenden genauer erläutert. Der Status wird immer in das gleiche Byte geschrieben. Ein Überschreiben im eigentlichen Sinne ist grundsätzlich nicht möglich. Wie oben erwähnt ist ein leerer Speicherplatz mit logischen Einsen gefüllt. Solange die einzelnen Bits von logisch 1 auf logisch 0 wechseln, ist ein Überschreiben möglich. Sind die Statusinformationen so gewählt, dass sie in der chronologischen Reihenfolge ihres Auftretens nur weitere Nullen hinzufügen, so können mehrere Statusinformationen im gleichen Byte gespeichert werden. Um den Speicher konsistent zu halten, werden nur vier unterschiedliche Zustände benötigt.

Bitfolge des Statusbytes	Bedeutung
11111110	Empty
11111100	Written
11111000	Full
11110000	Busy

Tabelle 4: Codierung des Overheades

Um Fehlauswertungen zu vermeiden, wird einer Bitfolge aus lauter Einsen oder Nullen keine Bedeutung zugewiesen.

Anmerkung: Wird unmittelbar nach dem Starten eines Löschvorgangs das Messgerät vom Strom getrennt, wäre es theoretisch möglich, dass beim Lesen des Statusbytes eine Einerfolge (leerer Speicherplatz) zurückgegeben wird. Weiss man aber über das Auftreten dieses Ereignisses bescheid, kann der Initialisierungsvorgang dementsprechend programmiert werden.

- Empty: Der Sektor ist gelöscht und bereit, um neue Daten aufzunehmen. Dieser Status wird nur bei einer kompletten Löschung des gesamten Speichers auf alle Sektoren geschrieben.
- Written: Der Sektor ist mit Daten gefüllt jedoch noch nicht voll. Beim Vorbereiten eines neuen Sektors wird jeweils direkt der Written-Status auf den Sektor geschrieben, auch wenn sich noch keine eigentlichen Messdaten darauf befinden.
- Full: Der Sektor ist komplett mit Messdaten gefüllt.
- Busy: Der Sektor steht gerade kurz vor einem Löschvorgang.

Der Busy-Status ist deswegen notwendig, weil ein Löschvorgang vergleichsweise langsam ist (bis zu 50 ms). Erst nach dem Abschliessen des Löschvorgangs wird dem Sektor ein neuer Status zugewiesen.

Um beim Aufstarten nun den korrekten Sektor zu finden, bedarf es der korrekten Interpretation der Statusinformationen. Was wenn während des Schreibvorgangs der Strom getrennt wird? Was wenn genau beim „wrap around“ das Gerät ausgeschaltet wird? Es gibt eine grosse Zahl von Ereignissen, welche auftreten können. Viele davon sind Spezialfälle, welche nur sehr selten sind. Trotzdem müssen diese abgedeckt sein. Hier ein einfaches Beispiel:

Das Messgerät war kurze Zeit im Betrieb gewesen. Die ersten drei Sektoren sind bereits voll. Genau als der dritte Sektor voll ist, ist das Messgerät ausgesteckt worden. Der vierte Sektor und alle darauffolgenden Sektoren haben somit als Status „Empty“. Die ersten drei Sektoren den Status „Full“.

Beim Aufstarten wird daher prioritär zuerst nach leeren Sektoren gesucht. Danach nach beschriebenen Sektoren und entgegen der Reihenfolge von Abbildung 4 werden Sektoren mit dem Status „Busy“ noch vor Sektoren mit dem Status „Full“ gesucht.

Im genannten Beispiel findet der Algorithmus schnell einen Treffer und liefert als Ergebnis den Dezimalwert 3 für den vierten Sektor (Indexierung startet bei 0!). Nun muss der Algorithmus das Statusbyte des vorherigen Sektors überprüfen. Er wird als Ergebnis den Status „Full“ bekommen. Nun ist die Information eindeutig und das Programm weiss, dass der Sektor mit der Nummer 3 der aktuelle Sektor zum Schreiben ist. Da dieser leer ist, kann die Suche nach dem Speicherplatz gestoppt werden und als Nummer für den aktuellen Speicherplatz der Wert 2 gesetzt werden. (2 deshalb, weil immer beim dritten Byte begonnen, wird Messdaten zu schreiben)

Dies ist nur ein Beispiel. Der gesamte Initialisierungsablauf ist in Abbildung 5 zu sehen. Die rot eingefärbte Linie ist der Hauptpfad und signalisiert den Normalablauf des Speicherns. Der Algorithmus liefert einen 8Bit-Wert zurück. Die ersten 6 Bit repräsentieren den Index des gefundenen Sektors, die obersten beiden Bits werden für die Codierung der Statusinformation verwendet, damit das Hauptprogramm weiss, welche Art von Status zuerst gefunden wurde. Die Codierung ist in der nachfolgenden Tabelle zu sehen.

Rückgabewert des Algorithmus	Bedeutung
00xxxxxx	Es wurden noch leere Sektoren gefunden.
01xxxxxx	Es gibt keine leeren Sektoren mehr, aber es wurde ein beschriebener Sektor gefunden. (Normalzustand)
10xxxxxx	Es wurden weder leere noch beschriebene Sektoren gefunden. Aber es wurde ein Sektor gefunden, welcher noch nicht korrekt gelöscht wurde.
11xxxxxx	Es wurde ein Sektor gefunden, bei dem der Löschvorgang nicht abgeschlossen wurde.

Tabelle 5: Rückgabewert des Algorithmus

[Grafik folgt noch]

Kurzzusammenfassung: Das Programm muss sich zur Laufzeit nur zwei Variablen merken: den aktuellen Sektor und die aktuelle Nummer des Speicherplatzes. Daraus kann jeweils die korrekte 24Bit-Adresse gebildet werden. Beim Aufstarten sucht sich ein Algorithmus diese beiden Werte und gibt diese ans Hauptprogramm weiter. Durch die Speicherorganisation ist dieser Suchvorgang sehr effizient und benötigt nur wenige Lesevorgänge. Die Speicherplatznummer wird stetig inkrementiert. Ist ein Sektor voll, so wird die Sektornummer inkrementiert und die Nummer des Speicherplatzes wieder auf 2 gesetzt. Ist der gesamte Speicher voll, so wird nach und nach der nächste Sektor wieder gelöscht, um darauf neue Daten schreiben zu können. Im Dauerbetrieb gehen dadurch die ältesten Messdaten stetig verloren.

5.4 Bediensoftware

Als Bediensoftware ist eine Java-Applikation geschrieben worden. Diese soll den Benutzern die Möglichkeit bieten, die gemessenen Daten auszulesen und in ein gebräuchliches Format zu exportieren, damit eine einfache Weiterverarbeitung der Daten ermöglicht beispielsweise in Excel oder Matlab.

Das Programm bietet drei Hauptfunktionen um mit dem P3T7 zu kommunizieren. Diese sind im Bereich 'Steuerung' zu finden. Daneben bietet das Tool die Funktion sich mit dem P3T7 zu verbinden. Die im Bereich 'Bluetooth' zu finden ist. Die restlichen Elemente dienen alle der Ausgabe. Der 'Status' visualisiert den Fortschritt des Downloads. Im Bereich 'Echtzeit' werden die aktuellen Messwerte des P3T7 angezeigt. Im dominierenden Bereich 'Plot' werden die Daten aus dem Speicher visualisiert, um dem Benutzer eine schnelle Validierung der Daten zu ermöglichen.

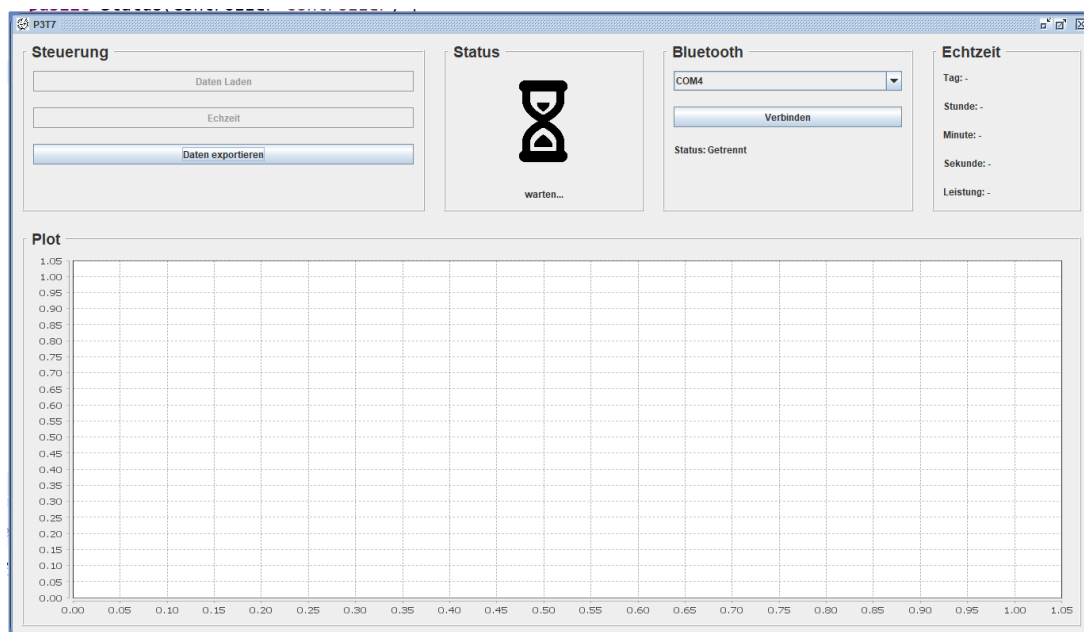


Abbildung 19: GUI der Bediensoftware

Steuerung

Mit den drei Hauptfunktionen können die Daten aus dem P3T7 extrahiert werden. Wenn ein Download gestartet wird, kann auf dem Status-Panel der Fortschritt beobachtet werden. Falls der Download abgeschlossen ist werden die Daten im Plot dargestellt. Dieser soll dem Nutzer die Sicherheit geben, dass keine falschen Daten heruntergeladen wurden. Anschliessend kann mit dem Button 'Daten exportieren' eine CSV-Datei generiert werden. Diese ist mit dem Namen 'ausgabe.txt' neben der Programmdatei zu finden. Mit dem Button 'Echtzeit' kann die Echtzeitübertragung gestartet werden. Während der Echtzeitübertragung werden jede Sekunde die aktuellen Messwerte an das Tool weitergeleitet. Diese werden anschliessend direkt im Echtzeit-Panel angezeigt.

Bluetooth

Das Bluetooth-Modul emuliert über Bluetooth eine serielle Verbindung. Um das Tool mit dem P3T7 zu verbinden muss zuerst im Betriebssystem das P3T7 gekoppelt werden. Ist dies erfolgt

kann im Tool im Bluetooth-Panel aus dem Dropdown-Menü der entsprechende ComPort ausgewählt werden. Dieser kann im Gerätemanager nachgeschaut werden. Falls ein falscher Port ausgewählt wird, vergeht eine Zeit (ca. 30s) bis das Programm den Fehler bemerkt, welche abgewartet wird.

Programmstruktur

Das Programm wurde nach dem MVC Pattern realisiert. Somit hat es praktisch keine nennenswerten strukturellen Eigenheiten bis auf das Interface für die serielle Verbindung.

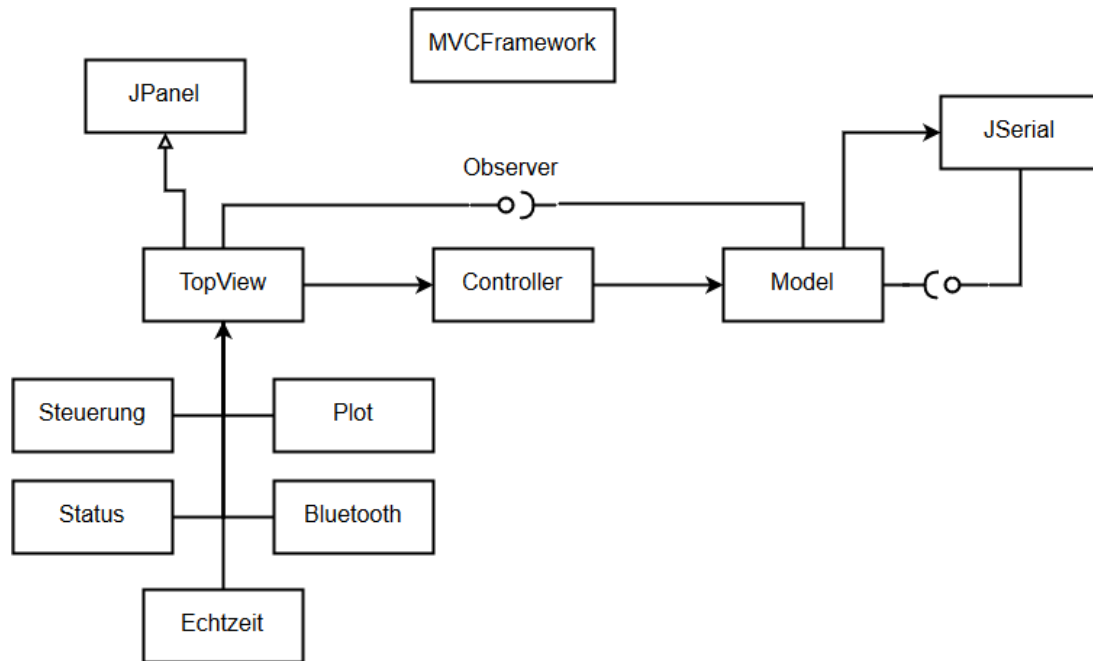


Abbildung 20: Diagramm der Bediensoftware

6 Messungen

Für die Validierung des Gerätes wurden die beiden Layers separat ausgemessen. In den nächsten Abschnitten werden die Messungen der beiden Layer kurz erläutert und die gemessenen Abweichungen zum Erwartungswert erklärt.

Erster Layer

Beim ersten Layer wurde das Netzteil, die Spannungsmessschaltung, das Relais und die Strommessschaltung, wie im Messprotokoll im Anhang ersichtlich, ausgemessen. Die Messresultate stimmten bis auf den Schaltungsteil der Strommessung mit den Erwartungswerten überein.

Bei der Strommessung wurde der Widerstand des Relais und der Sicherung vernachlässigt. Dadurch entsteht beim eingeschalteten Relais ein anderes Stromteilverhältnis als ursprünglich angenommen. Die Abweichungen lassen sich durch einen Kompensationsfaktor ausgleichen und liegen in der akzeptierbaren Toleranz. Dies heisst, der ADC wird genügend angesteuert, um eine akzeptierbare Ungenauigkeit zu erlangen.

Zweiter Layer

Beim zweiten Layer wurde die Abschneidspannung der Eingangsschutzschaltung, sowie die Verstärkung der Messkanäle gemessen. Diese Messungen sind in den Abbildungen 21 und 22 ersichtlich.

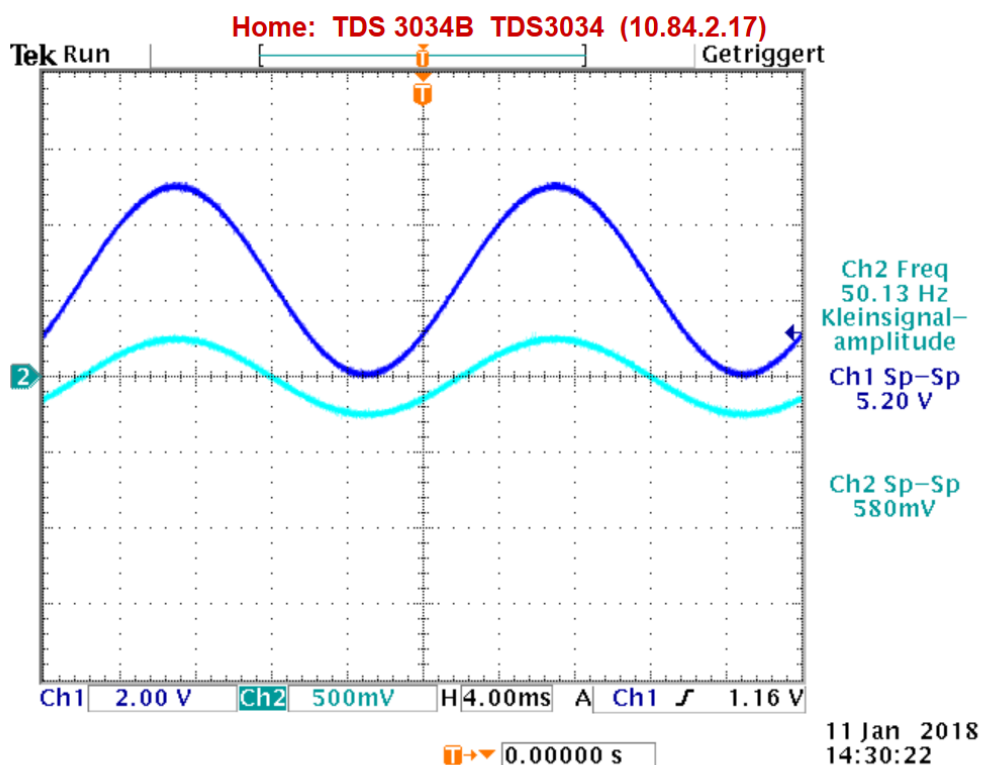


Abbildung 21: Spannungsverstärkung und DC-Einkopplung des 5A Messkanals

In Abbildung 21 ist der Ausgang (Dunkelblau) des 5A Messkanals bei einem Eingangssignal (Hellblau) von 580mV mit einer Frequenz von 50Hz abgebildet. Es ist ersichtlich, dass das Signal um den Faktor neun verstärkt und um 2.5V angehoben wird.

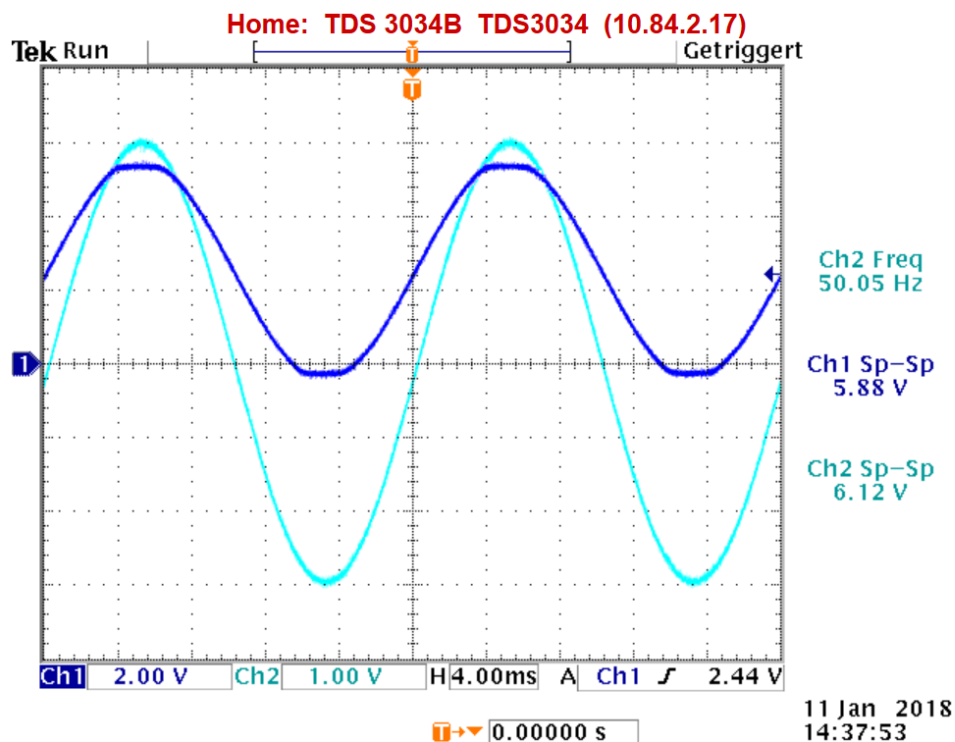


Abbildung 22: Messung der Eingangsschutzschaltung

In Abbildung 22 ist die Funktionalität der Eingangsschutzschaltung ersichtlich. Die Spannung wird bei Eingangsspannungen unter -0.3V und über +5.3V auf die respektive Spannung begrenzt. Somit kann sichergestellt werden, dass der Eingang des ADCs nie die maximal erlaubte Eingangsspannung überschreitet. Dies ist notwendig, damit die Messbereiche nicht ausgeschaltet werden müssen, wenn sie übersteuert werden.

7 Schlusswort

P3T7 wurde während des dritten Semesters im Studiengang Elektrotechnik entwickelt. Der Prototyp, welcher gebaut wurde, ermöglicht es den Energieverbrauch von einphasigen Verbrauchern über einen Zeitraum von fünf Tagen aufzuzeichnen.

Beim Erstellen des Prototyps wurde sich an den Zielen, welche im Kapitel 2 aufgelistet sind, orientiert.

Die Sollziele der Hardware konnten bis auf die Peripherie umgesetzt werden. Auf ein «Betriebs-LED» wurde verzichtet, da das Gerät nur geöffnet werden darf, wenn es sich nicht am Netz befindet. Das Netzgerät entspricht der Schutzklasse zwei, aufgrund dessen benötigt es keine Potenzialtrennung. P3T7 wurde, um zu gewährleisten, dass es am Niederspannungsnetz angeschlossen werden kann, auf $\hat{U}=400\text{V}$ und $\hat{I}=15\text{A}$ ausgelegt. Um die Schaltung vor zu grossen Strömen zu schützen, besitzt die Schaltung 3 Sicherungen (Kap. 4.1).

Die definierte Ungenauigkeit konnte für rein ohmsche Verbraucher eingehalten und im Messbereich von 5W bis 100W auf $\pm 0.5\text{W}$, im Messbereich 100W bis 800W auf $\pm 1.5\text{W}$ und im Messbereich 800W bis 2300W auf $\pm 10\text{W}$ verbessert werden. Als Referenzmessung galt das Leistungsmessgerät Voltech PM1000. Es können Leistungen bis zu $(5\pm 0.5)\text{W}$ detektiert werden. Die Referenzmessungen befinden sich im Anhang. Die auf dem EEPROM gespeicherten Daten werden per Bluetooth an ein PC-Programm gesendet, welches die verbrauchte Wirkleistung aufzeigt. Ausserdem ist es möglich, die Daten als Textfile abzuspeichern. Zudem besitzt das Programm einen Echtzeit-Modus. In diesem wird pro Sekunde die aufgenommene Wirkleistung des Verbrauchers angezeigt.

Bei nicht ohmschen Verbrauchern hat P3T7 grössere Abweichungen. Im Bereich von 5 bis 100W kann ein Fehler von ± 10 auftreten. Bei 100-2300W beträgt die Unsicherheit $\pm 50\text{W}$. Dies ist auf das Umschalten der einzelnen Messbereiche zurückzuführen. Bei Strömen, welche nur kurze Spitzen besitzen, wird der Overflow später erkannt. Dies bedeutet, dass das Umschalten der Messbereiche zu spät geschieht. Durch dies entstehen die höheren Abweichungen. Zudem lässt der Mikrocontroller nur eine Sample-Zeit von $3 \cdot 125\text{Hz}$ zu. So könnten Harmonische Schwingungen von maximal $1 \cdot 420\text{Hz}$ detektiert werden.

Durch einen leistungsfähigeren Mikrocontroller könnte man P3T7 verbessern, so wäre es möglich, höhere Oberwellen zu detektieren. Durch eine höhere Rechenleistung könnte man die einzelnen Effektiv-Werte berechnen. Dies würde das Umschalten der einzelnen Messbereiche verbessern und ermöglichen, die Scheinleistung sowie den Phasenverschiebungswinkel ϕ zu bestimmen.

8 Echtheitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, alle wörtlichen und sinngemässen Übernahmen als solche gekennzeichnet und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Datum

Unterschrift

Unterschrift

Unterschrift

Unterschrift

9 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

1	Mechanischer Aufbau	6
2	Konzept Elektrischer Aufbau	6
3	Firmware Aufbau	7
4	Konzept Software	8
5	Algorithmus um mittlere Leistung zu berechnen	9
6	Signalaufbereitungsstrecke	10
7	Blockschaltbild des ersten Layers des Leistungsmessgerätes	11
8	Frequenzgang Tiefpass-Filter 1. Ordnung	12
9	Sallen/Key-Topologie Tiefpass-Filter 2. Ordnung	13
10	Umgebautes Sallen/Key zu passivem Filter 1. Ordnung	13
11	Einkoppelung	14
12	Sicherheitsschaltung	15
13	Messpfad	16
14	Übertragungskonzept	21
15	Messbereiche	23
16	Stromkennlinie induktive Last	24
17	Aufteilung des Speichers	25
18	Aufteilung eines Sektors	25
19	GUI der Bediensoftware	28
20	Diagramm der Bediensoftware	29
21	Spannungsverstärkung und DC-Einkopplung des 5A Messkanals	30
22	Messung der Eingangsschutzschaltung	31

Tabellenverzeichnis

1	Auflösung der Messbereiche	17
2	theoretische Genauigkeit der Messbereiche	18
3	Threshold-Values	24
4	Codierung des Overheades	25
5	Rückgabewert des Algorithmus	27

Literatur

- [1] P. Schleuniger, "Analogtechnik (ant) skript," o.J, unpubliziertes Dokument.
- [2] W. Witz, *Elektronik - keine Kunst!: Grundlagen der Elektronik*. Stephan Wiki, 2015.
- [3] electronics tutorials.ws, "Active low pass filter," [Online]. [Online]. Available: http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html{Abgerufen 1.1.2017}
- [4] wikipedia.org, "Surface-mounted device," 1.1.2017. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Surface-mounted_device

10 Anhang

Der Anhang ist zu Gross, um ihn zu Drucken. Darum wird er elektronisch abgegeben. Er enthält folgende Dokumente.

Dokumente

- Pflichtenheft
- Schema
- Messprotokoll

Datenblätter

- Controller ATmega2560
- Arduino Schema ATmega2560
- Netzteil RAC04
- Mess-Schunts
- Operationsverstärker TL07
- RTC DS323
- Flash-Speicher
- Bluetooth-Modul HC-05
- Levelshifter

Source Code

- Firmware
- Bediensoftware