

## PROJEKTARBEIT 3 TEAM 7

### LEISTUNGSMESSUNG MIT DATEN-LOGGER

BENJAMIN EBELING, MARC D. BEVER, DOMINIK HILTBRUNNER, ELIAS V. DÄNIKEN

7. Januar 2018

AUFTRAGGEBER: H. GYSIN

BETREUER: M. MEIER H. GYSIN A. GERTISER B. DOMENGHINO P. SCHLEUNIGER

STUDIENGANG: ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Konzept</b>	<b>4</b>
2.1	Mechanischer Aufbau . . . . .	4
2.2	Elektrischer Aufbau . . . . .	4
2.3	Firmware Aufbau . . . . .	5
2.4	Software Aufbau . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Technische Grundlagen</b>	<b>5</b>
3.1	Hintergrund Messung . . . . .	5
3.2	Signalaufbereitung . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Analoge Schaltung</b>	<b>8</b>
4.1	Layer 1 . . . . .	8
4.2	Filter . . . . .	9
4.3	Einkoppelung . . . . .	10
4.4	Sicherheitsschaltung . . . . .	11
4.5	Genauigkeit . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Software</b>	<b>13</b>
5.1	Softwarekonzept . . . . .	13
5.2	Berechnungskonzept . . . . .	13
5.3	Übertragungskonzept . . . . .	16
5.4	Peripherie und Algorithmen . . . . .	17
5.5	Bediensoftware . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Qualitätssicherung</b>	<b>23</b>
6.1	Fertigung . . . . .	23
6.2	Messungen . . . . .	23
6.3	Bediensoftware . . . . .	23
<b>7</b>	<b>Schlusswort</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>23</b>

# 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

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über das Konzept. Es ist gegliedert in die verschiedenen Aspekte der Schaltung.

### 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.

[Bild ergänzen]

### 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 digital Bereich und der analoge Bereich. Im Digitalbereich ist die Verbindung zu den verschiedenen Bauteilen Realisiert. Es sind eine Realtimeclock, welche folgend nur noch als RTC bezeichnet wird, 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 und um die Daten nicht nicht-flüchtig zu speichern. Und das Bluetooth Modul wird gebraucht, um eine drahtlose Verbindung zum PC herzustellen. Im analogen Bereich wird die Signalaufbereitung gemacht, welche in einem separaten Kapitel behandelt wird. Die unterste Schicht ist ein Arduino Mega, welcher die Recheneinheit des P3T7 darstellt.

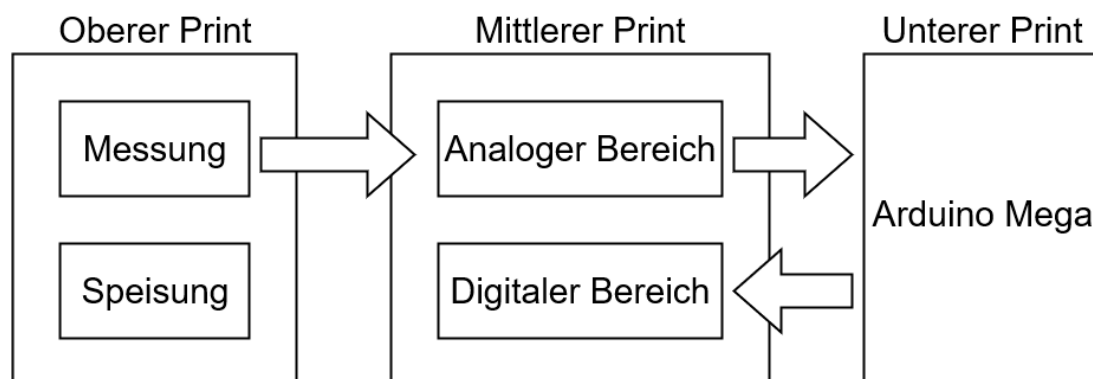


Abbildung 1: Konzept Elektrischer Aufbau

## 2.3 Firmware Aufbau

Domi neu Schreiben

[ Abbildung folgt noch ]

## 2.4 Software Aufbau

Die Software stellt die Schnittstelle zwischen dem Menschen und dem P3T7 dar. Sie soll dazu dienen die Daten aus dem P3T7 zu lesen und sie für weitere Berechnungen bereitzustellen. Damit die Daten einfach weiterverarbeitbar sind, kann mithilfe der Software ein CSV-File generiert werden. 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.

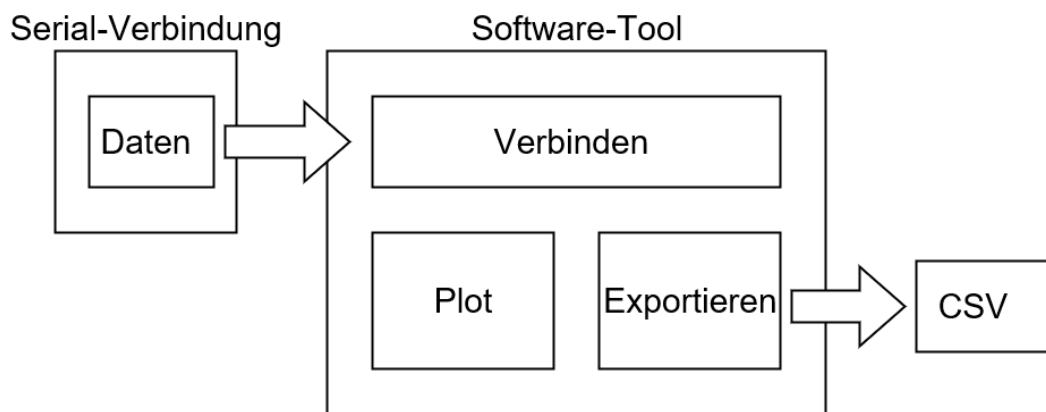


Abbildung 2: Konzept Software

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. Die Software ist nicht geeignet, um die Daten zu verarbeiten.

## 3 Technische Grundlagen

In den technischen Grundlagen kommen die verschiedenen Technologien und physikalischen Prinzipien zur Sprache, die verwendet wurden.

### 3.1 Hintergrund Messung

Die Leistung kann auf verschiedene Arten, jedoch nicht direkt gemessen werden. Dieses 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 mittels folgender Grafik aufgezeigtem Algorithmus.

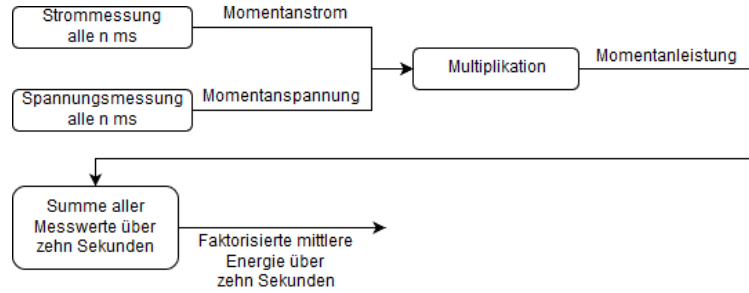


Abbildung 3: Algorithmus um mittlere Leistung zu berechnen

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, wird der Momentanstrom und die Momentanspannung alle **n** **(noch einfügen auch in Grafik)** Sekunden zusammenmultipliziert 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  $\Delta t$  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  $\Delta t$  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 Mikrocontroller 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. Die Anforderungen sind gegeben, demnach wird die Schaltung an diese angepasst. So ist die zulässige Spannung am ADC 0V bis 5V. Diese Signalaufbereitungs-Strecke ist für die Strommessung und die Spannungsmessung identisch. Der einzige Unterschied zwischen den verschiedenen Signalen liegt in der Verstärkung.

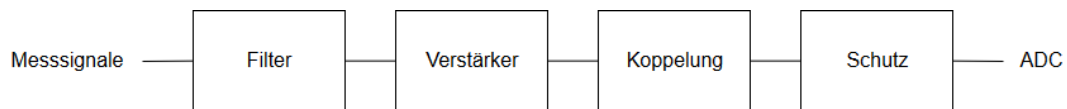


Abbildung 4: Signalaufbereitungsstrecke

### 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, wurden Nicht-Invertierende Verstärker verwendet. 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. Dies entspricht der Messstrecke vom Shunt bis an den Mikrocontroller.

### 4.1 Layer 1

Der erste Layer ist für alle Schaltungsteile mit 230V, sowie für die Verbindung nach Aussen zuständig. Abbildung 5 zeigt den groben Aufbau. Das genaue Schema befindet sich im Anhang unter **evt. Referenz hinzufügen!!!**

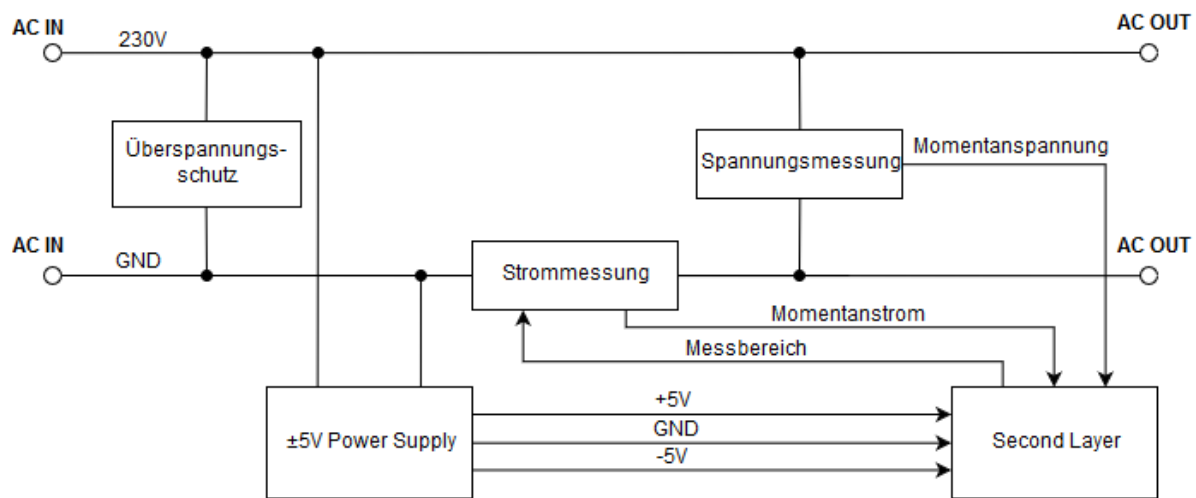


Abbildung 5: Blockschaltbild des ersten Layers des Leistungsmessgerätes

#### Überspannungsschutz:

Der Überspannungsschutz schützt das Gerät von 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 anders als geplant betrieben wird.

#### Strommessung:

Für die Strommessung stehen zwei Messschunts zu Verfügung. Zum einen ein  $50m\Omega$  Widerstand und zum anderen ein  $1m\Omega$  Widerstand, welcher mit einem Relais parallel zum Ersten geschaltet werden kann. Durch die Parallelschaltung kann der Messbereich bei Betrieb umgeschaltet werden, ohne einen Unterbruch zu erzeugen, bei welchem, aufgrund induktiven Lasten, hohe Spannungen entstehen könnten, welche die Schaltung zerstören würden. Zudem kann somit eine unterbruchfreie 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.

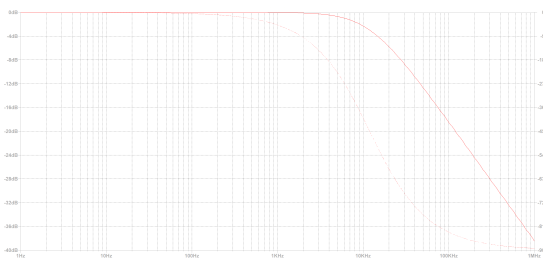


### Power Supply:

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 werden die Filter gebraucht um harmonische Oberwellen herauszufiltern. Im Projektauftrag [x] wird definiert, dass Oberwellen ab  $5kHz$  nicht mehr im Signal erwünscht sind. Darum müssen Oberwellen die eine höhere Frequenz haben, unterdrückt werden damit diesen nicht die Messung verfälschen.

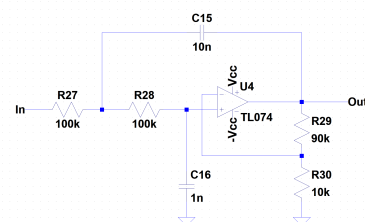


**Abbildung 6:** Frequenzgang Tiefpass-Filter 1. Ordnung

Für das Projekt sind Tiefpass-Filter notwendig die 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.[x]

### Dimensionierung

Die Wahl fiel auf Butterworth-Filter mit Sallen/Key-Topologie 2. Ordnung. Diese bietet den Vorteil, dass sie nicht invertierend ist. Dadurch ist ein Operationsverstärker ausreichend pro Signalpfad. Die Butterworth-Koeffizienten bringen den Vorteil, dass sie flach sind im Durchlassbereich und einen relativ eckigen Übergang bieten.[x] Jedoch wurde überlesen, dass mit dieser Filtertopologie nur Verstärkungen bis  $A = 3$  realisierbar sind. Bei höheren Verstärkungen können die instabil werden.

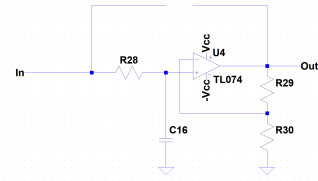


**Abbildung 7:** Sallen/Key-Topologie Tiefpass-Filter 2. Ordnung

### Realisierte Filter

Zuerst wurden die Sallen/Key-Filter realisiert. An den Operationsverstärker wurden praktisch keine Anforderungen gestellt. Er soll ein GWP[x] von mindestens  $800kHz$  besitzen und nicht Rail-to-Rail sein. Dadurch wurde einer verwendet der an Lager war. Dies ist der TL074, der praktischerweise 4 Operationsverstärker in einem Gehäuse vereint. Die passiven Bauteile wurden mithilfe einer Formel[x] aus dem Internet erstellt, die sich im Laufe des Projektes als falsch herausstellte.

Nachdem der Print gefertigt war, wurde beim Testen festgestellt, dass die Filter instabil laufen aufgrund den zu hohen Verstärkungsfaktoren. 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 8:** Umgebautes Sallen/Key zu passivem Filter 1. Ordnung

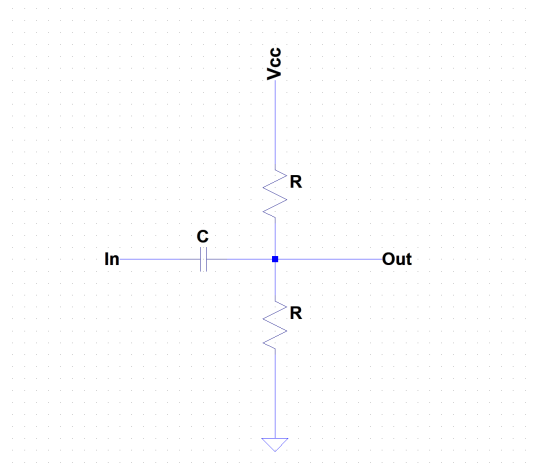
Die Dimensionierung der neuen Schaltung ist mithilfe der nachfolgenden Formel geschehen. Die Verstärkungen konnten beibehalten werden. Die passiven Filter mussten neu berechnet werden.[x]

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

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

### 4.3 Einkoppelung

Das Signal nach der Filterung und der Verstärkung beträgt  $\pm 2.5V$ . Um dieses Signal anzuheben auf eine für den Mikrocontroller verträgliche 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.



Um diese Schaltung zu dimensionieren, muss sie auf zwei Arten betrachtet 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.

**Abbildung 9:** Einkoppelung

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. Der grösste Kondensator an Lager 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, welches hochfrequente Störungen abhalten soll. Die Grenzfrequenz dieses Filters muss höher sein, als die Grenzfrequenz des ersten Filters, damit es nicht das Signal verfälscht.

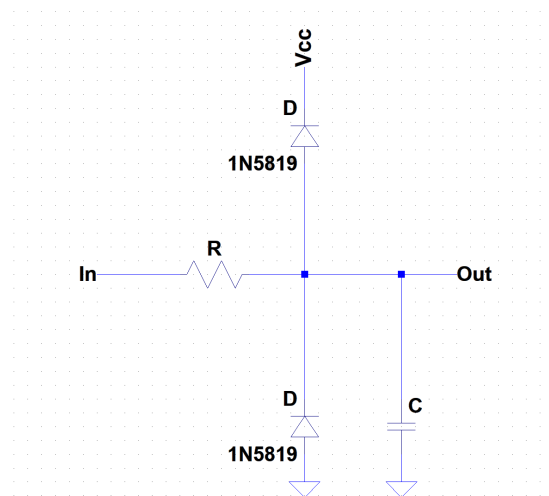


Abbildung 10: Sicherheitsschaltung

## 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. Die nachfolgende Grafik zeigt den Messpfad mit den möglichen Teilen, in welchen Ungenauigkeiten entstehen können und werden.

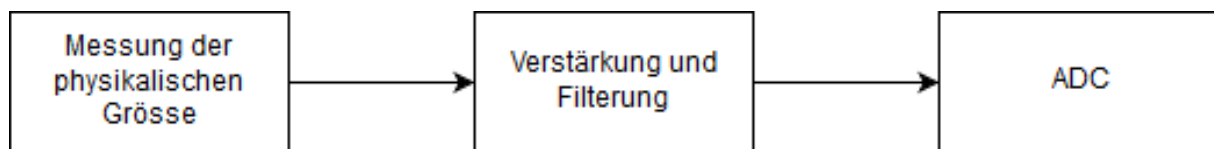


Abbildung 11: Messpfad

Nachfolgend werden die möglichen Fehler der einzelnen Blöcke in Abbildung 11 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 unter **!Noch einfügen!!!** ersichtlich, lässt sich der Strom über das Ohmsche Gesetz  $I = \frac{U_{mess}}{R_{mess}}$  berechnen und die Spannung über einen Spannungsteiler  $U = U_{mess} \cdot \frac{R_{tot}}{R_{mess}}$ . Somit ergeben die Toleranzen der Widerstände eine konstante faktorielle Ungenauigkeiten, welche durch eine Multiplikation im Mikrocontroller beheben wird.

### Verstärkung und Filterung

**!!!!Noch schreiben!!!**

### ADC

Bei der Konvertierung eines analogen Signals zu einem Digitalen gibt es zwangsläufig einen Informationsverlust durch die Quantisierung des Signals. Da für dieses Gerät ein 10Bit-ADC

verwendet wird, hat das digitale Signal eine Auflösung von 1024 Werten. Für eine Spannung von  $\pm 333\text{V}$  bedeutet dies eine Auflösung von  $0.65\text{V}$ . Für den Strom ergeben sich folgende Ungenauigkeiten: Der  $\pm 15\text{A}$  Messbereich, ergibt eine Genauigkeit von  $19.5\text{mA}$ , der  $\pm 5\text{A}$  Bereich, eine von  $9.77\text{mA}$  und der Bereich von  $\pm 1\text{A}$ , eine Genauigkeit von  $1.95\text{mA}$ .

### **Resultierende Genauigkeit**

**!!Noch schreiben!!!!**

## 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 Softwarekonzept

Es kann in drei Betriebszustände unterschieden werden: 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 folgt noch ]

### 5.2 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. Im Folgenden 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, welche Operationen auf Gleitkommazahlen direkt anwenden kann. Die erste Optimierung sorgt 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 Analog-digital-Wandlers. 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 Abbildung 12 entnommen werden.

Analoger Eingang	Beschreibung	Wertebereich	$r_{ADCn}$ Auflösung pro Bit
ADC0	Spannung	-400V bis 400V	$0.78125 \frac{V}{Bit}$
ADC1	Kleinster 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	$0.029296875 \frac{A}{Bit}$

**Abbildung 12:** theoretische Genauigkeit der Messbereiche

Das Messgerät speichert keine Strom- oder Spannungswerte ab, sondern nur die Leistung. Die Werte von Abbildung 12 können deshalb noch für jeden Bereich multipliziert werden. Man erhält dadurch die Genauigkeit der Leistung pro Bit.

$$R_{ADC1} = r_{ADC0} \cdot r_{ADC1} = 0.000762939 \frac{W}{Bit} \quad (8)$$

$$R_{ADC2} = r_{ADC0} \cdot r_{ADC2} = 0.007629394 \frac{W}{Bit} \quad (9)$$

$$R_{ADC3} = r_{ADC0} \cdot r_{ADC3} = 0.022888184 \frac{W}{Bit} \quad (10)$$

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 11 gegeben. Die Eingangsspannung variiert je nach Wertebereich und kann durch Formel 12 reproduziert werden. Zur übersichtlicheren und allgemeinen Darstellung wurde dem realen Signal die Variable x zugeordnet.

$$ADC = \frac{U_{IN} \cdot 2^{10}}{U_{ref}} \quad (11)$$

$$U_{IN} = \frac{U_{ref}}{x_{max} - x_{min}} \cdot \left( x + \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \right) = \frac{U_{ref} \cdot x}{x_{max} - x_{min}} + \frac{U_{ref}}{2} \quad (12)$$

- 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 12 gezeigt ist. Da die Analogschaltung ein offsetbelastetes Eingangssignal liefert (2.5V am ADC entsprechen 0A bzw. 0V), muss dieser entfernt werden. Die beiden Gleichungen 11 und 12 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 12 gezeigten Genauigkeit pro Bit. Da nach der Offsetentfernung das System nun linear ist, können die Dezimalwerte der einzelnen Eingänge ebenfalls multipliziert werden. Somit gilt:

$$p_i = (ADC0 - 512) \cdot (ADCn - 512) \cdot r_{ADC0} \cdot r_{ADCn} = (ADC0 - 512) \cdot (ADCn - 512) \cdot R_{ADCn} \quad (13)$$

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:

$$E = \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} p_i \cdot \Delta t = \sum_{i=1}^{f_s \cdot t_s} (ADC0 - 512) \cdot (ADC1 - 512) \cdot R_{ADCn} \cdot \frac{1}{f_s} \quad (14)$$

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

Formel 14 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 13 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.

$$\bar{P} = \frac{E}{t_s} = B \cdot \frac{R_{ADCn}}{f_s \cdot t_s} \quad (15)$$

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 3 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:

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 Fließkommarechnens in Kauf und wandelt den Dezimalwert gemäss Formel 15 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 4 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 3 Strombereiche verfügt, werden während des Messens auch 3 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.

### 5.3 Übertragungskonzept

Die zweite Optimierung befasst sich mit dem sparsamen Speichern und Übertragen der Daten. 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 Aufgabe der Software, diesen Bitstrom wieder zu trennen und korrekt zu interpretieren. In Abbildung 13 ist die Aufteilung des Bitstroms zu sehen.

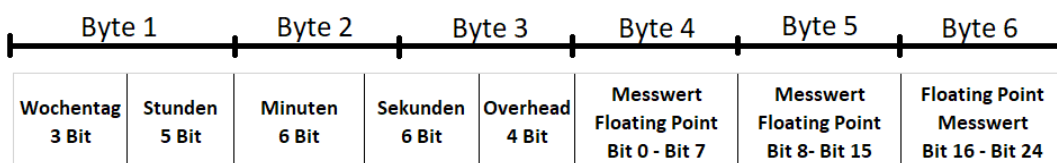


Abbildung 13: Übertragungskonzept

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 8 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. Bis 8. Nachkommastelle handelt. Diese Genauigkeit kann gar nicht erreicht werden, weshalb diese Information auch nicht gespeichert wird.

[Hier folgt noch die Bedeutung des Overheads]

## 5.4 Peripherie und Algorithmen

Die Funktionen zur Kommunikation mit der Peripherie sowie einige kleine Algorithmen wurden zwecks Programmübersicht in externe C-Module gepackt. Auf die Verwendung von externen Bibliotheken wurde komplett verzichtet. 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, welcher nur gerade die Funktionen beinhaltet, welche das Messgerät benötigt.

Der Prozessor muss mit 3 Peripheriegeräten kommunizieren. Das erste Modul ist eine Realtime Clock, welche am I2C-Bus betrieben wird. Zur Speicherung steht ein Flashspeicher mit SPI Schnittstelle zur Verfügung. Zuletzt das Bluetooth Modul, über welches 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.

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 wurden 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 8Bit gelassen, da sowohl die CPU als auch der Speicher mit dieser Wortbreite arbeiten. Wie die Daten übertragen werden, wurde bereits in Kapitel x.3 beschrieben. Die Java-Applikation muss diesen Datenstrom auseinandernehmen 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 12 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. Diese sind so konzipiert, dass sie 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 14 ist dieses Verhalten visualisiert.

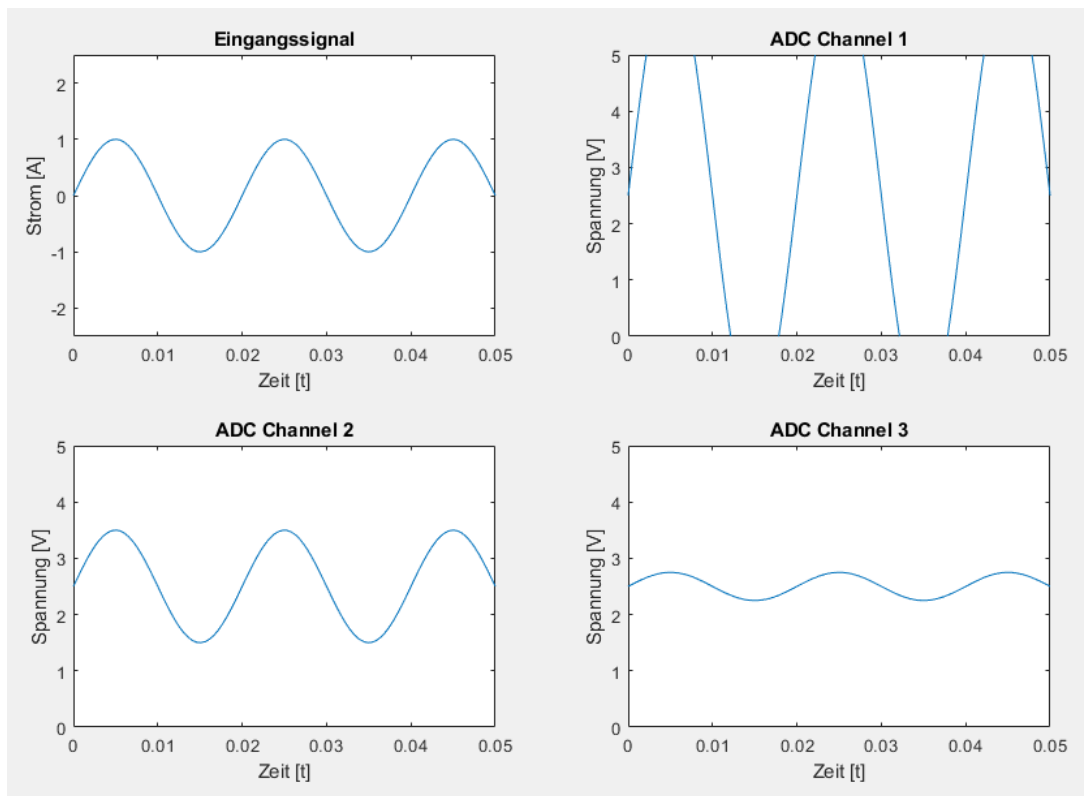


Abbildung 14: Messbereiche

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 des AD-Bereiches. Für die Software bedeutet dies, dass im Falle eines Overflows der ADC immer wieder den Wert 0 oder 1023 zurückliefert. Im Falle des Underflows erhält das Hauptprogramm Werte im Bereich von 512. Dieses Verhalten kann detektiert und ausgewertet werden. Der Algorithmus zählt die Anzahl an Overflow-Durchgängen bzw. die Anzahl der Underflow-Durchgänge. Ist das Signal ausserhalb dieser Bereiche, werden die gezählten Durchgänge wieder dekrementiert. Überschreitet der Zähler einen definierten Wert, wird der Multiplexer umgeschaltet und somit ein anderer analoger Eingang ausgewertet. Die Anzahl an Durchgängen ist Erfahrungssache und wurde experimentell bestimmt.

[Hier Zahlen]

Hinweis: Der Nullwert von 512 ist nur theoretisch. Welcher Wert die verschiedenen Messbereiche liefern, wird ebenfalls experimentell bestimmt und in der Software entsprechend korrigiert.

### 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, wurden diverse Mechanismen entwickelt und implementiert. Die grösste Aufmerksamkeit wurde wieder der Effizienz des Codes gewidmet.

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 15 zu sehen.

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

Abbildung 15: 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 16 ist die Aufteilung eines einzelnen Sektors zu sehen.

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

Abbildung 16: 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 Einserfolge einen ungültigen Datensatz signalisiert. Ein leerer Speicherplatz im Flashspeicher ist logisch mit Einsen gefüllt. Das Lesen eines leeren Speicherplatzes gibt einem den Wert „1111 1111“ zurück. Stösst der Algorithmus beim Aufstarten auf eine Einserfolge 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, könne mehrere Statusinformationen im gleichen Byte gespeichert werden. Um den Speicher konsistent zu halten, werden nur 4 unterschiedliche Zustände benötigt.

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

**Abbildung 17:** Codierung des Overheades

Um Fehlauswertungen zu vermeiden, wird eine 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 Einserfolge (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 vorkommen. Trotzdem müssen diese abgedeckt sein. Hier ein einfaches Beispiel:

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

Beim Aufstarten wird prioritär zuerst nach leeren Sektoren gesucht. Danach nach beschriebenen Sektoren und entgegen der Reihenfolge von Abbildung 17 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 sich die Suche nach dem Speicherplatz gespart 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 18 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.

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

**Abbildung 18:** Rückgabewert des Algorithmus

[ Grafik folgt noch ]

Zuletzt nochmals eine schnelle Zusammenfassung:

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 zu schreiben. Im Dauerbetrieb gehen dadurch die ältesten Messdaten stetig verloren.

## 5.5 Bediensoftware

Als Bediensoftware wurde eine Java-Applikation geschrieben. Diese soll den Benutzern die Möglichkeit bieten, die gemessenen Daten auszulesen und in ein gebräuchliches Format zu exportieren. Das ermöglicht eine einfache Weiterverarbeitung der Daten 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.

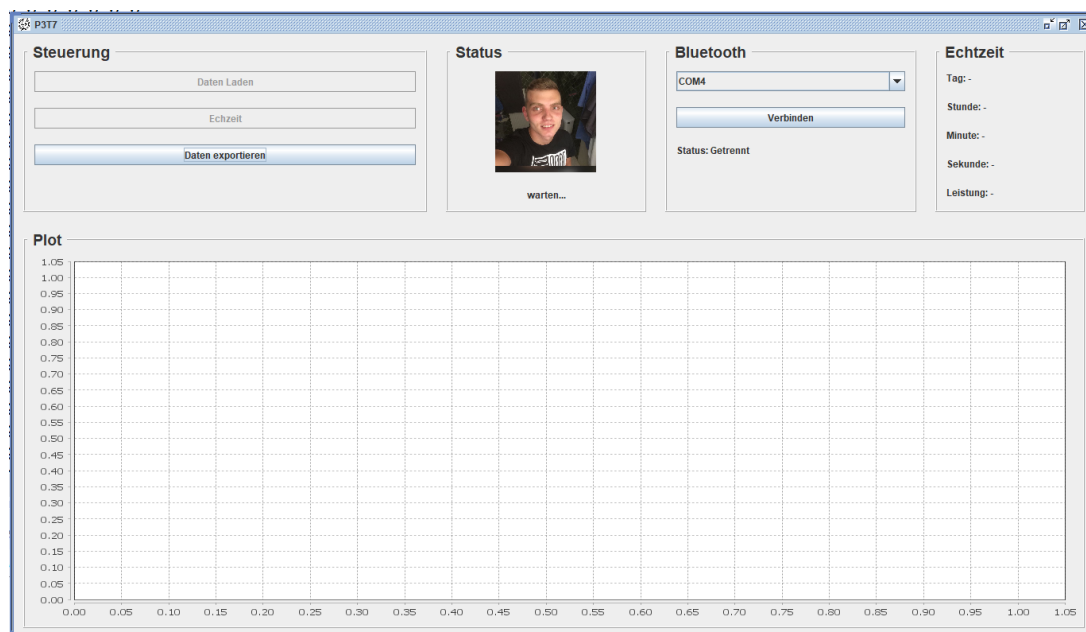


Abbildung 19: GUI der Bediensoftware

### 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 wird 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

