

# **BACHELORARBEIT**

im Studiengang BEW

## **Entwicklung und Vergleich eines Optischen Puls-Sensors**

Ausgeführt von: Andreas Schreiber  
Personenkennzeichen: 1110255058

BegutachterIn: Dipl.-Ing. Christoph Veigl

Wien, 20.Jänner 2014

## Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Ich versichere, dass die abgegebene Version jener im UploadTool entspricht.“

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Optischen Puls-Sensors. Das Pulssignal soll über einen vorgegebenen elektrischen Schaltplan aufgenommen, verstärkt, gefiltert und anschließend über einen Mikroprozessor digitalisiert werden. Danach soll das digitalisierte Pulssignal über das OpenEEG P2 Format an den PC übermittelt werden. Mithilfe des Open Source - Programmes „Brainbay“ soll das Pulssignal dargestellt werden. Der Schaltplan des Optischen Puls-Sensors stammt von Scott Harden [1].

Zusätzlich soll noch ein käuflich erwerblicher Optischer Puls-Sensors von pulsesensor.com analysiert und die Ergebnisse mit jenen des selbst aufgebauten Sensors verglichen werden.

# Abstract

This bachelor thesis concerns with the development of an Optical Pulse Sensor. The pulse signal should be recorded, amplified and filtered with a predefined electrical schematic and will then be digitalized via a microcontroller. The digitalized pulse signal should be transmitted in OpenEEG P2 format to the PC. Then it will be displayed with the open source program “Brainbay”. The electrical schematic of the Optical Pulse Sensor was created by Scott Harden [1].

Furthermore a purchasable Optical Pulse Sensor from pulsesensor.com should be analyzed and the results should be compared with the Optical Pulse Sensor of Scott Harden.

# 0 Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	3
Abstract.....	3
0      Inhaltsverzeichnis .....	4
1      Aufgabenstellung .....	6
2      Theoretische Grundlagen.....	7
2.1      Funktionsweise eines Optischen Puls-Sensors.....	7
2.1.1      Photoplethysmographie .....	7
2.1.2      Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) .....	8
2.1.3      Elektrokardiographie .....	8
2.1.4      Methodenauswahl.....	9
2.2      Materialien .....	10
2.2.1      Die Schaltung von Scott Harden .....	10
2.2.2      Der Mikrocontroller.....	11
2.2.3      Die Entwicklungsumgebung.....	11
2.2.4      Das OpenEEG P2 Format.....	11
2.2.5      Brainbay.....	12
2.2.6      HTerm.....	12
2.2.7      Eagle .....	12
3      Scott Harden - Optical Pulse Sensor.....	13
3.1      Aufbau .....	13
3.1.1      Die virtuelle Masse.....	14
3.1.2      Der Sensor.....	14
3.1.3      Der Vorverstärker.....	15
3.1.4      Der veränderbare Tiefpass und Impedanzwandler .....	15
3.1.5      Der Integrierverstärker .....	16
3.2      Messergebnis .....	18
3.3      Zusammenfassung .....	20
3.4      Verbesserungsvorschläge.....	21

4	pulsesensor.com - Optical Pulse Sensor.....	22
4.1	Der Aufbau.....	22
4.2	Messergebnisse.....	24
4.3	Zusammenfassung .....	27
5	Firmware Implementierung.....	28
5.1	Konfiguration des Teensy2.0++ .....	28
5.2	Die Programmierung .....	29
5.3	Die Übertragung mittels OpenEEG P2 Format .....	31
5.4	Die Darstellung des Signals mittels Brainbay .....	32
5.5	USB-Libraries .....	32
5.5.1	LUFA .....	32
5.5.2	USB Funktionalität des AT90usb1286 Controllers.....	33
6	Conclusio .....	33
7	Literaturverzeichnis .....	34
8	Abbildungsverzeichnis .....	37

# 1 Aufgabenstellung

Diese Arbeit handelt von der Entwicklung eines Optischen Puls-Sensors.

Als Basis dient der Schaltplan von Scott Harden [1]. Das dabei entstehende Pulssignal soll mit dem Mikrocontroller „Teensy++2.0“ [2] digitalisiert und mittels Übertragungsprotokoll „OPENEEG\_P2“ [3] (siehe Kap. 2.2.3) an den PC übermittelt werden. Mithilfe des Freeware Programmes „Brainbay“ [4] (siehe Kapitel. 2.2.4) soll dann das Signal dargestellt werden. Als Vergleichsbasis wird der kommerziell erhältliche Puls-Sensor von pulsesensor.com verwendet.

Es sollen die Unterschiede im Messergebnis und im Aufbau erläutert werden.

Das Hauptaugenmerk der Arbeit wird jedoch auf den Aufbau und die Messung des Puls-Sensors von Scott Harden gelegt.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Funktionsweise eines Optischen Puls-Sensors

Eines der wichtigsten Module eines Puls-Sensors ist die Schnittstelle zwischen Mensch und Sensor. In der heutigen Zeit gibt es viele Methoden den Herzschlag in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Die drei bekanntesten Methoden, die in der heutigen Medizintechnik Anwendung finden, werden hier erläutert.

#### 2.1.1 Photoplethysmographie

Bei dieser Methode wird mit einer LED ein Licht erzeugt. Dieses Licht durchleuchtet einen Finger. Mit einem Fototransistor wird proportional zu den Lichtverhältnissen ein analoges Signal erzeugt. Es gibt zwei Varianten wie die Messung erfolgen kann:

Der Finger wird zwischen der LED und dem Fototransistor platziert (siehe Abb.1)

Die LED und der Fototransistor befinden sich auf derselben Seite des Fingers. (siehe Abb.2).

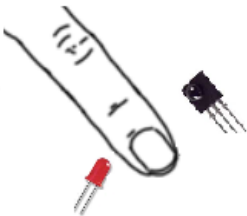


Abbildung 1:  
Messung\_mittels\_Durchleuchten

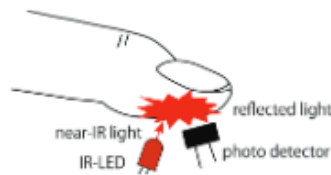


Abbildung 2: Messung\_mittels\_Reflexion [5]

Bei der ersten Variante wird das Licht, das durch den Finger leuchtet, gemessen.

Bei der zweiten Variante wird das reflektierte Licht des durchfließenden Blutes gemessen.

Der durch den Herzschlag verursachte Blutfluss erweitert bzw. entspannt die Arterien und Venen. Dadurch ergibt sich eine unterschiedlich starke Lichteinstrahlung am Fototransistor. Der Fototransistor verändert je nach Lichteinstrahlung proportional den Durchfluss des „Photostroms“, der durch den Kollektorstrom (eine Art Multiplikator) verstärkt wird. Deshalb verändert sich der Strom proportional zum Pulssignal. Dieses Signal muss verstärkt und gefiltert werden. [1]

Diese Methode wird in der wissenschaftlichen Arbeit mit dem Titel: „Mouse with Photo-Plethysmographic surfaces for unobtrusive stress monitoring,“ von den Autoren Chigira, M., Kobayashi und A. Maedav verwendet. Es wird eine Computermouse so präpariert, dass sie den „Stress-Level“ des Benutzers während normaler PC-Tätigkeit messen kann. [5]

### 2.1.2 Nahinfrarotspektroskopie (NIRS)

Die Nahinfrarotspektroskopie ist ein Verfahren welches z.B. den Wassergehalt eines Stoffes misst. NIRS findet nicht nur in der Medizintechnik Anwendung. Sie wird z.B. auch für Qualitätsanalysen in der Nahrungsmittelindustrie oder zur Materialerkennung bei modernen Verfahren der Mülltrennung verwendet.

Durch eine elektromagnetische Strahlung im nahen infraroten Bereich (760–2500 nm bzw. ca.  $13.000\text{--}4.000\text{ cm}^{-1}$ ) werden die Moleküle des Stoffes zum Schwingen angeregt. Dabei werden die entstehenden Oberton- und Kombinationsschwingungen mithilfe von statistischen Verfahren ausgewertet.

In der Medizintechnik wird die Nahinfrarotspektroskopie verwendet um den Sauerstoffgehalt, das Blutvolumen und den Blutfluss eines Gewebes zu messen.

Es wird mit Hilfe des nahinfraroten Spektrums des Lichtes das Gewebe durchleuchtet. Umso mehr Hämoglobin bzw. Blut im Gewebe ist umso lichtundurchlässiger wird es.

Dadurch lässt sich wie in der Photoplethysmographie indirekt der Pulsschlag messen. [6] [7]

In der wissenschaftlichen Arbeit von Ning Cao und Tianxin Gao wird die Nahinfrarotspektroskopie verwendet um eine neue Methode der Lichtausbreitung im menschlichen Körper darzustellen. Basierend auf dieser Methode wird ein Oximeter entwickelt. [8]

### 2.1.3 Elektrokardiographie

Die Elektrokardiographie ist eine weitere Methode in der heutigen Medizintechnik um den Herzschlag zu messen und zu analysieren.

Der Herzschlag wird ausgelöst durch einen elektrischen Impuls des Sinusknoten, der im rechten Vorhof liegt. Diesen elektrischen Impuls kann man noch an der Haut messen. Mit jedem Herzschlag verändert sich das Potential der Spannung an der Haut. Diese Unterschiede sind jedoch sehr schwach (0,5mV - 1mV) [9] und müssen verstärkt und gefiltert werden. [10] [11]

In folgender Abbildung werden die Richtungen der Erregungsausbreitung, von den einzelnen Herzabschnitten ausgehend, vom Sinusknoten dargestellt [12]. Proportional dazu wird das Pulssignal dargestellt.



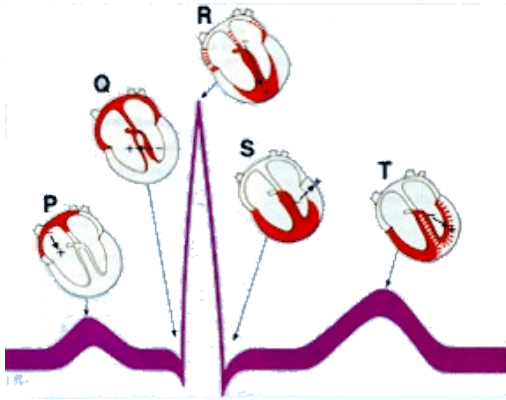


Abbildung 3: Erregungsausbreitung und EKG [12]

In der wissenschaftlichen Arbeit von Lew, C.K. und Moghavvemi, M. mit dem Titel „Remote heart rate monitoring system based on electrocardiography“ findet diese Technik Anwendung. Es wird mithilfe der Elektrokardiographie die Pulsrate eines Patienten überwacht und ein passendes Elektrokardiogramm dazu erstellt. Diese Daten werden über Funk zu dem überwachenden Computer gesendet. [9]

## 2.1.4 Methodenauswahl

In dieser Arbeit wird die Pulserkennung via Photoplethysmographie realisiert. Diese Methode wird auch bei dem Puls-Sensor von Scott Harden als auch von pulsesensor.com verwendet. Sie ist auch die einfachste Methode zur Realisation eines sauberen Signals.

## 2.2 Materialien

Für die Entwicklung des Programmes, die Digitalisierung des analogen Signals und für die Übermittlung zum PC wurden folgende Materialien verwendet.

### 2.2.1 Die Schaltung von Scott Harden

Die Schaltung benötigt vier Operationsverstärker (OPV), deshalb wurde der IC „LM344N“ [13] verwendet. Dieser besitzt vier integrierte Operationsverstärker.

Des Weiteren wurden folgende Bauteile zur Realisierung der Schaltung verwendet.

Bauteil	Wert	Anzahl
LED Super Flux 70		1
PT331C Fototransistor		1
IC LM324		1
Schottky-Diode		2
Kondensator	22 $\mu$ F	2
Kondensator	0,22 $\mu$ F	1
Potentiometer	10k $\Omega$	1
Widerstand	100k $\Omega$	2
Widerstand	1,8M $\Omega$	1
Widerstand	100 $\Omega$	1
Widerstand	150 $\Omega$	2
Widerstand	1,5k $\Omega$	1
Widerstand	220 $\Omega$	1
Widerstand	680 $\Omega$	1

Abbildung 4: Scott\_Harden\_Puls-Sensors\_Stückliste

### 2.2.2 Der Mikrocontroller

Für die Digitalisierung der Daten wird der Teensy++2.0 der Firma pjrc [14] verwendet. Der Teensy++2.0 (siehe Abbildung 2) ist ein USB-fähiger Mikrocontroller in kompakter Größe. Der Teensy++2.0 besitzt folgende Kenngrößen [2] :

Prozessor: AT90USB1286, 8 Bit AVR, 16 MHz

Flash Memory: 130048

RAM Memory: 8192

EEPROM: 4096

I/O: 46,5 Volt

Analog In: 8

PWM: 9

UART, I2C, SPI: 1, 1, 1



Abbildung 5: Teensy++ 2.0

Der Mikrocontroller wird mittels USB Spannung (5V) versorgt. Diese Kennzahlen sind für die benötigte Funktion mehr als ausreichend.

### 2.2.3 Die Entwicklungsumgebung

Als integrierte Entwicklungsumgebung wurde AVR Studio 4 verwendet. AVR Studio ist kostenlos und ist für die Programmierung von AVR-Mikrocontrollern ausgelegt. Es können sowohl in Assembler als auch in C/C++ Projekte realisiert werden. [15]

### 2.2.4 Das OpenEEG P2 Format

Das OpenEEG P2 Format ist ein offenes Übertragungsprotokoll der OpenEEG - Community. Ein Paket besteht aus 17Bytes:

- Die Bytes 0 - 1 werden zur Resynchronisierung verwendet, falls die Verbindung unterbrochen wird.
- Das 2. Byte ist für die Version des Protokolls reserviert.
- Das 3. Byte ist der Paketzähler.
- Die Bytes 4 - 15 sind für 6 Nutzdaten vom Datentyp „uint16\_t“ reserviert. Diese müssen um korrekt erkannt zu werden in Big-Endian Format gespeichert werden.
- Das 16. Byte ist für den Status der Switches zuständig. [3]

Dieses Protokoll wird ebenfalls von der Open Source App „Brainbay“ unterstützt. [3]

## 2.2.5 Brainbay

Brainbay ist eine von der OpenEEG Community entwickelte Anwendung, um Bio- bzw. Neurofeedback, aus gewonnenen Biosignal-Messdaten, zu erhalten.

Es können bioelektrische Signale, Daten von Messsensoren, oder auch visuelle Informationen (Webcam) verarbeitet werden.

Für die Entwicklung wird Brainbay verwendet, um das digitalisierte Signal graphisch am Computer darzustellen. [4]

## 2.2.6 HTerm

HTerm ist ein Freeware Terminal-Programm für die serielle Schnittstelle, mit Unterstützung für beliebig viele (virtuelle) RS232-Ports. Die Ein- und Ausgabe erfolgt wahlweise in ASCII, Hex, Binär oder Dezimal. [16]

In Abbildung 5 sieht man einen Screenshot des Programmes HTerm.

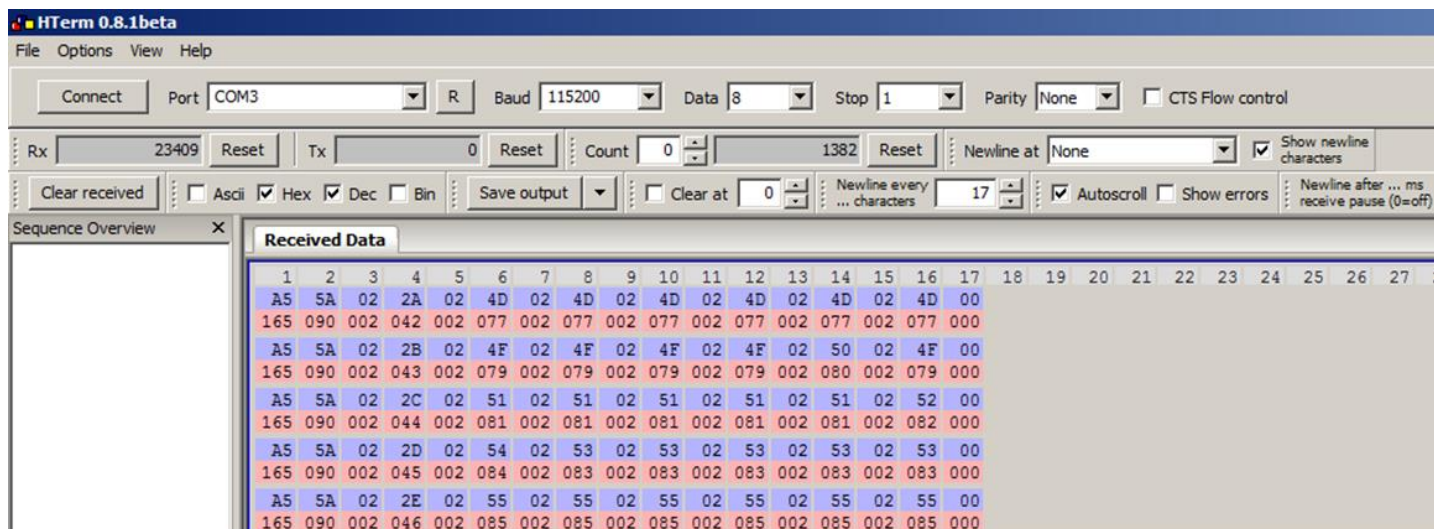


Abbildung 6: Screenshot\_HTerm

## 2.2.7 Eagle

Eagle [17] ist ein Layout und Schaltplan Editor für elektrische Anwendungen.

Bauteile die nicht in den Bibliotheken zu finden sind, können mit dem Bauteil Editor erzeugt und eingebunden werden.

### 3 Scott Harden - Optical Pulse Sensor

Als Basis für die Puls-Sensor Schaltung diente der Schaltplan von der Webseite [1] von Scott Harden. Im nächsten Kapitel werden die Anpassungen angeführt.

#### 3.1 Aufbau

Die Signalverarbeitung des Optischen Puls-Sensors besteht aus fünf verschiedenen Einheiten.

Die Versorgungsspannung wurde mit 12V gewählt.

Die gesamte Schaltung wurde auf einem Steckbrett aufgebaut.

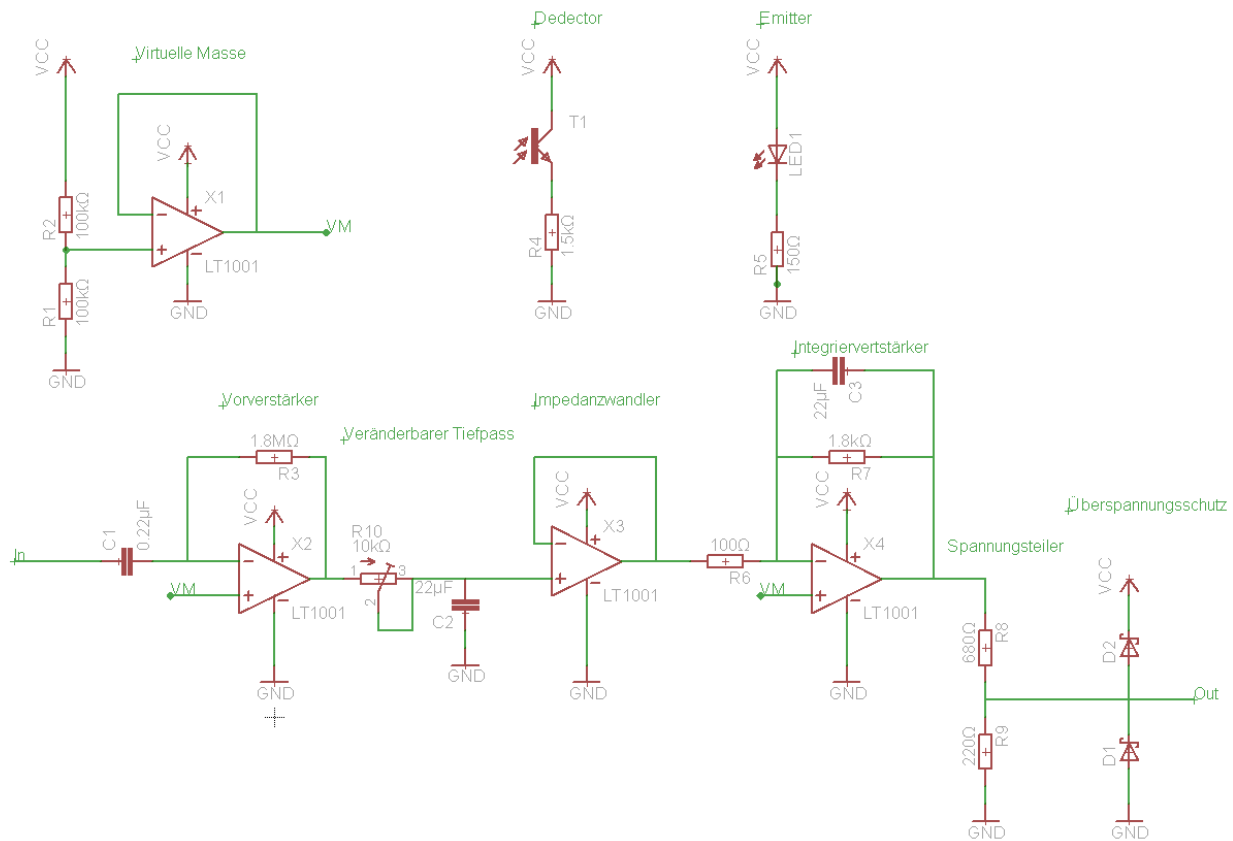


Abbildung 7: Schaltplan v. Scott\_Harden

Folgende Anpassungen wurden zu dem Schaltplan von Scott Harden (siehe Abbildung 6) durchgeführt:

- Für die rote LED wurde eine Superflux LED von Kingbright eingesetzt, die mehr Strom benötigt. Der Vorwiderstand wurde reduziert auf  $150\Omega$ .
- Der Vorwiderstand für den Fototransistor beträgt  $1,5k\Omega$ .
- Am Ausgang von dem Integrierverstärker wurde noch ein Spannungsteiler eingebaut.
- Als Überspannungsschutz sind zwei Schottky-Dioden nach dem Spannungsteiler eingebaut worden.

### 3.1.1 Die virtuelle Masse

Der erste Operationsverstärker des LM344N wird als virtuelle Masse verwendet, (siehe Abbildung 6) somit ist keine negative Spannung nötig. Dafür wird am nicht-inventierenden Eingang des ersten OPVs ein Spannungsteiler (R1 und R2) mit zwei  $100k\Omega$  Widerständen geschaltet. Der Ausgang des OPVs wird wieder auf den inventierenden Eingang des OPVs rückgekoppelt.

Der Ausgang kann folglich als virtueller Massepunkt verwendet werden. (Siehe Abbildung 6).

Durch den Spannungsteiler (siehe Abbildung 4, R1 und R2) wird die Versorgungsspannung von 12V auf 6V halbiert und auf den nicht-inventierenden Eingang des OPVs eingespeist.

Durch die Gegenkopplung versucht der OPV die Spannungsdifferenz zwischen den Eingängen auszugleichen, daher wird am Ausgang 6V ausgegeben. [18]

### 3.1.2 Der Sensor

Der Sensor (siehe Abbildung 6) besteht aus einer roten Superflux LED (LED1) von Kingbright [19] mit dem Vorwiderstand (R4) von  $150\Omega$ . Parallel dazu wird ein Fototransistor (T1) von Everlight [20] mit einem Vorwiderstand (R5) von  $1,5k\Omega$  geschaltet. Der Emitter führt zu der ersten Vorverstärkerschaltung. [1]

### 3.1.3 Der Vorverstärker

Der Vorverstärker (siehe Abbildung 6). besteht aus einem, zum invertierenden Eingang des zweiten OPVs geschalteten, 0,22µF Kondensator (C1). Die Gegenkopplung wird mit einem 1,8MΩ Widerstand (R3) realisiert. Der positive Eingang ist gegen die virtuelle Masse geschaltet.

Das Signal wird durch den Kondensator entkoppelt und durch diese Beschaltung auf 6V (VCC/2) reduziert. [21]

### 3.1.4 Der veränderbare Tiefpass und Impedanzwandler

Der Tiefpass besteht aus einem RC Glied, wobei als Widerstand ein 10kΩ Potentiometer (R10) eingesetzt wird. Der Kondensator (C2) hat einen Wert von 22µF.

Der Tiefpass dient zum Entstören des Pulssignals. Durch das Potentiometer kann die Grenzfrequenz variabel zum Sperren von störenden Frequenzen angepasst werden. Ein typischer niederfrequenter Störfaktor ist zum Beispiel die Elektroinstallation unserer Wohnungen/Häuser. Die 50Hz von unserer 230V Spannungsversorgung müssen gefiltert werden.

Nach den ersten Versuchen hat sich ein Widerstand von 2,41kΩ für das Potentiometer bewährt, um ein klares, entstörtes Signal zu sehen.

Mit der Formel  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$  ergibt sich folgende Grenzfrequenz [22]:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2,42k\Omega \cdot 22\mu F} = 2,99\text{Hz}$$

Mit einer Grenzfrequenz von 3Hz sind bis zu 180 Herzschläge in der Minute messbar. Alle höheren Frequenzen werden gefiltert.

Der dritte OPV dient in dieser Schaltung als Impedanzwandler. Durch die hohe Eingangsimpedanz des OPVs wird der Tiefpass nicht durch die restliche Schaltung belastet. [23]

### 3.1.5 Der Integrierverstärker

Der Integrierverstärker (siehe Abbildung 4) ist ein verstärkender Tiefpassfilter. Ein Widerstand (R6) von  $100\Omega$  wird an den invertierenden Eingang des vierten OPVs geschaltet. Die Rückkopplung besteht aus einer Parallelschaltung mit einem Widerstand (R7) von  $1,8k\Omega$  und einem Kondensator (C3) mit  $22\mu F$ .

Der nicht-invertierende Eingang des OPVs ist mit der virtuellen Masse verbunden.

Mit dem Widerstand von  $1,8k\Omega$  und dem Kondensator mit einer Kapazität von  $22\mu F$  ergibt sich laut Formel  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$  folgende Grenzfrequenz [22]:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1,8k\Omega \cdot 22\mu F} = 4,02\text{Hz}$$

Die Grenzfrequenz beträgt 4Hz. Diese ist somit um 1Hz höher als vom veränderbaren Tiefpass.

Der Integrierverstärker hat durch die Beschaltung durch die Widerstände R6 mit  $100\Omega$  und R7 mit  $1,8k\Omega$  eine Verstärkung um den Faktor 18.

Dies lässt sich anhand der Formel für den Verstärkungsfaktor [24] vom invertierenden OPV nachrechnen.

$$V_u = \frac{-R_2}{R_1}$$

$$\frac{-1,8k\Omega}{100\Omega} = -18$$

Durch das Verhältnis der beiden Widerstände ergibt sich eine Verstärkung von  $\sim 18$ . Aufgrund des Kondensators nimmt bei steigender Frequenz die Ausgangsspannung ab. [25]

Ein Spannungsteiler musste eingebaut werden, weil das Ausgangssignal zwischen 6V und 6,5V schwankte und der ADC Eingang des Teensys mit der ausgewählten internen Referenz nur Spannungen zwischen 0V bis 2,56V messen kann (siehe Kapitel 5.1).



Das Ausgangssignal ist um drei Viertel zu groß, folglich musste ein Widerstandsverhältnis von 4:1 realisiert werden. Mit der folgenden Spannungsteilerformel [26] wurden die genauen Widerstandswerte ermittelt:

$$U_2 = \frac{U_{ges} * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{6,5V * 220\Omega}{680\Omega + 220\Omega} = 1,58V$$

Mit den Widerständen von  $R_8 = 680\ \Omega$  und  $R_9 = 220\ \Omega$  ergab sich somit eine Ausgangsspannung von 1,58V.

Als Überspannungsschutz kamen zwei Schottky-Dioden [27] zum Einsatz.

Diese haben einen Durchbruchsspannungswert von 6,45V. Wenn wie in Abbildung 9 ersichtlich durch Bewegungsartefakte höhere Verstärkungen zustande kommen, werden diese ab +6,45V gegen die Masse abgeleitet. Sollte es ebenfalls zu einer negativen Spannung kommen, werden diese gegen VCC abgeleitet. Praktisch ist aber eine Verstärkung auf 6,45V durch die Beschaltung der OPVs und dem Spannungsteiler nicht möglich.

## 3.2 Messergebnis

Die Messergebnisse werden unter folgenden Umgebungsbedingungen interpretiert:

Zuerst wurde das Messergebnis am Oszilloskop dargestellt und anschließend das übertragene Pulssignal mit Brainbay visualisiert; jeweils mit Ruhepuls als auch mit Bewegung.

Alle Messungen wurden bei Bürolicht durchgeführt.

Nach mehreren Versuchsreihen hat sich herausgestellt, dass das beste Messergebnis mit festem Fingerdruck auf die LED erzielt wurde. Folglich wurden auch alle weiteren Messungen mit dieser Methode durchgeführt.

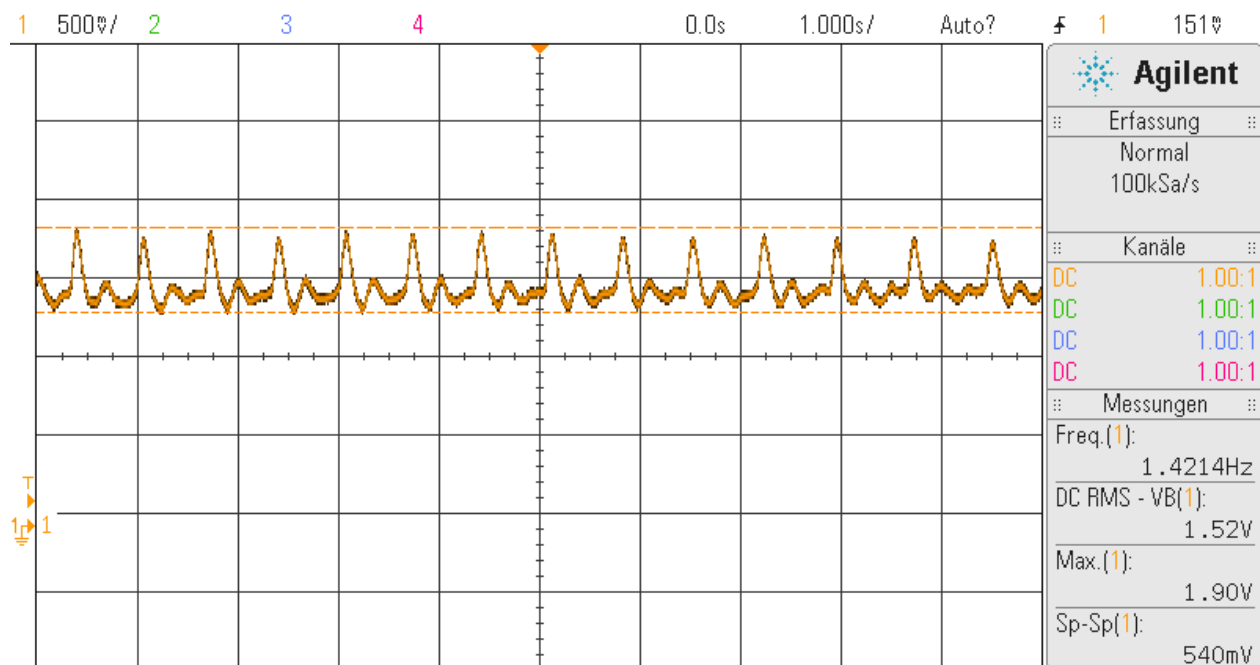


Abbildung 8: Scott\_Harden\_Messergebnis\_Oszilloskop\_Ruhepuls

In Abbildung 7 erkennt man das Pulssignal nach dem Spannungsteiler. Das Signal wurde auf ein Viertel der Spannung reduziert, sodass der ADC Eingang des Teensy-controlllers das Signal komplett wandeln kann. Wie man erkennt hat das Pulssignal eine Frequenz von 1,42Hz, das sind 85 Herzschläge in der Minute.

Das Signal besitzt einen Gleichspannungsanteil von 1,52V und einen Wechselspannungsanteil von 540mV. Die Maximalspannung beträgt 1,9V.

Auf die maximale Eingangsspannung des ADCs fehlen noch 66mV, diese dienen als Puffer. Wie in Abbildung 10 dargestellt, kann es bei Bewegung (z.B. beim Ablegen des Fingers am Sensor), zu höheren Verstärkungen kommen, dadurch könnte der ADC Eingang beschädigt werden.

Der ADC Eingang wird jedoch, wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, gegen Überspannung von größer als 5V bzw. auch vor negativer Spannung geschützt.

Die Versorgungsspannung beträgt 12V, die Stromaufnahme der Schaltung ist 70mA. Mit der Formel für die Leistungsberechnung [28]  $P = U * I$  ergibt sich eine Leistungsaufnahme von 8,4W.

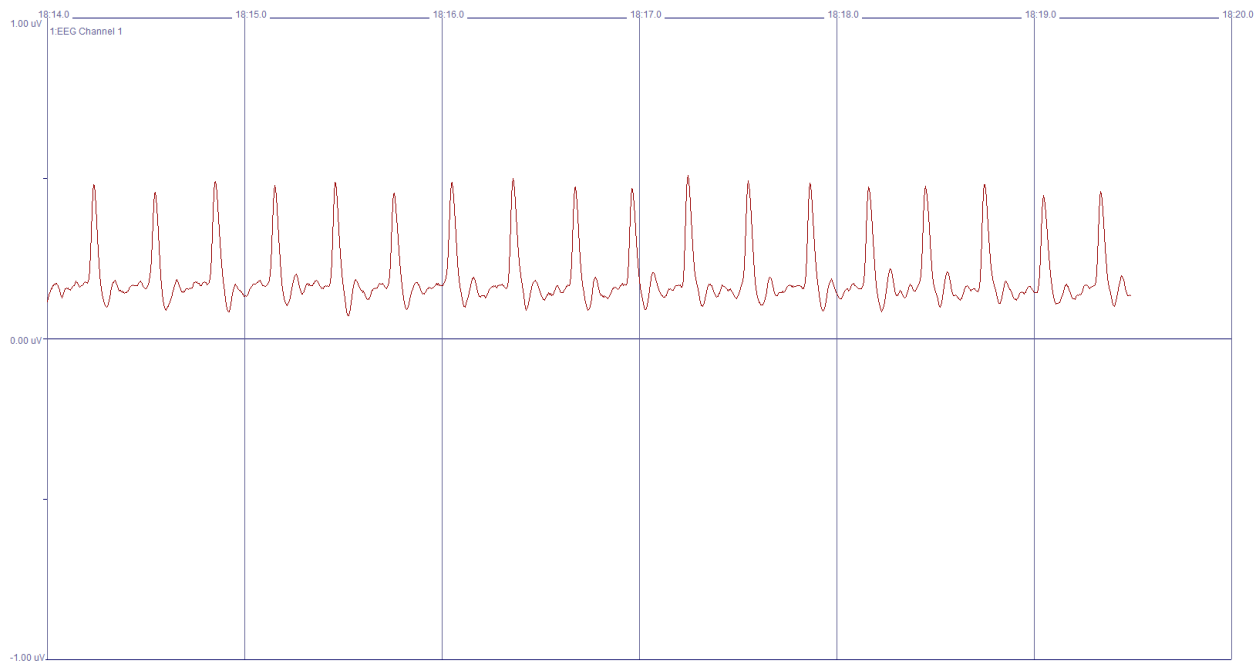


Abbildung 9: Scott\_Harden\_Messergebnis\_bei\_Ruhepuls\_in\_Brainbay

In Abbildung 9 kann man das Pulssignal nach der Übermittlung zum PC in Brainbay dargestellt sehen.

Das Pulssignal sieht etwas klarer und feiner aus als bei der Darstellung mittels Oszilloskop. Dies lässt sich darauf zurückführen dass die Auflösung am PC höher ist und die Signalstrichstärke feiner angezeigt wird.

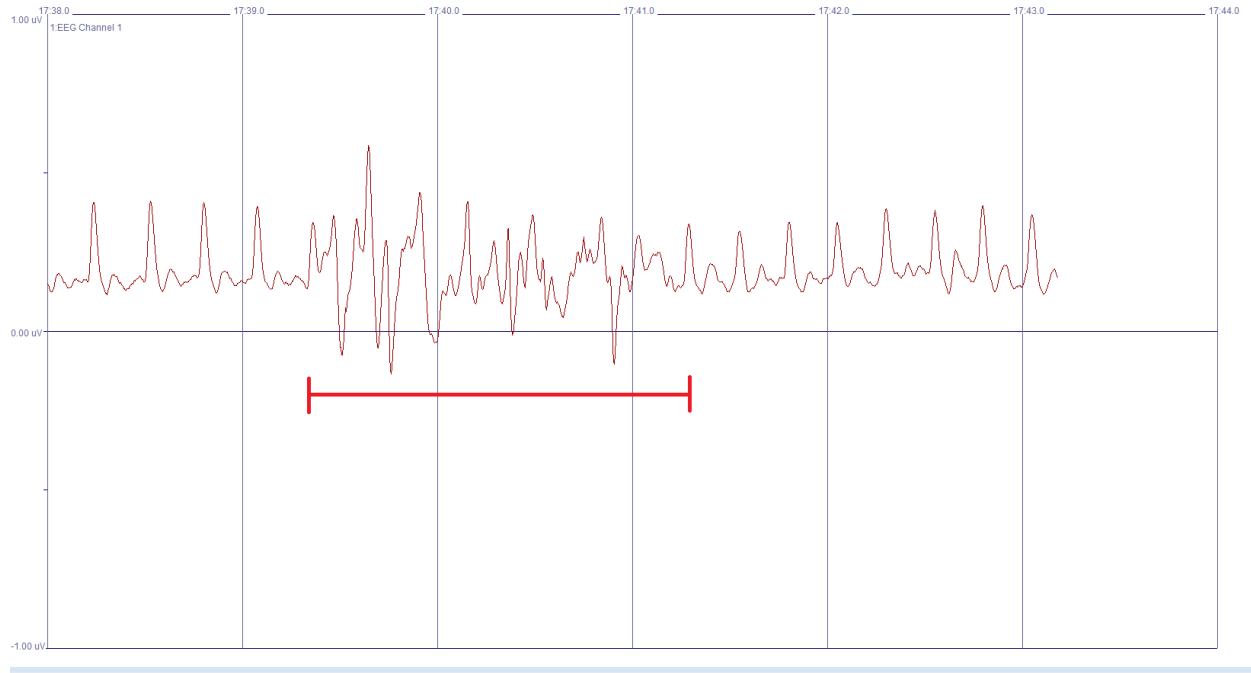


Abbildung 10: Scott\_Harden\_Messergebnis\_bei\_Bewegung\_in\_Brainbay

In Abbildung 10 werden nach 4 Herzschlägen Handbewegungen mit der nicht messenden Hand durchgeführt (durch die rote Linie angezeigt).

Durch diese Bewegungen wird das Signal sehr unstabil, daher lässt sich nur schwer der Pulsschlag ableiten.

### 3.3 Zusammenfassung

Die Schaltung von SWHarden ist eine einfache, aber jedoch gut funktionierende Grundsaltung für einen Puls-Sensor. Durch den zweiten Tiefpassfilter mit Potentiometer können Störungen im hochfrequenten Bereich flexibel gefiltert werden. Daher bleibt ein deutliches Pulssignal übrig.

Jedoch lässt sich mit der Schaltung nur der Ruhepuls messen, da man bei Bewegungen oder beim Sprechen an die Grenzen stößt. Für sportliche Anwendungen ist der Sensor damit nicht geeignet. Zusätzlich kann es bei unterschiedlichen Fingergrößen zu anderen Ergebnissen kommen. Man kann aber durch ein Wechseln auf einen anderen Finger entgegenwirken.

Der hohe Leistungsverbrauch von 8,4W ist auf die Verwendung von der Superflux LED von Kingbright [19] zurückzuführen. Theoretisch könnte man auch eine schwächere LED verwenden. Bei diesem Versuch war jedoch die größte Priorität ein deutliches Signal zu bekommen.

Der Materialaufwand ist sehr gering. Die passenden Bauelemente sind Standardware bzw. sind auch günstig zu bekommen. Die Digitalisierung kann mit jedem handelsüblichen Mikrocontroller der ADC Eingänge besitzt, durchgeführt werden.

### **3.4 Verbesserungsvorschläge**

Für die Schaltung von Scott Harden gibt es noch Verbesserungsvorschläge.

Die Schaltung benötigt zwei unterschiedliche Betriebsspannungen, 12V und 5V. Theoretisch wäre es nach Scott Harden auch möglich die Schaltung mittels 5V zu betreiben. Damit könnte man den Puls-Sensor mittels Versorgungsspannung des Teensys über USB betreiben. Der Haken daran ist, dass man mit dieser Variante kleinere Anpassungen und mehrere Versuchsreihen benötigt um ein klares Signal zu bekommen. Leider war für diesen Versuch keine Zeit mehr übrig.

Im Zuge meiner Arbeit habe ich daher einen „Workaround“ untersucht:

Die Versorgungsspannung des Teensys (5V) auf 12V mittels DC/DC Converter [29] zu transformieren. Das Pulssignal war aber praktisch nach dem Integrierverstärker nicht mehr vorhanden. Bereits nach der Sensoreinheit war das Signal komplett verzerrt, sodass klar war dass kein deutliches Signal mehr entstehen wird.

## 4 pulsesensor.com - Optical Pulse Sensor

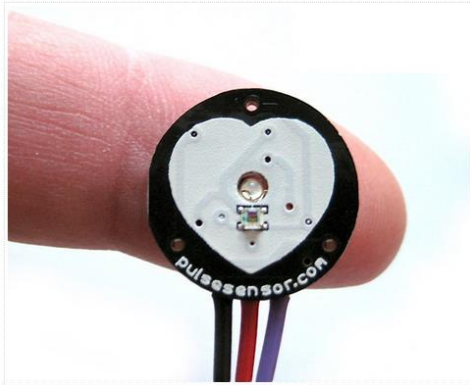


Abbildung 11: Foto\_Puls -  
Sensor\_pulseSensor.com [31]

Der Puls-Sensor von pulsesensor.com [30] ist von Joel Murphy und Yury Gitman entwickelt worden. Dieser Puls-Sensor ist wie jener von Scott Harden ein Open Hardware Projekt, somit selbst erweiterbar. Einen fertigen Aufbau kann man aber auch bestellen. Mittlerweile gibt es eine 2. Version des Puls-Sensors (siehe Abbildung 10). Dieser bietet ein deutlicheres Pulssignal als sein Vorgänger und kann mit 3V oder 5V betrieben werden.

Mit der fertigen Version erhält man einen Puls-Sensor, der mit SMD Bausteine realisiert wurde. Daher ist die gesamte Schaltung nur 1cm<sup>2</sup> groß. Mit einem Arduino

Uno Microcontroller kann ebenfalls der offene Code verwendet werden und das Signal kann am PC dargestellt werden.

Jedoch wird in dieser Arbeit das Pulssignal ebenfalls an den Teensy++2.0 übermittelt.

### 4.1 Der Aufbau

Die Puls-Sensor Schaltung von pulsesensor.com (siehe Abbildung 12) besteht grundsätzlich aus zwei Einheiten: Die Sensoreinheit und der Tiefpassverstärker.

Für die Sensoreinheit wird eine grüne LED verwendet. Laut Homepage [31] soll diese Wellenlänge des Lichts, in Kombination mit dem Fototransistor, die besten Ergebnisse bringen.

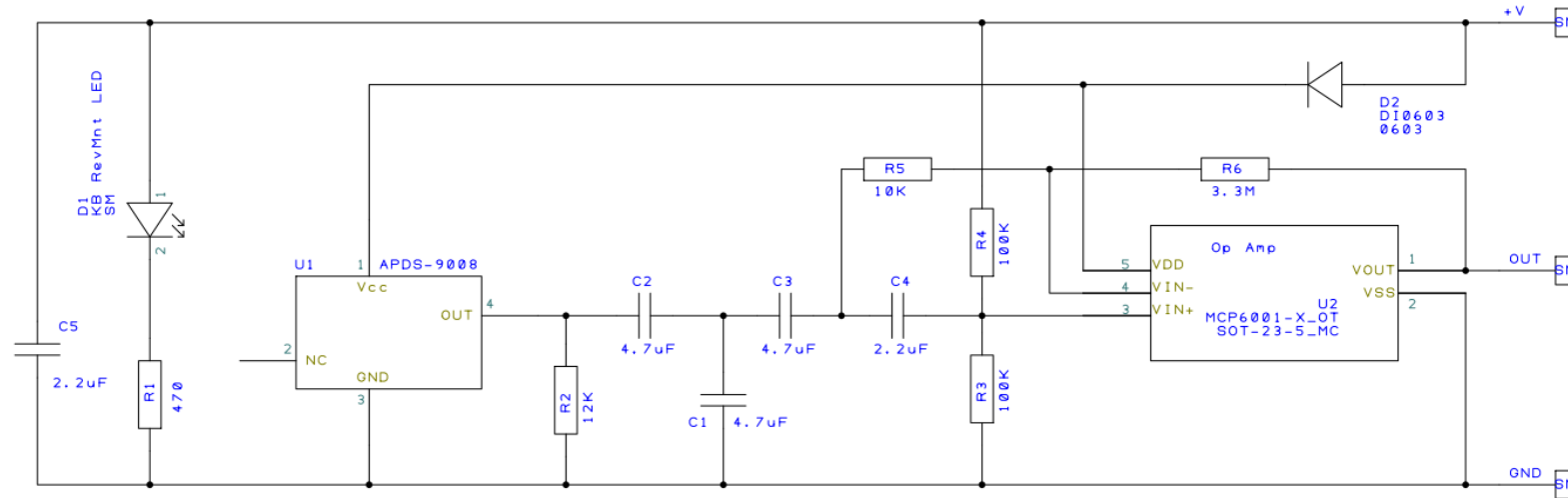
Die Versorgungsspannung von 3V wird durch den Vorwiderstand (R1) auf das richtige Maß für die LED begrenzt. Der dazu parallel geschaltete Kondensator dient zur Spannungsstabilisierung.

Die Diode wird als Verpolungsschutz verwendet, der darüber fließende Strom versorgt den Fototransistor und den OPV. Am positiven Eingang des OPVs befindet sich ein Spannungsteiler. Dadurch wird für das Messsignal ein Referenzpunkt auf die Hälfte der Versorgungsspannung erzeugt.

Durch die Rückkopplung und den Vorwiderstand wird die Verstärkung realisiert. Die Kondensatoren dienen zum Stabilisieren bzw. filtern des Signals. [30]

Das Ausgangssignal (Vout) wird direkt auf den ADC Eingang (Pin2) des Teensy-controllers geschaltet.

Die Masse wird ebenfalls direkt mit AGND des Teensys verbunden.



Pulse Sensor Amplified

Designed by Joel Murphy  
Spring 2012

Licensed under the TAPR Open Hardware License ([www.tapr.org/OHL](http://www.tapr.org/OHL))

Abbildung 12: Schaltung\_pulsesensor.com [17]

## 4.2 Messergebnisse

Die Messergebnisse werden unter folgenden Umgebungsbedingungen interpretiert:  
Zuerst wurde das Messergebnis am Oszilloskop dargestellt und anschließend wurde das übertragene Pulssignal mit Brainbay dargestellt; jeweils mit Ruhepuls als auch mit Bewegung.  
Alle Messungen wurden bei Bürolicht durchgeführt.

Die Messeinheit lässt sich mittels einer Klettverbindung um den Finger wickeln.  
Das beste Ergebnis wurde erzielt indem die Klettverbindung eng um den Finger gebunden wurde.

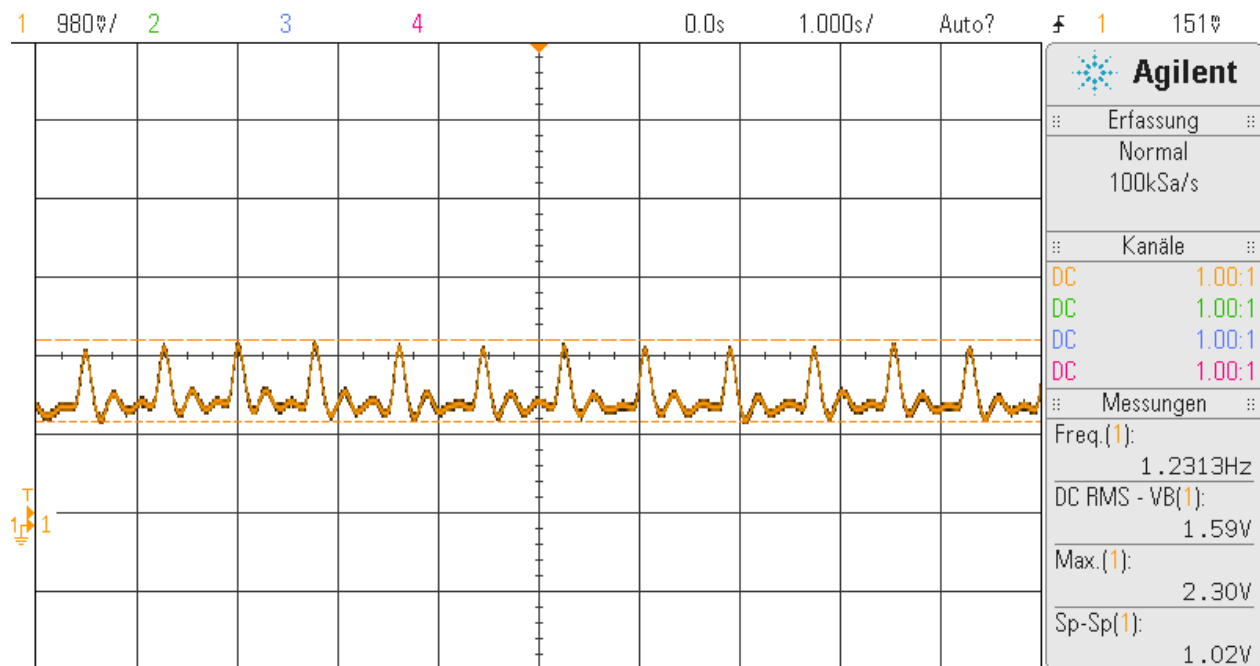


Abbildung 13: pulsesensor.com\_Messergebnis\_ bei\_Ruhepuls \_am\_Oszilloskop

In Abbildung 13 ist das Pulssignal des Puls-Sensors zu sehen. Die Frequenz beträgt wie man erkennt 1,23Hz, das entspricht 73,86 Herzschläge in der Minute

Der Gleichspannungsanteil ist 1,59V, die Wechselspannung beträgt 1,02V. Die Maximalspannung hat einen Wert von 2,3V.

Mit einem Wert von max. 2,3V sind noch 26mV als Puffer auf 2,56V übrig. Dieser Puffer dient zum Schutz des ADC-Eingangs.



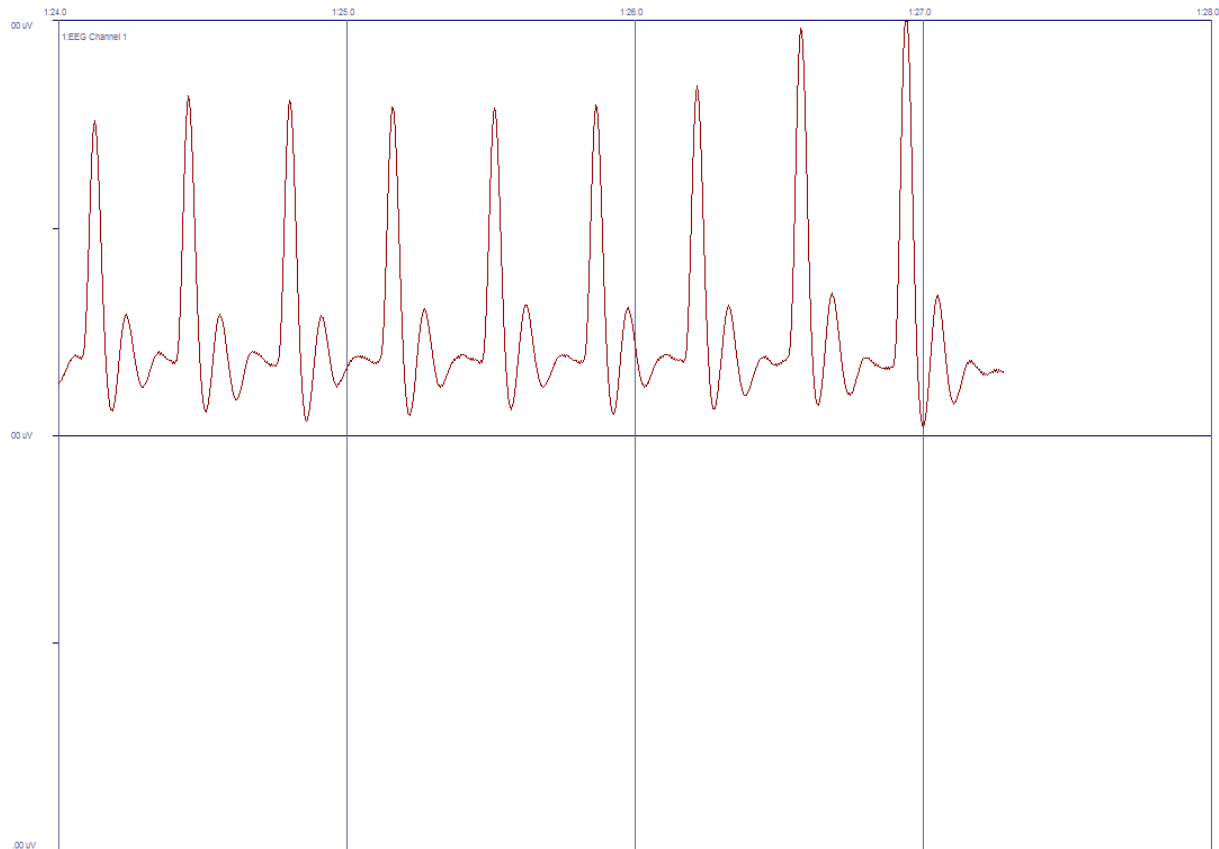


Abbildung 14: pulsesensor.com\_Messergebnis\_bei\_ Ruhepuls \_in\_ Brainbay

In Abbildung 14 sieht man die Darstellung des Pulssignals von pulsesensor.com mit Brainbay. Ein klares und deutliches Signal ist zu sehen, jedoch ist es ebenfalls sehr unstabil. Jede kleinste Bewegung führt zu einer Veränderung, obwohl man den Pulsschlag immer sehr gut erkennt.

Die Versorgungsspannung beträgt 3V. Die Stromaufnahme der Schaltung ist 1,22mA. Mit der Formel für die Leistungsberechnung  $P = U * I$  [28] ergibt das eine Leistungsaufnahme von 3mW.

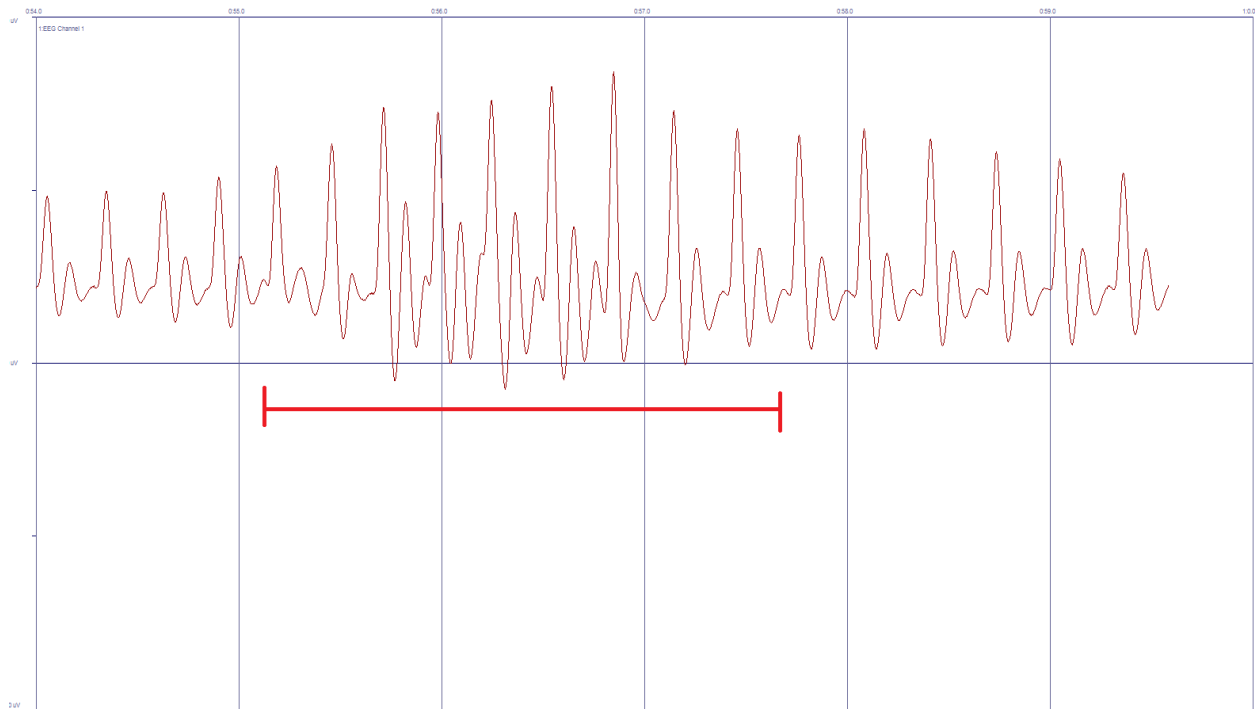


Abbildung 15: pulsesensor.com\_Messergebnis\_bei\_Bewegung\_in\_Brainbay

In Abbildung 15 werden nach 4 Herzschlägen Handbewegungen mit der nicht messenden Hand durchgeführt (durch die rote Linie angezeigt).

Durch diese Bewegungen wird das Signal unregelmäßig verstärkt, jedoch lässt sich das Pulssignal deutlich bestimmen.

## 4.3 Zusammenfassung

Der gekaufte Puls-Sensor von pulsesensor.com besitzt einen professionellen Aufbau durch SMD Bausteine. Störungen werden sehr gut herausgefiltert und das Signal ist klar und deutlich.

Im Gegensatz zur Schaltung von Scott Harden lässt sich nicht nur der Ruhepuls messen, auch bei Bewegung lässt sich das Pulssignal ableiten. Leider konnte der Puls-Sensor nicht unter richtiger sportlicher Aktivität getestet werden.

Doch auch wie bei der Schaltung von SWHarden kann es bei unterschiedlichen Fingergrößen zu anderen Ergebnissen führen. Aber ein Wechseln auf einen anderen Finger kann dem entgegen wirken.

Ein weiterer großer Vorteil von dieser Schaltung ist der sehr geringe Leistungsverbrauch von 3mW.

Beim selbstständigen Aufbau auf einem Steckbrett ist es sehr gut möglich dass das Signal verzerrter ist. Der Materialaufwand hält sich auch hier in Grenzen. Die Bauelemente sind ebenfalls leicht und günstig zu bekommen. Die Digitalisierung kann mit jedem üblichen Mikrocontroller, der ADC Eingänge besitzt, durchgeführt werden.

## 5 Firmware Implementierung

In diesem Kapitel wird der Teensy2.0++ vorgestellt. Es wird der verwendete A/D Wandler auf dem Mikrocontroller gezeigt und anschließend das Programm anhand eines Flussdiagramms dargestellt.

### 5.1 Konfiguration des Teensy2.0++

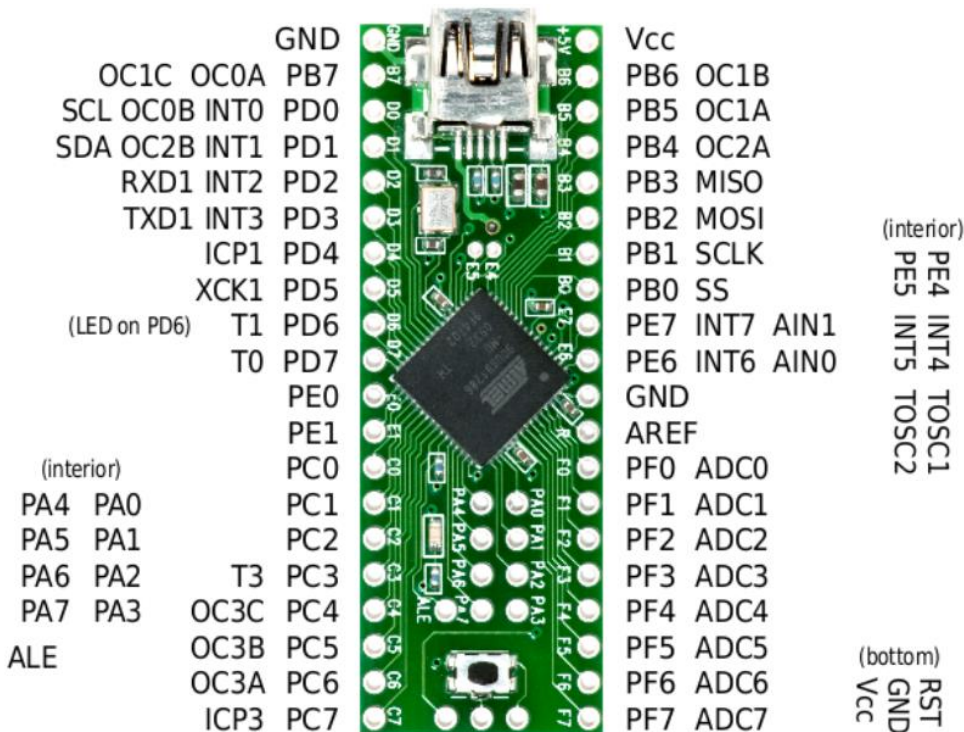
Die Beschaltung des Teensy-controllers ist einfach: Die Versorgung und Signalübertragung zum PC erfolgt über USB. Das analoge Signal vom Puls-Sensor wird über den Pin F2 und über den A/D Wandler des Mikroprozessors in ein digitales Signal umgewandelt.

Als Spannungsreferenz wurde die interne Referenz gewählt, somit kann nur eine Spannung von 0V bis 2,56V ( $\pm 7,8\%$  Toleranz laut pjrc [32]) gemessen werden. Die mögliche Abweichung ist für das Anzeigen des Signals am PC nicht relevant.

Die interne Referenz wurde gewählt, weil die Bandbreite von 0V bis 2,56V ausreichend ist und das Signal nicht von der Versorgungsspannung des Teensy-controllers erzeugt wird.

Um eine genauere Messung zu erzielen, wird wie im Datenblatt [33] des Mikroprozessors „AT90USB1286“ beschrieben, ein Kondensator mit 100nF zwischen ARef und AGND geschaltet. Dies dient zur Reduktion des Rauschens von ARef.

Anhand der Abbildung 15 lässt sich der Pin leicht am Microcontroller ausfindig machen.



## 5.2 Die Programmierung

Die Programmierung des Teensys anhand des Flussdiagramms (siehe Abbildung 16) wurde wie folgt realisiert:

Zuerst werden die benötigten Variablen definiert und initialisiert. Danach folgt die Initialisierung der CPU, der USB Funktion und des ADC. Dieser wird auf interne Referenz konfiguriert. Der Multiplexer wird fix auf Pin 2 programmiert.

Danach folgt die Endlosschleife: Der Status der Variablen „adc\_state“ bestimmt den ganzen Programmablauf (implementiert als state-machine). Der State wird mit ADC\_STATE\_IDLE (=Ruhemodus) initialisiert.

In diesem State wird eine Messung gestartet. Der State wird auf ADC\_STATE\_SAMPLING (=Messung wird durchgeführt) gesetzt. Ist die Messung abgeschlossen, wird ein Interrupt Flag gesetzt und eine Interrupt Service Routine aufgerufen.

In der Interrupt Service Routine wird der Messwert in Big-Endian Format in das 17Byte Array „TXBuf“ geschrieben. Solange das Array nicht voll ist, wird in der Interrupt Service Routine immer wieder eine neue Messung gestartet. Während die Messung läuft, wird die ISR verlassen und das Hauptprogramm wird fortgesetzt.

Nachdem das Array „TXBuf“ mit Messwerten voll ist, wird der Wert von „adc\_state“ auf ADC\_STATE\_CONV\_READY (=Bereit zum Übertragen) gesetzt. Die ISR wird beendet und das Programm durchläuft wieder die „Main Funktion“. Mit dem Status ADC\_STATE\_CONV\_READY ist die letzte Abfrage positiv und das Array wird der USB Funktion zum Übertragen übergeben. Nach der Übertragung wird der Status von adc\_state wieder auf ADC\_STATE\_IDLE gesetzt und das Programm beginnt wieder von vorne.

Vor jeder Datenübertragung wird 10ms gewartet. Dadurch wird das ganze Programm deutlich verlangsamt und es werden 92 Datenpakete pro Sekunde mit jeweils 6 Messwerten übertragen. Das ist für die notwendige Funktion mehr als ausreichend.

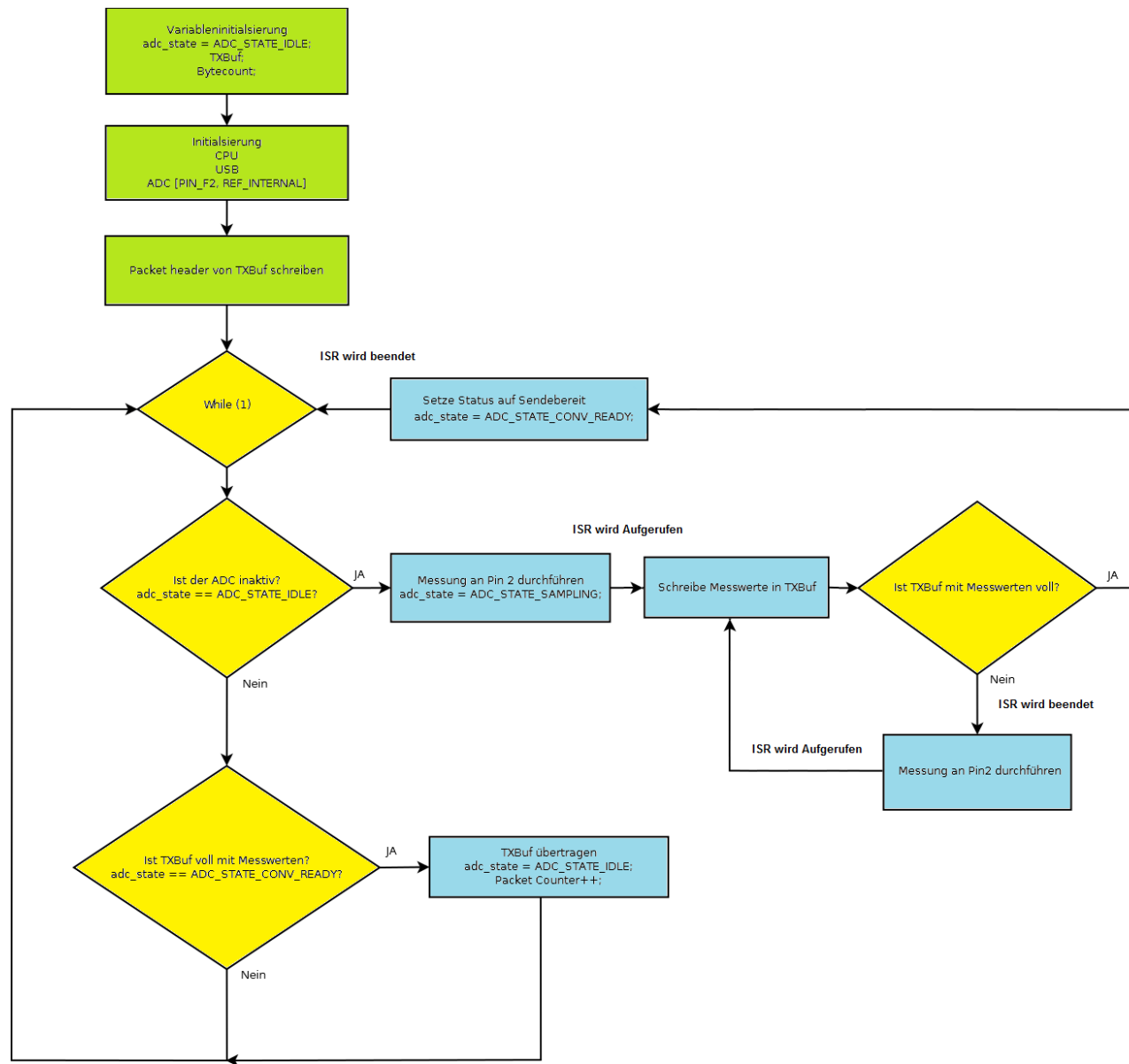


Abbildung 17: Flussdiagramm des Programmes

## 5.3 Die Übertragung mittels OpenEEG P2 Format

Wie bereits in der Einleitung unter 2.1.3. erwähnt, wird das OpenEEG P2 Protokoll [3] von der OpenEEG-Community verwendet um Daten über Brainbay zu verarbeiten bzw. zu visualisieren.

Die Übertragung wurde mittels des Freeware Programms „HTerm [16]“ geprüft.

Die Abbildung 17 zeigt einen Screenshot des Programmes „HTerm“. Man erkennt die Übertragung der Pakete 42 - 46 mit dem Aufbau des „OpenEEG P2“ Protokolls.

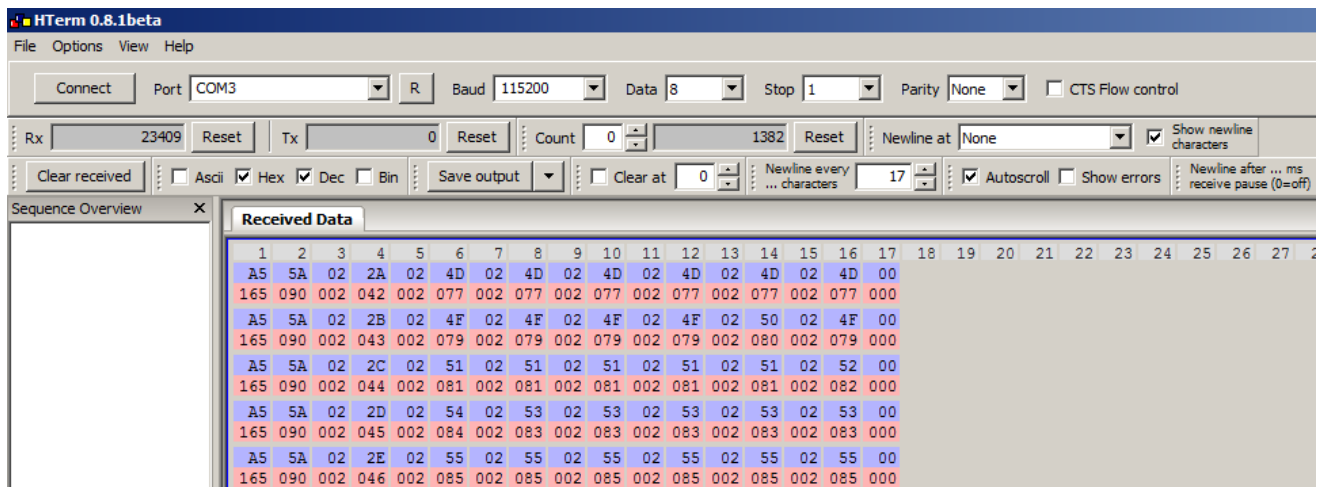


Abbildung 18: HTerm\_OpenEEG\_P2\_Protokoll\_Pakete

## 5.4 Die Darstellung des Signals mittels Brainbay

Zur Darstellung des Signals wurde Brainbay [4] verwendet. Als Quelle wurde ein „Generic Biosignal-Amplifier“-Element verwendet und für die Darstellung mit dem Oszilloskop-Element verbunden.

Bei den Einstellungen des „Generic Biosignal-Amplifiers“ wurde der passende COM Port für die Übertragung ausgewählt und das „OPNEEG P2“ Format als Übertragungsprotokoll eingestellt.

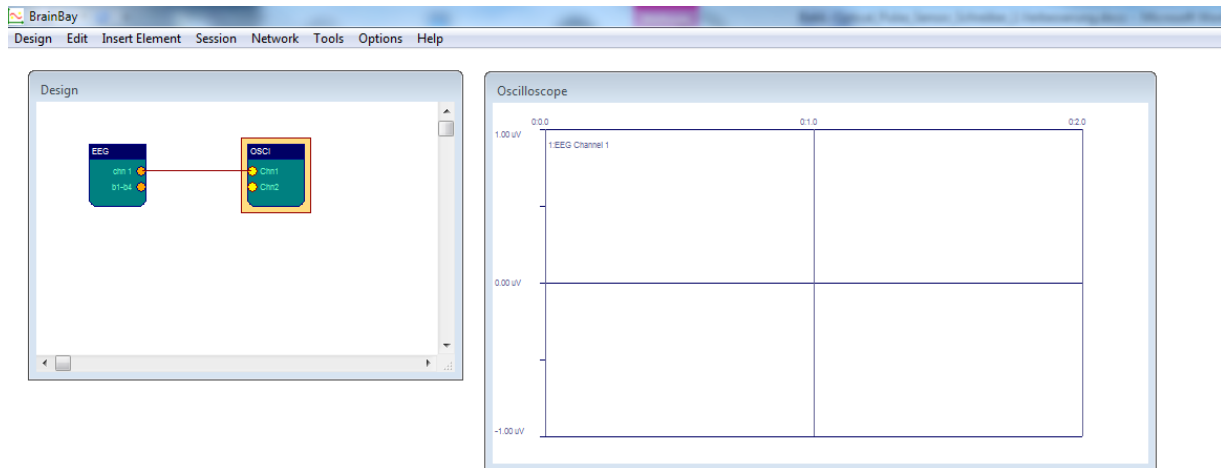


Abbildung 19: Brainbay\_Design

## 5.5 USB-Libraries

Es sind für Amel AVR Microcontroller einige USB Libraries als Open Source verfügbar.

### 5.5.1 LUFA

LUFA (Lightweight USB Framework for AVR), auch bekannt unter MyUSB, ist ein Open-Source USB Stack für die AVR8 und AVR32 Atmel Mikroprozessorserien. Entwickelt wurde diese von Dean Camera, einem australischen Entwickler, der mittlerweile bei Atmel in Norwegen arbeitet. Die LUFA Library kann ebenfalls für die Übertragung der Nutzdaten über USB verwendet werden. [18]



### 5.5.2 USB Funktionalität des AT90usb1286 Controllers

Der Mikroprozessor „AT90usb1286“ auf dem Teensy++2.0 besitzt eine Hardwareunterstützung für USB-Client Funktionen. Dadurch lassen sich z.B. USB Human Interface Device (HID), Mass-Storage oder Communication Device Class (CDC) Implementierungen realisieren. Zur Übertragung der Daten wurde die USB CDC Klasse verwendet, wodurch am PC ein virtueller COM Port zur Verfügung steht, der mit HTerm oder BrainBay geöffnet werden kann. Die dafür benötigten Einstellungen können im Datenblatt nachgelesen werden, bzw. kann man auf der Homepage von PJRC [14] eine passende Library mit Beispielanwendungen finden. [19]

Diese Library wurde auch für die Übertragung verwendet.

## 6 Conclusio

Die Entwicklung eines Optischen Puls-Sensors ist ein viel versuchtes Projekt, dass zeigt auch die Nachfrage auf dem Blog von Scott Harden, genauso auch auf [pulsesensor.com](http://pulsesensor.com).

Wie am Anfang des Projekts bereits erwartet, ist der gekaufte Puls-Sensor von [pulsesensor.com](http://pulsesensor.com) stabiler verwendbar als das „Minimaldesign“ von Scott Harden.

Der gekaufte Puls-Sensor punktet durch seinen geringen Leistungsverbrauch, die kleine Größe und das saubere Signal.

Er erzeugt auch bei Bewegung ein stabiles Pulssignal und wäre theoretisch auch für sportliche Tätigkeiten geeignet.

Mit dem Schaltplan von Scott Harden lässt sich mit überschaubarem zeitlichen und einem geringen finanziellen Aufwand ein Puls-Sensor entwickeln. Dieser ist jedoch nur zum Messen von Ruhepuls geeignet. Leider hat dieses Pulssensor-Design Probleme bei Bewegungen ein deutliches Signal zu messen.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] S. W. Harden, „Simply DIY ECG + Pulse Oximeter(version 2),“ [Online]. Available: <http://www.swharden.com/blog/2013-04-14-simple-diy-ecg-pulse-oximeter-version-2/>. [Zugriff am 13 8 2013].
- [2] Paul und Robin, „Teensy USB Development Board,“ [Online]. Available: <http://www.pjrc.com/teensy/>. [Zugriff am 25 9 2013].
- [3] J. P. A. R. Joerg Hansmann, „ModularEEG firmware for one-way transmission, v0.5.4-p2,“ [Online]. Available: <http://openeeg.sourceforge.net/doc/modeeg/firmware/modeeg-p2.c>. [Zugriff am 27 12 2013].
- [4] C. Veigl, „Brainbay,“ [Online]. Available: <http://www.shifz.org/brainbay/>. [Zugriff am 8 9 2013].
- [5] H. Chigira, M. Kobayashi und A. Maeda, „Mouse with Photo-Plethysmographic surfaces for unobtrusive stress monitoring,“ in *Consumer Electronics*, Berlin, 2012.
- [6] „Nahinfrarotspektroskopie,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Nahinfrarotspektroskopie>. [Zugriff am 13 12 2013].
- [7] „Near-infrared spectroscopy,“ [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Near-infrared\\_spectroscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Near-infrared_spectroscopy). [Zugriff am 13 12 2013].
- [8] N. Cao und T. Gao, „Noninvasive Tissue Blood Oxygenation Measurement Based on Near Infrared Spectroscopy (NIRS),“ in *Bioinformatics and Biomedical Engineering , 2009. ICBBE 2009. 3rd International Conference*, 2009.
- [9] C. Lew und M. Moghavvemi, „Remote heart rate monitoring system based on electrocardiography,“ in *Research and Development, Student Conference*, 2002.
- [10] „Elektrokardiogramm,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrokardiographie>. [Zugriff am 15 12 2013].

- [11] „Electrocardiography,“ [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrocardiography>. [Zugriff am 15 12 2013].
- [12] D.-I. (. J.Hiller, „Biomedizinische Messtechnik,“ 2005. [Online]. Available: <http://www2.hs-esslingen.de/~johiller/elektrokardiogramm/reizleitung.htm>. [Zugriff am 26 1 2014].
- [13] alldatasheet, „alldatasheet - LM324N,“ [Online]. Available: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17880/PHILIPS/LM324N.html>. [Zugriff am 27 1 2014].
- [14] PJRC, „PJRC: Electronic Projects with Components Available Worldwide,“ [Online]. Available: <http://www.pjrc.com/>. [Zugriff am 27 1 2014].
- [15] Atmel, „Studio Archive,“ [Online]. Available: <http://www.atmel.com/tools/STUDIOARCHIVE.aspx>. [Zugriff am 26 12 2013].
- [16] T. Hammer, „Der - Hammer,“ [Online]. Available: <http://www.der-hammer.info/terminal/index.htm>. [Zugriff am 18 1 2014].
- [17] CadSoft, „CadSoft EAGLE PCB Design Software,“ [Online]. Available: <http://www.cadsoftusa.com/>. [Zugriff am 10 2 2013].
- [18] „Grundlagen der Operationsverstärker,“ [Online]. Available: <http://www.batronix.com/versand/know-how/op-amp.html>. [Zugriff am 20 12 2013].
- [19] Kingbright, „Datenblatt Super Flux LED Lamp,“ [Online]. Available: [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/180303-da-01-en-SUPER\\_FLUX\\_LED\\_TYP\\_L\\_7679C1SEC\\_H.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/180303-da-01-en-SUPER_FLUX_LED_TYP_L_7679C1SEC_H.pdf). [Zugriff am 27 1 2014].
- [20] alldatasheet, „alldatasheet - PTC331C,“ [Online]. Available: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/91033/EVERLIGHT/PT331C.html>. [Zugriff am 27 1 2014].
- [21] Elektronik Kompendium, „Invertierender Verstärker,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0210141.htm>. [Zugriff am 29 12 2013].
- [22] Wikipedia, „Tiefpass,“ [Online]. Available:

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Tiefpass>. [Zugriff am 3 1 2014].
- [23] Elektronik Kompendium, „Passiver Tiefpass,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0206172.htm>. [Zugriff am 29 12 2013].
- [24] D. Mietke, „Elektroniktutor,“ [Online]. Available: [http://elektroniktutor.de/analogverstaerker/op\\_int.html](http://elektroniktutor.de/analogverstaerker/op_int.html). [Zugriff am 17 1 2014].
- [25] Elektronik Kompendium, „Der Integrierverstärker,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0412061.htm>. [Zugriff am 29 12 2013].
- [26] Elektronik Kompendium, „Spannungsteiler,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0201111.htm>. [Zugriff am 20 1 2014].
- [27] Fairchild Semiconductor, „Schottk y- Diode\_Datenblatt: P6KE6.8(C)A-P6KE440(C)A“.
- [28] Elektronik-Kompendium, „Elektrische Leistung,“ [Online]. Available: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0201114.htm>. [Zugriff am 1 2 2014].
- [29] Linear Technology, „Conrad Produktinfo: LT1301,“ [Online]. Available: [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/171557-da-01-en-LT\\_1301.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/171557-da-01-en-LT_1301.pdf). [Zugriff am 31 1 2014].
- [30] PulseSensor.com, „PulseSensor,“ [Online]. Available: <http://pulsesensor.myshopify.com/pages/open-hardware>. [Zugriff am 15 10 2013].
- [31] PulseSensor.com, „PulseSensor - Pulse Sensor Amped,“ [Online]. Available: <http://pulsesensor.myshopify.com/products/pulse-sensor-amped>. [Zugriff am 2014 1 19].
- [32] pjrc, „Using the analog digital converter(ADC) on Teensy with C language,“ [Online]. Available: <http://www.pjrc.com/teensy/adc.html>. [Zugriff am 2 2 2014].
- [33] PJRC, „Atmel AVR datasheets,“ [Online]. Available:

<http://www.pjrc.com/teensy/at90usb1286.pdf>. [Zugriff am 20 12 2013].

[34] D. Camera, „LUFA,“ [Online]. Available:  
<http://www.fourwalledcubicle.com/LUFA.php>. [Zugriff am 3 11 2013].

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messung_mittels_Durchleuchten .....	7
Abbildung 2: Messung_mittels_Reflexion [5] .....	7
Abbildung 3: Erregungsausbreitung und EKG [12] .....	9
Abbildung 7: Scott_Harden_Puls-Sensors_Stückliste.....	10
Abbildung 4: Teensy++ 2.0.....	11
Abbildung 5: Screenshot_HTerm.....	12
Abbildung 6: Schaltplan v. Scott_Harden .....	13
Abbildung 8: Scott_Harden_Messergebnis_Oszilloskop_Ruhepuls.....	18
Abbildung 9: Scott_Harden_Messergebnis_bei_Ruhepuls_in_Brainbay.....	19
Abbildung 10: Scott_Harden_Messergebnis_bei_Bewegung_in_Brainbay.....	20
Abbildung 11: Foto_Puls -Sensor_pulseSensor.com [31] .....	22
Abbildung 12: Schaltung_pulsesensor.com [17] .....	23
Abbildung 13: pulsesensor.com_Messergebnis_bei_Ruhepuls _am_Oszilloskop .....	24
Abbildung 14: pulsesensor.com_Messergebnis_bei_Ruhepuls _in_Brainbay.....	25
Abbildung 15: pulsesensor.com_Messergebnis_bei_Bewegung_in_Brainbay.....	26
Abbildung 16: Teensy 2.0++_Pin_Assignments .....	29
Abbildung 17: Flussdiagramm des Programmes .....	30
Abbildung 18: HTerm_OpenEEG_P2_Protokoll_Pakete.....	31
Abbildung 19: Brainbay_Design .....	32