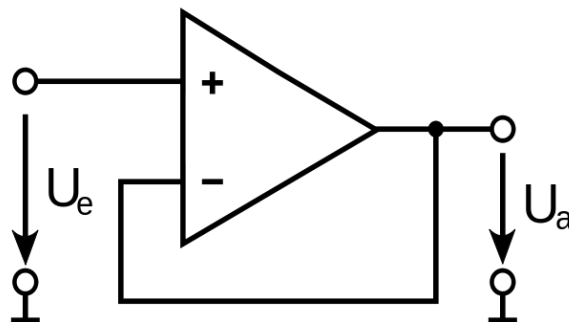


UNIVERSITÄT REGENSBURG

# F-Praktikum

VERSUCH:  
OPERATIONSVERSTÄRKER UND A/D-WANDLER

*T. Korn, F. Heimbach, M. Ziola, S. Srichandan,  
J. Hubmann, D. Disterheft*



25.02.2022

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Grundlagen</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1 Operationsverstärker . . . . .                                      | 4         |
| 1.2 Herz- und Elektrokardiogramm . . . . .                              | 4         |
| 1.3 Messtechnische Herausforderungen . . . . .                          | 5         |
| <b>2 Aufgaben und Fragen zur Vorbereitung auf den Versuch</b>           | <b>7</b>  |
| <b>3 Versuchsaufbau</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1 Beschaltung der verwendeten OpAmps . . . . .                        | 9         |
| 3.2 Eigenschaften und Beschaltung der LabJack A/D-D/A-Messbox . . . . . | 9         |
| 3.3 Beschaltung der verwendeten Filter-Bausteine . . . . .              | 9         |
| 3.4 Verwendete Mess- und Steuerprogramme . . . . .                      | 10        |
| 3.4.1 Spannungsrampe.vi . . . . .                                       | 10        |
| 3.4.2 Oskilloskop.vi . . . . .  | 10        |
| <b>4 Versuchsdurchführung</b>   | <b>11</b> |
| <b>5 Protokoll</b>  | <b>13</b> |

## Motivation

In der modernen experimentellen Physik haben nahezu alle Messtechniken, egal ob in der Teilchen-, Atom-, oder Festkörperphysik, eine Gemeinsamkeit: die im Experiment untersuchten Effekte werden umgewandelt in Spannungs- oder Stromsignale. Eine weitere Gemeinsamkeit ist die digitale Erfassung und Weiterverarbeitung der Messwerte mit Computerunterstützung. Die Schnittstellen zwischen der „analogen“ Welt und der digitalen Datenerfassung und Verarbeitung sind typischerweise Verstärkersysteme, in denen die Messsignale aufbereitet werden, und Analog-Digital-Wandlerkarten. Im Rahmen des Praktikums soll anhand eines Beispiels gezeigt werden, wie mithilfe von Operationsverstärkern und Frequenzfiltern reale Messsignale so konditioniert werden können, dass sie mit einem A/D-Wandler aufgenommen werden können. Als Signalquelle dienen dabei die Versuchsteilnehmer selbst: die schwachen elektrischen Signale, die den Herzschlag eines Menschen begleiten, werden mittels Elektroden an den Armen abgegriffen. Ziel des Praktikumsversuchs ist der schrittweise Aufbau eines Verstärkersystems zur Messung eines Elektrokardiogramms.

## Lernziele

- Kennenlernen einfacher Operationsverstärker-Schaltungen
- Verständnis der A/D-Wandlung: Auflösung, Samplingrate etc.
- Analoge Signalfilterung über Hoch-, Tief- und Bandsperre-Schaltungen
- Ursachen für elektrische Störsignale und Gegenmaßnahmen
- Digitale Datenverarbeitung, numerische Fourier-Transformation, digitale Filterung

# 1 Grundlagen

## 1.1 Operationsverstärker

Ein Operationsverstärker (OpAmp) ist ein gleichspannungsgekoppelter elektrischer Spannungsverstärker, der in der Regel über zwei Spannungseingänge und einen -ausgang verfügt. Dabei wird die zwischen den Eingängen anliegende Spannung um ein Vielfaches verstärkt und am Ausgang gegenüber Masse ausgegeben. Durch geeignete Beschaltung lassen sich mit einem OpAmp eine Vielzahl von verschiedenen Verstärkern und Operatoren realisieren, was ihn zu einem der vielseitigsten und wichtigsten elektrischen Bauteilen in der Elektronik macht.

## Literaturliste

Zu den Grundlagen von Operationsverstärkerschaltungen und deren Wirkungen, sowie Frequenzfiltern findet sich einiges in den folgenden Büchern:

- Horowitz/Hill: The Art of electronics, Cambridge University Press, Signatur: 84/ZN 4000 H816
- Horowitz/Hill: Die Hohe Schule der Elektronik Teil 1, Analogtechnik, Elektor-Verlag, Signatur: 84/ZN 4000 H816 D4-1
- Tietze/Schenk: Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer-Verlag 1971, Signatur: 84 ZN 5410 T564
- Weblink (**bitte mit viel Vorsicht genießen!**): <http://www.hit-karlsruhe.de/hit-mic/Projekte/ekg/index.htm>

## 1.2 Herz- und Elektrokardiogramm

Das menschliche Herz ist ein sich rhythmisch kontrahierendes Organ, das den Blutkreislauf treibt und so für eine Versorgung der Muskeln und Organe mit Sauerstoff und Nährstoffen sorgt. Die einzelnen Muskelpartien werden über elektrische Spannungsimpulse zur Kontraktion angeregt. Damit fungiert das Herz als elektrisch angetriebenes Pumpensystem. Die Herzfrequenz wird durch den Sinusknoten gesteuert, eine Ansammlung von spezialisierten Herzmuskelzellen, die sich über spontane Depolarisation selbst erregen können. Die vom Sinusknoten vorgegebene Herzfrequenz wird durch Nerven und Hormone beeinflusst und liegt im Ruhezustand bei Erwachsenen typischerweise zwischen 60 und 80 Schlägen/min, bei Hochleistungssportlern sind wegen des vergrößerten Herzens auch Werte unter 40 Schlägen/min möglich.

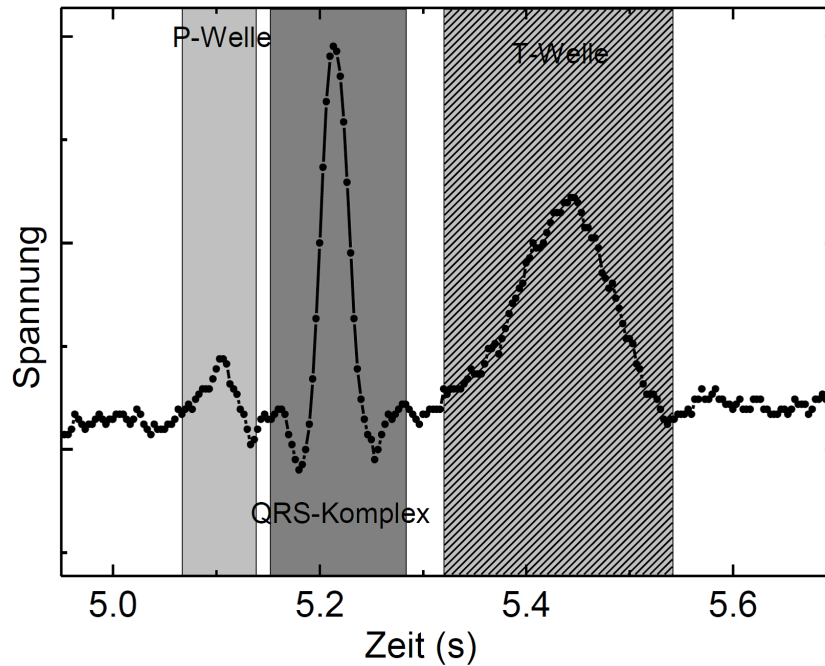


Abbildung 1.1: Elektrokardiogramm-Signal, aufgenommen mit dem im Versuch aufzubauenden System. Die charakteristischen Komponenten eines Herzschlags (Testkandidat T. Korn) sind markiert.

In einem Elektrokardiogramm werden die Spannungsimpulse mit Hilfe von Elektroden direkt am Körper abgegriffen und als Funktion der Zeit detektiert. Abbildung 1.1 zeigt ein typisches Elektrokardiogramm. Die zu einem einzelnen Herzschlag gehörenden, charakteristischen Spannungsimpulse sind hier zeitaufgelöst dargestellt. Zunächst kommt es zur Erregung des Herzvorhofs (P-Welle), gefolgt von der Erregung der beiden Herzkammern (QRS-Komplex) und der Erregungsrückbildung der Kammern (T-Welle).

Das EKG ist ein wichtiges diagnostisches Werkzeug zur Leistungsdiagnose beim gesunden Menschen. Im Rahmen des Praktikumsversuchs sollen anhand von EKG-Signalen, die von/an beiden Praktikanten über einen Zeitraum von mehreren Minuten aufgenommen werden, die Herzfrequenz und die Standardabweichung der Herzfrequenz bestimmt werden. Beide Größen erlauben Rückschlüsse auf die Ausdauerleistung: eine niedrige Herzfrequenz ist ein Anzeichen für ein großes Herzvolumen.

Die Standardabweichung der Herzfrequenz in Ruhe ist typischerweise bei Ausdauersportlern ebenfalls höher als bei untrainierten Versuchspersonen.

### 1.3 Messtechnische Herausforderungen

Zur Messung eines Elektrokardiogramms müssen zunächst die Rahmenbedingungen des Experiments und die Eigenschaften des Messsignals aufgelistet werden:

1. Ein direkter Abgriff der Spannungsimpulse am Herzmuskel ist im Rahmen des Versuchs nicht wünschenswert. Stattdessen werden beide Arme eines Praktikanten

ten über Elektroden kontaktiert. Dabei wird die Leitfähigkeit des menschlichen Körpers ausgenutzt.

2. Die Amplitude der so messbaren Spannungsimpulse liegt bei etwa 1 mV.
3. Die Kontaktwiderstände zwischen Haut und Elektroden werden mittels Kontaktspray reduziert. Damit bildet sich allerdings auch ein galvanisches Element zwischen Haut und Elektrode, das eine Gleichspannung von bis zu 300 mV erzeugt, die den Spannungsimpulsen überlagert ist.
4. Die Abgriffe an den Armen des Praktikanten stellen eine Spannungsquelle mit sehr hohem Innenwiderstand dar.
5. Durch die Abgriffe an den Armen bildet sich eine große Induktionsschleife.
6. Das Messsignal ist annähernd periodisch, die Grundfrequenz liegt bei etwa 1 Hz.

## 2 Aufgaben und Fragen zur Vorbereitung auf den Versuch

**Wichtig!** Für eine erfolgreiche Vorbereitung ist es nützlich die Versuchsbeschreibung selbst durchgelesen zu haben, da hierzu ebenfalls Fragen in der Vorbesprechung gestellt werden!

*Der Theorieteil des Protokolls sollte die unten aufgelisteten Fragen vollständig abdecken, ohne ausschweifend zu werden.*

### 1. Der Operationsverstärker (OpAmp)

- Wie können Sie mit einem OpAmp einen nichtinvertierenden Verstärker aufbauen?
- Wie bestimmt sich der Verstärkungsfaktor  $V$  dieser Verstärker?
- Welche Effekte unterscheiden den realen OpAmp vom idealen OpAmp?
- Was ist ein Impedanzwandler und welche Bedeutung kommt diesem im Versuch zu?

### 2. Der Analog-Digital-Wandler (A/D-W)

- Wie ist die prinzipielle Arbeitsweise eines A/D-W und was passiert bei zu großem oder kleinem Eingangssignal?
- Welche Auflösung kann der im Versuch verwendete A/D-W erzielen?
- Erläutern Sie, weshalb im Versuchssteil 1.a) ein Spannungsteiler verwendet werden muss und zeichnen Sie das Gesamtschaltbild.

### 3. Wechselstromfilter

- Wie lassen sich Hoch- und Tiefpass-Schaltungen mittels Widerständen und Kondensatoren realisieren?
- Wie definiert sich die Grenzfrequenz  $f_G$ ?
- Erklären Sie die Begriffe Mittenfrequenz  $f_0$ , Bandbreite  $B$  und Güte  $Q$  im Kontext einer Bandsperre.
- Was sind Bode-Diagramme? Wie funktioniert die Umrechnung in Dezibel?
- Wie ermittelt man die Filterordnung  $n$  aus der Filtersteilheit (Bode-Diagramme)?
- Wie sieht das Ausgangssignal einer Rechteckspannung aus, nachdem ein Tiefpass durchlaufen wird?

### 4. Diskrete Fourier-Transformation, digitale Frequenzfilter

- Was ist die Grundlage der Fourier-Transformation?
- Welchen Zusammenhang gibt es zwischen Zeitfenster und Frequenzauflösung?
- Wie arbeiten digitale Frequenzfilter?

5. Messtechnische Herausforderungen beim Messen von EKG-Signalen

- Welche Signalstörungen erwartet man beim Messen von EKG-Signalen?
- Welche Lösungsansätze werden zur Unterdrückung dieser Störsignale im Versuch verfolgt?



## 3 Versuchsaufbau

### 3.1 Beschaltung der verwendeten OpAmps

Im Praktikumsversuch kommt ein kommerzieller Operationsverstärker zum Einsatz. Das OPV-IC LM741 beinhaltet einen OpAmp, dessen Beschaltung in Abbildung 3.1 dargestellt ist.

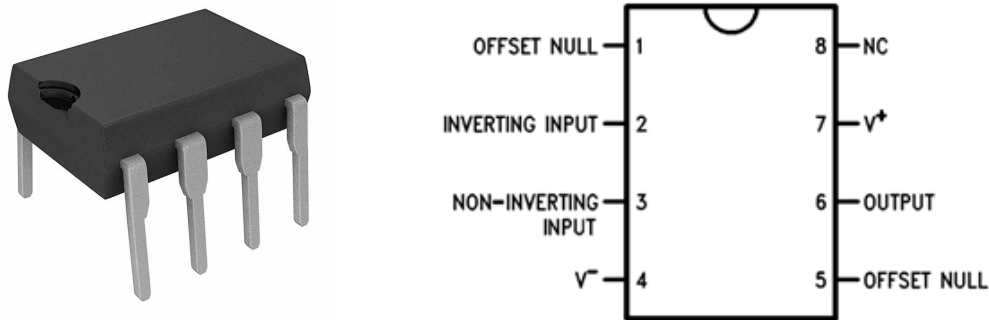


Abbildung 3.1: Beschaltungsplan des OPV-ICs LM 741. V+ wird an +15 V angeschlossen, V- an -15 V. Zwischen den Pins 1 und 5 kann eine Gleichspannung zur Kompensation des Offsets eingespeist werden.

### 3.2 Eigenschaften und Beschaltung der LabJack A/D-D/A-Messbox

Die LabJack-U12-Messbox beinhaltet 8 Analog-Eingänge mit 12 Bit Auflösung, sowie 2 Analog-Ausgänge mit 10 Bit Auflösung. Der maximale Spannungsbereich beträgt dabei für die Ausgänge 0 bis 10 V und -10 bis 10 Volt für die Eingänge.

Im Versuch verwenden wir zwei Eingänge (AI0 und AI1) und einen Ausgang (AO0). Die Eingänge werden differentiell beschaltet, d.h. die Messbox liefert die Spannungsdifferenz AI0-AI1. Dieser Messmodus ermöglicht es Störsignale, die durch lange Messleitungen verursacht werden, zu unterdrücken. Dabei wird Eingang AI0 mit dem Signalausgang einer Verstärkerschaltung verbunden, Eingang AI1 mit dem Massepegel der Verstärkerschaltung. Die beiden Messleitungen werden miteinander verdreht (warum?).

### 3.3 Beschaltung der verwendeten Filter-Bausteine

Die vorgefertigten Filterbausteine haben ein Ersatzschaltbild auf der Oberseite (analog Abb. 3.2), an dem die Beschaltung erkennbar ist:

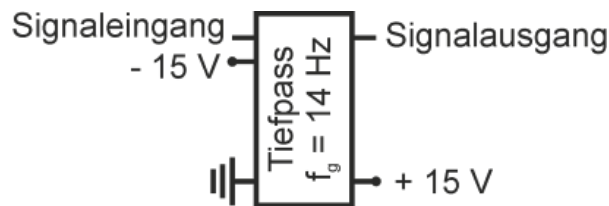


Abbildung 3.2: Ersatzschaltbild für den im Versuch verwendeten 14 Hz Tiefpass. Die Beschaltung für Hochpass und Bandsperre sind analog.

### 3.4 Verwendete Mess- und Steuerprogramme

Im Versuch werden zwei selbstgeschriebene LabView-Programme verwendet. Diese sind auf dem Desktop des Messrechners zu finden.

#### 3.4.1 Spannungsrampe.vi

Über das Spannungsrampen-Programm lässt sich automatisch eine Messreihe generieren, bei der die Spannung am Eingang AI0 als Funktion der Steuerspannung am Ausgang AO0 gemessen wird. So können Kennlinien der Operationsverstärker aufgenommen werden.

Das Programm erzeugt am Analog-Ausgang AO0 Spannungen zwischen 0 V und 5 V mit geringer Auflösung. Daher sollte möglichst der gesamte Dynamikbereich des Ausgangs ausgenutzt werden: Kleine Steuerspannungen werden am besten über einen Spannungsteiler erzeugt!

Im Programm können Start- und Endwert der Spannungsrampe, sowie die Schrittweite ausgewählt werden. Was sollte bei der Wahl der Schrittweite beachtet werden?

#### 3.4.2 Oskilloskop.vi

Das Messprogramm Oskilloskop.vi ermöglicht ein kontinuierliches Auslesen der am Eingang AI0 der LabJack-Messbox anliegenden Spannung mit einer vorgegebenen Abstrate von 200 Hz. Der Mitschrieb der Messwerte erfolgt erst nach Drücken des dafür vorgesehenen Buttons.

**Hinweis:** Am Eingang AI0 kann nur eine Spannung bis zu +/- 10 V detektiert werden.

## 4 Versuchsdurchführung

Es ist bei diesem Versuch wichtig sich schon im Vorfeld Gedanken zu machen, was bei den einzelnen Teilen des Versuches verlangt wird, und vor allem was das Ziel bzw. der Sinn der Versuchsteile ist.

### 1. Testschaltungen

#### a) Überprüfung der Linearität der nicht-invertierenden Verstärker

- Nachweis der Linearität der Verstärkung mit dem LabView-Programm *Spannungsrampe.vi* für Verstärkungsfaktoren von 1, 10 und 100 unter Ausnutzung eines möglichst großen Spannungsbereichs.

#### b) Charakterisierung der Frequenzfilter Tiefpass und Bandsperre

- Erzeugung von Sinussignal mit dem Frequenzgenerator
- Ausmessen des Frequenzgangs (Amplitude + Phasenverschiebung) von Tiefpass (ca. 8 Hz – 120 Hz) und Bandsperre (ca. 8 Hz – 200 Hz) mit dem Oszilloskop.
- Bestimmen Sie Grenzfrequenz und Filterordnung des Tiefpasses, sowie Grenzfrequenzen, Mittenfrequenz, Bandbreite und Güte des Bandpasses aus einer entsprechenden Auftragung der Daten in einem Bode-Diagramm.

### 2. EKG-Schaltung

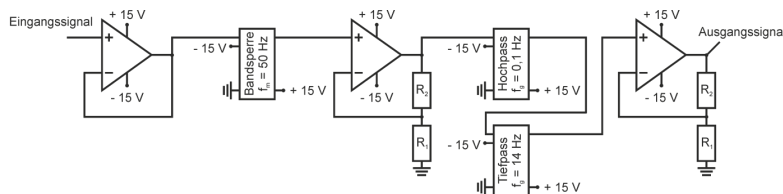


Abbildung 4.1: Schaltplan der EKG-Schaltung.

#### a) Aufbau der Schaltung (Abb. 4.1) bestehend aus

- Impedanzwandler
- Bandsperre
- OPV-Verstärker, 50 - 100-fach, nicht-invertierend
- Hochpass
- Tiefpass
- OPV-Verstärker, 50 - 100-fach, nicht-invertierend

#### b) Aufnahme eines EKGs:

Dazu wird eine Elektrode an den Eingang des EKG-Systems, die andere an die Erde angeschlossen. Das verstärkte Signal wird mit dem Programm *Oszilloskop.vi* aus dem A/D-Wandler mit einer Scanrate von 200 Hz ausgelesen.

- i. 5 Minuten lang bei beiden Praktikanten den Ruhepuls aufnehmen.
- ii. 5 Minuten lang Störsignale, die an den Elektrodenanschlüssen auftreten, messen.
- iii. 5 Minuten lang ein EKG messen während:
  - A. Die Bandsperre überbrückt ist.
  - B. Der Tiefpass überbrückt ist.
  - C. Bandsperre und Tiefpass überbrückt sind.

**Die Messdaten werden digital aufgenommen und gespeichert, also unbedingt USB-Stick mitnehmen!**

***Hilfe! Meine Schaltung funktioniert nicht!***

Dann können folgende Sachen schiefgelaufen sein:

- Ist die Versorgungsspannung eingeschaltet?
- Sind die Bauteile an die Versorgungsspannung angeschlossen?
- Ist die Schaltung korrekt aufgebaut?
- Haben die Bauteile/Verbindungskabel Kontakt mit dem Steckbrett?
- Sind die OpAmps richtig beschaltet?
- Sind alle für die Schaltung relevanten Bauteile auf Masse (A/D-Wandler, Frequenzgenerator, Oszilloskop, Filter)?
- Ist der A/D-Wandler korrekt beschaltet (Blaues Kabel: Eingang A/D-Wandler, rotes Kabel: Ausgang A/D-Wandler)?

Wenn nichts davon hilft, bleibt nur ein Ausweg: Den Betreuer rufen!

## 5 Protokoll

Im ersten Teil des Versuchsprotokolls werden die physikalischen und technischen Grundlagen zum Versuch beschrieben, wobei die Fragen zur Vorbereitung abgedeckt werden. Der zweite Teil befasst sich mit der Durchführung des Versuchs, sowie der Auswertung und Diskussion der Ergebnisse. **Fehlerrechnung und -diskussion sind obligatorisch.**

*Zur Auswertung:* Bei den Vorversuchen und den eigentlichen EKG-Messungen werden große Datenmengen erzeugt, die digital weiterverarbeitet werden sollen. Es empfiehlt sich dafür das Programm ORIGIN, das auf den Rechnern im CIP-Pool zur Verfügung steht und auf dem Praktikumsrechner installiert ist.

Die Auswertung umfasst folgende Punkte:

1. Charakterisierung des linearen Verhaltens der OpAmps.
2. Charakterisierung von Tiefpass und Bandsperre.
3. Führen Sie Fourier-Transformationen an den originalen EKG-Messungen (i) und dem Störsignal (ii) durch. Begründen Sie aus dem Vergleich dieser beiden Spektren die Verwendung eines geeigneten digitalen Filters und stellen das digital gefilterte Spektrum (i') dar. Bestimmen Sie den Ruhepuls der Praktikanten aus diesen Fourier-Transformationen.
4. Suchen Sie in den Zeitverlaufssignalen zu (i) und (i') einen einzelnen Pulsschlag für jeden Probanden heraus und diskutieren die Unterschiede. Kennzeichnen Sie zusätzlich die charakteristischen Komponenten des Herzschlages.
5. Vergleichen Sie die Wirksamkeit von digitalen und analogen Filtern: Filtern Sie die Messungen aus (iii) mit einem entsprechenden digitalen Pendant und diskutieren Sie die Qualität der analog bzw. digital gefilterten Signale.
6. Abschließende Diskussion der Ergebnisse und des Versuches an sich.