



---

**Praktikum Biomedizinische Messtechnik**  
**Versuch 1 - Vorbereitung**  
**Lorenz Diener, Peter Zimmer**

---

INSTITUT FÜR BIOMEDIZINISCHE TECHNIK  
FAKULTÄT FÜR ELEKTROTECHNIK  
KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE

5. Mai 2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EKG-Anforderungen</b>	<b>1</b>
1.1 EKG-Verlauf . . . . .	1
1.2 Frequenzanteile . . . . .	2
1.3 Elektroden . . . . .	2
1.4 Anforderungen an einen EKG-Verstärker . . . . .	3
<b>2 Analyse des vorgegebenen Verstärkers</b>	<b>3</b>
<b>3 Verstärkerschaltung</b>	<b>4</b>
3.1 Vergleich . . . . .	4
3.2 Verstärkerschaltung . . . . .	5
3.3 Operationsverstärker . . . . .	5

## 1 EKG-Anforderungen

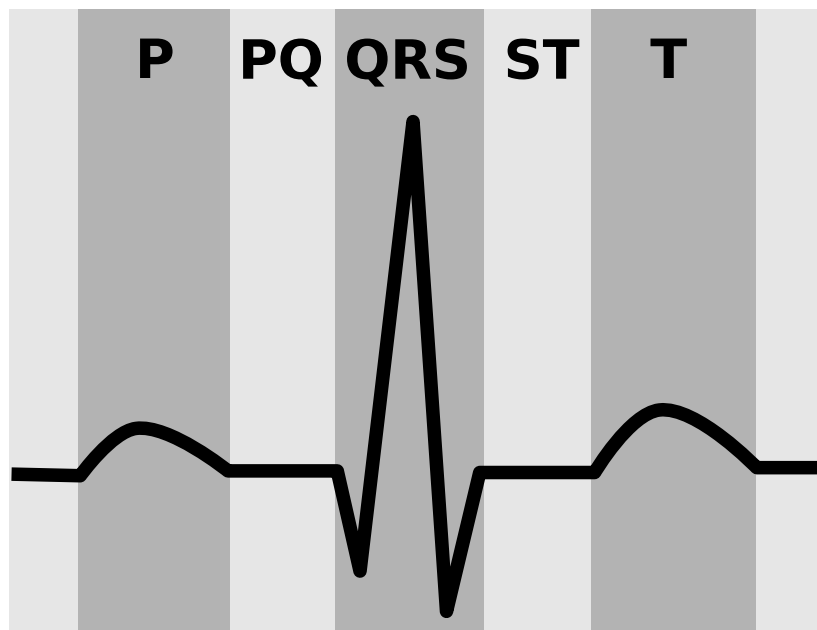


Abbildung 1: EKG (Schematisch)

### 1.1 EKG-Verlauf

Das EKG stellt ein Spannungsvektor dar, welcher auf die Ableitungssachse projiziert wird. Gebildet wird er durch die Summation der Potentiale der Herzzellen.

Er ändert sich mit den einsetzen der unterschiedlichen Erregungsphasen des Herzens:<sup>1,2</sup>

- **P-Welle:** Die P-Welle characterisiert die Erregung des Sinusknotens und des Vorhofs. Hierbei steigt das Ruhepotential der P-Zellen so lange an, bis diese vollständig depolarisiert werden. Dadurch wird die Reizleitung in Gang gesetzt, und die Herzmuskelzellen der Vorhöfe ziehen sich zusammen.
- **PQ-Strecke:** Die Vorhöfe sind vollständig depolarisiert, der Reiz breitet sich über die AV-Knoten zu den Kammern aus.
- **QRS-Komplex:** Der Reiz breitet sich durch His-Bündel, Kammerschenkel und Purkinje-Fasern aus, die Kammern werden depolarisiert und die Herzmuskelzellen der Kammern ziehen sich zusammen. (Während dieser Phase repolarisieren sich zusätzlich die Vorhöfe, dies wird im EKG durch den QRS-Komplex überdeckt)
- **ST-Stecke:** Die Kammern sind vollständig depolarisiert und entspannen sich wieder langsam.
- **T-Welle:** Die Herzmuskelzellen der Kammern repolarisieren sich. Ein neuer Zyklus beginnt.

## 1.2 Frequenzanteile

Für die einzelnen Teile des EKG ergeben sich folgende Zeit- und Frequenzanteile:<sup>3</sup>

Art	P-Welle	Q-Zacke	S-Zacke	T-Welle
Dauer	90ms	< 30ms	< 40ms	ca. 80ms
Frequenzanteile	1-15Hz	1-40Hz	1-40Hz	1-15Hz

Abbildung 2: EKG-Frequenzanteile

Insgesamt ist also etwa der Bereich von 1 bis 40 Hertz interessant. Für Messung der Variabilität über einen längeren Zeitraum sind gegebenenfalls auch noch niedrigere Frequenzanteile interessant.

## 1.3 Elektroden

Die Elektrode hat die Aufgabe eines Messwandlers, der eine Umsetzung von Ionen- zu Elektronenleitung durchführt. Sie verringert auch den Übergangswi-

<sup>1</sup>Armin Bolz und Wilhelm Urbazek. *Technik in der Kardiologie: eine interdisziplinäre Darstellung für Ingenieure und Mediziner*. Springer Verlag, 2002.

<sup>2</sup>Prima Online Learning. *Anatomy and Physiology Online - Cardiac conduction system and its relationship with ECG*. <http://www.youtube.com/watch?v=v3b-YhZmQu8> (Abgerufen: Mai 2013).

<sup>3</sup>Bolz und Urbazek, *Technik in der Kardiologie: eine interdisziplinäre Darstellung für Ingenieure und Mediziner*.

derstand zwischen Gewebe und Leitung.<sup>4</sup>

## 1.4 Anforderungen an einen EKG-Verstärker

Folgende Anforderungen erschienen uns für einen EKG-Verstärker als wünschenswert:

- Rauscharm
- Galvanisch getrennt
- Gute Gleichtaktunterdrückung
- Schaltungstechnisch einfach
- Hohe Eingangsimpedanz
- Gutes Übertragungsverhalten im geforderten Frequenzbereich

## 2 Analyse des vorgegebenen Verstärkers

Den vorgegebenen Verstärker teilen wir zur Analyse in 3 Stufen auf:

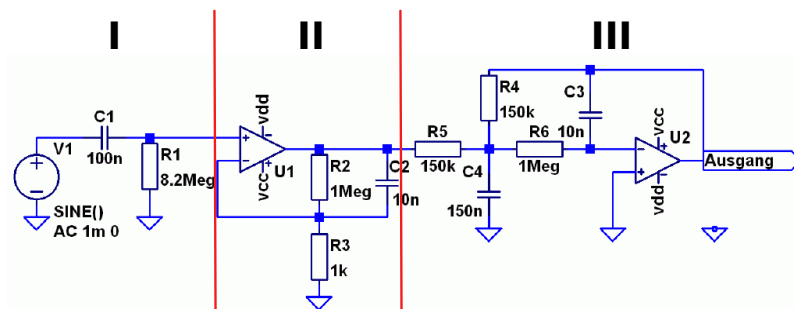


Abbildung 3: Vorgegebener Verstärker

- Stufe I: Passiver Hochpassfilter erster Ordnung mit Knickfrequenz ca. 0.2Hz
- Stufe II: Verstärkender aktiver Tiefpassfilter erster Ordnung, Gain. ca. 60dB, Knickfrequenz ca. 15.9Hz
- Stufe III: Aktiver Tiefpassfilter zweiter Ordnung, Knickfrequenz ca. 10Hz

Die gesamte Schaltung stellt einen um das tausendfache verstärkenden Bandpass für den Frequenzbereich von 0.2 bis ca. 10 Hertz dar, hierbei ist die Filterflanke des Tiefpassanteils mit 60dB/Dekade ab ca. 15.9 Hertz sehr steil.

<sup>4</sup>Wilhelm Stork. *Vorlesung Biomedizinische Messtechnik 1*. 2012.

### 3 Verstärkerschaltung

Die vorgegebene Schaltung ist nicht optimal, da sie über keinerlei Gleichtaktunterdrückung verfügt. Desweiteren werden die höheren noch für das EKG relevanten Frequenzen nicht berücksichtigt.

Weitere Schaltungsmöglichkeiten: Differenzverstärker, Instrumentenverstärker, Instrumentenverstärker mit nachgeschaltetem Bandpass, Instrumentenverstärker mit Driven-Right-Leg

#### 3.1 Vergleich

Verschiedene mögliche Verstärkerschaltungen bewerten wir in hinsicht auf Verschiedene Aspekte folgendermaßen, wobei wir zur Bewertung werte von - (am schlechtesten) bis ++ (am besten) vergeben:

Schaltung	CMRR	Eingangsimpe- danz	Filte- rung	Auf- wand	Patientensicher- heit
Aktiver Bandpass	-	+	+	0	+
Differenzverstärker	0	-	-	++	+
Instrumentenverstär- ker	+	++	-	-	+
Instrumentenverstär- ker + Bandpass	+	++	+	-	+
Driven-Right-Leg	++	++	-	-	-

Abbildung 4: Bewertung möglicher Verstärkerschaltungen

Vorteile eines symmetrischen Differenzverstärkers sind insbesondere Gleichtaktunterdrückung, Nachteile sind ein geringer Eingangsimpedanz sowie hohe Empfindlichkeit gegenüber Bauteiltoleranzen bei den Widerständen.

Die Gleichtaktunterdrückung ist Wünschenswert, da Störungen in der Regel auf beide Eingänge gleich wirken, eine hohe Gleichtaktunterdrückung filtert diese Heraus ohne das Nutzsignal zu verfälschen. Sie wird gemessen indem zuerst die Gleichtaktverstärkung durch das zusammenschliessen beider Eingänge un das anlegen einer Spannung bestimmt wird, und diese dann in Verhältnis zur Differenzverstärkung gesetzt wird (Vergleicht Bild).

Ein reiner Differenzverstärker hat eine geringen Eingangsimpedanz. Dies führt Aufgrund der hohen Übergangswiderstände zwischen Herzzellen und Elektrode zu einer Verzerrung des Signals. Daher ist eine Impedanzwandlerstufe nötig, die die Eingangsimpedanz erhöht.

### 3.2 Verstärkerschaltung

Wir schlagen folgende Verstärkerschaltung (inklusive Symmetrischer Stromversorgung) vor: (TODO FIXME besseres bild)

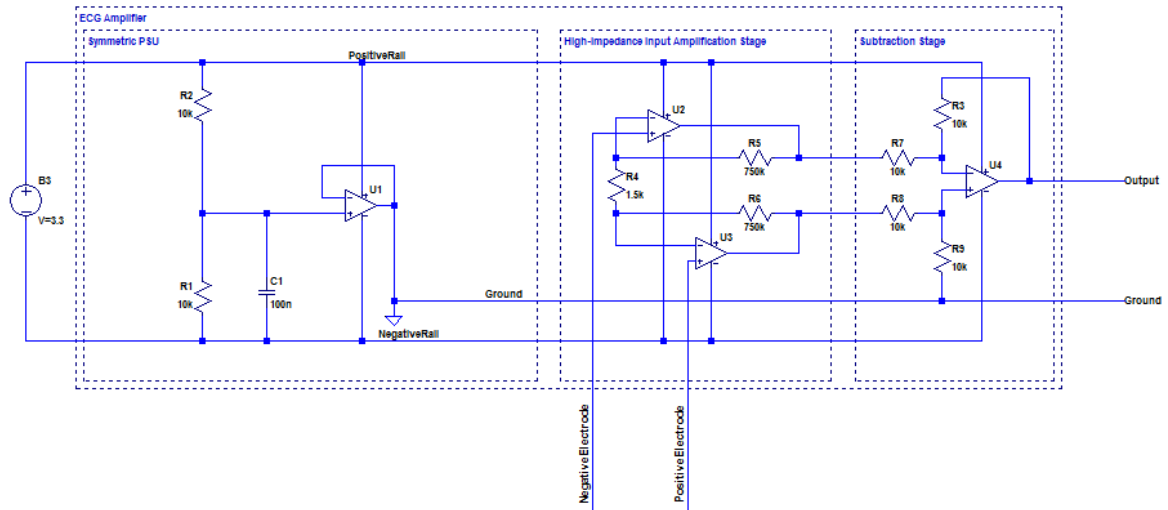


Abbildung 5: Unser Verstärker

Berechnung der Widerstandswerte für die einzelnen Widerstände: (TODO FIXME namen im plan anpassen)

$$R_3 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 1.5k\Omega$$

$$\text{Damit: } v = 1 + \frac{2 * R_1}{R_2} \Rightarrow R_1 = \frac{(v-1) * R_2}{2} = 749k\Omega$$

$$\text{Nächster Widerstand aus der E24-Reihe: } R_1 = 750k\Omega, v = 999.67$$

Abbildung 6: Widerstandsberechnung

Die tatsächliche Realisierung auf dem Steckbrett planen wir folgendermaßen:

TODO

Abbildung 7: Unser Verstärker

### 3.3 Operationsverstärker

Im Bezug auf den Operationsverstärker stellen wir folgende Überlegungen auf:

- **Rail to Rail:** Beide Versorgungsspannungen können beim Verstärken auch tatsächlich erreicht werden. Die Verstärkung darf nur so hoch sein, das bei der maximalen erwarteten Eingangsamplitude der Verstärker nicht clippt.
- **Common Mode Rejection Ratio:** Hier 80dB (typ), sollte möglichst hoch sein, da die Gesamt-CMRR des Differenzverstärkers nur so hoch wie die des Op-Amps sein kann.
- **Gain Bandwith Product:** Hier ca. 1.7MHz, weit von der geforderten Bandbreite unseres Verstärkers entfernt und muss deshalb hier nicht weiter betrachtet werden.
- **Maximum Peak to Peak output Voltage:** ca. 0V bis 2.2V bei 3.3V Versorgungsspannung. Für uns bedeutet das, das wir gegebenenfalls unsere virtuelle Masse auf 1.1V legen sollten.
- **Frequenzkennlinie:** Phasengang und Open Loop Verstärkung sind in dem für uns interessanten Frequenzbereich beinahe konstant und müssen deshalb nicht weiter betrachtet werden.
- **Temperaturbereich:** Der Temperaturbereich für den Betrieb des Operationsverstärkers ist 0°C bis 70°C. Da wir davon ausgehen das wir die Schaltung unter Laborbedingungen betreiben, stellt dies vorerst kein Problem dar.