

Gruppe:

Datum:

ausgearbeitet von:

Testat:

**Laborversuch „Der EKG-Verstärker“**  
(Anwendungen von Filterschaltungen)

Alle Vorbereitungsaufgaben und Messergebnisse sind in der Ausarbeitung sauber darzustellen! Zur Vorbereitung der Versuche ist es erforderlich, die Vorbereitungsaufgaben zu lösen **und** mit den Messaufgaben vertraut zu sein, d.h. dort angegebenen Dimensionierungen vorzubereiten. **Zum Laborversuch sind die SCHAMATICS-Schaltbilder und die Ergebnisse der Simulation mitzubringen. (Diskette)**

Ziel des Laborversuchs ist es, einen Verstärker aufzubauen, der die elektrische Erregung, die zur Kontraktion des Herzmuskels führt, auf dem Oszilloskopschirm sichtbar zu machen. Hauptaufgaben sind die Realisierung der verschiedenen Filter mit Hilfe von Operationsverstärkern.

**Inhalt:**

- 1) Grundlagen und Begriffe aus der Elektrokardiographie
- 2) Das Blockschaltbild des EKG-Verstärkers
- 3) Der Tiefpaß 3.Ordnung
- 4) Die RLC-Resonanzfilter und die Resonanzfilter mit der Induktivitätsersatzschaltung
- 5) der komplette EKG-Verstärker

**1 Grundlagen und Begriffe aus der Elektrokardiographie**

Bei Kontraktion eines jeden Muskels kommt es zu elektrischen Potentialänderungen, wobei ein erregter Muskelbezirk gegenüber einem nicht-erregten nach dem hier nicht näher erläuterten bioelektrischen Grundgesetz als elektrisch negativ betrachtet wird. Mit Hilfe der Elektrokardiographie lassen sich jene elektrischen Potentialänderungen messen, die mit der Aktion der Herzmuskulatur in Zusammenhang stehen. Größe, Richtung und Dauer dieser

elektrischen Potentialänderungen lassen Rückschlüsse auf

die Funktion des Herzmuskels zu.

Eine Muskelfaser wird nicht gleichzeitig auf ihrer ganzen Länge von der Erregung erfaßt, sondern eine Erregungswelle wandert in Längsrichtung über die Muskelfaser. Potentialänderungen in ihrem zeitlichen Verlauf bei der Erregung einer Zelle nennt man Aktionspotential. Dieses Aktionspotential läßt sich direkt messen, indem man an der betreffenden Muskelfaser eine Elektrode anbringt (z.B. man sticht eine Mikroelektrode direkt in die Muskelzelle).

Verständlicherweise ist diese Messung für die ärztliche Praxis ungeeignet. Man geht daher einen anderen Weg: Werden 2 Elektroden außerhalb der Muskelfaser in gewissem Abstand voneinander angebracht, so kann man ebenfalls das Aktionspotential messen, und zwar indirekt, da der den Muskel umgebende Körper elektrisch leitfähig ist.

Betrachtet man die kürzeste Verbindung zwischen den beiden Elektroden als *Ableitungslinie*, so ist die gemessene Spannung maximal, wenn der Spannungsvektor (am Muskel gemessen) die gleiche Richtung hat, wie die Ableitungslinie. Die an der Ableitungslinie gemessene Spannung ist null, wenn der zugehörige Spannungsvektor am Muskel senkrecht auf der Ableitungslinie steht. Das Herz ist ein sehr komplexer Muskel. Die Summe aller an der Herzaktion beteiligten Muskelfasern b.z.w. deren Elementar(spannungs)vektoren bilden gemeinsam einen resultierenden (zeitlich sich ändernden) dreidimensionalen Momentanvektor.

Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des das Herz umgebenden Mediums des Körpers ist die elektrische Aktivität des Herzmuskels beliebig in und am Körper ableitbar. Die Ableitung erfolgt an standardisierten Ableitpunkten mit Hilfe von Ableitelektroden am Körper. Da sich der Momentanvektor während der Herzaktion zeitlich ändert, variiert auch seine Projektion auf die Ableitungslinie, was zum typischen Kurvenbild des EKG führt.

Die einzelnen *Ableitungen* (nicht zu verwechseln mit den Ableitungen, die Sie aus der Differentialrechnung kennen) stellen somit unterschiedliche Projektionen des gleichen Vektorverlaufes dar. Daher werden bei einem in der Arztpraxis üblichen EKG immer mehrere E-

lektroden (2 am Arm, 2 an den Fußknöcheln, mehrere am Brustkorb) angebracht, um mehrere Ableitungen graphisch darstellen zu können, um so den ganzen Herzmuskel in seiner Aktion beurteilen zu können.

Im Jahr 1903 entwickelte EINTHOVEN erstmals ein klinisch brauchbares Gerät zum Messen dieser Ableitungen. (damals gab es noch keine elektronischen Verstärker, so war man auf hochempfindliche Saitengalvanometer angewiesen (Meisterwerke der Feinwerktechnik!!), um die sehr niedrigen Spannungen von ca. 1mV darstellen zu können). 1931 führte die weitere technische Entwicklung zum Einsatz von Röhrenverstärkern, mit denen die abgeleiteten Spannungen verstärkt und aufbereitet werden konnten. Nach EINTHOVEN sind folgende (einfache) Standardableitungen bekannt:

**Ableitung 1: linker Arm → rechter Arm**

Die Ableitungslinie ist also eine etwas über dem Herzen verlaufende waagrechte Gerade.

**Ableitung 2: linkes Bein → rechter Arm**

Die Ableitungslinie ist also eine von der rechten Achsel zum Schritt verlaufende schräge Gerade.

**Ableitung 3: linkes Bein → linker Arm**

Die Ableitungslinie ist also eine von der linken Achsel zum Schritt verlaufende schräge Gerade.

Die Ableitungspunkte an den Armen befinden sich einfacherweise direkt am Handgelenk, für das Bein bringt man die Elektrode direkt über dem Knöchel an.

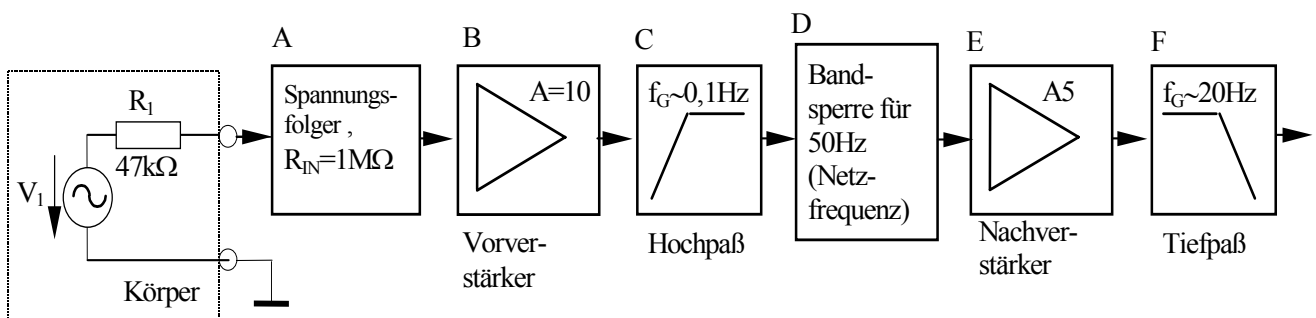
Wir werden am Ende des Versuchs, wenn alle

eine dieser Ableitungen (nach Wahl) messen und auf dem Oszilloskopschirm darstellen.

Es ist offensichtlich, daß es besonderer Maßnahmen bedarf, um die doch sehr kleinen Spannungen an den Ableitpunkten (ca. 1mV) messen zu können. Hierbei treten folgende Probleme auf:

- Die uns umgebende Umwelt ist durch elektrische und magnetische Felder so belastet, daß eine direkte Messung nicht möglich ist. Insbesondere sind folgende Störquellen zu erwähnen:
- die 50Hz Netzspannung, die sich in Form elektrischer Felder praktisch überall befindet
- hochfrequente Störungen durch Funkgeräte oder therapeutische Geräte.
- das elektrochemische Verhalten an den Elektroden: man benötigt eine Kontaktflüssigkeit oder ein Kontaktgel, das zusammen mit der Elektrode einen Übergang von Ionenleitung zu metallische Leitung darstellt und damit zwischen Körper und Elektrode ein galvanisches Element mit einer Spannung von bis zu +300mV darstellt.
- Die Ableitungspunkte am Körper selbst stellen elektrisch gesehen eine Spannungsquelle mit sehr hohem Innenwiderstand dar, zu dem sich der Innenwiderstand der Ableitelektroden (Gel, Kontaktflüssigkeit) noch addiert, so daß man das Signal an den Ableitelektroden praktisch nicht belasten darf.

Unter Berücksichtigung all dieser Punkte läßt sich nun das Blockschaltbild des EKG-Verstärkers angeben.



(2-1) Blockschaltbild des EKG-Verstärkers

Verstärkungsblöcke und Filter aufgebaut sind,

## 2 Das Blockschaltbild des EKG-Verstärkers

Der prinzipielle Aufbau eines EKG-Verstärkers ist in Bild (2-1) gegeben. Der Spannungsfolger hat einen sehr hohen Eingangswiderstand, um das EKG-Signal mit dem sehr hohen Innenwiderstand nicht zu stark zu belasten. Der Hochpaß trennt die Gleichspannungskomponente (hervorgerufen durch das galvanische Element Elektrode-Haut) ab. Die untere Grenzfrequenz darf nicht zu hoch gewählt werden ( $f_G \sim 0,1\text{Hz}$ ), sonst wird das EKG-Signal verfälscht (Differenzierung!). Das Sperrfilter sorgt dafür, daß die besonders störende Netzfrequenz von 50Hz unterdrückt wird. Der Vor- und Nachverstärker ergibt zusammen eine Gesamtverstärkung von 50. Das Tiefpaßfilter sorgt dafür, daß die höheren Frequenzen, auch die Oberwellen der 50Hz-Netzfrequenz unterdrückt werden. Es wird ein Tiefpaßfilter der Ordnung 4 bis 5 mit einer Eckfrequenz zwischen 10 und 30Hz verwendet. Nach dem Tiefpaß steht das Signal um die Gesamtverstärkung von 50 verstärkt zur Verfügung, so daß das 1mV EKG-Signal auf 50mV angehoben wird. Es läßt sich dann leicht mit der Einstellung von 20mV/unit auf dem Oszilloskopschirm mit einer Amplitude von ca. 2cm darstellen.

## 3 Das Tiefpaßfilter

Zur Unterdrückung aller hochfrequenten Anteile muß ein Filter höherer Ordnung entworfen werden.

### Vorbereitungsaufgaben:

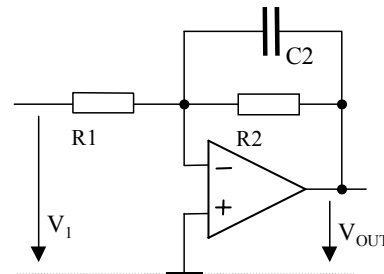
- 3.a) Machen Sie sich mit der Theorie und dem Entwurf von Tiefpaßfiltern vertraut (Skript).
- 3.b) Warum ist für einen EKG-Verstärker die Verwendung eines Tschebyscheff-Filters nicht angeraten? Was sind die Vor und Nachteile. Weswegen überwiegen hier die Nachteile?
- 3.c) Jede Gruppe soll anhand der nachstehenden Tabelle ein Tiefpaßfilter realisieren.

Gr.	Filter	Gr.	Filter	Gr.	Filter
1	Butterw. 4.Ordg. $f_g=14\text{Hz}$	2	Butterw. 4.Ordg. $f_g=17\text{Hz}$	3	Butterw. 5.Ordg. $f_g=14\text{Hz}$
4	Bessel 4.Ordg.	5	Bessel 4.Ordg.	6	Bessel 4.Ordg.

	$f_g=16\text{Hz}$		$f_g=13\text{Hz}$		$f_g=15\text{Hz}$
7	Bessel 4.Ordg. $f_g=14\text{Hz}$	8	Bessel 4.Ordg. $f_g=12\text{Hz}$	9	Butterw. 4.Ordg. $f_g=12\text{Hz}$
10	Bessel 4.Ordg. $f_g=17\text{Hz}$	11	Butterw. 5.Ordg. $f_g=16\text{Hz}$	12	Butterw. 5.Ordg. $f_g=12\text{Hz}$
13	Bessel 5.Ordg. $f_g=12\text{Hz}$	14	Bessel 5.Ordg. $f_g=14\text{Hz}$	15	Butterw. 4.Ordg. $f_g=13\text{Hz}$

Ermitteln Sie aus der Filtertabelle die normierten Koeffizienten  $a_i$  und  $b_i$  und berechnen Sie die realen Koeffizienten  $\alpha_i$  und  $\beta_i$ .

- 3.d) Berechnen Sie mit den Filterkoeffizienten  $\alpha_i$  und  $\beta_i$  die Bauelementewerte für die R's und C's. Die Staffelung der verfügbaren Kondensatoren entspricht der E-6-Reihe (1 - 1,5 - 2,2 - 3,3 - 4,7 - 6,8 - 10). Der größte Wert darf nicht größer als 2,2µF sein. Gegebenenfalls sind die Widerstandswerte zu erhöhen. Wenn Sie ein Teilfilter erster Ordnung benötigen (bei allen Filtern ungradzahliger Ordnung benötigt man ein solches Teilfilter), so kann dieses durch folgende Schaltung realisiert werden:



(3-1) Verstärker mit Tiefpaßfilter 1. Ordnung

Durch das Widerstandsverhältnis  $R2/R1$  kann auch die Verstärkung eingestellt werden. Die Schaltung ist also gleichzeitig (invertierender) Verstärker und Tiefpaßfilter erster Ordnung.

- 3.e) Zeichnen Sie das Komplettschaltbild des Tiefpaßfilters mit SCHEMATICS. Für die OP's können Sie die Elemente OP\_M verwenden. (Vorsicht: die OP's TL082 und LM258 wären auch möglich, aber die DEMO-Version von PSPICE bekommt mit diesen Modellen zu viele interne Kno-

- ten und die Schaltung lässt sich dann nicht simulieren)
- 3.f) Simulieren Sie die Schaltung (AC-Analyse) und geben Sie die Amplitude der Ausgangsspannung in dB sowie die Gruppenlaufzeit der Ausgangsspannung in PROBE aus.
  - 3.g) Simulieren Sie die Schaltung (Transienten-Analyse). Wählen Sie als Anregung ein Rechtecksignal mit geeigneter Frequenz und geben Sie die Ausgangsspannung in PROBE aus. Die Ausgangsspannung ist bei einer Rechteckanregung dann die Sprungantwort des Systems.
  - 3.h) Vergleichen Sie das AC-Verhalten und das Sprungverhalten mit den im Skript angegebenen Kurven. Das Frequenzverhalten und die Sprungantworten müssen identisch sein.
  - 3.i) Runden Sie jetzt die Widerstandswerte auf den nächstgelegenen E-Reihenwert auf oder ab (bilden Sie keine Widerstände aus parallel-oder seriengeschalteten Widerständen!), und wiederholen Sie die Simulation. Beurteilen Sie die Ergebnisse. Man sieht dann deutlich die Abweichungen, die aber i.a. akzeptiert werden können. Bringen Sie die beiden Schaltungen in eine SCHEMATICS-Zeichnung, damit Sie in Probe die beiden unterschiedlichen Schaltungen in ein Plot bekommen
  - 3.k) Bereiten Sie eine Diskette mit dieser Schaltung (SCHEMATICS) vor, so dass Sie beim Labortermin die Simulation durchführen können.

**Messaufgaben:**

Bauen Sie auf dem Steckbrett die Schaltung nach 3.e) auf, und nehmen Sie die Schaltung in Betrieb.

- 3.A) Geben Sie ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 2Hz auf das Tiefpaßfilter. Archivieren Sie das Oszillogramm. Vergleichen Sie den Verlauf mit der Sprungantwort des entsprechenden Filters, die im Skript angegeben ist. Verifizieren Sie, daß die Frequenz  $f=0\text{Hz}$  (Gleichspannung = Beharrungszustand) korrekt übertragen wird.
- 3.B) Stellen Sie mit dem Signalgenerator eine sinusförmige Spannung mit einer Frequenz von  $f=0,1*f_g$  und eine Amplitude von 2Vpp ein. Notieren Sie sich die Amplitude am Ausgang.

- 3.C) Stellen Sie mit dem Signalgenerator eine sinusförmige Spannung mit einer Frequenz von  $f=0,8*f_g, f=f_g, f=1,2*f_g, f=2*f_g, f=5*f_g$ , gleiche Amplitude-einstellung wie in 3.B) Notieren Sie sich die Amplitude am Ausgang. Vergleichen Sie mit dem Ergebnis der Simulation.

**Ausarbeitung:**

- 3.1) Skizzieren Sie den in 3.B) - 3.D) gemessenen Amplitudenverlauf im Bodediagramm. (doppeltlogarithmisch)
- 3.2) Drucken Sie die PROBE-Ergebnisse von 3.g), 3.h) und 3.i) aus und fügen Sie diese zur Ausarbeitung hinzu

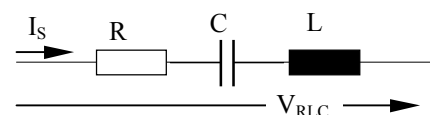
**4 Die RLC-Resonanzfilter**

**Allgemeine Grundlagen:**

Mit Hilfe von RLC-Schaltungen lassen sich frequenzselektive Schaltungen mit hoher Güte realisieren.

Im Folgenden sollen zusammenfassend (Wiederholung von Elektrotechnik Grundlagen) die wichtigsten Eigenschaften und Kenngrößen der Resonanzkreise zusammengestellt werden.

Der **Serienresonanzkreis**: ist eine Reihenschaltung von Spule, Widerstand und Kondensator wie Bild (4-10) zeigt



(4-10) Serienresonanzkreis

Der (komplexe) Strom  $I_S$  ist durch

$$\underline{I}_S = \underline{V}_{RLC} * \frac{1}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (4.10)$$

gegeben. Diese Gleichung läßt sich in die allgemeine Form :

$$\underline{I}_S = \underline{V}_{RLC} * \frac{1}{R} * \frac{1}{1 + j * Q_{RS} * \left( \frac{\omega}{\omega_R} - \frac{\omega_R}{\omega} \right)} \quad (4.11)$$

umformen, mit den (überall gebräuchlichen) Kenngrößen

$$Q_{RS} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{Resonanzgüte}) \quad \text{und}$$

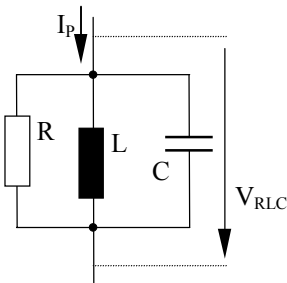
$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Resonanzfrequenz}) \quad (4.12)$$

Der **Parallelresonanzkreis**: ist eine Parallelschaltung von Spule, Widerstand und Kondensator wie Bild (4-20) zeigt

Die (komplexe) Spannung  $V_{RLC}$  ist durch

$$\underline{V}_{RLC} = \underline{I}_P * \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} \quad (4.20)$$

gegeben.



(4-20) Parallelresonanzkreis

Diese Gleichung läßt sich ebenfalls in die allgemeine Form :

$$\underline{V}_{RLC} = \underline{I}_S * R * \frac{1}{1 + j * Q_{RP} * \left( \frac{\omega}{\omega_R} - \frac{\omega_R}{\omega} \right)} \quad (4.21)$$

umformen. Mit

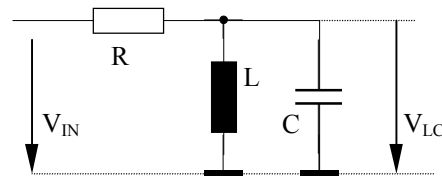
$$Q_{RP} = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{Resonanzgüte}) \quad \text{und}$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Resonanzfrequenz}) \quad (4.22)$$

Technische Bedeutung haben auch Schaltungen, die gegenüber den beiden klassischen (Serien- und Parallelresonanzkreis) etwas modifiziert sind. Erwähnenswert ist der

### Bandpaß

Er ist eine Modifikation des Parallelresonanzkreises und in (4-30) angegeben.



(4-30) Bandpaß

Im Gegensatz zum Parallelresonanzkreis hat man hier eine Eingangs- und Ausgangsspannung, so daß diese Schaltung durch eine Übertragungsfunktion beschrieben werden kann: Die Spannung am Ausgang  $V_{LC}$  läßt sich nach der Spannungsteilerregel leicht angeben und man erhält als Übertragungsfunktion:

$$\frac{\underline{V}_{LC}}{\underline{V}_{IN}} = A = \frac{Z_C \parallel Z_L}{Z_C \parallel Z_L + R} = \frac{\frac{j\omega L / j\omega C}{j\omega L + 1 / j\omega C}}{\frac{j\omega L / j\omega C}{j\omega L + 1 / j\omega C} + R} \quad (4.30)$$

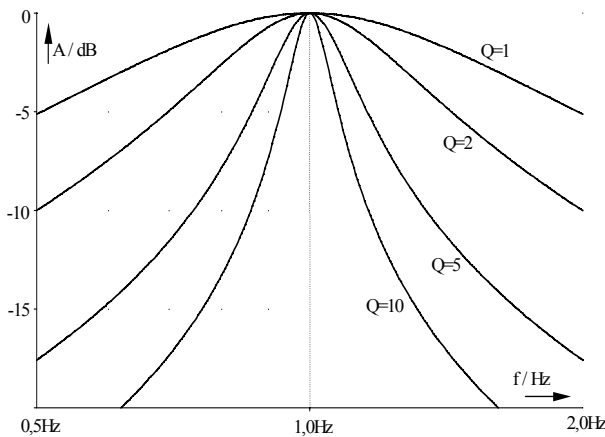
Diese Gleichung läßt sich auf den Hauptnenner bringen und man erhält wieder die bekannte Form:

$$\frac{\underline{V}_{LC}}{\underline{V}_{IN}} = A = \frac{1}{1 + j * R \sqrt{\frac{C}{L}} \left( \frac{\omega}{\omega_R} - \frac{\omega_R}{\omega} \right)} = \frac{1}{1 + j * Q_{RBP} \left( \frac{\omega}{\omega_R} - \frac{\omega_R}{\omega} \right)} \quad (4.31)$$

umformen. Auch hier erhält man die typischen Kenngrößen, die mit denen des Parallelresonanzkreises identisch sind:

$$Q_{RBP} = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{Resonanzgüte}) \quad \text{und}$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Resonanzfrequenz}) \quad (4.32)$$

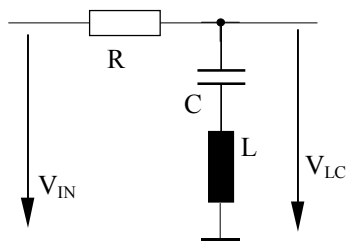


(4-31) Amplitudenverlauf des Bandpasses für  $f_R = 1 \text{ Hz}$

Entsprechend der Übertragungsfunktion (4.31) ist es mit dem Bandpaß möglich, eine Frequenz ( $\omega_R$ ) ungedämpft zu übertragen, alle anderen Frequenzen werden abgeschwächt. Je weiter die Frequenzen von der Resonanzfrequenz abliegen, desto größer ist die Abschwächung.

Bild (4-31) zeigt als Bode-Diagramm einige typische Verläufe der Amplitude in dB in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedene Werte von Q.

Eine weitere wichtige Schaltung ist die **Bandsperr**e. Er ist eine Modifikation des Serienresonanzkreises und in (4-40) angegeben. Im Gegensatz zum Serienresonanzkreis hat man auch hier eine Eingangs- und Ausgangsspannung, so daß diese Bandsperr ebenfalls durch eine Übertragungsfunktion beschrieben werden kann.



(4-40) Bandsperr

Die Spannung am Ausgang  $V_{LC}$  läßt sich nach der Spannungsteilerregel leicht angeben und man erhält als Übertragungsfunktion:

$$\frac{V_{LC}}{V_{IN}} = A = \frac{Z_L + Z_C}{Z_L + Z_C + R} = \frac{j\omega L + 1/j\omega C}{j\omega L + 1/j\omega C + R} \quad (4.40)$$

Um diese Gleichung auf eine der bekannten Formen zurückzuführen macht man einen kleinen Trick: man addiert im Zähler R und subtrahiert es gleich wieder:

$$\frac{V_{LC}}{V_{IN}} = A = \frac{j\omega L + 1/j\omega C + R - R}{j\omega L + 1/j\omega C + R} = 1 - \frac{R}{j\omega L + 1/j\omega C + R} \quad (4.41)$$

und man erhält:

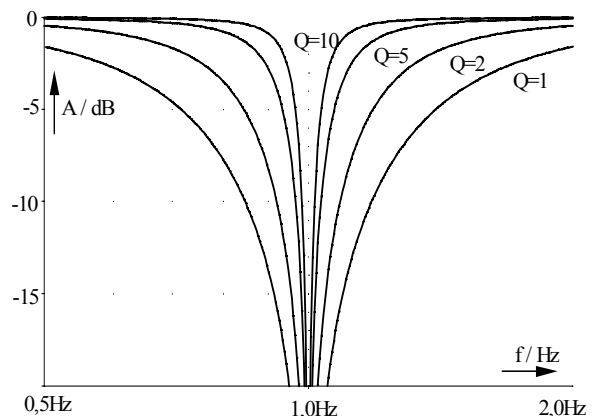
$$\frac{V_{LC}}{V_{IN}} = A = 1 - \frac{1}{1 + j * \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \left( \frac{\omega}{\omega_R} - \frac{\omega_R}{\omega} \right)} = 1 - \frac{1}{1 + j * Q_{RBS} \left( \frac{\omega}{\omega_R} - \frac{\omega_R}{\omega} \right)} \quad (4.42)$$

Auch hier erhält man die typischen Kenngrößen, die mit denen des Serienresonanzkreises identisch sind:

$$Q_{RBS} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{Resonanzgüte}) \quad \text{und}$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Resonanzfrequenz}) \quad (4.43)$$

Entsprechend der Übertragungsfunktion (4.42) ist es mit der Bandsperr möglich, eine Frequenz ( $\omega_R$ ) völlig zu unterdrücken ( $A=1-1=0$  für  $\omega=\omega_R$ ) übertragen, alle anderen Frequenzen werden mehr oder weniger durchgelassen. Je weiter die Frequenzen von der Resonanzfrequenz abliegen, um so mehr nähert sich die Übertragungsfunktion dem Wert 1.



(4-41) *Amplitudenverlauf der Bandsperre für  $f_R = 1\text{Hz}$ , verschiedene Werte für  $Q$*

Bild (4-41) zeigt als Bodediagramm einige typische Verläufe der Amplitude in dB in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedene Werte von  $Q$ .

Noch einige weitere Kenngrößen, die für die praktische Anwendung dieser Filter von großem Interesse sind: die Bandbreite ist durch

$$B = \frac{\Delta f}{f_R} = \frac{\Delta \omega}{\omega_R} = \frac{1}{Q} \quad \text{mit } \omega_R = 2\pi f_R \quad (4.50)$$

gegeben. Es ist der Abstand zwischen den beiden Frequenzen (ober- und unterhalb von  $\omega_R$ ) bei denen die Amplituden des Signals auf -3dB abgefallen ist. Die Phasenlage ist dann  $\pm 45^\circ$ .

#### **Anwendungen:**

**40.a)** Machen Sie sich mit der Spulenersatzschaltung nach „Antoniou“ (siehe Skript) vertraut.

#### **Bandpass:**

##### **Vorbereitungsaufgaben:**

- 41.a)** Berechnen Sie für einen **Bandpass** nach Bild (4-30) den Wert der Spule und des Widerstandes, wenn ein Kondensator von  $0,1\mu\text{F}$  verwendet wird, die Resonanzfrequenz  $50\text{Hz}$  beträgt, und die Güte  $Q_{\text{RBP}}=5$  sein soll.
- 41.b)** Berechnen Sie die Widerstände der „Antoniou“-Ersatzschaltung, wenn ein  $0,1\mu\text{F}$ -Kondensator verwendet wird, und der nach 41.a) ermittelte Induktivitätswert realisiert werden soll. Sie können für die Widerstände der „Antoniou“-Schaltung 4 gleiche Widerstände annehmen.
- 41.c)** Sehen Sie eine Abgleichmöglichkeit mit Potentiometer (einer der Widerstände variabel) vor, mit dem Sie die Toleranzen der Bauelemente kompensieren können, wenn die Toleranzen aller Bauelemente höchstens  $\pm 3\%$  betragen. Dimensionieren Sie diese Abgleichmöglichkeit, wenn mit dem gesamten Einstellbereich des Potentiometers gerade der maximale Fehler, der sich durch die un-

günstigste Toleranzkonfiguration ergibt, abgleichen können.

- 41.d)** Wie ändert sich die Frequenz des Bandpasses, wenn die beiden Kondensatoren um den Faktor 10 verringert werden (d.h.  $10\text{nF}$  statt  $0,1\mu\text{F}$ ) ?
- 41.e)** Zeichnen Sie das komplette Schaltbild des **Bandpasses** mit den Kennwerten aus **41.b)** mit Antoniou-Ersatzschaltung und Potiabgleich nach **41.c)** mit SCHEMATICS
- 41.e)** Simulieren Sie die Schaltung (AC-Analyse) mit parametrischer Variation von 3 verschiedene Potentiometereinstellungen (min, mitte, max) und geben Sie die Amplitude der Ausgangsspannung in dB aus.
- 41.e)** Simulieren Sie die Schaltung (Transientenanalyse) bei einer rechteckförmigen Anregung. (Potentiometer in der Mittelstellung). Wählen Sie die Frequenz geeignet
- 41.f)** Bereiten Sie eine Diskette mit dieser Schaltung (SCHEMATICS) vor, so dass Sie beim Labortermin die Simulation vorführen können.

##### **Messaufgaben:**

- Bauen Sie den **Bandpaß** nach **41.c)** auf, wobei Sie die Kondensatorwerte gemäß **41.e)** auf  $C=10\text{ nF}$  setzen.
- 41.A)** Geben Sie an den Eingang des Bandpasses ein Sinussignal von  $2\text{Vpp}$  und einer Frequenz von  $500\text{Hz}$ . Gleichen Sie mit dem Poti [siehe **4.1.d)**] auf **maximale** Amplitude (Resonanz) am Ausgang ab.
- 41.B)** Variieren Sie die Frequenz am Eingang. Was beobachten Sie am Ausgang? Wo liegen die 3dB- Frequenzpunkte (wo die Amplitude um 3dB gegenüber dem Resonanzpunkt abgefallen ist)
- 41.C)** Stellen Sie jetzt am Generator ein Rechtecksignal von  $20\text{Hz}$  ein (um die Sprungantwort zu sehen). Oszillographieren Sie das Ausgangssignal und archivieren Sie es.

##### **Ausarbeitung:**

- 41.1)** Wie groß ist die Bandbreite, die Sie in **41.B)** gemessen haben? Vergleichen Sie mit Gleichung (4.50)

**Bandsperr:**
**Vorbereitungsaufgaben:**

- 42.a) Berechnen Sie für ein **Bandsperr** nach Bild (4-40) den Wert der Spule und des Widerstandes, wenn ein Kondensator von  $0,1\mu\text{F}$  verwendet wird, die Resonanzfrequenz  $50\text{Hz}$  beträgt, und die Güte  $Q_{\text{RBS}}=1$  sein soll.
- 42.b) Zeichnen Sie das komplette Schaltbild der **Bandsperr** mit den Kennwerten aus 42.a) mit Antoniou-Ersatzschaltung an.  
Sehen Sie auch hier eine Abgleichmöglichkeit mit Potentiometer vor, mit dem Sie die Toleranzen der Bauelemente kompensieren können. (die Schaltung ist gegenüber 41.e) geringfügig modifiziert)
- 42.e) Simulieren Sie die Schaltung (AC-analyse) mit parametrischer Variation von 3 verschiedene Potentiometereinstellungen (min, mitte, max) und geben Sie die Amplitude der Ausgangsspannung in dB aus.
- 42.e) Simulieren Sie die Schaltung (Transienten-analyse) bei einer rechteckförmigen Anregung. (Potentiometer in der Mittelstellung). Wählen Sie die Frequenz geeignet
- 42.f) Bereiten Sie eine Diskette mit dieser Schaltung (SCHEMATICS) vor, so dass Sie beim Labortermin die Simulation vorführen können.

**Messaufgaben:**

- Bauen Sie die **Bandsperr** nach 42.b) auf dem Steckbrett auf. Verwenden Sie diesmal die Originalkondensatoren von  $0,1\mu\text{F}$  (Bauen Sie die Schaltung von 41.A) - 41.C) nur um!)
- 42.A) Geben Sie an den Eingang der Bandsperr ein Sinussignal von  $2\text{Vpp}$  und einer Frequenz von  $50\text{Hz}$ . Gleichen Sie mit dem Ableichpotentiometer auf minimale Amplitude am Ausgang ab.
- 42.B) Variieren Sie die Frequenz am Eingang. Was beobachten Sie am Ausgang? Wo liegen die  $-3\text{dB}$ - Frequenzpunkte?
- 42.C) Stellen Sie jetzt am Generator ein Rechtecksignal von  $f=10\text{Hz}$  ein (um die Sprungantwort zu sehen). Oszillographieren Sie das Ausgangssignal und archivieren Sie es.

**Ausarbeitung:**

- 42.1) Wie groß ist die Bandbreite, die Sie in 41.B) gemessen haben? Vergleichen Sie

mit Gl. (4.50)

**5 Der komplette EKG-Verstärker**

Das Blockschaltbild des EKG-Verstärkers ist in Bild (2-1) angegeben. Die kompliziertesten Teile (Bandsperr und Tiefpaßfilter) wurden bereits in Versuchsteil 3) und 4) aufgebaut und stehen zur Verfügung. Die restlichen Blöcke sind Standardblöcke, wie Sie von den Grundschaltungen mit Operationsverstärkern bekannt sind. Zeichnen Sie alle Schaltbilder mit SCHEMATICS

**Vorbereitungsaufgaben:**

- 5.a) Machen Sie einen Schaltungsvorschlag für den Spannungsfolger am Eingang (Block A)
- 5.b) Machen Sie einen Schaltungsvorschlag für den ersten Verstärker (Block B). Überprüfen Sie, inwieweit Schaltungsteile 5.a) und 5.b) zusammengefaßt werden kann.
- 5.c) Machen Sie einen Schaltungsvorschlag für den Hochpaß ( $f_G \sim 0,1\text{Hz}$ ) (Block C).
- 5.d) Machen Sie einen Schaltungsvorschlag für den Nachverstärker (Block E)
- 5.e) Geben Sie das Gesamtschaltbild des EKG-Verstärkers an (SCHEMATICS-Zeichnung) Falls es Probleme mit der Anzahl der Bauelemente gibt (DEMO-Version) 2 Blätter verwenden.

Hinweis: Einzelschaltbilder sind nicht erforderlich: es genügt die saubere Zeichnung des Komplettschaltbildes nach 5.e). Die Dimensionierung der Schaltungsvorschläge in 5.a) bis 5.d) muß jedoch sauber hergeleitet werden!!

**Messaufgaben:**

- Bauen Sie den kompletten EKG-Verstärker auf. Schließen Sie an den Eingang des EKG-Verstärkers ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von  $1\text{Hz}$  (ungefähr Pulsfrequenz) und einem geeigneten Amplitudenwert (keine Begrenzung) an.
- 5.A) Oszillographieren Sie die Spannungen an den Ausgängen aller Blöcke im EKG-Verstärker. und verifizieren Sie so die korrekte Funktion des EKG-Verstärkers. Achten Sie darauf, daß die Signale nicht in die Begrenzung gehen. Gegebenenfalls verringern Sie die Eingangsspannung. Archivieren Sie die Diagramme.



**5.B)** Schließen Sie den Eingang des EKG-Verstärkers an eine Versuchsperson an. Verwenden Sie eine der 3 Standardableitungen (siehe Kapitel 1). Die Versuchsperson muß absolut ruhig und entspannt sitzen. (Jede Muskelbewegung führt zu Störungen des EKG-Bildes). Archivieren Sie ein brauchbares Oszillographenbild.

*Hinweis: Sie werden - wenn Sie alles richtig gemacht haben- eine sauberes EKG bekommen. Für medizinische Auswertungen ist dies jedoch unbrauchbar: der Arzt benötigt zur Beurteilung und Diagnose des Herzmuskels ganz bestimmte Ableitungen, die am Brustkorb entnommen werden müssen.*

**Ausarbeitung:**

Stellen Sie alle in **5.A** und **5.B** gemessenen Oszillogramme sauber und dokumentiert zusammen.