

Karlsruher Institut für Technologie Institut für Biomedizinische Technik	
Prof. Dr. rer. nat. O. Dössel Geb. 30.33, Raum 515 Tel.: 0721 / 608-42650	M.Sc. Laura Anna Unger Geb. 30.33, Raum 413.1 Tel.: 0721 / 608-48232

Lineare Elektrische Netze

WS 2017/2018

SPICE-Aufgabe

Die maximale Punktzahl dieser Aufgabe entspricht 3% der Gesamtpunktzahl des Leistungsteils im Fach Lineare Elektrische Netze. Die in dieser SPICE-Aufgabe erzielten Punkte sind ausschließlich im aktuellen Wintersemester (2017/18) sowie im darauffolgenden Sommersemester (2018) gültig.

*Sie erhalten die SPICE-Aufgabe am Montag, den 8. Januar 2018 als Download in ILIAS. Der Bearbeitungszeitraum endet am Freitag, den 19. Januar 2018 um 09:30 Uhr. **Später eintreffende Aufgaben werden nicht gewertet! Die Eidesstattliche Erklärung muss unbedingt unterschrieben werden!** Die Aufgaben können am 19. Januar 2018 am Ende der LEN-Vorlesung im Hörsaal abgegeben werden. Die Dokumente müssen **geheftet** (tackern genügt) und mit Deckblatt (Seite 1 enthält **Name, Matrikelnummer, KIT-Account und Eidesstattliche Erklärung**) versehen sein. Wir werden am genannten Termin keinen Tacker bereitstellen.*

Zur Bearbeitung der Aufgaben können die Rechner im Steinbuch Center for Computing (SCC) verwendet werden. Für Studenten der Vorlesung LEN sind der A- und C-Pool des SCC montags von 13:00 Uhr bis 15:30 Uhr und der A-, H- und I-Pool mittwochs von 08:45 Uhr bis 11:15 Uhr reserviert. Zu allen anderen Zeiten können nicht besetzte Rechner im SCC ebenfalls verwendet werden. Die SPICE-Software kann, muss aber nicht auf den Rechnern in anderen Poolräumen installiert sein.

Am Mittwoch, den 10. Januar 2018 findet um 14:00 Uhr eine SPICE-Übung im Daimler-Hörsaal statt. Dort wird eine grundlegende Einführung in SPICE gegeben. Am Montag, den 15. Januar 2018 stehen zwischen 13:00 Uhr und 15:30 Uhr in den Poolräumen A und C Tutoren für offene Fragen und Hilfe zur Verfügung. Am Mittwoch, den 17. Januar 2018 stehen zwischen 08:45 Uhr und 11:15 Uhr in den Poolräumen A, H und I Tutoren für offene Fragen und Hilfe zur Verfügung.

Einführung in die Aufgabenstellung

In dieser SPICE-Aufgabe soll eine vereinfachte, analoge Verarbeitungsstufe für die Pulsmessung analysiert werden. Bei der Pulsoximetrie wird ein Körperteil - oftmals das Ohrläppchen oder ein Finger - mit einer Lichtquelle durchleuchtet. Nachdem das Licht den Körperteil durchlaufen hat, wird die Restintensität mit Hilfe einer Photodiode gemessen. Da sich die Absorptionseigenschaften von sauerstoffreichem und sauerstoffarmem Blut unterscheiden, kann von der Ausgangsspannung der Photodiode auf die Sauerstoffsättigung des Blutes geschlossen werden. Außerdem wird die Pulsfrequenz im Ausgangssignal sichtbar, da die Gefäße die Lichtintensität stärker abschwächen, wenn sie mit Blut gefüllt sind. Wir wollen uns hier auf die Pulsmessung konzentrieren.

Die folgende Schaltung soll dazu dienen, das eigene Pulssignal auf einem Oszilloskop darzustellen. Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte Schaltung zur analogen Vorverarbeitung des Ausgangssignals der Photodiode.

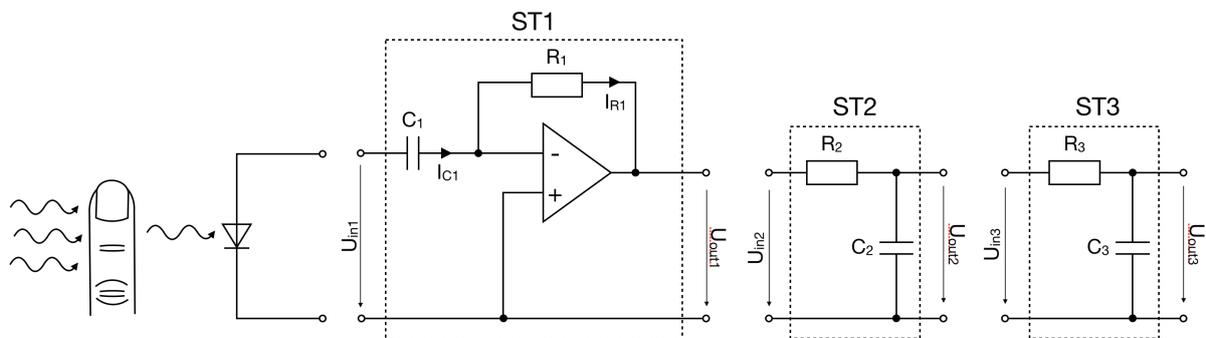


Abbildung 1: Analoge Vorverarbeitungsstufe mit Schaltungsteilen ST1, ST2 und ST3.

Da die Änderungen der Ausgangsspannung der Photodiode zu klein sind, um sie auf einem handelsüblichen Oszilloskop darzustellen, wird als erste Verarbeitungsstufe ein Differenzierer eingesetzt (Schaltungsteil ST1). Er differenziert das Eingangssignal und macht kleine Änderungen der Diodenspannung auf dem Oszilloskop sichtbar, auch wenn deren Absolutwert gering ist. Es folgen zwei weitere Schaltungsteile (ST2 und ST3). Die in Abbildung 1 dargestellte Schaltung stellt nur einen Ausschnitt der Beschaltung des Pulsoximeters dar und ist nicht vollständig.

Allgemeiner Hinweis:

- Verwenden Sie für alle Operationsverstärker das Modell *UniversalOpAmp2* aus LTSpice.
- Die Spannungsversorgung für alle Operationsverstärker soll $V_{CC} = \pm 10\text{ V}$ betragen.

Aufgabe 1

- (a) Stellen Sie die Übertragungsfunktion U_{out2}/U_{in2} auf. U_{out2} und U_{in2} bezeichnen dabei die Spannungen, die am Ausgang bzw. am Eingang von ST2 anliegen. Erläutern Sie anhand der Übertragungsfunktion, um welche Art von Filter es sich handelt (Hochpass, Tiefpass, Bandpass, Bandsperre). Geben Sie auch die Ordnung des Filters an. Ist das Filter aktiv oder passiv?
- (b) Simulieren Sie Schaltungsteil ST2 in LTSpice und stellen Sie das Bode-Diagramm der Übertragungsfunktion U_{out2}/U_{in2} dar.
- Erstellen Sie eine Spannungsquelle, um die Schaltung zu speisen. Stellen Sie die Wechselspannung am Eingang U_{in2} ein (1 V AC Amplitude, 0 V DC Amplitude).
 - Es gilt $R_2 = 40\text{ k}\Omega$ und $C_2 = 200\text{ nF}$.
 - Führen Sie eine AC-Analyse durch, indem Sie den Simulationsbefehl auf AC-Analyse einstellen. Variieren Sie die Frequenz von 0.01 Hz bis 1 kHz in 1000 Schritten pro Dekade.
 - Dokumentieren Sie einen Screenshot der Schaltung in LTSpice mit entsprechender Simulationsdirektive.
 - Dokumentieren Sie das erstellte Bode-Diagramm.
 - Geben Sie die Steigung des Bode-Diagramms im Sperrbereich an.
 - Markieren Sie die Grenzfrequenz f_g im Bode-Diagramm und lesen Sie diese ab. (Hinweis: Die Grenzfrequenz wird um 3 dB gedämpft.)
 - Bestimmen Sie die Grenzfrequenz f_g rechnerisch. Eine entsprechende Formel finden Sie im LEN-Skript.
- (c) Die beiden Schaltungsteile ST2 und ST3 sollen elektrisch voneinander entkoppelt werden, sodass der Ausgang von ST2 nicht durch den nachfolgenden Schaltungsteil ST3 belastet werden. Welche Operationsverstärkerschaltung in ihrer einfachsten Form kann hierfür verwendet werden?
- Geben Sie den Namen der gesuchten Operationsverstärkerschaltung an und skizzieren Sie diese.
 - Geben Sie den Amplitudengang ($a_v(\omega) = \dots$) sowie den Phasengang ($\varphi(\omega) = \dots$) der genannten Operationsverstärkerschaltung an.
- Wie erhält man das Bode-Diagramm einer Kette von Vierpolen nach dem Hinzufügen der genannten Operationsverstärkerschaltung (Amplitude und Phase)? Das Bode-Diagramm der Kette vor Hinzufügen der genannten Operationsverstärkerschaltung sei bekannt.
- (d) Führen Sie nun eine AC-Analyse wie in Aufgabenteil (b) für die Kette aus ST2 und ST3 durch, welche durch die in (c) genannte Schaltung elektrisch entkoppelt sind. Verwenden Sie die Simulationsdirektive aus Aufgabenteil (b). Auch die Spannungsquelle, die den Eingang der Schaltung speist, soll aus Aufgabenteil (b) übernommen werden. ST2 und ST3 sind identisch dimensioniert ($R_2 = R_3$ und $C_2 = C_3$).
- Dokumentieren Sie einen Screenshot der Schaltung in LTSpice mit entsprechender Simulationsdirektive.

- Dokumentieren Sie das entstandene Bode-Diagramm (Amplitude und Phase).
- Bestimmen Sie die Steigung des Bode-Diagramms im Sperrbereich und vergleichen Sie diese mit Ihrer Analyse aus Aufgabenteil (b).
- Von welcher Ordnung ist das entstandene Filter?

Aufgabe 2

Es soll nun die Wirkungsweise des Differenzierers (ST1) untersucht werden.

- (a) Da es sich bei ST1 um einen Differenzierer handelt, hängt die Ausgangsspannung U_{out1} am Ausgang von Schaltungsteil ST1 linear von der zeitlichen Ableitung der Eingangsspannung U_{in1} am Eingang von ST1 ab. Leiten Sie eine Gleichung $U_{out1} = A \cdot \frac{dU_{in1}}{dt}$ mit $A = const.$ her.
- Stellen Sie hierzu Gleichungen für I_{C1} und I_{R1} in Abhängigkeit von den Bauteilwerten R und C sowie den Spannungen U_{out1} und U_{in1} bzw. deren zeitlichen Ableitungen auf.
 - In welcher Beziehung stehen I_{C1} und I_{R1} ?
 - Gehen Sie von einem idealen Operationsverstärker aus.
- (b) Stellen Sie nun (unabhängig von Aufgabenteil (a)) die Übertragungsfunktion $\frac{U_{out1}}{U_{in1}}$ in Abhängigkeit von R_1 , C_1 und der Kreisfrequenz ω auf.
- (c) R_1 wurde zu $10\text{ M}\Omega$ gewählt. Dimensionieren Sie C_1 so, dass die Verstärkung für die Kreisfrequenz $\omega = 1\frac{1}{s}$ genau 40 dB beträgt. Stellen sie hierfür die Gleichung für den Amplitudengang a_v auf.
- (d) Führen Sie nun eine Transientenanalyse der Gesamtschaltung im Zeitbereich mit Hilfe von LTSpice durch. Beachten Sie, dass die Schaltungsteile ST2 und ST3 elektrisch entkoppelt sein sollen.
- Schalten Sie einen Widerstand $R_0 = 10\text{ k}\Omega$ am Eingang von ST1 in Reihe zu C_1 , um ungewollte Effekte bei hohen Frequenzen zu vermeiden.
 - Erstellen Sie eine Spannungsquelle, um die Schaltung zu speisen.
 - Verwenden Sie die erweiterte Option PULSE, um eine dreieckförmige Spannung zu erzeugen. Diese soll die Ausgangsspannung der Diode nach Modulation durch den Pulsschlag annähern. Wählen Sie eine Anfangsspannung ($V_{initial}$) von 0 V und eine Spannung im eingeschalteten Zustand (V_{on}) von 10 mV . Die ansteigende Rampe soll in einer Zeitdauer von $T_{rise} = 50\text{ ms}$ durchlaufen werden, während die abfallende Rampe der dreieckförmigen Spannung flacher verläuft ($T_{fall} = 550\text{ ms}$). Die Einschaltverzögerung (T_{delay}) soll 0.1 s betragen. Wählen Sie $T_{on} = 0\text{ ms}$. Die Periodendauer ($T_{periode}$) soll 1 s betragen. Simulieren Sie $n = 3$ Zyklen.
 - Starten Sie nun die Analyse im Zeitbereich (Transientenanalyse). Simulieren Sie die Schaltung im Zeitbereich von 0 s bis 2.5 s . Der maximale Zeitschritt soll $1\text{ }\mu\text{s}$ betragen.
 - Stellen Sie die Eingangsspannung U_{in1} in rot, die Spannung U_{out1} in grau und die Ausgangsspannung U_{out3} in dunkelblau in einem gemeinsamen Diagramm dar.
 - Dokumentieren Sie einen Screenshot der Schaltung mit Simulationsdirektive in LTSpice.
- (e) Wie weicht der Spannungsverlauf von U_{out1} von Ihrer Erwartung an ein ideales, invertierendes Differenzierglied ab? Zeichnen Sie hierzu qualitativ die dreieckförmige Eingangsspannung für eine Periodendauer. Zeichnen Sie in dasselbe Diagramm deren invertierte zeitliche Ableitung. Beschreiben Sie den Unterschied

zwischen beobachtetem (LTSpice) und erwartetem (Zeichnung) Spannungsverlauf. Welches Bauteil ist für die Abweichung verantwortlich? Wie müsste die Dimensionierung des Bauteils verändert werden, um den Effekt zu verringern?