

Rapport over projekt i Fys2ØV

Differensforstærkning

Christian Busk Hededal Steen Eiler Jørgensen
Morten Garkier Henriksen

Udarbejdet efteråret 1995

Indhold

1	Formulering af projektets mål	4
1.1	Problemformulering	4
1.1.1	Hvordan man vejer kaptajnen på en russisk U-båd	4
1.1.2	Hvordan man fjerner 200mV støj fra et 2mV-signal	4
1.2	Løsning i praksis	4
1.2.1	Hurtig gennemgang af opstillingen	5
1.3	Derfor virkede det altså alligevel	5
2	Teori for differensforstærkning	7
2.1	Hvilke funktionaliteter indgår?	7
2.1.1	Indgangstrinnet	7
2.1.2	Udgangstrinnet/Differensforstærkeren	7
2.1.3	Eksterne egenskaber	7
2.2	Teori for de to indgangstrin	8
2.3	Teori for differensforstærkeren	8
2.4	Kan man regne på det?	10
3	Beskrivelse af eksperimentet	11
3.1	Den konkrete løsning	11
3.1.1	Gennemgang af diagrammet	11
3.1.2	Den fysiske opstilling	12
3.2	Første eksperiment	13
3.3	Andet eksperiment: Med trimmet OFFSET	13
3.3.1	741-kredsene var ikke gode nok	13
3.4	Tredie forsøg: Nye operationsforstærkere	14
3.4.1	Et kredsløb der virkede	14
4	Resultater	15
4.1	Operationsforstærkerne	15
4.2	Støjforhold	15
4.3	Valg af prober eller elektroder	15
4.4	Plots af et EKG	16

5	Konklusion	17
6	Appendix	19

Figurer

1.1	Blok-diagram over opstillingen	5
2.1	Principdiagram over en differensforstærker	9
3.1	Diagram over opstillingen	12
6.1	Stykliste	21

Kapitel 1

Formulering af projektets mål

1.1 Problemformulering

I den medicinske forskning er man interesseret i at måle de elektriske spændinger, der opstår som følge af nerveimpulsernes elektrokemi. Det handler om spændingsforskelle på få millivolt, og det skal måles på en glimrende “antenne” for 50Hz radiostøj fra 220V-forsyningsnettet – menneskekroppen.

Det involverer altså det berømte “hvordan man vejer kaptajnen på en russisk U-båd”-problem:

1.1.1 Hvordan man vejer kaptajnen på en russisk U-båd

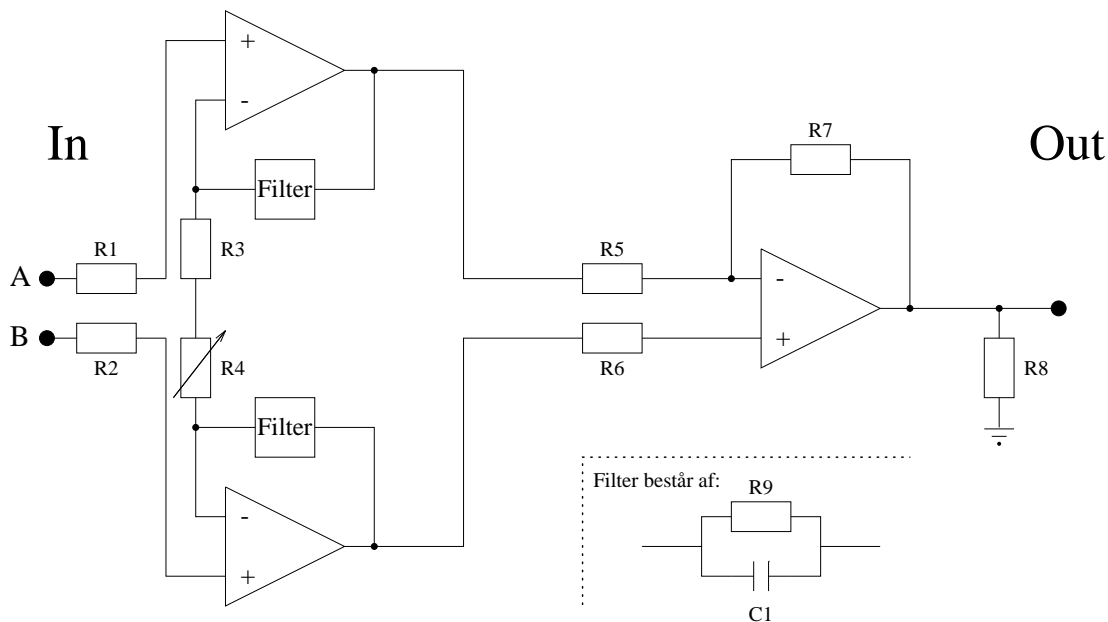
Man vejer først U-båden med kaptajn. Dernæst vejer man U-båden uden kaptajn. Kaptajnens masse er nu differencen mellem de to målte masser.

1.1.2 Hvordan man fjerner 200mV støj fra et 2mV-signal

- Man tager et kabel med to ledere.
- Man måler signalet plus støj på den ene kanal i en differensforstærker. På den anden kanal måler man kun støj.
- Da støjen gerne skulle være ens på begge kanaler fjerner man støjen fra signalet ved at tage kanalen ($0+\text{støj}$) og trække fra kanalen ($\text{signal}+\text{støj}$).
- Ud af det får man det signal man gerne ville måle. . .

1.2 Løsning i praksis

Da ovennævnte metoder ligner hinanden i betænkelig grad, og da de sammenstillet får vores projekt til at virke ret tvivlsomt, kræver det sikkert gode argumenter for at få nogen til at tro på ideen.



Figur 1.1: Blok-diagram over opstillingen

Men det er ikke desto mindre ovennævnte metode, der anvendes; vores implementation af løsningen ser ud som på figur 1.1

1.2.1 Hurtig gennemgang af opstillingen

Differensforstærkeren er den tredje OP-AMP yderst til højre. Den tager to input, måler differencen mellem dem, og multiplicerer denne med en passende faktor og smider dette output til “Out”.

Indgangene er beskyttet af højimpedans-kredse som i princippet bare kunne være spændingsfølgere, men i praksis også kan gøre nytte som forstærkere af indgangssignalet.

De to indgangsforstærkere skal så være *helt* identiske, da de derved ikke ændrer det indbyrdes forhold mellem kanalerne. Forstærkningen tænkes reguleret med et potentiometer (R4 på diagrammet), og kan derfor varieres til maksimal udnyttelse af forstærkerens spændvidde.

RC-filtrene er lavet for at øge tilbagekoblingen ved høje frekvenser (radiostøj).

1.3 Derfor virkede det altså alligevel

I forhold til at veje en U-båds-kaptajn har vi at gøre med meget mere præcise signaler, OP-AMP-kredsene er lynhurtige i forhold til de ændringer de skal måle, og frem for alt: Vi er interesseret i et kvalitativt billede af hvordan *ændringerne* i spændingen er. (Hvis vi antager det er EKG-udstyr vi skal lave).

Denne konstruktion skulle altså være tilstrækkelig til formålet: At finde et 2mV signal i en høstak af 100mV støj.

Kapitel 2

Teori for differensforstærkning

2.1 Hvilke funktionaliteter indgår?

Lad os nu atter engang kigge på blokdiagrammet over opstillingen. (Figur 1.1) Vi kan opdele kredsløbets funktionalitet i indgangstrin, filtre og udgangstrin. De to dele af indgangstrinnet består så af de to forforstærkere.

2.1.1 Indgangstrinnet

De to operationsforstærkere i indgangstrinnet fungerer efter samme princip – den ikke-inverterende forstærker. Tilbagekoblingen er hævet ved høje frekvenser ved at indsætte et filter i stedet for kun en modstand i tilbagekoblingen.

Det fremhæver indgangstrinnets funktion som støjreduktionsenhed – vi vil ikke forstærke radiostøj, derfor skal det undertrykkes mere end det lavfrekvente signal vi måler på.

Outputtet af dette trin er med samme fortegn som inputtet, og det er forstærket med en faktor givet ved relationer mellem indgangsmodstandene (R_1 og R_2), filteret og modstanden til det virtuelle nulpunkt (se senere).

2.1.2 Udgangstrinnet/Differensforstærkeren

Her ligger hovedfunktionaliteten i kredsløbet. Denne operationsforstærker får to kanaler som input, og giver et signal proportionalt med forskellen på de to inputspændinger. Forstærkningen er givet ved en relation mellem modstandene.

2.1.3 Eksterne egenskaber

Da operationsforstærkere i teorien har uendelig høj indgangsimpedans, kan det diskuteres om vores indgangsmodstande behøver at være så store. Da det er mennesker vi skal måle på, er det ikke uden en vis intuition, at det alligevel kan

være smart med kraftige modstande direkte på indgangene. Dermed er risikoen for $\pm 15\text{V}$ over brystkassen på en patient minimeret en hel del.

Udgangstrinnet skulle gerne have meget lille udgangsimpedans, dvs. at det som elektromotorisk kraft i et kredsløb skulle have en meget lille indre modstand, og det skulle derfor kunne trække et bredt spektrum af måleinstrumenter (inklusive lavimpedans-voltmetre) på sin udgang.

På diagrammet er bevidst ikke indtegnet spændingsforsyning. Der bør være en fuldstændig symmetrisk $\pm 15\text{V}$ -spænding på alle operationsforstærkerne. Den kan yderligere stabiliseres med 7815-kredse beregnet til spændingsstabilisering, alt efter hvor usikker man er på sin spændingsforsyning.

2.2 Teori for de to indgangstrin

Indgangssignalet på de to indgange består begge af (den samme) støj af alle frekvenser og så en spændingsforskel som stammer fra det signal vi ønsker at måle. De to signaler skal forstærkes *nøjagtig* lige meget, da de jo senere skal vurderes indbyrdes.

På Figur 1.1 kan den konkrete implementation af de to indgangstrin ses. Det burde være ganske almindelige ikke-inverterende indgangsforstærkere, men deres sædvanlige forbindelse til jord ved hjælp af en modstand er afløst af et modstandskredsløb, hvor man så forventer at der “svæver” en virtuel jord alt efter forstærkernes indbyrdes balance.

Da de to forstærkeres input (og også output) kan antages at være meget ens, fordi de skal filtrere meget støj fra et svagt signal, og tilbagekoblingen primært foregår på støjen, vil de to forstærkere indbyrdes balancere hinandens forstærkning.

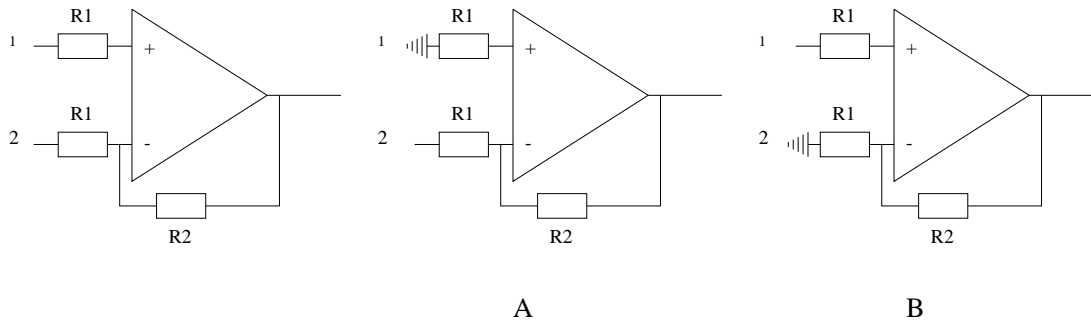
Antag nemlig at den ene forstærker forstærker signalet lidt kraftigere end den anden. Den virtuelle jord vil da blive presset mod den “svage” forstærker, som dermed forstærker lidt mere – mens den tidligere “stærke” forstærker vil få reduceret sin forstærkning.

Således balancerer de to forstærkere hinanden til samme forstærkning af støjen; og da tilbagekoblingen (og dermed balanceringen) er fremmet for den højfrekvente del af signalet vil det irrelevante signal blive benyttet til at holde de to forstærkere ens!!!

2.3 Teori for differensforstærkeren

Differensforstærkeren er basalt set en kombination af to simple forstærkertyper: den inverterende- (Figur 2.1A) og den ikke-inverterende forstærker (Figur 2.1B).

- Hvis man sætter indgang (1) til jord får man et kendt forstærkerkredsløb – den inverterende forstærker – med kendt forstærkning ($-R_2/R_1$). Forstær-



Figur 2.1: Principdiagram over en differensforstærker

keren vil altså med positivt input i forhold til (1) give negativt output i passende ratio.

- Hvis man sætter indgang (2) til jord får man et andet kendt kredsløb – den ikke-inverterende forstærker – med en anden kendt forstærkning (R_2/R_1 hvis $R_2 \gg R_1$). Forstærkeren vil altså til positivt input i forhold til (2) give positivt output i passende ratio.

Ovenstående har følgende konsekvenser:

- Antag at V_{ind} er positiv, regnet positivt på (2) i forhold til (1).
Hvis (1) bliver sat til referencepunkt havde vi en inverterende forstærker – output bliver negativt da input er positivt.
Hvis (2) bliver sat til referencepunkt vil input være negativt (det var positivt i forhold til (1)), og output også negativt, da vi nu arbejder med en ikke-inverterende forstærker.

Da vores to uafhængige målinger på den samme spænding giver samme output, må forstærkeren i begge tilfælde give et signal proportionalt (med samme proportionalitet) med differensen på de to indgange, hvilket var præcis hvad vi ønskede.

Der plejer at være en modstand fra den ikke-inverterende indgang til jord, for at holde indgangsimpedansen ens på de to indgange. Men da vi arbejder med forstærkere med meget optimale ind- og udgangsegenskaber, skulle forskellen i impedans ikke være noget problem. Til gengæld kunne det have konsekvenser for balanceringen hvis der var en modstand til jord på differensforstærkerens ene indgang.

Vi har ikke afprøvet kredsløbet med den ekstra modstand i praksis.

2.4 Kan man regne på det?

Ja, det kan man sikkert godt. Men vi er stødt ind i følgende problemer:

- De to indgangsforstærkeres indbyrdes balancerings-show gør det ret vanskeligt at regne sig frem til deres forstærkning uden at kunne læse sig til konstruktørens ideer med kredsen.
- Det er ret svært at simulere et signal, der ligner vores input tilstrækkelig meget til at få et tilfredsstillende overblik over forstærkerens “live”-egenskaber.

... så vi har altså ikke regnet på det. Da vi heller ikke specifikt har forsøgt at udmåle forstærkerens egenskaber er skaden ikke så stor.

Kapitel 3

Beskrivelse af eksperimentet

3.1 Den konkrete løsning

Først et overblik:

3.1.1 Gennemgang af diagrammet

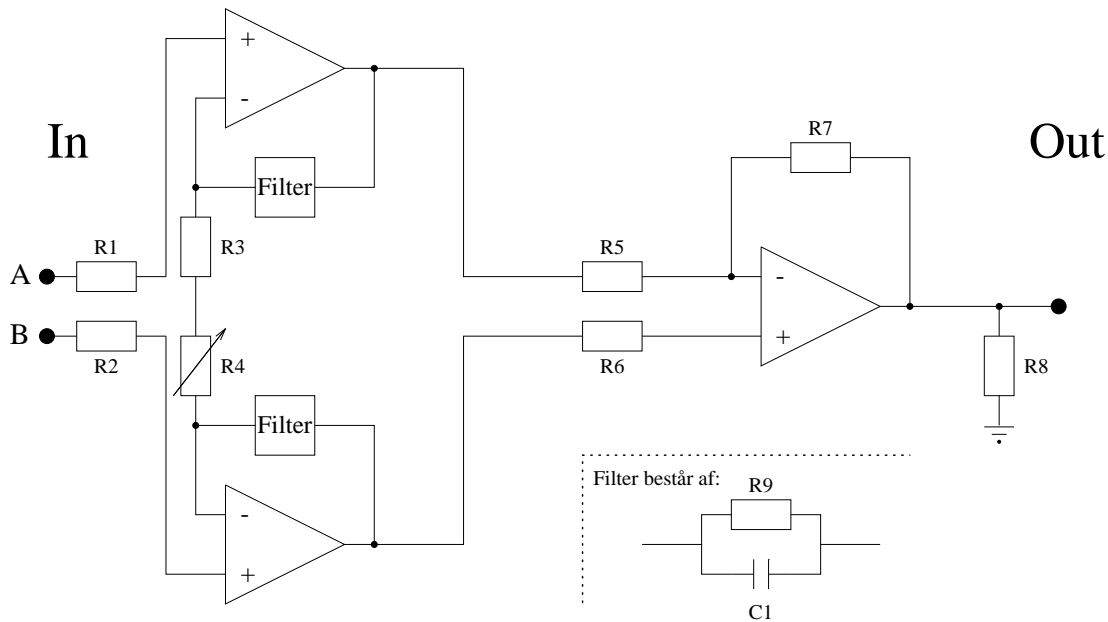
Lad os tage et kig på opstillingen igen (Figur 3.1). Inspiration til opstillingen er hentet fra et udleveret diagram, som vi ikke har fået original-kilde til. Derfor har vi ikke haft mulighed for at finde forfatterens argumentationer for opstillingens faciliteter. Vi har måtte ændre komponentværdierne af praktiske årsager, men i det store hele er vores opstilling identisk med referencens.

Ved indgang (A) og (B) sidder der to kraftige modstande, til at sikre at en patient ikke lider overlast hvis en forstærker skulle brænde sammen og sætte $\pm 15V$ på sine indgange. De to modstande er valgt så ens som muligt.

Dernæst følger indgangstrinnet som ovenfor beskrevet. Den samlede indgangs-impedans bliver derved MEGET stor, da der både er store modstande direkte i indgangen og derefter operationsforstærkere som i praksis også har modstand i $M\Omega$ -størrelsen. Filteret – en parallelkobling af en relativt stor modstand og en relativt lille kondensator – fremmer tilbagekobling på den højfrekvente støj, som benyttes til indbyrdes balancering af forstærkerne. Både kondensatorerne og de to modstande er valgt så ens som muligt.

Modstandstrinnet indeholdende (R3 og R4) skal resultere i en mulighed for at regulere indgangsforstærkningen. Det er her den virtuelle “jord” skal “flyde” op og ned.

I udgangstrinnet sidder to *ens* modstande R5 og R6, og tilbagekoblingen sker gennem R7. Her afviger vi fra vores oprindelige ide, da R7 ifølge oplægget skulle være et filter som de to andre tilbagekoblinger. Desværre resulterede det i at udgangsforstærkeren gik i selvsving ved 20MHz (!), så vi fjernede kondensatoren, da den sikkert sad der for at undgå at operationsforstærkeren anvendt i oplægget gik i selvsving.



Figur 3.1: Diagram over opstillingen

På udgangen sidder en modstand på $2k\Omega$ til jord. Den sidder der for at sikre at der er konstant drift på udgangstrinnet (også selvom der ikke trækkes strøm fra til måleinstrumenter), da udgangsforstærkeren ellers kunne blive beskadiget.

3.1.2 Den fysiske opstilling

Hele opstillingen blev opbygget på et protoboard, hvor der udover diagrammets komponenter også blev tilføjet multi-turn potentiometre til OFFSET-regulering af alle operationsforstærkere i kredsløbet, og spændingsforsyning på $\pm 15V$.

Begge forsyningsspændinger har en kondensator til jord, for at undgå eventuel støj fra spændingsforsyningen.

Begge indgange og udgangen tilsluttes almindelige coax-kabler. Det ville have været ønskeligt med et indgangskabel med to ledere og fælles skærm, men coax-kablerne viste sig at være tilstrækkeligt skærmende for støj.

Hele protoboardet indbygges i en metalkasse, og der trækkes ledninger til en fælles jord for kassen, opstillingen, måleinstrumenterne, spændingsforsyningen og senere også patienten.

Hermed har vi et system der er enigt om hvad 0 er, og vi kan begynde at måle.

3.2 Første eksperiment

I vores første forsøg arbejdede vi med 741-kredse og ingen OFFSET-regulering. Vi oplevede med det samme, at 0V ind på begge kanaler langt fra gav 0V ud af indgangstrinnet. Det fik så differensforstærkeren til at overstyre totalt, så den gik i $\pm 15V$. Det kom i og for sig ikke som en overraskelse, da kredsløbet er relativt følsomt overfor “ujævnheder”.

Løsningen var så at tilføje OFFSET-regulering, og det resulterede fremover i en del trimmearbejde. Det blev her af stor betydning at de to indgangsforstærkere balancerede hinanden – deres OFFSET-reguleringer var i praksis ikke uafhængige, og vi endte med at justere OFFSET efter at differencen på de to udgange af indgangstrinnet skulle være 0V istedet for at begge udgange skulle være eksakt nul.

3.3 Andet eksperiment: Med trimmet OFFSET

Det involverede en del hovedbrud i starten at trimme de to indgangsforstærkere indbyrdes. Trimningen blev foretaget med begge indgange sat til jord, og det forløb (efter en del mislykkede forsøg) nogenlunde smertefrit.

Desværre viste det sig, at hvis vi satte indgangene ens (og forventede en udgangsspænding på 0V) uden at tvinge dem til jord, ville udgangsspændingen være omkring 2V til den ene eller den anden side, hvilket jo i allerhøjeste grad er forskellig fra 0V.

Helt galt gik det, hvis vi satte forskelligt signal på indgangene. Vores udgangssignal blev da en blanding af radiostøj, 50 Hz og et rivende DC-offset. Vi forsøgte os med en del løsninger, men alle så ud til at ende med det samme problem:

3.3.1 741-kredsene var ikke gode nok

De to operationsforstærkere forstærkede på ingen måde ens. Selvom alle øvrige komponenter, der indgik i kredsløbet som værende ens var målt efter og fundet ens, og selvom vores forstærkere skulle balancere indbyrdes, bar resultatet præg af, at forstærkernes egenskaber grundlæggende var forskellige.

Vi kom derfor til det resultat, at vi måtte afprøve nogle bedre kredse, og valget faldt på TL071-kredsene fra TI. De er sokkelkompatible med 741, havde mulighed for OFFSET-regulering og burde være det nødvendige trin bedre end standardkredsene.

Det er egentlig ikke overraskende, da vores oplæg anvendte nogle helt andre kredse som forstærkere, og de i alle tilfælde så ud til at være valgt med en vis bagtanke ...!

Resten af komponenterne bibeholdtes.

3.4 Tredie forsøg: Nye operationsforstærkere

Efter udskiftning af kredsene ændrede kredsløbet sig markant. Trimningen blev lettere (den var næsten ikke nødvendig); men til gengæld oplevede vi at med en kondensator i tilbagekoblingen på udgangstrinnet gik udgangstrinnet i selvsving når vi forsøgte at trimme udgangsforstærkeren. Selvsvinget var en relativt pæn sinus-svingning på 20 MHz (!).

Vi fjernede kondensatoren, og oplevede ikke videre problemer med selvsving.

3.4.1 Et kredsløb der virkede

Nu kunne vi trimme hele kredsløbet til 0V ud ved 0V i differens ind. Desværre så kredsløbet i første omgang ud til at være ekstremt følsomt for støj på de ellers skærmede ledninger. I første omgang arbejdede vi med coax-ledninger ud til et punkt, hvor vi så gik over til korte uskærmede prøveledninger af ens længde. Det virkede i første omgang ikke; men i et enkelt tilfælde slap et signal igennem og frem for alt så resultatet ikke reproducerbart ud.

Der blev nu prøvet med store coax-stiks inderben direkte på huden, hvor forsøgspersonen samtidig havde et solidt greb om stikkens hus, der fungerede som ledning til jord.

Bortset fra et stort (og varierende) DC-offset, kunne man nu se et signal: en lille prik, der hoppede i takt til forsøgspersonens hjerteslag ...

Nu var det egentlig kun et spørgsmål om at finde en x/t-skriver til et plot af et EKG. Der blev så lidt besvær med det store DC-offset og skriveren, men vi fik et output med en OK opløsning.

Kapitel 4

Resultater

Det egentlige formål med projektet var at få kredsløbet til at virke. Vi har ikke haft ambition om en nærmere kortlægning af båndbredde, signal/støj-forhold og forstærkning under eksperimentielle forhold.

Da vi heller ikke følte os i stand til at udtale os kvalificeret om forventningsværdier, og kredsløbet stadig manglede en kærlig hånd for at være *helt* stabilt, har vi sat vores afgrænsning ved at få kredsløbet til at virke.

Nogle resultater/erfaringer kan vi dog godt præsentere:

4.1 Operationsforstærkerne

... skulle tilsyneladende være af bedre kvalitet end standard 741-kredse. Vi har ikke en forklaring på hvor det går galt for de billige kredse, men vi kunne observere at forskelle i deres egenskaber var en meget effektiv kilde til at trække hele kredsløbet i sæk.

Det må derfor tilrådes ved en eventuel gentagelse af eksperimentet, at der anvendes kvalitetsforstærkere med en mulighed for at justere et DC-OFFSET.

4.2 Støjforhold

Da kredsløbet er MEGET følsomt over for støj, skal der naturligvis benyttes skærmede kabler, fælles jord og metalkabinet for at begrænse problemet mest muligt. Desuden kunne det tilrådes at opbygge kredsløbet symmetrisk om strømfor- syning og jord i indgangstrinnet, for at levere "lige meget støj" til begge indgange.

4.3 Valg af prober eller elektroder

Vi har ikke eksperimenteret med valg af elektroder af tidshensyn, men der ligger klart et vigtigt uudforsket område her, som vi nok burde have arbejdet videre

med, hvis tiden havde tilladt det.

4.4 Plots af et EKG

... fra vores opstilling er vedlagt i appendixet.

Kapitel 5

Konklusion

Vi har oplevet at det er muligt med simple kredsløb, at udføre en ganske effektiv støjreduktion på et meget rodet signal — det egentlige signal bedømmer vi til at være under een procent af det samlede input.

Vi måtte til gengæld sande at de meget udbredte og billige 741-kredse ikke var gode nok. Årsagen er ukendt for os, men to 741-kredses indbyrdes egenskaber kunne tilsyneladende være så forskellige, at vores indgangstrin smadrede signalet.

Vi oplevede et DC-offset på udgangssignalet som kan fjernes ved simpel anvendelse af en tilstrækkelig stor kondensator direkte i serie med udgangen. Efter et sådant filter kan man forstærke signalet yderligere, hvis dette måtte ønskes.

Valg af elektroder er et område der burde udforskes videre, men det faldt altså uden for tidsrammerne af denne rapport.

At rigtige medicinere så gerne vil have 6 kanaler (dvs. 6 differensforstærkere!); ja, det må de altså selv om . . .

Københavns Universitet 19. december 1995

Christian Busk Hededal

Steen Eiler Jørgensen

Morten Garkier Hendriksen

Litteratur

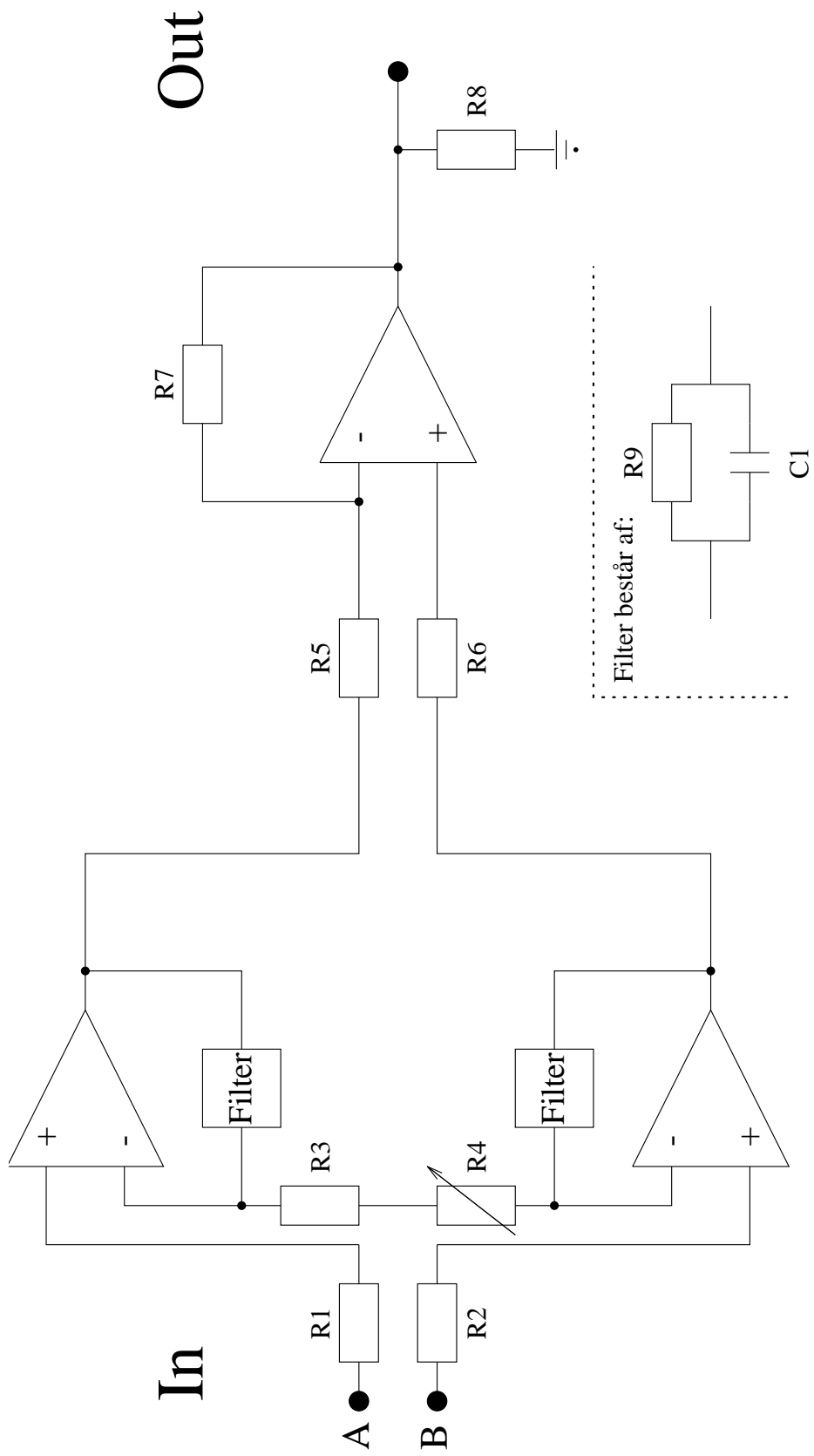
- [1] Martin H. Jones: *A practical introduction to electronic circuits* (1985)
Second Edition.
- [2] Lent/Miastkowski: *Practical Applications Circuits Handbook* s. 36

Kapitel 6

Appendix

Dette appendix indeholder:

- Diagrammet over opstillingen i stort format
- Stykliste
- Det oprindelige diagram vi fik udleveret
- Et print af et EKG med vores instrument



Som operationsforstærkere blev valgt kredsen TL071 fra (Texas Instr.), som er benkompatibel med 741-kredsen men er af væsentlig bedre kvalitet. 741-kredsen blev som nævnt også prøvet, men den havde vi ikke held med.

Komponent:	Værdi
R1 og R2 :	10M Ω
R3 :	47k Ω
R4 :	100k Ω (multiturn)
R5 og R6 :	4,7k Ω
R7 :	100 k Ω
R8 :	2,2k Ω
R9 :	100 k Ω \pm 1%
C1 :	2,2nF

Desuden blev der anvendt kondensatorer på 100nF til at aflede spændingsforsyningerne til jord, diverse kabler, en \pm 15V spændingsforsyning, et metalkabinet, diverse måleinstrumenter (deriblandt det uundværlige oscilloskop) samt adskillige liter kaffe til rapportskrivningen.

Figur 6.1: Stykliste