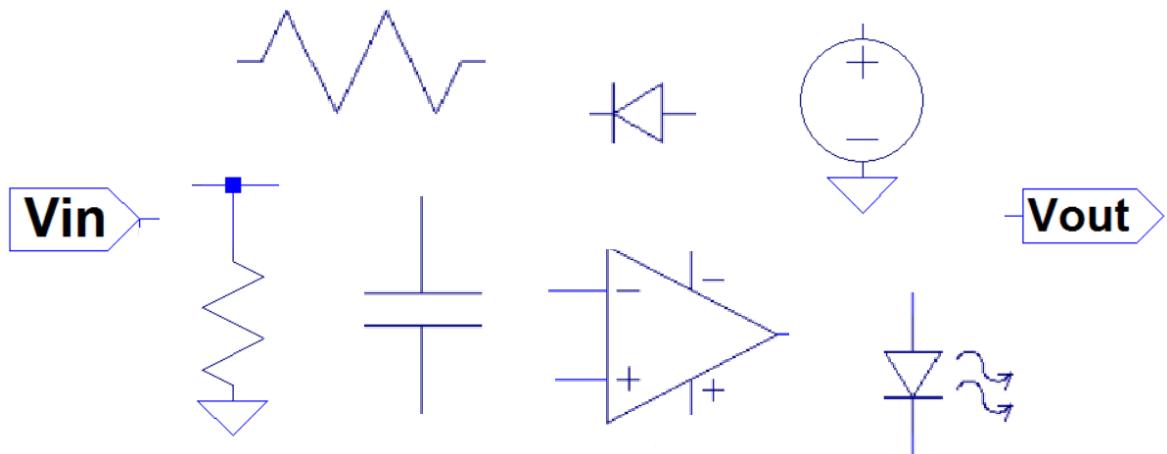

System til detektering af kropsbalance

Projektrapport 3. semester

AALBORG UNIVERSITET, 02/09/15 - 16/12/15

SKREVET AF
GRUPPE 375



Gruppemedlemmer:

Cecilie Topp, Mads Pedersen, Maria Kroustrup
Mathias Olsen, Nikoline Kristensen, Sofie Jensen



Titel: System til detektering af kropsbalance

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT
Sundhedsteknologi
Fredrik Bajers Vej 7
9220 Aalborg
<http://smh.aau.dk>

Tema: Instrumentering til opsamling af fysiologiske
signaler

Projektperiode: D. 02/09/2015 - 16/12/2015

P3, efterår 2015

Projektgruppe: 375

Synopsis:

Deltagere:

Tralalalala

Cecilie Sophie Rosenkrantz Topp

Mads Jozwiak Pedersen

Maria Kaalund Kroustrup

Mathias Vassard Olsen

Nikoline Suhr Kristensen

Sofie Helene Bjørnsrud Jensen

Vejleder: Erika G. Spaich

Oplagstal:

Sideantal:

Bilagsantal og -art:

Afsluttet den 16. december 2015

Forord og læsevejledning

Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med et 3. semester projekt af studerende på Aalborg Universitet, Sundhedsteknologi af gruppe 15gr375 i efteråret 2015. Ud fra projektets overordnede tema: "Instrumentering til opsamling af fysiologiske signaler" blev der heraf opstillet forskellige projektforslag. Denne rapport vil tage udgangspunkt i følgende projektforslag opstillet af Erika G. Spaich: "System til detektering af kropsbalance". Gruppens vejleder har under hele projektperioden været Erika G. Spaich.

Projektet rettes mod fagkyndigt personale, der beskæftiger sig med rehabilitering af apopleksipatienter og medstuderende på Aalborg Universitet, samt andre, der har interesse i emnet. Vi vil gerne takke vores vejleder Erika G. Spaich for vejledning og feedback igennem hele projektperioden. Derudover vil vi give en særlig tak til Jan Stavnhøj for hjælp og rådgivning til udarbejdelse af systemet samt Træningsenhed Vest Aalborg Kommune for at vi måtte komme og observere genoptræning af patienter med balanceproblemer.

Læsevejledning

Projektrapporten er baseret på den problembaserede AAU-model. Selve rapporten er delt op i 4 kapitler, samt appendiks, således at første kapitel indeholder projektets initierende problem, der ligger til grund for problemanalysen. Andet kapitel indeholdende problemanalysen giver relevant viden om apopleksi og apopleksipatienternes følger, rehabiliteringsforløb og nuværende rehabiliteringsmuligheder, samt baggrundsviden vedrørende teknologisk behandling af biologiske signaler. Dette er efterfulgt af en projektafgrænsning samt problemformulering, der ligger til grund for problemløsningen. Problemløsningen beskrives i kapitel tre, indeholdende projektets praktiske del ift. at bygge et system til detektering af kropsbalancen. Herunder beskrives systemets kravspecifikationer samt systemdesign, herunder teori, simulering, implementering og test. I fjerde kapitel afsluttes rapporten med en evaluerende diskussion og konklusion af systemets funktion samt perspektivering ift. udvikling af systemet. Herefter findes litteraturlisten, samt appendiks, der henvises til som bilag A, bilag B osv.

I rapporten benyttes Vancouver-metoden ved litteraturhenvisning, hvor anvendt litteratur tildeles fortløbende numre, således at den første reference i rapporten tildeles nummeret [1], den næste [2] osv. I litteraturlisten skrives den fulde reference, dvs. forfatter navn og årstal samt URL-kode hvis referencen er en hjemmeside, i den rækkefølge referencen anvendes i rapporten. Hvis referencen er placeret efter et punktum i en sætning tilhører referencen hele afsnittet, hvorimod er referencen placeret før et punktum tilhører referencen kun den pågældende sætning. Der der placeret flere referencer efter hinanden betyder dette, at der er anvendt flere referencer til den pågældende sætning eller afsnit.

Derudover anvendes det amerikanske komma, når der i rapporten skrives tal, eksempelvis 12,500 og 2.4. Dvs. det amerikanske komma på dansk er et punktum og omvendt det amerikanske punktum på dansk er et komma.

Indholdsfortegnelse

Forord	iv
Læsevejledning	iv
Kapitel 1 Indledning	1
1.1 Initierende problem	2
Kapitel 2 Problemanalyse	3
2.1 Apopleksi	3
2.2 Undersøgelse og behandling	7
2.3 Følger af apopleksi	8
2.4 Rehabilitering	11
2.5 Biofeedback	14
2.6 Behandling af biologiske signaler	16
2.7 Problemafgrænsning	21
2.8 Problemformulering	21
Kapitel 3 Problemløsning	22
3.1 Systembeskrivelse	22
3.2 Pilotforsøg	25
3.3 Specifikke kravspecifikationer	25
3.4 Teori, design, simulering, implementering og test	31
Litteratur	60
Bilag A Nervesystemer og nervefysiologi	65
A.1 Hjernens anatomi	65
A.2 Nervens anatomi	66
A.3 Aktionspotentiale	66
Bilag B Kroppens balance	69
B.1 Ørets bidrag til balance	69
B.2 Øjets bidrag til balance	70
B.3 Proprioceptorerne og skeletmuskulaturens bidrag til balancen	71
Bilag C Pilotforsøg	73
C.1 Formål med pilotforsøg	73
C.2 Materialer	73
C.3 Metode	73
C.4 Forsøgsopsætning på breadboard	74
C.5 Fremgangsmåde	75
C.6 Resultater	76
C.7 Diskussion og konklusion	80

Kapitel 1

Indledning

Apopleksi er den tredje største dødsårsag i Danmark og ca. 12.500 personer indlægges hvert år pga. sygdommen [1]. I 2011 levede 75.000 danskere med følger af apopleksi, og ud af disse er omkring hver fjerde person afhængig af andres hjælp [1]. Det er dog ikke alle patienter, der får mén af apopleksi.

Der sker en stigning af indlæggelsesforløb for mænd og kvinder, når de bliver ældre end 65 år [2]. Antallet af danskere, der lever med følger og varige mén af apopleksi, forventes derfor at være stigende i takt med, at der kommer flere ældre [3]. Apopleksi er i forvejen den sygdom, der kræver flest plejedøgn i sundhedssektoren, men i takt med, at der kommer flere ældre, forventes det at udgifterne til denne pleje stige. Ud fra et økonomisk perspektiv er det derfor omkostningsfuldt for samfundet ift. behandling, rehabilitering og produktivitetstab. Udgifterne til sygdommen udgør 4% af sundhedsvæsenets samlede udgifter [1, 4].

Følgerne af apopleksi opstår ofte pludseligt og kan medføre både fysiske og mentale konsekvenser for patienten [5]. Efter et apopleksitilfælde kan patienter opleve nedsat eller ikke funktionsdygtig balance. Problemer med balanceopstår, da encephalon ikke kan bearbejde de balanceinformationer, som proprioceptorerne og sansereceptorerne sender. [6] Dette resulterer i, at 40% af det samlede antal apopleksipatienter oplever faldulykker i det første år. [7]. Apopleksipatienter kan desuden opleve neglekt, der også er skade på de sensoriske og motoriske funktioner og er et af de hyppigste mén. Der findes forskellige typer af neglekt. Eksempelvis kan patienten opleve ikke at være opmærksom på den ene side af kroppen. [8]

Balanceproblemer og neglekt har alvorlige konsekvenser for apopleksipatienter, da de bl.a. kan føre til begrænsninger i hverdagen. [5, 9] For en apopleksipatient med balanceproblemer kan det være vanskeligt at vende tilbage til sin normale hverdag, da almindelige huslige pligter, såsom rengøring og personlig pleje kan være vanskeligt at klare uden hjælp. [10]

Balanceproblemer samt begrænsninger i hverdagen kan medføre nedsat livskvalitet. Dette ses eksempelvis ved, at apopleksipatienter har dobbelt så stor selvmordsrate som baggrundsbefolkningen [10]. Et apopleksitilfælde medfører en pludselig afbrydelse i patientens livsforløb. Det kan for patienten blive uoverskueligt at opretholde sociale- og familierelationer, hvilket medfører, at de senere i livet oplever en forringelse af deres livskvalitet. En forbedret livskvalitet kan skabes ved hurtigere rehabilitering samt forbedrede kropslige funktioner, herunder balancen. [10]

For at apopleksipatienter opnår den bedst mulige behandling og rehabilitering er det afgørende, at der er et fungerende sammenspil mellem kommuner, sygehuse og praktiserende læger [10]. Det er essentielt, at rehabiliteringen påbegyndes få dages efter apopleksitilfældet er opstået, for så vidt muligt at genskabe tabte funktionsevner. [11]

1.1 Initierende problem

Hvilke fysiologiske konsekvenser kan apopleksi have for patienten, og hvad er rehabiliteringsmulighederne for en patient med balanceproblemer?

Kapitel 2

Problemanalyse

2.1 Apopleksi

Encephalon har brug for ilt og næringsstoffer for at kunne fungere normalt og er derfor afhængig af en konstant blodtilstrømning. Hvis denne tilstrømning stopper, kan det have alvorlige konsekvenser. [1] Apopleksi er en sygdom, som har indvirkning på blodgennemstrømningen til encephalon, da den nedsætter blodtilførslen enten ved en blodprop eller ved en blødning [1]. Symptomerne fra apopleksi fremtræden kan variere fra et par minutter op til et par dage [12, 4]. Sundhedsstyrelsen definerer apopleksi som pludseligt opståede fokalneurologiske symptomer af formodet vaskulær genese med en varighed på over 24 timer. [13] Hvis varigheden er under 24 timer, betegnes det som transitorisk cerebral iskæmi (TCI), hvor de fleste tilfælde varer under en time uden permanent hjerneskade [8, 14]. Flere tusinde danskere oplever TCI årligt, men det er sjældent, at den ramte selv opdager det. Symptomerne heraf er milde og kan være en følelsesløshed i lemmerne eller i ansigtet samt korte oplevelser af forvirring, synsforstyrrelser og sproglige forstyrrelser. Det er sjældent, at der opstår mén fra TCI og derfor kræves der ingen behandling. [12, 1] Risikofaktorer, der kan medføre apopleksi, er forhøjet blodtryk, rygning, højt kolesteroltal, diabetes og arvelige defekter. Konsekvenserne fra apopleksi kan omfatte forbīgående eller varig lammelse af forskellige dele af kroppen, vanskeligheder ved tale og spisning samt et tab i muskulær koordinering. [12] Hurtig behandling er essentielt for at mindske disse konsekvenser [1]. Et apopleksitilfælde kan være forårsaget af enten en embolia cerebri (iskæmisk) eller hæmorrhagia cerebri (hæmoragisk), som ses på **figur 2.1.** [14]



Figur 2.1: På figuren ses, hvad der sker i encephalon, når henholdsvis iskæmisk og hæmoragisk apopleksi opstår. Der ses til venstre på billedet, at iskæmisk apopleksi sker, hvis en artierie blokkeres. Til højre ses, at hæmoragisk apopleksi opstår, når en arterie brister. (Revideret) [14]

Iskæmisk apopleksi

Iskæmisk apopleksi opstår i 80 – 85% af alle apopleksitilfælde [8]. Her blokeres en hjernearterie af en blodprop, der stopper tilførslen af blod til et bestemt område i encephalon, hvilket ses på **figur 2.1**. Blodpropperne dannes primært pga. åreforkalkning enten ved en trombe eller en emboli. Trombe sætter sig fast det sted, hvor den er dannet og består af blodplader og fibrin. [15] Emboli består typisk af fragmenter af blodceller eller kolesterol, som er diffunderet ind i blodcirculationen af encephalon fra arterierne [16]. Nervecellerne skades efter få minutter grundet iltmangel men kan i værste tilfælde dø efter denne periode [15, 17].

Hæmoragisk apopleksi

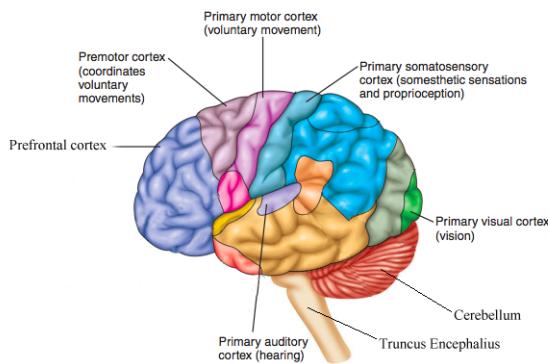
Hæmoragisk apopleksi opstår i 10 – 15% af tilfældene iblandt det samlede antal af apopleksiramte [8]. Årsagen heraf skyldes hovedsagligt forhøjet blodtryk eller, i sjældnere tilfælde, aneurismer eller medfødte misdannede kar [15]. Hæmoragisk apopleksi opstår, når en hjernearterie brister, og lækage af blod danner en blodansamling, hvilket ses på **figur 2.1**. Dette beskadiger det omkringliggende væv og forøger trykket i encephalon. Intracerebral hæmoragi opstår ofte af forhøjet blodtryk, der danner et pres på de små arterier, som får dem til at briste. [18]

Blødning i subaraknoidalrummene skyldes ofte bristning af en aneurisme i encephalon [15].¹ Symptomerne ved subaraknoidalblødning er generel tab af hjernefunktion, da der forekommer et øget pres på cerebrum, hvormod hæmatomet ved intracerebral hæmoragi er lokaliseret et bestemt sted i encephalon og forårsager nedsat funktion af én bestemt hjernefunktion [18].

2.1.1 Påvirkning på encephalon

Cerebrum er den største region af encephalon og kan deles op i to hjernehalvdeler. Her sker en processering af sanserne, tale, tanker, synet, hukommelsen og følelser. [19] For en yderligere beskrivelse af hjernens anatomi, nervefysiologi samt biologisk kommunikation se bilag A. Som tidligere nævnt i afsnit 2.1 er 80 – 85% af apopleksitilfældene iskæmiske og rammer hyppigst i media arterien, der forsyner det meste af cerebrum med blod. Derfor er det ofte sensoriske- og motoriske områder, der bliver skadet ved et apopleksitilfælde. [20, 21, 22] For at opretholde balancen kræves et samarbejde af de sensoriske- og motoriske områder i encephalon som ses på **figur 2.2**.

¹ FiXme Note: NTK: Subaraknoidalrummene er rummet mellem hjernehinderne



Figur 2.2: På figuren ses de sensoriske og motoriske regioner på den venstre hjernehalvdel af cerebrum. Derudover ses cerebellum og truncus encephalius. (Revideret) [23]

De sensoriske- og motoriske områder har stor indflydelse på hinanden. I **tabel 2.1** vil områder i encephalon, der har med balanceen at gøre, samt deres funktion fremgå. Ved apopleksi kan flere områder rammes samtidig, hvilket kan gøre, at flere funktioner svækkes. Da balanceen er styret af flere forskellige områder i encephalon betyder en skade på f.eks. det visuelle cortex ikke, at man mister balanceen helt.

Område i encephalon	Funktioner
Cerebellum	Modtager proprioceptiv og vestibulær information fra medulla spinalis og truncus encephalius. Fortolker og koordinerer frivillige bevægelser.
Det visuelle cortex	Fortolker lyssignaler, videresender informationer omkring rumlige forhold, bevægelse og koordinerer visuelle og somatosensoriske impulser.
Det præmotoriske cortex	Integratorer den sensoriske og motoriske systemer og igangsætter bevægelse som respons på visuelle eller auditive stimuli.
Det præfrontale cortex	Koordinerer information fra de andre cortex og udarbejder abstrakte intellektuelle funktioner, som at forudse hvilken effekt en handling vil have. Bearbejdere eksterne sanseindtryk inden der foretages en handling.
Truncus Encephalius	Modtager vestibulær information fra det indre ører, som fortæller hovedets placering i rummet og generel balance ift. til tyngdekraften.

Tabel 2.1: På tabellen ses en oversigt over de områder af encephalon, som påvirker balanceen, samt deres funktion. Områder kan yderligere ses på **figur 2.2** [19, 24]

De sensoriske- og motoriske nervebaner fra sensorisk- og motorisk cortex løber ned gennem medulla spinalis og leder derved impulser ud til target organer og muskler og tilbage igen. Nervebanerne fra hhv. højre og venstre hjernehalvdel krydsner i medulla oblongata eller i medulla spinalis. Denne krydsning betyder, at afferente signaler fra højre side af kroppen behandles i venstre hjernehalvdel, der sender efferente signaler tilbage til højre side af kroppen. [19, 23] Dette medfører, at et apopleksitilfælde i højre hjernehalvdel kan give sensoriske- og motoriske skader i venstre kropsdel og omvendt med venstre hjernehalvdel. [13, 9]

Hver muskelgruppe har sine egne dedikerede nerveceller. Antallet af nerveceller til hver muskel afhænger af, hvor præcis legemets bevægelse skal være. Flere nerveceller gør musklens bevægelse mere præcis. [23] Nervecellerne har en bestemt placering i cerebral cortex. Derfor vil et apopleksitifælde et bestemt sted ramme en bestemt muskel. F.eks. vil en skade på det auditory cortex kunne medføre balanceproblemer, da det derved er svært for patienten at vide hvor hovedet er placeret i rummet. [25] Efter et apopleksitifælde har encephalon en naturlig tilpasning ift. at genskabe disse tabte funktioner. I nogle tilfælde kan encephalon genskabe skadede nerver eller finde en anden vej for funktionen, som en eventuelt tabt nerve skulle udføre. [19] Denne mekanisme kaldes plasticitet [26].

2.1.2 Plasticitet

Encephalon kan ændre eller tilpasse sig de stimuli, den udsættes for, hvilket kaldes encephalons plasticitet eller nerveplasticitet. Processen sker kontinuerligt igennem hele livet, men encephalon kan ikke danne nye nerver. [23] Under et apopleksitifælde forekommer der som sagt iltmangel til encephalon, og nervecellerne kan derved blive skadet eller gå tabt [15]. Celledød medfører, at den døde nerve mister sine forbindelser til fungerende nerver. Denne forbindelsesafbrydelse i encephalon bevirket, at der kan opstå en kaskade af mistet kommunikation i de eksisterende nerver. Herved kan en nerves celledød påvirke andre områder af encephalon end blot der, hvor skaden er sket. [27] Encephalon benytter sig af sin plasticitet således, at den omlægger det eksisterende nervenetværk til et nyt. Den aktiverer nogle signalstoffer, som kan finde en alternativ metode til at gennemføre den ønskede handling. [28] Som nævnt kan encephalon ikke danne nye nerver efter celledød, hvilket betyder, at der ikke kan generhverves præcis samme funktion som tidligere men evt. en lignende funktion. Plasticitet kan deles op i tre fænomener: [27]

- Denervation Supersensitivity: Dette er en afbrydelse imellem akson og synapse. Dette gør synapsen overfølsom og bliver derved lettere påvirket til at lave nye synapseforbindelser.
- Unmasking of Silent (Latent) Synapses: Denne hændelse sker når synapser, der har fuld funktionalitet men ingen effekt på slutstedet, afsløres, hvorefter der opstår en aktivitet og effekt. Dvs. synapsen fungerer, men encephalon er ikke opmærksom på dette.
- Collateral Sprouting: Dette sker hvis to nerver innerverer på samme slutsted, og den ene nerve dør. Så vil den anden nerve spire ind i den skadete nerves telodendron, så funktionen genvindes.

Ud fra disse tre fænomener findes der en fysiologisk baggrund for rehabilitering. Nerveplasticitet er særlig øget op til en måned efter et apopleksitifælde. Det er derfor vigtigt at foretage genoptræning i denne periode, så encephalon kan danne nye forbindelser og kommunikationsveje. [28] Gentagelser af en færdighed effektiviserer synapseforbindelser, hvilket betyder, at den kompenserende færdighed styrkes. [23]. En kompenserende færdighed dækker over de kompenserende bevægelser, som kroppen skaber for at erstatte en tabt funktionsevne [29, 30].

Nerveplasticitet ses dog ikke kun som en positiv egenskab. Plasticiteten gør encephalon fleksibel for omlægning efter en skade men også sårbar over for udefrakommende og interne ubevidste påvirkninger. Dårlige vaner er encephalons negative side af plasticitet, fordi gentagende hændelser, der frigiver dopamin, også giver stærke synapseforbindelser. Når man forsøger at kvitte en dårlig vane som f.eks. rygning vil det neurale kredsløb i encephalon blive svagere, men det findes stadig og kan nemt genaktiveres. [31]

2.2 Undersøgelse og behandling

Det er vigtigt, at patienter med formodet apopleksi får den rette undersøgelse og behandling. Undersøgelse og diagnosticering er afgørende for det efterfølgende forløb, da behandling samt rehabilitering planlægges herefter. [13]

2.2.1 Undersøgelse

Når en patient med apopleksi indlægges, er grundig undersøgelse nødvendig for at identificere, hvilken form for apopleksi patienten har. Diagnosticeringsprocessen består af flere trin. Først optages en anamnese, hvor lægen stiller patienten spørgsmål omkring sygdomsforløbet og eventuelle risikofaktorer. Herefter anvendes en udvalgt, standardiseret skala til at foretage en klinisk undersøgelse af patientens almene tilstand. Den valgte skala gør det muligt for lægen at vurdere, hvordan patientens tilstand udvikler sig i perioden efter indlæggelsen. Der kan efterfølgende foretages enten en CT- eller MR-scanning for at undersøge, om patienten er ramt af iskæmisk eller hæmoragisk apopleksi. MR-scanning er at foretrække, hvis lægen mistænker blødning i cerebellum eller truncus encephalius, hvorimod CT-scanning anvendes til at bedømme området og omfanget af blødningen. Under forløbet kontrollerer lægen også andre fysiologiske faktorer, eksempelvis blodtryk og temperatur. Disse faktorer kan give information om apopleksien. [13, 15]

2.2.2 Behandling

Ved både iskæmisk og hæmoragisk apopleksi er det vigtigt at komme i behandling hurtigst muligt. [32] Standardbehandling for iskæmisk apopleksi har siden 2006 været trombolyse. Selve behandlingen foregår ved, at der sprøjtes blodpropopløsende medicin ind i en arterie, hvorefter blodpropen opløses. Denne behandling skal senest foregå 12 timer efter, da behandlingen derved ikke vil have nogen indvirkning efter længere tid. Ved hurtig behandling kan områder af encpehalon reddes, hvormed patientens fremtidige livskvalitet forbedres.² En risiko ved behandling med blodpropopløsende medicin er, at det kan skabe nye blødninger i dele af hjernen eller andre steder i kroppen. [33] Behandlingen af patienter, der rammes af hæmoragisk apopleksi, afhænger af hæmatomets placering samt størrelse. Primaert vil lægerne dræne blodet ud, såfremt det er muligt. Der kan desuden behandles med blodtrykssænkende medicin for at begrænse blødningen. [18]

2.2.3 Forebyggelse

En væsentlig del af iskæmisk apopleksi behandling er forebyggelse, da der er risiko for en ny blodprop. Til dette anvendes antikoagulationsbehandling, som er blodfortyndende medicin. Normalt har kroppen sit eget koagulationssystem, som får blodet til at storkne. Derudover medvirker koagulationssystem til at opløse evt. blodpropper i det kardiovaskulære system. For iskæmiske apopleksipatienter fungerer koagulationssystemet ikke optimalt, og det er dermed nødvendigt at hæmme blodets evne til at koagulere. Dette modvirker dannelsen af nye blodpropper. [34] For både iskæmisk og hæmoragisk apopleksi er en væsentlig del af forebyggelsen at undgå diverse risikofaktorer ift. livsstil. [35]

²FIXme Note: NTK: Trombolysebehandling finder sted på 12 sygehuse fordelt over de fem regioner.

2.3 Følger af apopleksi

Apopleksi kan forekomme pludseligt og dermed uden, at den ramte kan forberede sig på følgerne. Dette er modsat andre sygdomme, såsom diabetes, sclerose og KOL, hvor progressionen ofte sker gradvist. Der kan opstå psykiske konsekvenser forårsaget af hæmoragisk eller iskæmisk apopleksi som f.eks. depression eller angst, hvilket bl.a. går udover patientens lyst til at komme tilbage til sin normale hverdag. Følgerne kan derfor have indflydelse på patientens fysiske og mentale tilstand. [5] Udo over de psykiske konsekvenser giver apopleksi andre følger, som afhænger af, hvilken del af encephalon der rammes, og hvor omfangsrig hjerneskaden er. Omfanget afhænger af tiden, hvor en del af encephalon ikke får ilt, størrelse af den eventuelle blødningen og trykket i arterien [36].

2.3.1 Sensoriske og motoriske skader

De sensoriske og motoriske konsekvenser er de hyppigst forekommende følger hos apopleksramte og kan medføre problemer med udførsel af orienterende handlinger. [20, 37] De sensoriske og motoriske funktioner har indflydelse på hinanden, da der ofte anvendes sanser og motorik til udførsel af forskellige funktioner [9].

Som tidligere nævnt i afsnit 2.1.1 kan apopleksi skade sensoriske såvel som motoriske funktioner, som kan ses på **figur 2.2** på side 5 .

Symptomerne på sensoriske følger kan bl.a. være:

- Agnosi: Manglende evne til at genkende genstande på trods af klare sanseindtryk af genstanden. Der er flere former for agnosi, som har indflydelse på det at kunne genkende ansigter, lyde og legemesdele [38].
- Agnosognosi: Manglende sygdomserkendelse, hvilket f.eks. kan opleves ved, at patienten nægter sin halvsidige lammelse. I nogle tilfælde kan patienten oplyse om sin lammelse men vil stadig ikke erkende, at den er der [39].

Apopleksipatienterne kan derfor både have problemer med forholdet mellem egen krop og objekter omkring sig, afstandsbedømmelse samt kropsdelenes indbyrdes forhold [20, 37]. Derudover kan de sensoriske følger have indflydelse på motoriske følger, som f.eks. hvis encephalon ikke kan genkende og omdanne signalerne fra sansereceptorer til motoriske bevægelser. [19, 9].

Symptomerne på motoriske følger kan bl.a. være:

- Parese: Nedsat kraft i muskulaturen, hvilket vil sige, at der er bevægelse men i mindre grad end normalen. Hvis der er nedsættelse i halvdelen af kroppen kaldes det hemiparese [20].
- Paralyse: Ingen bevægelse i hele muskulaturen, hvilket vil sige, at kroppen er fuldstændig lammet. [40]
- Ataksi: Manglende evne til koordinering af muskelbevægelser. Dette sker ofte pga. sygdom i cerebellum [41].

Som følge af et apopleksitilfælde kan motoriske mén medføre begrænsninger i bevægelse ift. præcision, generel stivhed, opstart af gang, hurtige og spontane bevægelser samt rystelser. Alle disse følger har betydning for patientens balance og kan give udfordringer for patienten ift. at kunne sidde, stå eller gå. [20, 37]

Balance

En sensorisk og motorisk skade kan lede til balanceproblemer, da både kroppens sanser samt motorik hjælper til opretholdelse af balance. Balancen er vigtig for mennesket, eftersom den opretholder kropsstillingen vha. ubevidste bevægelser og gør bevægelse muligt uden fald. For at opretholde balancen bliver kropsvægten så vidt mulig fordelt omkring kroppens akse og de vægtbærende legemer, herunder fødder i oprejst position og gluteal musklerne i siddende position. [9]

Balancen er et komplekst system, da proprioceptorer og sansereceptorer samarbejder om at sende balanceinformation til encephalon, hvor den bearbejdes. Samarbejdet mellem receptorerne er illustreret på **figur 2.3**. Proprioceptorerne kontrollerer muskler, sener og ledernes position, dvs. de styrer ubevidste bevægelser. [19] Sansereceptorer fra vestibulen og øjne opfanger sanseindtryk. Proprioceptorer og sansereceptorer udgør de sensoriske input, som videresendes til områder i cerebral cortex, cerebellum og til centre i hele trucus encephalicus. Disse områder bearbejder balanceinformationen for at konkludere den fysiske position af kroppen og dens lemmer. Herved opretholdes balancen. [6, 19] Proprioceptorer og sansereceptorerne, samt hvor de findes, uddybes i bilag B.



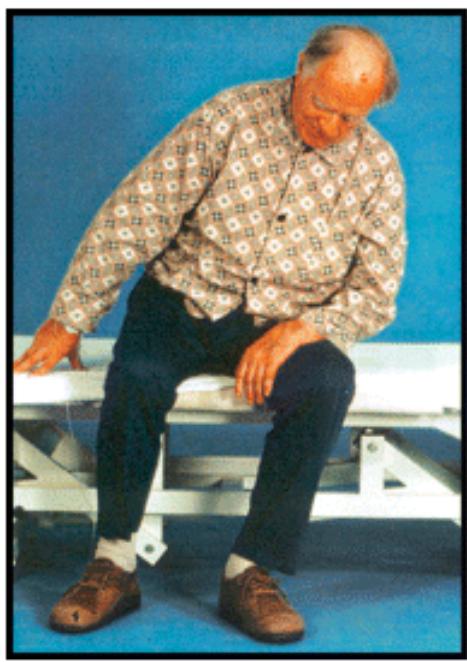
Figur 2.3: På flowdiagrammet ses, hvordan sansereceptorer og proprioceptorer samarbejder for at opretholde kropsbalance [42].

Apopleksipatienter oplever balanceproblemer, da samarbejdet mellem proprioceptorerne og sansereceptorerne er svækket, og de behandelende centre i encephalon er skadet. [19] En rask persons krop svajer som udgangspunkt omkring seks til syv grader i lateral retning [43, 44]. Grænsen for hvornår balancen ikke kan opretholdes er individuel og påvirkes af forskellige faktorer såsom alder og styrke [44]. Det kan derfor være vanskeligt at definere en værdi for denne grænse.

Balancen har betydning for den siddende, stående og gående position, og de forskellige

positioner afhænger af hinanden, hvilket kan give begrænsninger i hverdagen. Problemer ved opretholdelse af nævnte positioner giver øget risiko for faldulykker. [6]

Et eksempel på, hvordan balancen påvirkes, er Pusher Syndrom. Dette er en lidelse, hvor halvsidegt lammede patienter aktivt skubber deres kropsvægt mod den lammede kropsside, hvilket er illustreret på **figur 2.4**. Lidelsen kan opstå som følge af både højre- og venstresidig hjerneskade. Patienter med Pusher Syndrom registrerer ikke, at deres krop hænger, hvilket kan være med til at besværliggøre funktioner i dagligdagen og giver øget risiko for faldulykker i både stående, gående og siddende stilling. [6]



Figur 2.4: På billedet ses en patient med pusher syndrom. Det ses tydeligt, at patienten hænger til sin venstre side med kroppen [6].

Neglekt

Neglekt er en sensorisk og motorisk skade, og derfor kan sygdommen forekomme visuelt, kropsligt eller kombineret.³ Der er mange former for neglekt, hvor graden kan variere, som kan forekomme samtidigt [8]. Det anslås, at 25% af apopleksipatienterne i 2009 var ramt af neglekt. [13]

Ved visuel neglekt kan patienten bl.a. mangle sanseindtryk fra den påvirkede side af kroppen. Patienten er eksempelvis ikke opmærksom på den ene side af teksten, når vedkommende skal læse, selvom synet er normalt. Derudover kan patienten opleve kun at spise fra den ene del af tallerkenen, eftersom encephalon ikke registrerer den anden halvdelen. [8]

Ved den kropslige neglekt kan patienten have manglende kropsbevidsthed. Patienten har ofte normal følelse i den syge side af kroppen - indtrykkene bemærkes, men registres ikke i encephalon. Det kan komme til udtryk i, at patienten glemmer at klæde den syge side af kroppen ordentligt på eller kun barbere halvdelen af ansigtet. En alvorlig følge af kropslig neglekt kan være, at patienten udfører ubevist skade på sig selv. Patienten kan f.eks. støde ind

³FiXme Note: NTK: <http://gade.psy.ku.dk/bogkap/neglekt.htm> er god at læse før eksamen

i ting med den syge side eller ikke være opmærksom på, at benene ikke kan bære kropsvægten og derved miste balancen. Af denne grund kan der på længere sigt forekomme ergonomiske skader andre steder i kroppen. [20]

2.3.2 Personlige følger

Dette afsnit er baseret på hjerneskader generelt. Dvs. det ikke er sikkert, at apopleksi er årsagen, men det antages, at de samme udfordringer gør sig gældende hos personer, der får hjerneskader af apopleksi. Derudover skal det noteres, at det ikke er sikkert, at en patient får følger af apopleksi.

Personer, der rammes af en hjerneskade, beskriver hjerneskaden som et brud i deres liv, som de skal lære at forholde sig til. Det kan tage tid for patienterne at indse, at de er ramt af en sygdom. Patienten er ikke i stand til at udføre de samme opgaver som tidligere f.eks. grundet balancebesvær, hvilket har betydning den ramtes identitet, aktivitet og sociale relationer. Kroppens funktionsændringer gør, at den ramte kommer til at leve et mere inaktivt og hjemmeorienteret liv end før. En yngre patient er mere ramt af denne forandring ift. en ældre patient. Dette kan bl.a. skyldes vanskeligheden i at oprettholde sociale relationer og begå sig i hverdagen. Apopleksiramte kan derudover opleve en kropsspaltning, hvor kroppen opleves som et fremmedobjekt. [10, 45]

Der findes ikke synlige vanskeligheder for patienter med hjerneskade som f.eks. besvær med hukommelse, læsning og regning. Disse vanskeligheder har også en indflydelse på patientens selvopfattelse og kan derved være med til at nedsætte livskvaliteten for den enkelte. [10]

2.4 Rehabilitering

Når selve apopleksien er stabiliseret og behandlet, er det essentielt, at rehabiliteringen af patienten indfindes hurtigst muligt - gerne en til to dage efter apopleksitilfældet. I Danmark dækker rehabilitering af en patient med apopleksi områderne: direkte træning af funktioner, kompenserende bevægelser, ændringer i miljø samt social og psykologisk støtte. Patientens daglige rutiner kan være gået tabt pga. apopleksitilfældet, hvorfor det er vigtigt, at få vedkommende tilbage i sit vante miljø. Plejepersonale skal hjælpe patienten til at genfinde rytmen og til evt. at udføre dagligdagsopgaver på en ny måde. Det kan ske, at patienten ikke længere er i stand til at beherske begge sine hænder til en opgave, hvorved plejepersonalet skal bistå patienten i indlæringen af kun at benytte én hånd. [11]

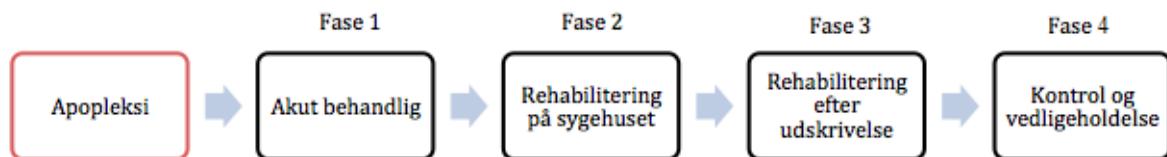
Apopleksipatienten skal i samarbejde med lægen, sygeplejersken og andet hjælpepersonale opstille nogle mål for sin rehabilitering. Målene skal være realistiske, så patienten ikke mister sin motivation til genoptræningen. [11]

2.4.1 Forløbsprogram for rehabilitering

Sundhedsstyrelsen har udarbejdet et forløbsprogram for rehabilitering af patienter med hjerneskade. Forløbsprogrammet strækker sig fra patienten erhverver hjerneskaden til bedst mulig funktionsevne er opnået. Herefter udføres kontrol og vedligeholdelse af funktionsevnen. Tidsperioden for rehabilitering varierer ift. hjerneskadens sværhedsgrad, samt graden af funktionstab. [46]

Forløbsprogrammet er essentielt ift. at kunne give patienten den korrekte rehabilitering, da patienterne har forskellige behov. Derudover kræves der forskellige former for teknologi

og metoder i de enkelte faser. Det vil derfor være oplagt at undersøge, hvilken form for rehabilitering der er at foretrække i de enkelte faser som ses på **figur 2.5**.



Figur 2.5: På figuren ses et forenklet overblik over de fire faser, som patienter med apopleksi skal igennem i forløbsprogrammet for rehabilitering. [46]

Den første fase

Første fase på **figur 2.5** er den del af forløbsprogrammet, som foregår på sygehusets apopleksiafdeling, hvor der primært foretages akut behandling. Den tidlige rehabilitering påbegyndes, når patienten er stabiliseret og følgerne er begrænset, hvorefter en speciallæge i neurologi giver en vurdering af patientens rehabiliteringsbehov. Derudover overvåges patienterne ift. bevidsthed, fysiologiske ændringer og amnesi og der foretages vurderinger af patientens basale fysiologiske funktioner.

Den anden fase

Det fremgår af **figur 2.5**, at patienten i den anden fase gennemgår rehabilitering på sygehuset. Her er der fokus på de skadede funktioner. Ligeledes bliver patienten på samme måde som i den første fase undervist af fagkyndigt personale, hvor patientens behov for rehabilitering og rehabiliteringens udvikling vurderes. Patienterne bliver i denne fase udredt ift. funktionsevne, mentale funktioner, bevægelsesfunktioner samt rehabilitering med henblik på daglige aktiviteter. Hvis patienten vurderes til at have en stabil udvikling i rehabiliteringsprocessen, vil vedkommende blive udskrevet og påbegynde fase tre. [46]

Den tredje fase

I den tredje fase på **figur 2.5** er patienten udskrevet fra sygehuset. Derved foregår rehabiliteringen ambulant og som selvstændig træning. Selve rehabiliteringen i tredje fase er bygget op ud fra rehabiliteringsforløbet i den anden fase. Det afgørende for den tredje fase er, hvorvidt patienten skal vedblive rehabilitering på sygehuset eller henvises til de kommunale rehabiliteringscentre. Dette afgøres på baggrund af observationer foretaget i anden fase. Den selvstændige træning kan for patienter med neglekt og balanceproblemer være en udfordring ift. bevægelsesmønstre og kropsholdning. [46]

Den fjerde fase

Det fremgår på **figur 2.5**, at fjerde fase er den afsluttende fase for behandlingsforløbet. Patienterne går stadig til kontrol og vedligeholdelse for at sikre, at rehabiliteringens udvikling er stabil. Det kan i sidste ende have betydning for, hvor lang tid det tager for patienten at generhverve sine tabte funktioner. Den fjerde fase varierer derfor yderligere fra patient til patient alt efter udviklingen af rehabiliteringen. [46]

2.4.2 Organisering af rehabiliteringsprocessen

I sundhedssektoren arbejder de forskellige organisatoriske aktører på tværs af hinanden, hvilket vil sige, at der er et samarbejde mellem sygehuse, kommuner og praktiserende læger. Dette samarbejde sker både internt på sygehusene, på afdelingerne og kommunalt mellem forvaltningerne. [10] De nævnte aktører er de centrale enheder i forbindelse med hjerneskaderehabilitering.⁴ De har opgaver i alle faser i varierende grad. Sygehuset har flest opgaver i første og anden fase, mens kommuner og praktiserende læger har flest opgaver i tredje og fjerde fase. [46] Det er vigtigt, at det organisatoriske samspil fungerer, da en god kommunikationen mellem aktørerne skaber en effektiv rehabilitering for patienten. De enkelte forløb kan være forskellige, afhængig af hvor i landet patienten befinder sig, samt hvor omfattende hjerneskaden er. [10]

2.4.3 Metoder til rehabilitering af balance

Der findes flere forskellige metoder og teknologier til at hjælpe med balanceproblemer under rehabiliteringsprocessen. Disse omfatter: [46]

- Platform feedback: En metode baseret på biofeedback, hvor patienten står på en platform, der mäter graden af patientens svajning⁵. Når platformen har målt svajningen af patienten, kan vedkommende enten få visuel eller auditiv feedback. Feedbacken skal gøre patienten mere opmærksom på, hvor meget kroppen svajer, hvilket gør det muligt at opretholde balancen en stående position. Denne metode har vist sig at forbedre en symmetrisk holdning for patienten. [47] Denne form for teknologi benyttes særligt i de tidlige faser af rehabiliteringen [46].
- Passiv sensorisk stimulation: En rehabiliteringsform, hvor patienten modtager elektrisk stimulation, der ikke medfører aktivitet i musklerne. Stimulationen underretter patienten om, hvad kroppen foretager sig, så det bliver muligt at korrigere bevægelserne og opretholde balancen. [10] Denne metode tilbydes under hele rehabiliteringsforløbet og har effekt for gangfunktionen [46].⁶
- Balanceträning med fysioterapeut: Denne træningsform indebærer forskellige træningsmetoder med f.eks. et vippebræt eller skumpude. Her skal patienten stå på brættet eller puden mens der foretages andre øvelser, eksempelvis boldkast eller rotation på stedet. Derudover træner patienterne den statiske balance ved at udføre en øvelse i stående udgangsposition med fødderne på en tegnet linje, så den ene fods tær er mod den anden fods hæl og armene holdes tæt ind til kroppen og over kors. I nogle tilfælde kan fysioterapeuten bede patienten om at lukke øjnene eller blinde vinklen ned til fødderne, så patienten skal stole på kroppens egne signaler til opretholdelse af balancen. [48] Denne form for rehabilitering tilbydes under hele rehabiliteringsforløbet og har en god effekt på patientens balance samt sociale kompetencer. [46]⁷

⁴FiXme Note: NTK: Øvrige aktører omfatter forskellige faggrupper med neurofaglige kompetencer. Derudover findes kommunikationscentre med specialiserede hjerneskadetilbud, hvis de centrale aktører ikke kan leverer det de skal. Ellers er der VISO, ViHS, UU og borgerorganisationer. Tjek kilde "Sundhedsstyrelsen2011a" for yderligere info

⁵FiXme Note: NTK: Centre of pressure

⁶FiXme Note: NTK: Når musklerne stimuleres passivt, kan patienten 'mærke' den lammede kropsdel, og selvom den ikke kan styres fuldt ud kan der stadig gradvist skabes kontakt til den igen, da det er muligt at føle hvad den foretager sig.

⁷FiXme Note: tilføj, at det er fra observationerne

- Styrketræning: Træning af kroppens styrke og især muskelpower har en dokumenteret effekt på balancen, da en god koordinering for musklernes sammenspil er essentiel. Hvis musklerne er stærke, er kroppen bedre til at stå imod udefrakommende påvirkninger som f.eks. tyngdekraften, hvilket giver en bedre balance. [48]

Efter rehabiliteringsforløbet er det besværligt at måle, om genoptræningen har været succesfuld af flere årsager. Nogle sygdomme kan læges over tid uden nogen form for behandling. Derfor vil nogle patienter muligvis opnå samme resultat uden rehabiliteringen. Derudover skal man ikke altid opfatte faldulykker som et tegn på, at patienten ikke har gjort fremskridt. Når patienten får bedre balance og stoler mere på sine egne signaler, vil der naturligt foregå mere aktivitet i hverdagen, hvilket indebærer en højere risiko for at komme ud af balance. [49] Man mener, at den bedste målemetode for succes af rehabilitering er spørgeskemaer til patienter. [49]

2.5 Biofeedback

Biofeedback blev introduceret i slutningen af 1960 og har herefter været anvendt i forbindelse med rehabilitering af patienter [50, 51]. Biofeedback er en terapeutisk metode, der hjælper individet med at genoptræne fysiologiske aktiviteter og kropsfunktioner, der er blevet glemt eller gået tabt som følge af f.eks. apopleksi [51].

Biofeedback kan anvendes både før, under og efter udførelsens af øvelser [51, 52]. Formålet med biofeedback er at forbedre en patients helbred, livskvalitet og præstationer under rehabilitering og daglige gøremål. [51]

Der findes flere forskellige apparater og sensorer til at opfange fysiologiske signaler. De opfangede signaler kan benyttes sammen med et biofeedback system til bevægelses-, styrke- og balancetræning. Signalerne opfanges af apparatet eller sensoren, hvorefter signalet behandles og fortolkes af et system. Systemet kan herefter give feedback til patienten på baggrund af signalernes information. [51] Denne feedback leveres til patienten visuelt, auditivt og sensorisk.

- Visuel Biofeedback: Patienten får visuel feedback ved f.eks. lysdioder i forskellige farver, en monitor med farver, billeder eller grafer. F.eks. kan lysdioderne anvendes til at vise i hvilken grad patienten svajer, og i hvilken retning svajningen sker. Den visuelle feedback afhænger af patientens syn, da patienter med forringet visuelle funktioner kan have udfordringer ift. at registrere feedbacken og derved reagere korrekt på feedbacken. [53, 54]
- Audio Biofeedback: Patienten får feedback via lyd. Dette kan gøres ved f.eks. at bruge lydsignaler, hvor patienten er blevet instrueret i, hvad de enkelte signaler betyder ift. kropsstillingen. Denne form for feedback afhænger af patientens hørelse, og registrering af lyde. Derudover skal lydsignalerne være tilpas komplekse, så patienten kan stå i den ønskede kropsstilling, og samtidig simpel nok til at patienten kan foretage konkrete bevægelser.⁸ [53, 54]
- Sensorisk feedback: Denne form for feedback kan gives ved f.eks. stød eller vibration. Ved sensorisk biofeedback vil patienten modtage f.eks. vibrationer bestemte steder på kroppen, hvis personen er ved at falde eller kommer ud af balance uden at registrere det. Dette kræver midlertidig at patienten kan føle vibrationerne og forstå, hvad de betyder ift. de bevægelser, som er nødvendige for at korrigere. [54]

⁸FIXme Note: Hvad menes der med denne sætning?

Ved alle tre biofeedback metoder er der fordele og ulemper, og det kan være vanskeligt at bestemme hvilken metode, der kan anvendes som en generel metode. Patienternes problemer kan være individuelle, og det er derfor vigtigt at overveje hvilken form for feedback, patienten er i stand til at processere. En kombination af metoderne kan være at foretrække, for at forstærke feedbackens påvirkning på patienten.

Biofeedback kan overordnet inddeltes i to grupper: Direkte feedback, hvor det målte signal udtrykkes som eksempelvis en numerisk værdi, og transformert feedback, hvor det målte signal kontrollerer et udstyr, der kan give patienten et bestemt signal. Dette signal kan f.eks. være auditivt eller visuelt. [52]

Biofeedback kan hjælpe patienten med at udvikle en bedre voluntær kontrol over kroppen samt genoptræne patienter til at bevare disse forbedringer uden brug af biofeedback systemet [51]. For at patienten kan modtage feedbacken, skal signalet måles på patienten og fortolkes. Der kan benyttes forskellige typer af sensorer til at opfange fysiologiske signaler fra patienterne, som kan deles ind i en fysiologisk og en biomekanisk del. [52]

2.5.1 Fysiologisk biofeedback

Fysiologisk biofeedback omfatter måling på forskellige kropslige systemer. Det kan bl.a. måles på det neuromuskulære system, det kardiovaskulære system eller respirationssystemet. En fysiologisk feedback kan f.eks. anvendes til patienter med balanceproblemer ved brug af elektromyografisk (EMG) feedback, hvor myoelektriske signaler omsættes til et signal til patienten, hvormed der kan opnås bevidsthed om svage muskler. Foruden EMG kan der anvendes hjerneaktivitet (EEG), øjenmuskelaktivitet (EOG) og hjerteaktivitet (EKG) til feedback til patienter med balanceproblemer, da disse måleparametre alle er dele af kroppens systemer og påvirkes, hvis kroppen er i ubalance. Hvilken sensor der benyttes afhænger af, hvilken form for feedback der anvendes samt hvad man ønsker at måle på patienten. [51]

2.5.2 Biomekanisk biofeedback

Ved biomekanisk biofeedback måles der på generelle motoriske egenskaber såsom kroppens bevægelser og selve kropsholdningen. For apopleksipatienter med balanceproblemer kan flere forskellige biomekaniske biofeedback systemer anvendes under rehabiliteringen af balancen. Disse omfatter f.eks. [52]:

- En trykplade: Her måles fordelingen af patientens kropsvægt under forskellige øvelser.
- Inerti-sensorer: Der anvendes et accelerometer eller gyroskop til bestemmelse af kroppens bevægelse i de tre dimensioner: Position, hastighed og acceleration⁹. Gyroskopet måler vinkelhastigheden, hvor accelerometeret måler accelerationen i en bestemt retning ift. tyngdekraften.
- Et kamerasystem: Giver et visuelt indtryk af patientens bevægelser og kropshældning.

Flere studier evaluerer effekten af inerti-sensorer i forbindelse med rehabilitering af patienter med balanceproblemer. Et studie viser bl.a. positive resultater, da effekten af et gyroskop i forbindelse med rehabilitering af patienter med kropssvaj blev testet. Her skulle patienterne på samme tid udføre kognitive og motoriske handlinger imens de gik. Imens modtog de biofeedback vedrørende deres kropshældning ud fra gyroskopmålinger. Det viste sig, at især de yngre patienter havde gavn af at modtage signaler omkring deres kropshældning imens de udførte opgaverne. Hvorimod de ældre patienter havde gavn af at

⁹FiXme Note: NTK: Dette er kinematik af kroppens bevægelser

modtage biofeedback imens de kun udførte én af opgaverne - det blev forvirrende for dem at skulle udføre flere opgaver på én gang, imens de skulle fokuserer på balancen. Et andet studie, der gør brug af et accelerometer, viser effektiviteten af audio biofeedback for testpersonernes balancefunktion og kropsholdning. Studiet konkluderede, at audio biofeedback medførte en signifikant forbedring af testpersonernes balancefunktion. [52]

Fordelen ved at benytte et accelerometer til at detektere apoplekspatienternes kropshældning er, at det kan måle patientens acceleration i en bestemt retning ift. tyngdekraften. Gyroskopet mäter herimod kun vinkelhastigheden, når objektet er i bevægelse og kan derfor ikke detektere, hvor meget patienten svajer. For at få de bedste resultater ift. genkendelse af apoplekspatientens kropshældning placeres accelerometeret øverst på sternum [55]. Accelerometeret har derved formålet at advare apoplekspatienter, der kommer i ubalance, for at undgå faldulykker. Valg af feedback udstyr afhænger f.eks. af patientens hørelse og følsomhed samt sværhedsgraden af hjerneskaden og hvilke funktioner, der skal genoptrænes. [56]

2.5.3 Krav til patienter med balanceproblemer ved anvendelse af biofeedback

Biofeedback er anvendt i flere årtier, men på trods af dette er det stadig vanskeligt at fastslå, i hvilken grad det gavnner patienten [57]. Derfor er det vigtigt, at biofeedback systemet er designet til den enkelte patientgruppens behov ift. til begrænsninger og brug af feedback. Hvis en patient skal have gavn af biofeedback kræver det, at patienten har en kognitiv kapacitet til at følge instruktionerne under behandlingssessioner og fastholde læring fra session til session. Derudover kræves neurologisk kapacitet til at genskabe frivillig kontrol, samt motorisk kapacitet, hvis patienten skal opnå genskabelse af evt. tabte fysiske funktioner. [58] Kravene til patienten ved anvendelse af et medicinsk instrument kan være forskellige alt efter instruments virkemåde. Det er i midlertid vigtigt, at systemets design tilpasses til patienters begrænsninger, som det skal anvendes på. Som tidligere nævnt er måden hvorpå feedback gives vigtigt ift. patientens evner til at opfange og fortolke forskellige feedback former. Det kan f.eks. for nogle patientgrupper være vanskeligt at registrere den visuelle feedback, hvis de har problemer med forringet syn, hvorimod andre patientgrupper kan have nedsat hørelse, og derved vil have svært ved at udnytte audio biofeedback. Disse problemer opleves ofte i den ældre patientgruppen, stiller det bestemte krav til måde hvorpå feedback gives. [2].

2.6 Behandling af biologiske signaler

Et biologisk signal skal behandles for at kunne give et feedback til patienten samt et digitalt output evt. til plejepersonale. For at kunne behandle et signal fra et accelerometer kræves der hhv. en forstærker, filtre, komparator samt ADC. Der kan anvendes andre komponenter til signalbehandling ift. hvad accelerometret skal benyttes til, men de nævnte vil blive benyttet i dette projekt.

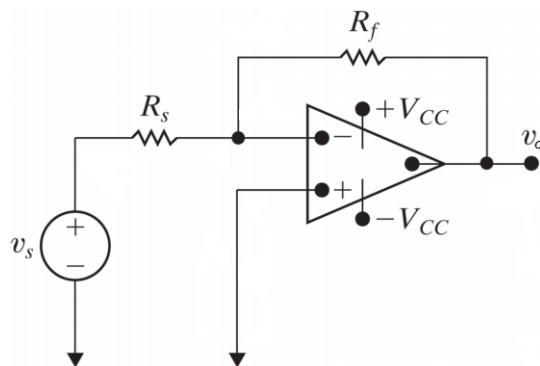
2.6.1 Forstærker

En forstærker kan benyttes til at ændre inputtet fra et biologisk signal til et ønsket output. Dette kan gøres ved at kombinere en operationsforstærker med modstandere, der derved

kan skalere, ændre fortegn på, addere og subtrahere signalet. Der findes fire forskellige forstærkningskredsløb til at udføre de nævnte opgaver: [59]

- Inverterende forstærkningskredsløb: Benyttes til at invertere signalet, samtidig med det skaleres. Inverteringen af signalet betyder, at der ændres fortegn på signalet.
- Summerende forstærkningskredsløb: Fungerer ligesom det inverterende forstærkningskredsløb med den undtagelse, at input signaler summeres.
- Ikke-inverterende forstærkningskredsløb: Benyttes kun til at skalere input signalet.
- Differens forstærkningskredsløb: Benyttes til at trække to input signaler fra hinanden, så det bliver muligt at se forskellen[59]. Der findes forskellige typer af differensforstærkning, herunder et kredsløb med en enkelt operationsforstærker samt en såkaldt instrumenteringsforstærker. I instrumenteringsforstærkeren indgår yderligere to operationsforstærkere, for at lave inputbuffere til den oprindelige operationsforstærker.[60]

For at forstærke signalet fra et accelerometer benyttes operationsforstærkeren, der skalerer input-spændingen til en ønsket output-spænding. Dette gøres for at opnå et bestemt output, hvis den næste komponent skal bruge et specifikt input eller for at forstærke signaler med lav frekvens eller amplitude. Der kan f.eks. bruges en inverterende forstærker, som ses på **figur 2.6**, hvor V_s er det målte signal, der ønskes forstærket og V_o er output. Inputtets forstærkning kaldes gain og er en ratio mellem R_f/R_s , som er de to modstande. [59]



Figur 2.6: På figuren ses en ideel operationsforstærker, som er inverterende koblet og kan forstærke input signalet V_s til et ønsket output signal V_o . [59]

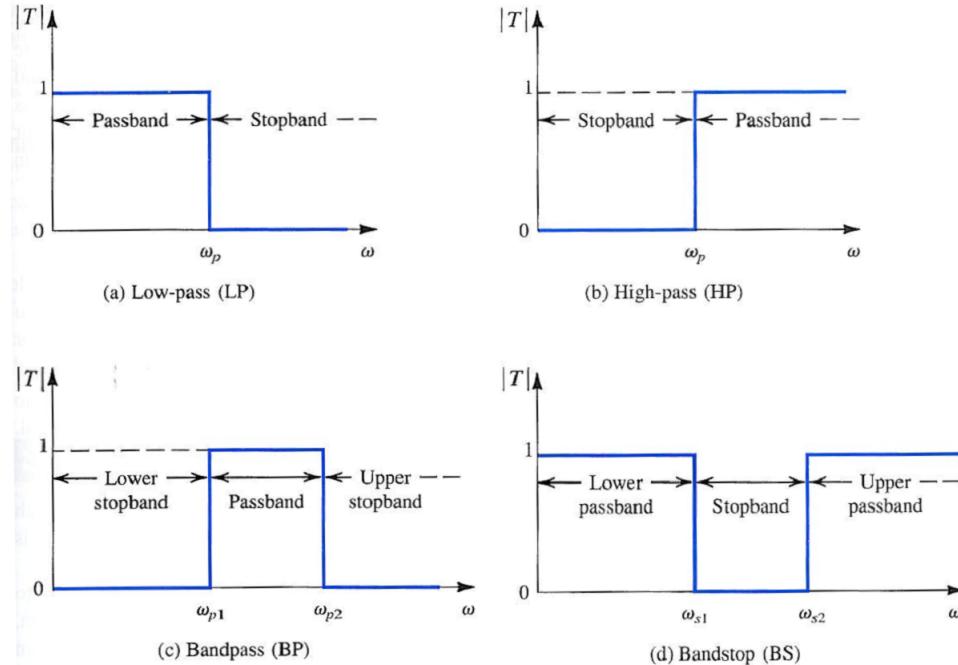
2.6.2 Filtrering

Filtrering er et værktøj indenfor databehandling, som anvendes i det biologiske signals frekvensdomæne. Formålet med at filtrere et målt signal er at fjerne uønskede frekvenser, også kaldet støj, der ikke tilhører det signal, der ønskes undersøgt. Filtret kan opdele signalet i såkaldte bånd: Pasbånd, hvor frekvenserne frit passerer igennem filteret uden påvirkning, samt stopbånd, hvor frekvenserne dæmpes, så de ikke har indflydelse på signalet. Dette gøres ved en knækfrekvens. Der findes flere forskellige typer af filtre, der afhænger af, hvilke frekvenser der skal fjernes fra det målte signal [61]:

- Lavpasfiltret: Anvendes til at dæmpe frekvenser over den valgte knækfrekvens. Dette gøres ved at dæmpe de frekvenser, som ligger over knækfrekvensen.
- Højpasfilteret: Anvendes, modsat lavpasfiltret, til at dæmpe frekvenser under den valgte knækfrekvens ved at dæmpe signalet under knækfrekvensen.
- Båndpasfilteret: Er en kombination af et lav- og højpasfilter. Her defineres et interval, hvormed de frekvenser der ligger udenfor intervallet vil blive dæmpt.

- Båndstopfilteret: Fungerer, modsat båndpasfilteret, ved at dæmpe specifikt definerede frekvensområder. Frekvenserne udenfor det definerede område påvirkes ikke.

I forbindelse med databehandling kan flere affiltrene anvendes samtidig [61]. Princippet i de fire filtertyper er illustreret på **figur 2.7**.



Figur 2.7: På figuren ses de fire forskellige filtertyper.[60]

Filtrene kan desuden inddeltes i forskellige grader eller ordener, afhængigt af hvor stejl filtreringskurven er, dvs. hvor meget signalet dæmpes pr. dekade[60].

2.6.3 Støj

Støj er den uønskede del af et opsamlet signal, der ikke har nogen relation til det ønskede signal. Signaler, der er fordelt udover et frekvensspektrum, kan filtreres for støj vha. de tidligere beskrevne filtre. [61, 62] Støj kan inddeltes i flere forskellige generelle typer, som typisk vil forekomme:

- Elektriske signaler: Dette er bl.a. 50 Hz støj, som er en frekvens fra elnettet. Denne 50 Hz frekvens kan gå ind og påvirke de biologiske signaler, der måles på. Hvis der er flere 50 Hz kilder, der interagerer, kan det give ekko ved eksempelvis 100 Hz og 150 Hz. Det er denne form for støj, der skal undgås, når signalet analyseres.
- Ledninger: Kan fungere som antenner, der opfanger 50 Hz støj og andre former for støj. Problemet bliver større jo længere ledningen er. Derudover kan der forekomme støj fra ledninger, hvis de bevæges under optagelse af signalet. Denne form for støj er dog meget lavfrekvent. [?]
- Magnetfelt: Kan komme i kontakt med ledningerne og derved inducere strømmen, der skaber støj i signalet. Jordens magnetfelt kan f.eks. påvirke ledningerne. For at mindske støjen kan ledningerne snoes / flettes sammen. [62]

2.6.4 Komparator

En analog komparator er et kredsløb, der sammenligner en inputspænding eller -strøm med en eller flere referencespændinger eller -strømme. Rent teknisk gøres dette ved, at komparatoren inverterer inputsignalet $\pm 180^\circ V_-$, imens referencesignalet ikke inverteres. Hvis inputsignalet passer med en eller flere af referenceværdierne, vil de tilknyttede komponenter aktiveres. Den simpleste komparator er en operationsforstærker uden modkobling. [53]

Komparatorens output går fra en mætningsgrænse til en anden, når det negative input af operationsforstærkeren passerer igennem 0V. Dette betyder, at ved et inputsignal på mere end tærskelniveauet vil outputsignalet opnå negativ mætningsgrad. Omvendt ved et inputsignal, som er lavere end tærskelniveauet, vil outputsignalet opnå positiv mætningsgrad. [53]

2.6.5 ADC og konvertering til computeren

Når der foretages målinger på kroppens signaler, er output et analogt signal, som er kontinuert i tid og amplitude. Ved behandling af det analoge signal anvendes digital processering, hvilket betyder, at det analoge signal skal konverteres til et digital signal vha. en ADC (Analog-to-Digital-Converter). Det digitale signal er diskret i tid og amplitude, så det analoge signal kvantificeres under konverteringen [?]. Konverteringsprocessen består af to dele: sampling og kvantisering [63].

Sampling er processen, hvor diskretisering i tidsdomænet finder sted. Tidsdomænet i det kontinuerte signal konverteres derved til et diskret signal. Samplingsfrekvensen er den hyppighed, hvormed signalet måles. Hvis der ikke vælges en passende samplingsfrekvens, kan information fra det originale signal gå tabt. Ifølge Nyquists sætning er en hensigtsmæssig samplingsfrekvens således, at samplingsfrekvensen skal være mindst det dobbelte af frekvensen i det originale signal. [63] Det anbefales dog i praksis at sample med en samplingsfrekvens, der er ti gange frekvensen af det originale signal. Det er derudover vigtig, at der ikke bliver samplet med for høj samplingsfrekvens, hvis det ikke er nødvendigt. En større mængde data bruger mere plads og processering, hvilket kan resultere i datadøden.¹⁰. En for lav samplingsfrekvens kan medføre, at kurven fra det rekonstruerede signal ligger forskudt ift. det originale signal, hvilket kaldes alias. [63] Det skal derfor inden opsamlingen af data bestemmes, hvor meget data, der er nødvendigt.

Diskretisering af amplituden betegnes som kvantisering. De enkelte samples har en amplitudemængde, og ved kvantisering inddeltes denne analoge værdi i trin. I modsætning til sampling sker der en approksimering i det rekonstruerede signal, da værdierne mellem to trin repræsenteres af samme digitale værdi. Dette gør, at flere værdier kan ligge indenfor den samme digitale værdi [63]. Antallet af amplitudeniveauer, der er tilgængelige til at repræsentere det analoge signal, determineres af antal bits. En ADC med en opløsning på 12-bit inddeltes f.eks. i 4096 niveauer, da $2^{12} = 4096$. [64] Det mindste amplitudeniveau, ADC'en kan opnå, kaldes Least Significant Bit (LSB) og bestemmes ved følgende ligning¹¹:

$$LSB = \frac{FSR}{(2^n - 1)} = \frac{FSR}{2^n} \quad (2.1)$$

FSR er "full scale voltage range", n er antal bits, 2^n er antal værdier og $2^n - 1$ er antal intervaller.

¹⁰FiXme Note: kilde - forelæsning

¹¹FiXme Note: kilde - forelæsning Sofie

Ved forstærkning er det essentielt at være opmærksom på ADC'ens arbejdsområde, da den har et bestemt inputområde. Hvis et outputsignal er større eller mindre end hhv. den øvre og nedre værdi inden for arbejdsområdet for ADC'en, vil signalet blive afskåret. Herved går en del af dataen tabt.¹²

¹²FiXme Note: problemer igen med at finde nogle kilder til det

2.7 Problemafgrænsning

Apopleksi er en sygdom, der har stor indflydelse på blodtilførslen til encephalon. Hvis tilstrømningen af blod er nedsat, kan der opstå både motoriske og sensoriske skader hos patienten, hvilket kan komme til udtryk som balanceproblemer. Balance er vigtig for at kunne fungere i dagligdagen, da den sikrer at man holder kroppen oprejst og muliggør bevægelse uden fald. [9] ¹³ Apopleksipatienter med balanceproblemer oplever en begrænsning i deres dagligdag, da de er afhængige af hjælp til daglige gøremål, som de før sygdommen selv kunne udføre. De oplever det som et brud på deres tidligere liv, hvilket påvirker deres identitet og livskvalitet. [10]

For at begrænse de fysiske, og dermed også de personlige, følger mest muligt, er det essentielt at rehabiliteringen påbegyndes hurtigt efter apopleksitilfældet. Indenfor rehabilitering af balance tilbydes forskellige metoder, såsom platform feedback og passiv sensorisk stimulation. En anden mulighed ift. rehabilitering af balancen er biofeedback. Studier viser positive resultater med biomekanisk biofeedback, herunder inert-sensorer, hvor der måles på kroppens generelle motoriske egenskaber. [52] For at biofeedback er en mulighed, er det en forudsætning, at patientens kognitive evner er tilstrækkelige til at kunne blive instrueret og kunne huske de indlærte øvelser fra gang til gang. [58] Dette gør sig især gældende for den ældre befolkning, som systemet skal designes til, da det er denne befolkningsgruppe, der i højere grad rammes af apopleksi. [2]

Det er interessant at undersøge, hvordan et system baseret på biomekanisk biofeedback kan designes således, at det vha. et accelerometer hjælper apopleksipatienter med at genoptræne deres balance. Der kan benyttes forskellige komponenter til signalbehandling, men til behandling af accelerometrets signal er der valgt en forstærker, filter, komparator samt ADC.

Det er essentielt at undersøge, om systemet kan designes sådan, at det i højere grad tillader patienterne at bidrage til deres egen rehabilitering ved at benytte visuel, sensorisk og/eller audio biofeedback. Det er muligt, at dette kan begrænse nogle af patienternes personlige følger, da kontakten med sundhedspersonale i forbindelse med rehabiliteringen kan begrænses, hvormed det normale hverdagssliv hurtigere kan genoptages.

2.8 Problemformulering

Hvordan designes et biofeedbacksystem med et accelerometer således, at det hjælper apopleksipatienter under rehabilitering af balancen?

¹³ FiXme Note: Burde alt EFTER denne fxnote og indtil det nye afsnit omformuleres eller udelades? Det bygger op til et problem, som vi ikke arbejder med.

Kapitel 3

Problemløsning

3.1 Systembeskrivelse

Dette afsnit indeholder en beskrivelse af det system, der skal kunne anvendes af apopleksipatienter som et selvstændigt træningsapparat i rehabiliteringen af balanceproblemer. Systembeskrivelsen indeholder målgruppen for designet, samt hvilket formål og anvendelse det har. Ud fra disse faktorer er systemet blevet designet og illustreret i et blokdiagram.

3.1.1 Systemets bruger

Systemet udvikles til apopleksipatienter med balanceproblemer mhp. selvtræning af balance i rehabiliteringsfasen i fase 3 og 4 i afsnit 2.4.1 på side 11. Systemet skal være let anvendeligt, da det udvikles til anvendelse i hjemmet af patienterne selv. Systemets design skal altså være enkelt, så der ikke skabes forvirring blandt patienterne ift. systemets funktioner. Fagkyndige personale, såsom fysioterapeuter og læger, skal kunne instruere patienten i brugen af systemet samt følge med i udviklingen, som patienten gennemgår. Det skal derfor være muligt for det fagkyndige personale at anvende systemet og aflæse data herfra.

3.1.2 Systemets formål og anvendelse

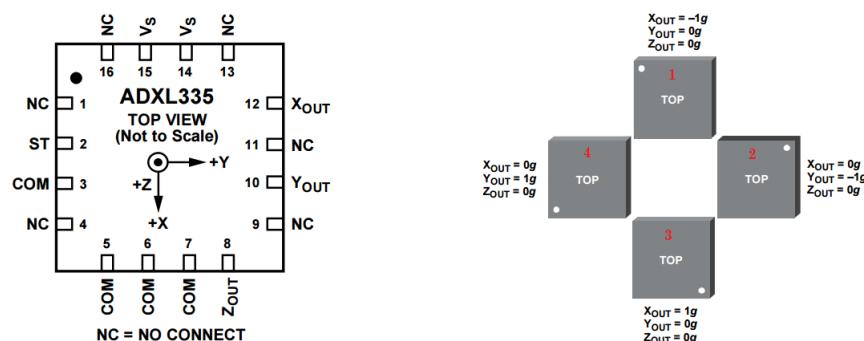
Systemets input er patienternes kropshældning i det frontale plan, dvs. hvor meget vedkommende svajer under udførelse en bestemt øvelse i stående udgangsposition, som er beskrevet i tredje punkt i afsnit 2.4.3 på side 13. Systemet skal kunne konvertere informationerne vedrørende patienternes kropshældning til visuel og somatosensorisk feedback samt et digitalt output i form af grafer. Den visuelle og somatosensorisk feedback har til formål at gøre apopleksipatienter opmærksomme på, hvornår de har bevæget sig over den normale grænse for krops svaj. Således kan systemet registrere, hvis patienten er i risiko for at falde. Inden et fald sker, udsendes et feedback signal, så patienterne har mulighed for at rette sig op. Selve systemet skal anvendes til selvtræning i hjemmet ved udførelse af øvelsen dvs. træning af statisk balance. Det skal derfor være et brugervenligt system, dvs. systemet skal kunne påsættes uden problemer og fungere uden, at patienten skal navigere rundt i forskellige funktioner for at påbegynde feedbacken. Systemet skal fungere som en hjælp for patienten, da vedkommende bliver bevidst omkring sin balance. Herved kan apopleksipatienten være mere selvstændig i rehabiliteringsprocessen. Det er på baggrund af afsnit 2.5.2, side 15 valgt, at systemet skal placeres øverst på sternum for at få bedst mulige målinger ift. patienternes kropshældning. Systemet skal give visuel og somatosensorisk feedback i form af en vibrator samt fem dioder på linje, bestående af en grøn, to gule og to røde. Med denne metode indikeres både, hvilken retning patienten svajer samt graden heraf. Ved benyttelse af to feedback former er der større mulighed for, at patienten kan opfange signalerne. Hvis patientens visuelle sans er

begrænset kan systemet stadig benyttes grundet den somatosensorisk feedback. Jævnfør afsnit 2.3.1, side 9 er grænsen for, hvornår et fald forekommer ift. hældningsgrad individuel. I praksis bør systemet dermed tilpasses til den enkelte patient på baggrund af testøvelser ift. balancen. Hældningsgraderne vil i dette projekt blive valgt på baggrund af raske forsøgspersoner, da det vurderes udfra problemanalysen afsnit 2.3.1, side 9, at apopleksipatienter har flere sygdomsrelaterede faktorer, der kan påvirke deres hældningsgrad.

For at øge øvelsens sværhedsgrad yderligere kan den visuelle sans udelukkes. Patienten skal under øvelsen forsøge at holde balancen så længe som muligt uden at bevæge sig ud i en risikozonerne. Hvis patienten kommer ud i en risikozone, vil dette blive markeret ved lys i dioderne samt vibration. Træningsøvelsen kan gentages efter behov. Ved at tage flere målinger igennem rehabiliteringsforløbet vil det forventes, at der sker en fremgang ift. tiden, hvori balancen kan opretholdes uden at patienten bevæger sig ud i risikozonerne.

3.1.3 Accelerometer

Der er valgt et accelerometer til måling af det biologiske signal, som der skal gives feedback på. Accelerometeret ADXL335, som ses på **figur 3.1** er en treakset sensor, som kan anvendes til måling af statisk balance. Accelerometeret har en single-supply spændingsforsyning, der skal være mellem 1.8 - 3.6V, da dette er accelerometerets driftsspændings interval. På dette accelerometer er der tilkoblet en regulator, hvilket forhindrer at spændingsforsyningen kan supplere accelerometeret med mere end 3.3V. Arbejdsområdet ligger mellem $\pm 3.6g$, og outputtet fra accelerometeret er maksimalt på $\pm 1.188V$ ift. accelerometerets indbyggede offset. Offsettet varierer efter spændingsforsyningen men ligger ved 3V forsyning på 1500mV og beregnes som $Off = Vs/2$. Båndbredden for X og Y-akserne ligger mellem 0.5 til 1600Hz og for Z-aksen mellem 0.5 til 550Hz. Støjen fra Xout og Yout ligger normalt på $150\mu g/\sqrt{Hz * rms}$ ¹, mens det for Zout ligger på $300\mu g/\sqrt{Hz * rms}$. Sensitiviteten afhænger, ligesom offsettet, af spændingsforsyningen, da accelerometeret er ratiometrisk² og ligger ved 3V forsyning mellem 270 og 330mV/g. Outputsignalet er en analog spænding der er proportionel med accelerationen. Accelerometerets outputimpedans er $32K\Omega$ med en afvigelse på $\pm 15\%$ [65]



Figur 3.1: På figuren ses accelerometeret af typen ADXL335 i forskellige stillinger. Til venstre på figuren ses accelerometerets pin konfiguration og funktions beskrivelse. Til højre ses, hvordan accelerometeret skal placeres for forskellig g påvirkning. (Revideret) [65]

¹FiXme Note: Ret evt. denne enhed - erikas rettelser

²FiXme Note: NTK: Ratiometrisk vil sige, at output er direkte proportionelt med input.

Når accelerometeret hældes til siden, vil der ske en acceleration ift. tyngdekraften i en given retning og dermed et udslag fra referencepunktet, som er ved en hældning på 0° . Hvis accelerometeret f.eks. stilles på højkant, som det ses til højre på **figur 3.1** i stilling 1, vil x aksen blive påvirket med $-1g$.[65]

Sammenhængen mellem de enkelte parametre kan udtrykkes ved følgende ligninger:

$$V_{out} = V_{offset} + sensitiviteten * tyngdekraften * \sin(vinklen) \quad (3.1)$$

$$V_{out} = V_{offset} + \frac{\Delta V}{\Delta g} * g * \sin \Theta \quad (3.2)$$

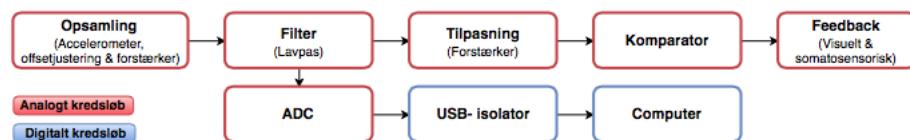
Herudfra er det muligt at isolere og udregne de ukendte parametre, altså kan patientens hældningsgrad bestemmes ud fra accelerometerets output.

3.1.4 Overordnede funktionelle krav til systemet

- Systemet skal være simpelt, så det kan anvendes af både apopleksipatienterne selv samt af fagkyndigt personale
- Systemet skal kunne måle kropshældning, samt angive hvilken retning hældningen sker mod.
- Systemet skal kunne give visuel og somatosensorisk feedback ved forskellige hældningsgrader.
 - Grøn diode: Skal lyse, når patienten ikke er ude i risikozonerne og informere patienten om at accelerometeret er placeret korrekt.
 - Gul diode: Skal lyse, når den første risikozone defineret i grader indtræffer og slukke, hvis patienten retter sig op.
 - Rød diode: Skal lyse, når den anden risikozone defineret i grader indtræffer og slukke, hvis patienten retter sig op.
 - Vibrationshastighed: Skal aktiveres, når den første risikozone indtræffer og skal slukke, hvis patienten retter sig op. Hvis patienten hælder yderligere, skal vibrationshastigheden stige.
- Systemet skal kunne give et digitalt output, så fagkyndigt personale kan behandle og gemme patienternes data i et program.

3.1.5 Systemets opbygning

Systemets opbygning fremgår af **figur 3.2**.



Figur 3.2: På figuren ses de enkelte blokke, som systemet skal indeholde.

Det biologiske signal, der opsamles med accelerometeret, skal som det første centreres omkring $0V$ ved en offsetjustering og efterfølgende forstærkes. Herefter skal signalet filtreres for at frasortere uønskede frekvenser, der ligger uden for det ønskede signals spektrum. Herefter deler systemet sig i en analog og digital del. I den analoge del følger en tilpasning af signalet i form af en forstærkning. Herefter kommer signalet over i en komparatordel, hvor det bliver

sammenlignet med nogle definerede tærskelværdier, der hver især er koblet til en bestemt type feedback, der skal udløses hvis tærskelværdien overskrides.

I den digitale del af systemet, bliver signalet ledt ind i en ADC. Denne vil omdanne det analoge biologiske signal til et digitalt signal. Det digitale signal bliver herefter ledt ind i en USB-isolator, så der ikke opstår lækstrømme og for at øge patientens sikkerhed. Til sidst vil det digitale signal overføres til en computer, hvor det efterfølgende kan gemmes. Det bliver herved muligt at databehandle signalet og opstille det som en graf eller lignende.

Systemet har altså både et output henvendt til patienterne og det fagkyndige personale. Patienternes output er den feedback, der oplyser om deres hældningsgrad. Programmet, der skal behandle og gemme patienternes øvelsesresultater, er output til det fagkyndige personale.

3.2 Pilotforsøg

Der udføres i dette projekt et pilotforsøg for at identificere og sammenligne væsentlige parametre ift. det anvendte accelerometer. En udførlig beskrivelse af pilotforsøget kan ses i bilag C på side 73. Formålet med pilotforsøget er at kunne fastsætte det frekvensspektrum, som det ønskede signal ligger indenfor, da det på den måde er muligt at frafiltrere støjsignaler fra det opsamlede signal. Derudover skal det maksimale og minimale outputsignal fra accelerometeret identificeres, for at spændingsværdierne for de valgte hældningsgrader kan udregnes. Pilotforsøget udføres desuden for at sammenligne de målte offset- og sensitivitetsværdier med de oplyste værdier i databladet for accelerometeret.

3.2.1 Konklusion

På baggrund af målinger og beregninger i pilotforsøget kan det konkluderes, at for outputsignalet fra accelerometeret ved den statiske acceleration udgør alt over 0Hz støj. Der udregnes en baseline ved 0g påvirkning til 1.6325V , som burde være 1.65V , da dette er halvdelen af spændingsforsyningen. Derved afviger den målte baseline med 1.06% . Ved rotationsmålingerne vurderes det, at alt over 25Hz er støj. Maksimum og minimum outputsignalet fra accelerometeret vil for langsom rotation eller svajning henholdsvis være 1.9638V og 1.3092V , hvilket bliver til 0.3313V og -0.3233V efter offsettet er blevet justeret, der udregnes til 0.0037V og -0.0036V pr grad. Afvigelserne mellem pilotforsøg og datablad vurderes som værende acceptable ift. videre udførelse af forsøg med accelerometeret.

3.3 Specifikke kravspecifikationer

I praksis er det ikke muligt at have ideelle komponenter [59]. Der vurderes derfor ud fra pilotforsøget, litteratur samt relevante datablade, hvilke krav blokkene i blokdiagrammet i afsnit 3.2 på side 24 skal opfylde og den tolerance, der accepteres ift. forskellige parametre.

3.3.1 Opsamling

Blokken opsamling omfatter accelerometeret, offsetjustering og forstærkning. Accelerometeret skal have en sådan størrelse, at det kan påsættes en patient uden at give fysiske begrænsninger. Accelerometeret skal kunne måle en statisk acceleration i mindst to retninger, da der måles i det frontale plan til hhv. højre og venstre side. Herved kan det bestemmes, hvilken retning patienterne holder mod i stående position. Det skal kunne detektere en hældningsgrad op til

$\pm 90^\circ$, da en forsøgsperson ikke kan komme over denne hældningsgrad. Offsetjusteringen skal centrere det målte signal omkring 0V, da accelerometeret typisk mäter 1.6325V ved 0g påvirkning af den pågældende akse ifølge pilotforsøget. Derfor skal der trækkes 1.6325V fra alle inputs fra accelerometeret. Justeringen af offset skal forekomme inden forstærkning således, at der ikke sker en forstærkning og dermed forskydning af offsetværdien, når accelerometeret mäter i positiv og negativ retning, hvorved g påvirkningen ændres. Ved justering af offsettet må der ikke ske en ændring af amplitudens peak-to-peak og frekvensen. Forstærkningen skal gøre det nemmere at adskille det ønskede signal fra støj i den efterfølgende filtreringsblok. For at forstørkningskredsløbet ikke dræner strømforsyningen, skal inputimpedansen til forstærkeren være mindst 100 gange større end outputimpedansen i accelerometeret som kan ses i afsnit 3.1.3 på side 23. Signalet skal efter forstærkningen ligge indenfor arbejdsmrådet $\pm 3V$ og der ønskes derfor størst mulige forstærkning. Den højeste mæling ved $\pm 90^\circ$ var ifølge pilotforsøget efter offsetjusteringen 0.3313V. Derfor kan forstærkningen udregnes således:

$$\frac{3V}{0.3313V} = 9.05 \approx 9.1 \quad (3.3)$$

Der ønskes en forstærkning på faktor 9.1. Derved vil den maksimale spænding efter denne forstærkning være 3.0148V, hvilket accepteres, da der vides fra databladet for operationsforstærkeren TL081 og teori, at når TL081 bliver forsynet med en spænding på 5.5V, så vil den maks give ca. 4V ud. [66] Derfor vil en lille afvigelse i outputsignalet ift. arbejdsmrådet ikke få systemet til at gå i mætning. Forstærkningens gain i dB udregnes ud fra følgende formel:

$$20 \cdot \log_{10}(9.1) = 19.1808\text{dB} \quad (3.4)$$

Krav:

- Opsamlingsblokken skal have en spændingsforsyning på 5.5V.
- Accelerometeret skal minimum have en output akse.
- Accelerometeret skal være under 5×5 cm i dimensionerne.
- Accelerometeret skal kunne mæle statisk acceleration i mindst to retninger.
- Accelerometeret skal kunne detektere en hældning fra 0° til $\pm 90^\circ$.
- Offsetjusteringen skal centrere det målte signal omkring 0V.
- Offsetjusteringen skal modtage en referencespænding på 1.6325V.
- Forstærkeren skal have en indgangsimpedans på mindst $3.68M\Omega^3$.
- Forstærkningen skal være på 9.1, som svarer til 19.1808dB.
- De benyttede modstande til designet af forstærkeren skal besidde den navngivne værdi.
- Outputtet fra denne blok skal være mellem 2.9817V og -2.9097V.

Tolerance:

- Der accepteres en afvigelse i spændingsforsyning på $\pm 9\%$.
- Der accepteres ingen afvigelse ift. krav for accelerometerets dimension og minimum antal af akser.
- Der accepteres en afvigelse i detektionen af hældningsgrad på $\pm 5\%$.
- Der accepteres en afvigelse af offsetjusteringen på $\pm 2\%$.

³FjXme Note: Da man ikke vil dræne blokken før for strøm. Udregnet ved $32K\Omega$, da indputimpedans skal være mindst 100 gange større end den forrige bloks outputimpedans. Accelerometrets indgangsimpedans har en afvigelse på $+15\%$

- Der accepteres en afvigelse i referencespændingen på $\pm 0.003V$.
- Der accepteres kun en indgangsimpedans i forstærkeren på mindst $3.68M\Omega$.
- Der accepteres en afvigelse i forstærkningen på $\pm 2\%$.
- Der accepteres en afvigelse i de benyttede modstandes reelle værdi på $\pm 1\%$.
- Der accepteres en afvigelse ift. maksimum og minimum output fra blokken på $\pm 5\%$.

3.3.2 Filter

Blokken indeholdende et filter anvendes til at frasortere uønskede signaler, der kan forekomme under målinger med accelerometret. Filtreringsblokken inddrages i systemet jævnfør afsnit 2.6.2 på side 17. Frekvensområdet for kropshældning er ikke klart defineret, men studier anvender et frekvensområde liggende mellem $0.02 - 10Hz$ [67]. Alle signaler, der ligger udenfor dette spektrum, ønskes derfor fjernet. I pilotforsøget blev der påvist, at signalet i dette tilfælde ligger mellem $0 - 25Hz$. Alt signal uden for dette spektrum ønskes derfor frafiltreret. Dette gøres ved at benytte et lavpasfilter, der har en knækfrekvens ved $25Hz$.

Den maksimale variation i pasbåndstransmissionen (A_{max}) sættes til $3dB$. For fjerne $50Hz$ støj, sættes stopbåndsfrekvensen til $45Hz$. Der beregnes en faktor ud fra LSB, som udregnes i afsnit 2.6.5 på side 19 samt den maksimale amplitude af signalet. Den maksimale amplitude beregnes ved en Root Mean Square (RMS) analyse ud fra rotationerne foretaget i afsnit ?? på side ?? for hhv. højre og venstre side. Dæmpningsfaktoren udregnes ved følgende ligning:

$$\frac{0.00244V}{0.0162V} = 0.1506 \approx 0.2 \quad (3.5)$$

$$\frac{0.00244V}{0.0131V} = 0.1863 \approx 0.2 \quad (3.6)$$

Der ønskes en dæmpning på faktor $\frac{1}{5}$, da der tages forbehold for et tolerance område. Dæmpningens gain i $dB(A_{min})$ udregnes ud fra følgende formel:

$$A_{min} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{5} \right) = -13,98 \approx -14dB \quad (3.7)$$

Krav:

- Filteret skal have en spændingsforsyning på $5.5V$.
- Filteret skal kunne modtage et inputsignal på $\pm 3V$.
- Der ønskes en knækfrekvens i pasbåndet på $25Hz$.
- Der ønskes en stopbåndsfrekvens på $45Hz$.
- Der ønskes maksimal fladhed på pasbåndet og stopbåndet.
- Der ønskes en minimum dæmpning af stopbåndet på $14dB$.
- Der ønskes en maksimal dæmpning i pasbåndet på $3dB$.

Tolerance:

- Der accepteres en afvigelse i spændingsforsyning på $\pm 9\%$.
- Der accepteres ingen afvigelse ift. hvor stort et inputsignal filtret skal kunne modtage.
- Der accepteres en afvigelse fra knækfrekvensen på $\pm 10\%$.
- Der accepteres en afvigelse fra stopbåndsfrekvensen på $\pm 5\%$.
- Der accepteres kun en maksimal fladhed på pasbåndet og stopbåndet.
- Hvordan tjekker man, at det man har fået er det maksimale?
- Der accepteres minimal dæmpning på $14dB$ af stopbåndet eller en afvigelse på $+15\%$.
- Der accepteres maksimal dæmpning på $3dB$ af pasbåndet eller en afvigelse på -15% .

3.3.3 Tilpasning

Blokken tilpasning har til formål at tilpasse det filtrerede signal til komparatoren. Dette gøres med en forstærker, således at spektret, der skal reguleres indenfor, øges. Derudover afgrænses måleintervallet til $\pm 25^\circ$, da et range på $\pm 90^\circ$ er unødvendigt ift. at vurdere hvorvidt patienten er faldet. Det vurderes, at en hældning på over 25° medfører fald, da denne hældning ligger væsentligt ud over den naturlige hældningsgrad jævnfør afsnit 2.3.1, side 9. Der ønskes størst mulig forstærkning indenfor det fastsatte arbejdsområde på $\pm 3V$. Indgangsimpedansen bestemmes ud fra samme kriterier som for forstærkeren i opsamlingsblokken. I bilag C på side 73 er den størst mulige spænding efter justering af offsettet udregnet, hvilket er $0.3313V$. Derudover er der beregnet, at den maksimale volt pr. grad er $0.0037V$. Ved $\pm 25^\circ$ vil outputtet være;

$$0.0037 \cdot 25 = 0.0925V \quad (3.8)$$

Forstærkerens faktor samt gain i dB udregnes i **ligning (3.10)** og **ligning (3.11)**.

$$0.0925V \cdot 9.1 = 0.8418V \quad (3.9)$$

$$\frac{3V}{0.8418V} = 3.5638 \approx 3.6 \quad (3.10)$$

$$20 \cdot \log_{10}(3.6) = 11.1261\text{dB} \quad (3.11)$$

I **ligning (3.9)**, **ligning (3.10)** og **ligning (3.11)** er de $3V$ grænsen for arbejdsområdet. Der forstærkes med en faktor 3.6.

Krav:

- Forstærkeren skal modtage en spændingsforsyning på $5.5V$.
- Forstærkeren skal kunne modtage et inputsignal på $\pm 3V$.
- Forstærkeren skal forstærke med en faktor 3.6, som svarer til 11.1261dB .
- De benyttede modstande til designet af forstærkeren skal besidde den navngivne værdi.
- Indgangsimpedansen skal være over $3.2M\Omega$.
- Outputimpedansen skal være under $32K\Omega$.

Tolerance:

- Der accepteres en afvigelse i spændingsforsyning på $\pm 9\%$.
- Der accepteres ingen afvigelse ift. hvor stort et inputsignal forstærkeren skal kunne modtage.
- Der accepteres en afvigelse i forstærkningen på $\pm 2\%$.
- Der accepteres en afvigelse i de benyttede modstandes reelle værdi på $\pm 1\%$.
- Der accepteres en indgangsimpedans på mindst $3.2M\Omega$.
- Der accepteres en outputimpedans under $32K\Omega$.

3.3.4 Komparator

Blokken indeholdende komparatorer skal kunne sammenligne et inputsignal på maks $\pm 3V$ med referencespændinger. Komparatorerne skal vha. definerede tærskelværdier bestemme, hvilken hældningsgrad patienten har, og i hvilken retning vedkommende hælder mod. Der skal være flere tærskelværdier, så feedbacken kan gives i flere niveauer. Tærskelværdierne er bestemt på baggrund af pilotforsøg, hvor værdierne er beregnet ved først at finde spændingen for 90° , som jævnført C.6 på side 76 er $0.3313V$ for positiv retning og $-0.3233V$ i negativ retning efter

forstærkning på hhv. en faktor 9.1 og derefter en faktor 3.6. Denne værdi divideres med 90 for at bestemme spændingen ved $\pm 1^\circ$ og ganges herefter med hhv. 2° , 8° og 13° for at bestemme spændingen ved de enkelte hældninger og derved definere tærskelværdierne.

Krav:

- Komparatorblokken skal have en spændingsforsyningen på $\pm 5.5V$.
- Komparatoren skal kunne modtage et inputsignal på $\pm 3V +5\%$.
- Komparatoren skal ved et bestemt spændingsniveau aktivere en diode og vibrator:
 - Grøn diode og ingen vibration: I intervallet indenfor $0.1808V$ til $-0.1773V$. Svarende til $\pm 2^\circ$.
 - Gul diode og let vibration: Fra niveauet $0.9648V$ og $-0.9413V$. Svarende til $\pm 8^\circ$ eller over.
 - Rød diode og moderat vibration: Fra niveauet $1.5679V$ og $-1.5297V$. Svarende til $\pm 13^\circ$ eller over.

Tolerance:

- Der accepteres en afvigelse i spændingsforsyningen på $\pm 5\%$.
- Der accepteres ingen afvigelse ift. hvor stort et inputsignal komparatoren skal kunne modtage.
- Der accepteres en afvigelse i tærskelværdierne på $\pm 1\%$.

3.3.5 Feedback

Visuel feedback

Blokken med visuel feedback omfatter den del af systemet, der giver feedback til patienten vha. LED-dioder. Der skal i alt være fem LED-dioder: En grøn, der placeres i midten, en gul på hver side af den grønne diode og en rød diode på hver side af de gule dioder. Den grønne LED-diode skal lyse, når accelerometret er placeret korrekt på patienten, hvorved der er sikret den rette udgangsposition for hældningen. Dette gør, at den grønne LED-diode er aktiveret fra $0^\circ - \pm 2^\circ$. I intervallet $\pm 2^\circ - \pm 8^\circ$ lyser ingen LED-dioder. Den gule LED-diode aktiveres, når patienten skal være opmærksom på sin kropshældning ved en hældning på $\pm 8^\circ$. Den røde LED-diode aktiveres, når patienten er over $\pm 13^\circ$ og derfor er i fare for at falde. Retningen af patientens kropshældning bestemmes vha. placeringen af LED-dioderne. LED-dioderne til højre for den grønne LED-diode indikerer at patienten er ved at falde til højre. Det samme gør sig gældende for fald til venstre.

Krav:

- Den visuelle feedbackblok skal have en spændingsforsyning på $5.5V$.
- LED-dioderne skal aktiveres ved angivet tærskelværdier i komparatoren.
- LED-dioderne skal kunne give et tydeligt lys.

Tolerance:

- Der accepteres en afvigelse i spændingsforsyningen på $\pm 5\%$.
- Der accepteres ingen afvigelse ift. aktivering af LED-dioder, hvis tærskelværdierne for den bestemte LED-diode er opnået i komparatorblokken.
- Der accepteres kun tydeligt lys fra LED-dioderne.

Somatosensorisk feedback

Blokken med somatosensorisk feedback omfatter også den del af systemet, der giver feedback til patienten. Her vha. vibratører. Der skal i alt være to vibratører, som placeres i medialt på

hver underarm. Vibrationen skal ske i modsatte side af hældning, så patienterne kan rette sig mod siden, hvor vibrationen gives. Vibratorerne skal give en bestemt vibrationshastighed ved bestemte hældningsgrader hhv. den gule og røde LED-diode. Hvis den gule LED-diode lyser, skal vibrationen være let og hvis den røde LED-diode lyser skal vibrationen være moderat.

Krav:

- Skal have en spændingsforsyningen på 5.5V.
- Vibratorerne skal aktiveres ved angivet tærskelværdier i komparatoren.

Tolerance:

- Der accepteres en afvigelse i spændingsforsyningen på $\pm 5\%$.
- Der accepteres ingen afvigelse ift. aktivering af vibratorerne, hvis tærskelværdierne for den bestemte vibrator er opnået i komparatorblokken.

3.3.6 Spændingsforsyning

I systemet anvendes en spændingsforsyning af to 1.5V batterier placeret i en spændingsregulator, der skal leve en konstant spænding til hele kredsløbet. Der anvendes batterier for at undgå tilslutning til elnettet, hvilket gør det mere sikkert og anvendeligt for patienten. Spændingsforsyningen kan havde indflydelse på, hvilket outputsignal der opnås, og det er derfor vigtigt, at blokkene i systemet designes efter den fastsatte spænding.

Krav:

- Spændingsregulatoren skal leve en spænding på mindst 5.5V.
- Spændingsregulatoren skal forsyne samtlige blokke i systemet med en konstant spænding.
- Spændingsregulatorens forsyning må ikke forårsage klipning af signalet.

Tolerance:

- Der accepteres ikke en spænding under 5.5V.
- Der accepteres ingen afvigelse for spændingsregulatorens tilkobling eller klipning af signalet.

3.3.7 ADC

Blokken med en ADC anvendes i systemet, for at konvertere det analoge signal til digitalt. ADC'ens inputsignal vil ligge i området $\pm 3V$, men der skal tages højde for afvigelser. Båndbredden på accelerometeret bestemmer, hvilken samplingsfrekvens der skal benyttes. I følge Nyquists sætning skal der samples med minimum det dobbelte af det biologiske signals frekvens. I praksis samples der med minimum det tidobbelte jævnfør afsnit 2.6.5, side 19. I dette tilfælde er båndbredden $25Hz$, dvs. at der som minimum skal samples med $100Hz$, og i praksis vil det være hensigtsmæssigt at sample med minimum $250Hz$.

Krav:

- Komparatoren skal kunne modtage et inputsignal på $\pm 3V \pm 5\%$.
- Skal have en samplingsfrekvens på minimum $250Hz$.
- Skal ikke ændre på det signalet, som den optager.

Tolerance:

- Der accepteres ingen afvigelse ift. kravene om inputsignal og samplingsfrekvens.
- Der accepteres en afvigelse på $\pm 1\%$ af ADC'ens målinger af signalet sammenlignet med det indsendte signal.

3.3.8 USB-isolator

Blokken med USB-isolatoren anvendes i systemet for at øge patientens sikkerhed. USB-isolatoren isolerer patienten fra kredsløbet og sørger, at der ikke løber lækstrømme fra computeren ind i systemet.

Krav:

- USB-isolatoren skal være i stand til at kunne modtage et signal på $\pm 4V$.

Tolerance:

- Der accepteres ikke en afvigelse ift. kravet til USB-isolatoren.

3.3.9 Software

Blokken indeholdende softwaren implementeres i systemet for at kunne behandle og gemme patienternes øvelsesresultater. Denne del af systemet er brugerfladen for det fagkyndige personale og skal derfor kunne fremvise information omkring patienternes balance i form af grafer eller lignende. Det fagkyndige personale skal vha. af softwaren kunne følge med i patienternes udvikling ift. balancen.

Krav:

- Skal kunne fremvise data med information om patientens hældning i de enkelte øvelser, herunder hvor ofte patienten har bevæget sig ud i risikozonerne.
- Skal kunne gemme data med information om patientens hældning.

Tolerance:

- Der accepteres ingen afvigelse ift. software.

3.4 Teori, design, simulering, implementering og test

I dette afsnit vil teori og design for hver enkelt blok fra **figur 3.2** blive beskrevet. Herefter vil designet blive simuleret i programmet LT Spice, hvorefter blokken vil blive implementeret og testet. Denne test er nødvendig for at tjekke, om resultatet fra simuleringerne med ideelle komponenter stemmer overens med en test med reelle komponenter. Der kan altså være forskel, da der arbejdes med reelle komponenter i implementeringsfasen og ideelle komponenter i LTSpice.

3.4.1 Accelerometer

Teori og design

Teorien bag accelerometret ADXL335 ses i afsnit 3.1.3 på side 23. Der blev ud fra pilotforsøget fundet ud af, at signalet ligger i et frekvensområde fra 0-25Hz og derved er båndbredden 25Hz. For at få den ønskede båndbrede skal der ændres på kapacitorens størrelse ift. pilotforsøget, da kapacitoren her var tilpasset 50Hz. Kapacitorens størrelse (C) beregnes ud fra følgende formel fra accelerometerets datablad [65]:

$$\text{Båndbredde} = \frac{5\mu F}{C} \Rightarrow C = \frac{5\mu F}{\text{Båndbredde}} \quad (3.12)$$

Her er kendes båndbredden, som er 25Hz, hvilket gør at C bliver $0.2\mu F$. For at finde en kapasitor med værdien $0.2\mu F$ bruges der to $0.1\mu F$ kapacitorer i parallelforbindelse.

Simulering

Ifølge tolerancerne for accelerometret beskrevet i afsnit 3.3.1 på side 25 skal der testes for, hvorledes accelerometret overholder kravet om, at der maks må være en 5% afvigelse i detektionen af hældningsgrad.

Der kan ikke laves en simulering af et accelerometer i programmet LTspice, da denne komponent ikke findes der inde. Værdierne beregnet igennem pilotforsøget på side ?? anses som de teoretiske værdier for accelerometerets output.

Implementering og test

I pilotforsøget blev der arbejdet med reelle komponenter, hvilket også blev benyttet til implementeringen. Derfor antages det, at der vil være en mindre afvigelse imellem resultaterne fra testen og pilotforsøget end imellem resultaterne fra testen og en eventuel simulering, da der i simuleringer arbejdes med ideelle komponenter.

Til opsamling af data fra accelerometret blev der benyttet et multimeter. I testen blev der foretaget en aflæsning med multimetret for $\pm 8^\circ$ og $\pm 13^\circ$. Disse fire værdier ses i **tabel 3.1**. Den teoretiske stigning af volt pr. grad for henholdsvis negativ og positiv hældning er udregnet i bilag C på side 73. De teoretiske værdier for 8° og 13° udregnet derfor ud fra disse værdier. Dette gøres i følgende ligninger:

$$(-0.0036 \cdot 13) + 1.6325 = 1.5858V \quad (3.13)$$

$$(-0.0036 \cdot 8) + 1.6325 = 1.6038V \quad (3.14)$$

$$(0.0037 \cdot 8) + 1.6325 = 1.6619V \quad (3.15)$$

$$(0.0037 \cdot 13) + 1.6325 = 1.6803V \quad (3.16)$$

Disse værdier indsættes og der udregnes en afvigelse.

Vinkel af accelerometer	Beregnet Output	Output	% afvigelse ift. dækning af hældningsgrad
-13°	1.5858V	1.5686V	1.08%
-8°	1.6038V	1.5947V	0.57%
8°	1.6619V	1.6761V	0.85%
13°	1.6803V	1.7114V	1.85%

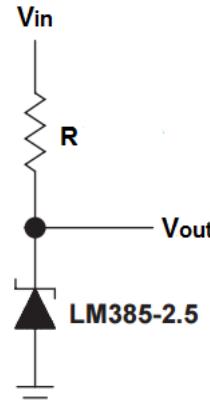
Tabel 3.1: I tabellen ses det målte output ved en bestemt grad. Herved kan der beregnes en afvigelse i procent.

Der ses i tabel **tabel 3.1**, at accelerometret har en maksimal afvigelse i detektionen af hældningsgrad på 1.85%. Derved overholder accelerometret tolerancerne, som er blevet stillet i afsnit 3.3.1 på side 25 og accelerometret accepteres derfor.

Referencespænding

Der skal ved offset- og komparatorblokken forsynes med en konstant spænding, da spændingen skal anvendes som sammenligningsgrundlag ift. andre signaler. Denne spænding kaldes en referencespænding. Referencespændingen består af en spændingsforsyning, en modstand og en spændingsreference diode. Der anvendes en referencediode af typen LM385, som både findes

som 1.2V og 2.5V. Et eksempel på en opsætning af en spændingsreference kan ses på figur 3.3.



Figur 3.3: Figuren illustrerer et eksempel på opsætning af et kredsløb for en spændingsreference med LM385. Figuren er en revideret udgave fra kilden. [68]

For at udregne værdien af modstanden, R , i kredsløbet, anvendes følgende generelle formel:

$$R = \frac{V_{forsyning} - V_{Reference}}{I_Z} \quad (3.17)$$

Hvor $V_{forsyning}$ er forsyningsspændingen som sendes ind i kredsløbet, $V_{Reference}$ er den referencespænding der skal sendes ud af systemet og I_Z er strøm forbruget fra de komponenter, der er i referencespændings kredsløbet. **Beregning af referenceværdien til offset** Først udregnes R for referencespændingen til offsettet. $V_{forsyning}$ er de 5.5V, der forsynes med fra spændingsforsyningen. $V_{Reference}$ 2.5V. I kredsløbet for offsettet indgår én operationsforstærker (TL081), der har en maksimal biasstrøm på 10nA[66]. Referencedioden har et arbejdsområde mellem $20\mu\text{A}$ til $20mA$ og for at sikre der er strøm nok til referencedioden er den sat til at bruge $200\mu\text{A}$ [68]. Dermed kan strømforbruget, I_Z , for offsettet udregnes som summen af de to biasstrømme og alle de kendte værdier indsættes i formlen:

$$R_{offset} = \frac{5.5V - 2.5V}{0.0002 + (1 \cdot 10(-8))A} = 14999.25004\Omega \approx 15K\Omega \quad (3.18)$$

Da offsettet på accelerometeret er på 1.6325V jævnført 3.4.2 på side 34 skal referenceværdi være ligeledes 1.6325V. For at opnå denne referenceværdi, bruges der en spændingsdeler. Den generelle formel for spændingsdeler er:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R2}{R1 + R2} \quad (3.19)$$

$R1$ bliver valgt til at være $10K\Omega$ og derved er følgende kendt:

- $V_{out} = 1.6325V$
- $V_{in} = 5.5V$
- $R1 = 10K\Omega$

Ligningen kommer til at være således:

$$1.6325V = 5.5 * \frac{R2}{10000\Omega + R2} R2 = 18818.44380\Omega \approx 18820\Omega \quad (3.20)$$

Beregning af referenceværdien til komparator Den samme fremgangsmåde anvendes til udregning af R for referencespændingen til komparatoren. Her er den ønskede referenceværdi 2.5V, så der benyttes ikke en spændingsdeler. Der er i begyndelse at kredsløbet indsat en operations forstærker (TL082), som har to input og output og derved kan fungere som både buffer til komparator kredsløbet og inverterende forstærker. Da spændingsdelen går direkte ind i en buffer, så er den maksimale biasstrøm på 50nA. Biasstrømmen for referencedioden er igen sat til 200μA. Dermed kan værdierne igen indsættes i formlen og R kan beregnes.

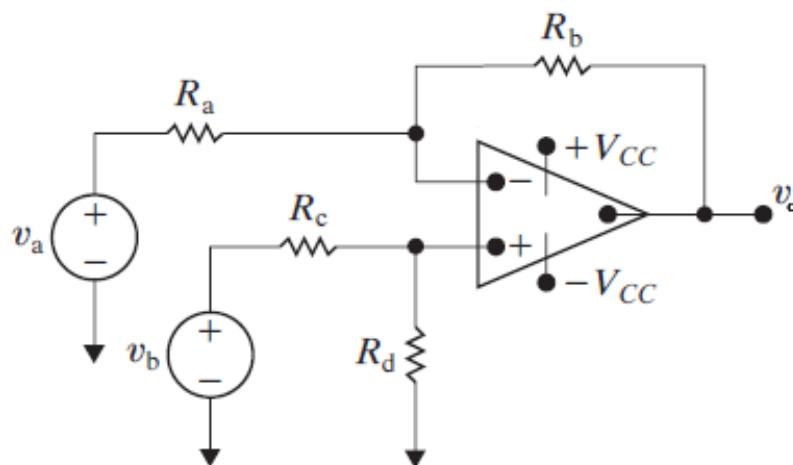
$$R_{komparator} = \frac{5.5V - 2.5V}{0.000200005A} = 14999.62501\Omega \approx 15K\Omega \quad (3.21)$$

Test af referencespænding

3.4.2 Offsetjustering

Teori og design

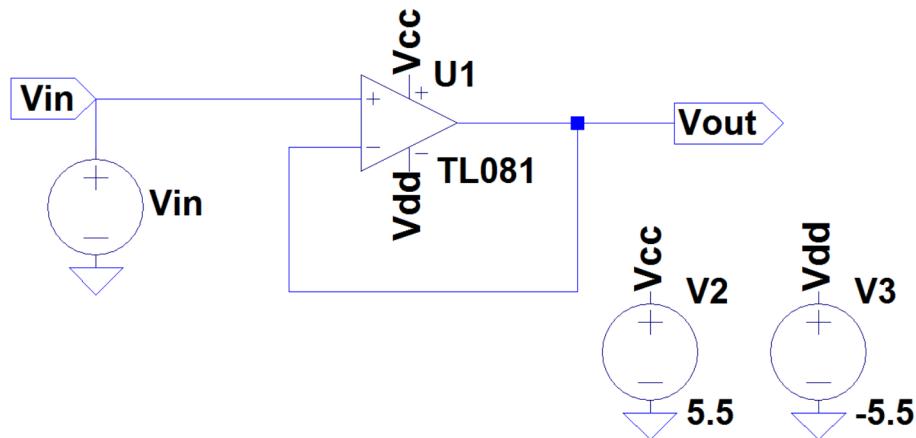
Det analoge signal fra accelerometeret har et indbygget offset, som gør, at outputtet ved 0g påvirkning er halvdelen af accelerometerets spændingsforsyning. For at kunne forstærke signalet, der både skal indeholde positive og negative værdier, er det nødvendigt at justere offsettet. Dermed kan accelerometeret i steady state ved 0g påvirkning have et outputsignal på 0V. Måden hvorpå dette nye offset indføres er ved anvendelse af et differensforstærker kredsløb, som ses på **figur 3.4**. Dette kredsløb kan tage et inputsignal, kaldet V_b på figuren, og fratrække et andet inputsignal, kaldet V_a på figuren, der vil fungere som en referenceværdi.



Figur 3.4: På figuren ses et generisk differens forstærker kredsløb illustreret. (Revideret) [59]

Den ikke-inverterende kanal ($+V_{in}$) har en høj indgangsimpedans på $10^{12}\Omega$, og derfor er outputimpedansen for den forrige blok ikke relevant. [66] Men inputimpedansen i den inverterende kanal ($-V_{in}$) afhænger af modstanden R_a på **figur 3.4** grundet det ikke-inverterende design. Derfor designes en buffer imellem signalet V_a og modstanden R_a , hvorfor

indgangsimpedansen i $-V_{in}$ ikke vil have en betydning. Dette skyldes, at outputimpedansen fra bufferen vil være meget lav. Der benyttes en operationsforstærker TL081 i en ikke konverterende konfiguration og med et gain på 1. Dette ses på figur 3.5.⁴



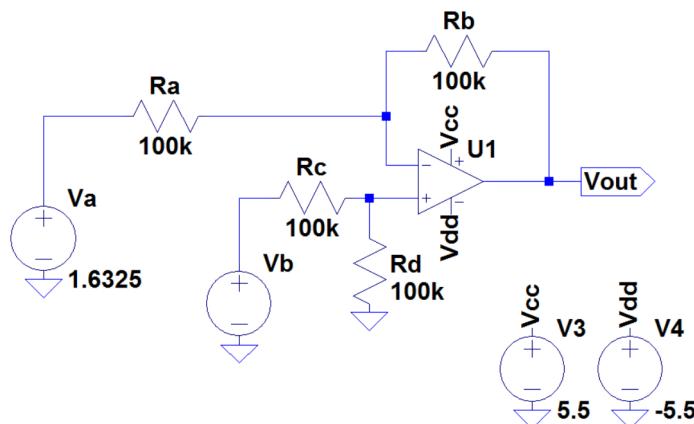
Figur 3.5: På figuren ses en buffer, som fungerer som en forstærker med et gain på kator 1.

I ligning (3.22) ses den simplificerede formel for differensforstærker kredsløbet, hvor $\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_c}{R_d}$;

$$V_o = \frac{R_b}{R_a} \cdot (v_b - v_a) \quad (3.22)$$

Der kan heraf ses, at forstærkningen på signalet kan bestemmes ved at vælge modstandene R_a og R_b , og at det er spændingen V_a , der trækkes fra spændingen V_b .

I dette tilfælde kræves der ikke en forstærkning, hvorfor modstandene R_a og R_b skal være det samme. Da signalet ikke skal inverteres, sendes accelerometerets output ind i den ikke-inverterende kanal. Offsettet, som i dette tilfælde er en referenceværdi på 1.6325V jævnført C.1 på side 77, sendes ind i den inverterende kanal. Dette illustreres på figur 3.6:



Figur 3.6: På figuren ses offsetjusteringens opbygning. V_a er referenceværdien, som sættes til 1.6325V, og V_b er outputtet fra accelerometeret, som vil skabe inputtet til operationsforstærkerens ikke-inverterende kanal. Modstandene i kredsløbet er ens, hvilket medfører at signalet ikke forstærkes, og spændingsforsyningen til operationsforstærkeren er $\pm 5.5V$.

⁴FiXme Note: Kilde på buffer

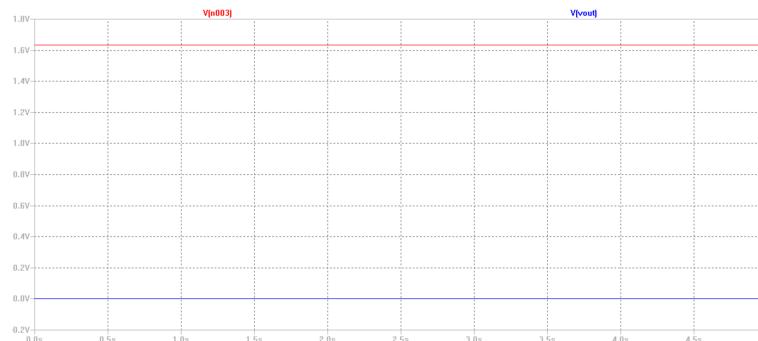
Simulering

Der foretages tre simuleringer i LTspice - en for hhv. det højeste- og laveste output, som accelerometret kan give for øvelserne. Dette vil svare til 1g påvirkning af accelerometerets x akse - altså 90° rotation. Derudover foretages der en simulering for 0g påvirkning, hvilket svarer til 0° rotation. Resultaterne ses i **tabel 3.2**.

Inputsignal	Offset	Forventet outputsignal	Simuleret outputsignal	Afvigelse
1.9638V	1.6325V	0.3313VV	0.3313V	0%
1.6325V	1.6325V	0V	-22.949 μ V	$\approx 0\%$
1.3092V	1.6325V	-0.3233VV	-0.3233V	0%

Tabel 3.2: I tabellen ses resultaterne fra simuleringerne af offsettet med forskellige inputs.

I tabellen fremgår det, at der er en lav afvigelse imellem de forventede- og simulerede outputsignal. Dette betyder, at kredsløbet fungerer rent teoretisk med ideelle komponenter, som bliver anvendt i LTspice. På **figur 3.7** ses simuleringen af 1.6325V input fra accelerometret.



Figur 3.7: På figuren ses en simulering af 1.6325V input, hvilket giver et output på $\approx 0V$.

Implementering og test

I implementeringen arbejdes der med reelle komponenter. Derfor antages der, at der kan være afvigelser fra resultaterne imellem testen med ideelle komponenter i dette afsnit og testen med reelle komponenter i simuleringen.

Der ses på **figur 3.6**, at der skal benyttes fire modstande på $100\text{K}\Omega$ til opbygningen af offsettet. Disse blev målt inden testen, hvilket fremgår i **tabel 3.3**.

Teoretisk	Ved måling	% afvigelse
$100\text{K}\Omega$	$99.8\text{K}\Omega$	0.2%
$100\text{K}\Omega$	$99.7\text{K}\Omega$	0.3%
$100\text{K}\Omega$	$99.7\text{K}\Omega$	0.3%
$100\text{K}\Omega$	$99.7\text{K}\Omega$	0.3%

Tabel 3.3: I tabellen ses der, at alle fire modstande afviger lidt fra deres teoretiske værdi, hvilket er forventet af reelle komponenter. Kravet til disse fire modstande var dog, at de skulle være ens således at der ikke sker en forstærkning. Disse modstande accepteres derfor.

Herefter implementeres kredsløbet. Til afbildning af signalet for de tre spændingsniveauer benyttes et oscilloskop. De aflæste resultater står under "Output" i **tabel 3.4**.

	<i>Ønskede input</i>	<i>Input</i>	<i>Forventet output</i>	<i>Output</i>	<i>% afvigelse</i>
<i>V1 ref</i>	1.6325V	1.6346V	×	×	×
<i>V2 signal</i>	1.9638V	1.9633V	0.3287V	0.3293XV	0.18%
	1.6346V	1.6346V	0V	-0.831VmV	$\approx 0\%$
	1.3092V	1.3091XV	-0.3254V	-0.3247XV	0.22%

Tabel 3.4: I tabellen ses en oversigt over det udregnede resultat for de tre spændingsniveauer.

I **tabel 3.4** betegner "V1 / ref." referencespændingen, som sendes ind i den inverterende kanal. "V2 / signal." betegner det mindste og største output, som accelerometret kan give ved $\pm 90^\circ$. Derudover indsendes en spænding, som svarer til reference spændingen. Disse tre spændinger bliver sendt ind i den ikke-inverterende kanal. Det "Ønskede input" er beregnet i afsnit C.6 på side 76 og burde være det, som sendes ind i V2. "Input" er den spænding, som sendes ind fra en spændingsforsyningen og er målt med et multimeter. "Forventet output" udregnes ved at trække inputtet fra reference spændingen fra inputtet fra det indsendte signal. "Output" er den afmålte værdi fra multimetret og "% afvigelsen" kan derved beregnes.

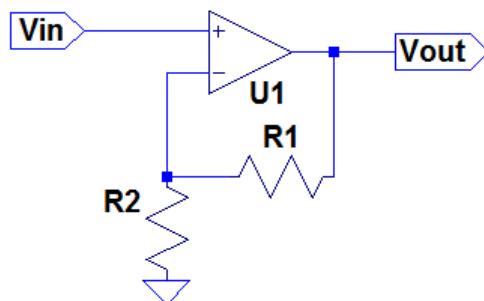
Der ses i **tabel 3.4**, at afvigelserne ligger inde for tolerancen for offsettet beskrevet i afsnit 3.3.1 på side 25. Derfor anses disse afvigelser som acceptable.

3.4.3 Forstærker i opsamlingsblok

Teori og design

Til forstærkningen i opsamlingsblokken på **figur 3.2** skal der benyttes en ikke-inverterende forstærker, da der ønskes, at inputtet og outputtet har samme polaritet. Ved en ikke-inverterende forstærker bliver inputtet tilkoblet direkte til den ikke-inverterende inputterminal, som har en impedans på $10^{12}\Omega$ indbygget i operationsforstærkeren. Hvis der var en lav indgangsimpedans, hvilket der kan være i den inverterende kanal grundet designet, ville denne blok trække spænding fra inputsignalet, hvilket vil give store afvigelser i de efterfølgende blokke.

Kredsløbet består af en operationsforstærker kaldet TL081, som sidder i et closed-loop med modstandene R1 og R2, der udgør en spændingsdeler. Dette ses på **figur 3.8**.



Figur 3.8: Kredsløbet for en ikke-inverterende forstærker i en closed-loop konfiguration.

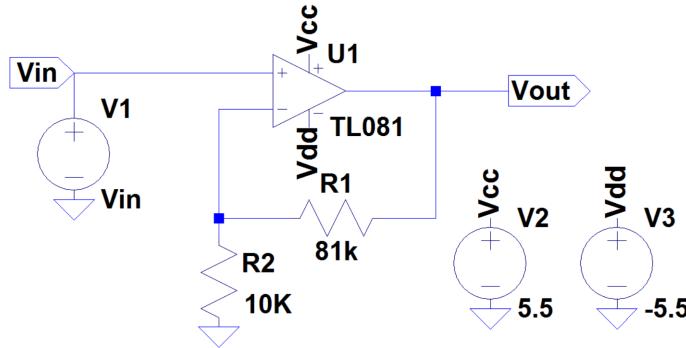
Der er jævnfør afsnit 3.3.1 på side 25 bestemt, at forstærkningen skal være en faktor 9.1, hvilket svarer til 19.1808dB. For at udregne R1 er R2 modstanden blevet valgt til $10K\Omega$. [59]

Ud fra dette er R_1 blevet bestemt ved følgende udregning:

$$9 = 1 + \left(\frac{R_1}{10K\Omega} \right) \quad (3.23)$$

$$R_1 = 81K\Omega \quad (3.24)$$

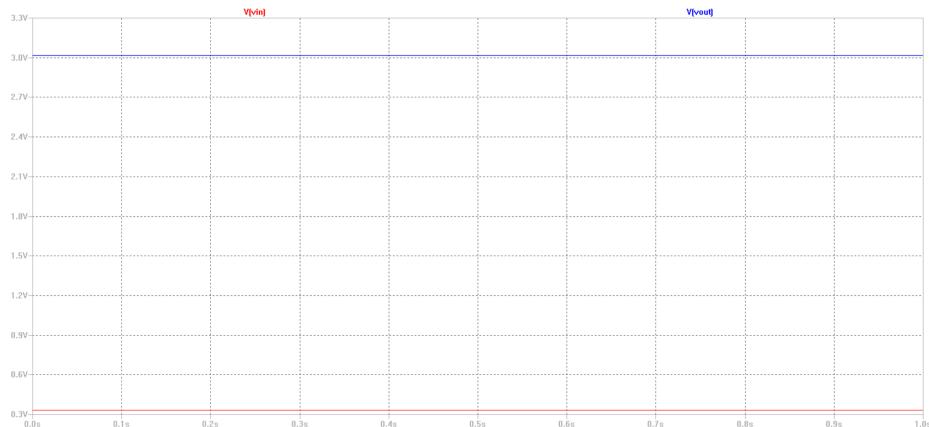
R_1 og R_2 bliver brugt til at designe kredsløbet for en ikke-inverterende operations forstærker. Dette kredsløb designes i LT-spice, som ses på **figur 3.9**.



Figur 3.9: Kredsløbet for en ikke-inverterende forstærker med to modstande, R_1 og R_2 , som med værdierne $81K\Omega$ og $10K\Omega$ giver en forstærkning med en faktor 9.1.

Simulering

Der undersøges i to simuleringer, om forstærkeren virker ved det laveste input på $-0.3233V$ og højeste input på $0.3313V$, som er blevet udregnet igennem pilotforsøget. På **figur 3.10** ses en simulering af dette.



Figur 3.10: På figuren ses en simulering af en ikke-inverterende forstærker, hvor der sker en forstærkning med en faktor 9.1. Inputtet, V_{in} , er $0.3313V$, som bliver forstærket 9.1 gange og derved giver ca. $3V$ i outputtet, V_{out} .

Der kan ses på **figur 3.10**, at det forstærkede signal, kaldet V_{out} , er ca. $3V$, hvilket er ca. 9.1 gange større end V_{in} , som i simuleringen er sat til $0.3313V$. Derved er der sket den ønskede forstærkning som forventet, da simuleringen er med ideelle komponenter. Derfor har de enkelte komponenter i denne simulering en lav tolerance, sammenlignet med komponenterne i et reelt kredsløb.

Resultaterne af de to simuleringer ses i **tabel 3.5**

<i>Inputsignalet</i>	<i>Forstærkning</i>	<i>Outputsignalet</i>	<i>Målte forstærkning</i>	<i>% afvigelse i forstærkning</i>
0.3313V	9.1	3.0147V	9.10	0%
-0.3233V	9.1	-2.9417V	9.10	0%

Tabel 3.5: Her ses resultaterne for simuleringerne med det laveste- og højeste input.

Der ses på afvigelserne, at der arbejdes med ideelle komponenter, da der er en meget lav afvigelse i outputtet ift. det forventede output. Derved fungerer kredsløbet teoretisk og kan implementeres.

Implementering og test

Ifølge det valgte design skal der benyttes to modstande på $10\text{K}\Omega$ og $81\text{K}\Omega$ til opbygningen af forstærkeren. Reelt findes der ikke en modstand på $81\text{K}\Omega$, hvorfor der istedet benyttes $82\text{K}\Omega$. Dette giver teoretisk en forskel på 1.235% i modstanden. Dette er det tætteste man kan komme på $81\text{K}\Omega$. Der kunne også benyttes en $150\text{K}\Omega$ - og $180\text{K}\Omega$ modstand i parallel forbindelse, hvilket vil give 1.01% afvigelse. Disse komponenter vil også have afvigelser, hvorved den samlede procentvise afvigelse vil forøges. De to modstande blev målt inden testen, hvilket fremgår i **tabel 3.11**.

<i>Teoretisk</i>	<i>Ved måling</i>	<i>% afvigelse</i>
$10\text{K}\Omega$	$10.0236\text{K}\Omega$	0.236%
$82\text{K}\Omega$	$81.724\text{K}\Omega$	0.337%

Tabel 3.6: I tabellen ses det, at de tre modstande afviger lidt fra deres teoretiske værdi, hvilket er forventet af reelle komponenter. Det er en acceptabel afvigelse ifølge tolerancerne i afsnit 3.3.1, side 25. Modstandene kan derfor anvendes til implementeringen.

Herefter blev kredsløbet implementeret. Til afbildning af signalet blev der benyttet et multimeter, som viste det forstærkede signal for de to spændingsniveauer. De aflæste resultater er angivet under "Output" i **tabel 3.7**.

<i>Teoretisk input</i>	<i>Målte input</i>	<i>Output</i>	<i>% Faktiske forstærkning</i>	<i>% afvigelse i forstærkning</i>
0.3313V	0.3310V	3.0258V	9.14	0.44%
-0.3233V	-0.3231V	-2.9612V	9.16	0.66%

Tabel 3.7: I tabellen ses resultaterne fra testen med forstærkeren, der har en faktor 9.1. Det maksimale og minimale input fra offsetjusteringen er forsøgt at blive sendt ind.

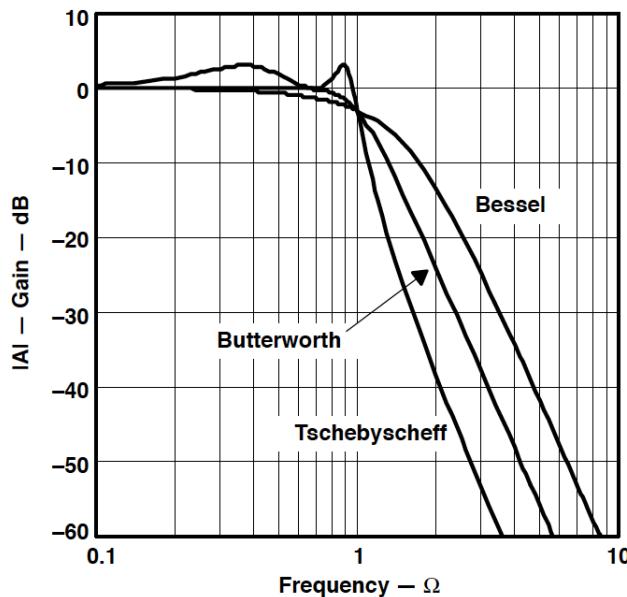
Der ses ud fra testen, at forstærkeren overholder kravene fra afsnit 3.3.1, side 25. Derudover ligger afvigelserne indenfor tolerancerne for forstærkningen, som er $\pm 2\%$. Derfor anses disse afvigelser som acceptable.

3.4.4 Filter

Teori og design

Filtre kan udarbejdes både i aktiv og passiv form. Hvis signalet ligger i frekvensområdet under 1MHz anbefales det at benytte aktive filtre. Aktive filtre benytter operationforstærkere,

kondensatorer og modstande, hvor passive filtre benytter kondensatorer, modstande og spoler. [69] Der findes flere forskellige typer filtre, heriblandt Butterworth-, Tschebyschev- og Besselfilter. Butterworthfilteret giver maksimal fladhed i pasbåndet og stopbåndet. Tschebyschevfilteret giver den hurtigste overgang fra pasbåndet til stopbåndet. Besselfilteret giver en lineær faserespons, hvilket vil sige at fasen er lineær med frekvensen.⁵⁶ [69] I dette projekt anvendes et Butterworthfilter, da der ønskes maksimal fladhed i pasbåndet og stopbåndet som nævnt i kravspecifikationerne for filtret. De forskellige typer filtre fremgår af nedenstående **figur 3.11.**⁷



Figur 3.11: Figuren viser et bodeplot filter, hvor de fire karakteristika af et lavpasfilter er angivet

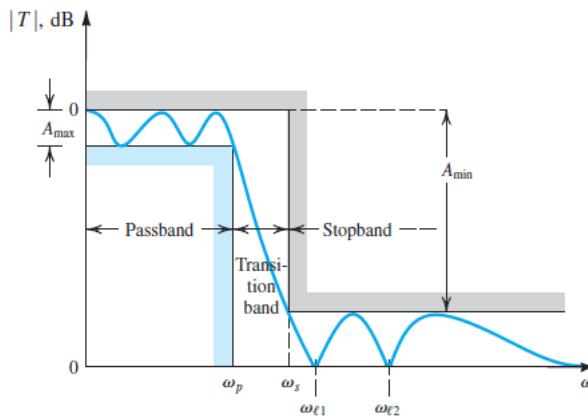
Der findes to forskellige måder hvorpå et filter kan designes: Sallen-Key topologien (SKT) og Multiple Feedback toppologien (MFT). SKT-metoden er den mest anvendte og tillader separate gain indstillinger samt inverterende og ikke-inverterende konfigurationer, hvormod MFT-metoden benyttes i filter design med høj gain-nøjagtighed(Q-værdi). I dette projekt benyttes en ikke-inverterende konfiguration grundet den høje indgangsimpedans i den ikke-inverterende terminal, hvorfor SKT-metoden er valgt. Herved forhindres det, at filtret loader fra de forrige blokke. Loading defineres som effekten af, at et komponent trækker strømmen i et kredsløb f.eks. et måleapparat. Loading kan være både ønsket, hvis f.eks. brugen af strøm til aktivering af en LED-diode loader, og uønsket, hvis f.eks. et måleapparat trækker strøm ved afmåling af et signal, i et system. Loading vil trække i den samlede strøm fra kredsløbet, og trækker derfor meget strøm fra batterierne. Hvis der vælges et inverterende design for operationsforstærkeren i filterkonfiguration, vil blokken have en lav indgangsimpedans, hvorfor denne blok vil begynde at loade. Der kræves derfor mere strøm for at opretholde outputspændingsniveauet. [? 69?]

⁵FiXme Note: Til os: Fasen angiver hvor godt et signals frekvensspektrum bliver gengivet

⁶FiXme Note: skal vi have et billede ind af de forskellige typer?

⁷FiXme Note: kilde?

Jævnfør kravspecifikationer af lavpasfilteret i afsnit 3.3.2, side 27 kræves det, at filteret har en minimumsdæmpning af stopbåndet (\min_A) på 14dB og der accepteres en maksimal dæmpning af pasbåndet (\max_A) på 3dB. Derudover skal lavpasfilteret have en pasbåndfrekvens (ω_p) på 25 Hz, samt en stopbåndfrekvens (ω_s) på 45 Hz. Af nedestående figur **figur ??** fremgår en illustration af, hvad de forskellige parametre beskriver.



Figur 3.12: Figuren viser et bodeplot filter, hvor de fire karakteristika (\min_A), (\max_A), (ω_p) og (ω_s) af et lavpasfilter er angivet. [69]

Med udgangspunkt i de enkelte parametre af lavpasfilteret kan den pågældende orden af filteret bestemmes vha. **ligning (???)** for overføringsfunktionen:

$$A(\omega_s) = 10 \log \left[1 + \epsilon^2 \cdot \left(\frac{\omega_s}{\omega_p} \right)^{2N} \right] \quad (3.25)$$

I **ligning (3.25)** betegner $A(\omega_s)$ den minimale dæmpning der kræves af stopbåndet. (ω_p) og (ω_s) er pasbåndfrekvensen og stopbåndfrekvensen, som begge er angivet i Hz. Disse variable kan ses på **figur 3.12**. N angiver filtrets orden, og ϵ er udtrykt ved nedenstående **ligning (???)**:

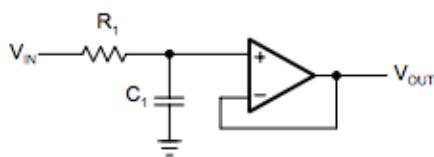
$$\epsilon = \sqrt{10^{A_{max}/10} - 1} \quad (3.26)$$

Nu kan lavpasfilterets orden bestemmes, jævnfør værdierne fra kravspecifikationerne fra afsnit 3.3.2, side 27 ved at indsætte disse værdier i **ligning (3.25)**. Udregningerne vil se ud som følgende:

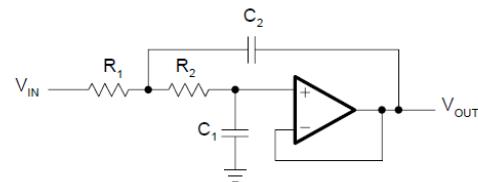
$$\epsilon = \sqrt{10^{3dB/10} - 1} = 0.998 \quad 14dB = 10 \cdot \log \left[1 + \epsilon^2 \cdot \left(\frac{45Hz}{25Hz} \right)^{2N} \right] \quad N = 2.711 \approx 3 \quad (3.27)$$

Det fremgår af **ligning (???)**, at lavpasfilterets orden bliver 3. Filterets orden kun kan angives i hele tal og derfor afrundes resultatet. Hvis kravene til filteret skal overholdes, skal der altid rundes opad ved udregning af orden.

Der skal altså benyttes et 3. ordens lavpasfilter. I dette tilfælde anvendes filtertypen, SKT. Et 3. ordens lavpasfilter konstrueres ved at sammenætte et 1. ordens filter med et 2. ordens filter. Af figur **figur 3.13** og **figur 3.14** fremgår hhv. et 1. og 2. ordens lavpasfilter designet efter SKT. [69]

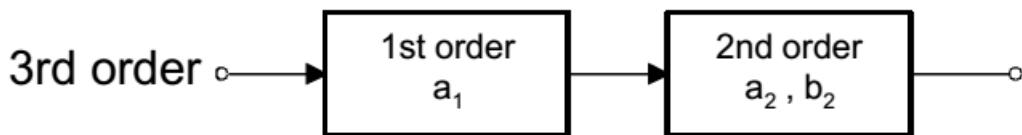


Figur 3.13: På figuren ses en illustration af et 1. ordens unity-gain Sallen-Key lavpasfilter, hvor værdien C er kondensatoren, R er modstandene. filterKonfigurationen har en indgangsspænding, V_{in} og udgangsspænding, V_{out} . [69]



Figur 3.14: På figuren ses en illustration af et 2. ordens unity-gain Sallen-Key lavpasfilter, hvor værdien C er kondensatoren, R er modstandene. filterKonfigurationen har en indgangsspænding, V_{in} og en udgangsspænding, V_{out} . [69]

I designet af et 3. ordens filter designes både et 1. og et 2. ordens filter i forlængelse af hinanden, som ses på **figur 3.15**.



Figur 3.15: På figuren ses, hvordan et 3. ordens filter designes ved et 1.- og 2. ordens filter i forlængelse af hinanden. Værdierne a_1 , a_2 og b_2 er fastsatte værdier, som kan aflæses i en tabel for Butterworth koefficienterne. [69]

Filtret designes efter SKT-metoden bestående af tre modstande, tre kondensatorer og to operationsforstærkere. Værdierne for modstandene kan udregnes ved **ligning (3.28)** for et 1. orden lavpasfilter, der skal benytte en modstand, kondensator og operationsforstærker. I **ligning (3.29)** udregnes modstandene for et 2. orden lavpasfilter, der skal benytte to modstande, to kondensatorer og en operationsforstærker. [69]

$$R_1 = \frac{a_1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C_1} \quad (3.28)$$

$$R_{2,3} = \frac{a_2 \cdot C_3 \pm \sqrt{a_2^2 \cdot C_3^2 - 4 \cdot b_2 \cdot C_2 \cdot C_3}}{4\pi \cdot f_c \cdot C_2 \cdot C_3} \quad (3.29)$$

Værdien for C_1 i **ligning (3.28)** og **ligning (3.29)** er nødvendigvis ikke det samme, da disse to ligninger er uafhængige af hinanden. Der aflæses i en tabel for Butterworth koefficienterne, at a_1 , a_2 og b_2 skal være 1.0000. For at finde reelle værdier under kvadratroden i **ligning (3.29)** skal følgende være opfyldt:

$$C_3 \geq C_2 \frac{4 \cdot b_2}{a_2^2} \quad (3.30)$$

I **ligning (3.29)** står C for kondensatorer, R står for modstande og a_1 og b_1 er konstanter, mens f_c er den valgte knækfrekvens i Hz, jævnfør kravspecifikationerne afsnit 3.3.2 på side 27.

For at udregne modstandene fastsættes C_1 til 100nF for hhv. både 1. og 2. ordens lavpasfiltrene. Når C_1 er bestemt, kan C_2 for 2. ordens lavpasfilteret beregnes ved at benytte

følgende **ligning (3.30)**. Som grundregel skal C_3 være over dobbelt så stor som C_2 :

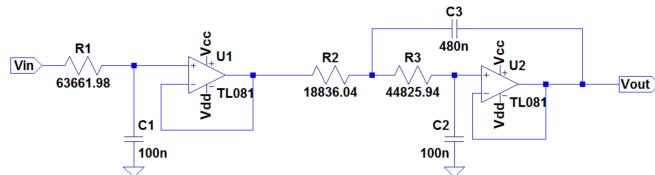
$$C_3 \geq 100\text{nF} \frac{4 \cdot 1}{1.000^2} = C_3 \geq 400\text{nF} \quad (3.31)$$

Ud fra ovenstående ligning vælges C_3 til at være 470nF for at opfylde **ligning (3.30)**. Når værdierne for C er bestemt kan modstandene for filteret bestemmes. For et 1. orden lavpasfilter benyttes **ligning (3.28)** til at beregne R_1 og for et 2. ordens lavpasfilter anvendes **ligning (??)** for at beregne R_1 og R_2 .

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 100\text{nF}} R_1 = 63661.98\Omega \quad (3.32)$$

$$R_{2,3} = \frac{1.0000 \cdot 470\text{nF} \pm \sqrt{1.0000^2 \cdot 470\text{nF}^2 - 4 \cdot 1.0000 \cdot 100\text{nF} \cdot 470\text{nF}}}{4\pi \cdot 25\text{Hz} \cdot 100\text{nF} \cdot 470\text{nF}} = \begin{cases} R_2 = 19546.69414\Omega \\ R_3 = 44115.28306\Omega \end{cases} \quad (3.33)$$

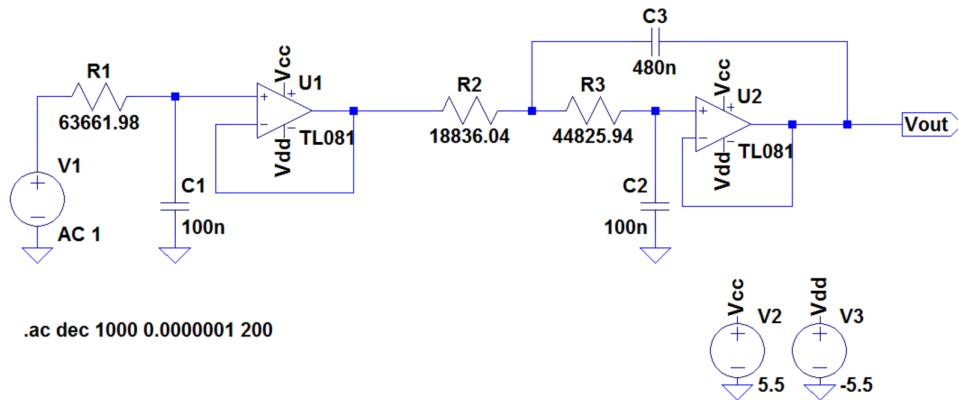
Filterets værdier for kondensatorerne og modstandene er nu udregnet for hhv. 1. og 2. ordens filter. Filterkonfigurationen kan nu simuleres i LTspice for at bestemme, hvor godt et 3. ordens filter, der er blevet designet.



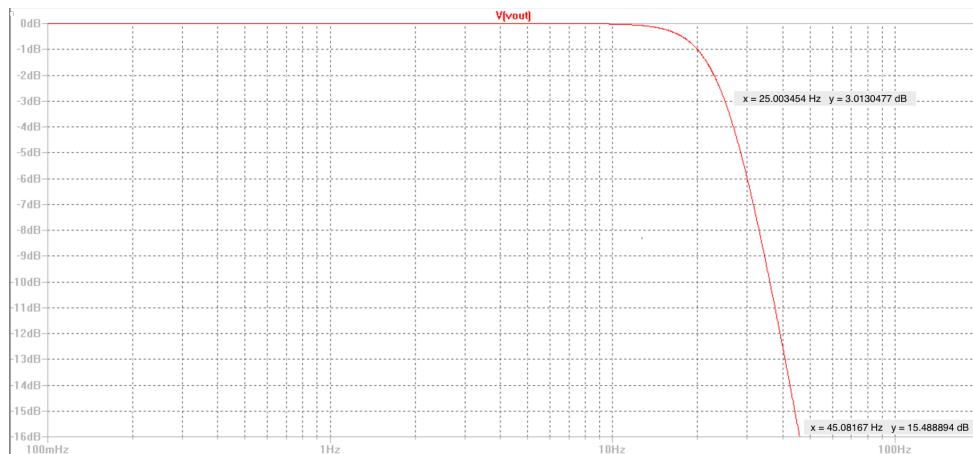
Figur 3.16: På figuren ses det teoretiske kredsløb for lavpasfilteret med udregnede værdier for de enkelte modstande og kondensatorer. Filteret er designet i LTspice.

Simulering

For at udføre en simulering af 3. ordens lavpasfilteret, foretages en AC-analyse, der beskriver forholdet mellem frekvensindholdet og filterets dæmpning. Kredsløbet simuleres med et inputsignal, der har en amplitude på 1V. Der foretages en simulering ud fra kravspecifikationerne i afsnit 3.3.2 på side 27. LTspice anvendes til simulering af lavpasfilteret, hvor der anvendes operationsforstærkeren, TL081, hvilket er den operationsforstærker, der også vil blive benyttet i test af filteret. I simuleringen vil der blive undersøgt, hvorledes kravene stemmer overens med kravspicifikationerne, ved at betragte et bodeplot over det simulerede 3. ordens filter.



Figur 3.17: Af figuren fremgår en illustration af kredsløbet for et 3. ordens lavpasfilter. Filteret simuleres i LTspice vha. en AC-analyse med et inputsignal, der har en amplitude på 1 V.



Figur 3.18: Af figuren fremgår en illustration på et bodeplot, der viser 3. ordens filterets frekvensindhold målt i Hz over dæmpningen målt i dB. Lavpasfilteret er simuleret i LTspice.

Af bodeplottet fremgår det, at det simulerede filter har en maksimal amplitude i dB på -3.012 ved en knækfrekvens på 25Hz , hvilket ikke overholder kravspecifikationerne i afsnit 3.3.2, side 27. Grundet den lave afvigelse accepteres afvigelsen i midlertidigt og der udføres derfor endnu en simulering af filteret med de reelle modstande, der kan benyttes under implementeringen. Der aflæses, at der ved en stopbåndsfrekvens på 45Hz er amplituden i dB på -15.443 . Dette overholder projektets opstillede krav for filterkonfigurationen ved en minimum dæmpning på 14 dB i stopbåndsfrekvensen. Filterkonfigurationen med reelle modstande fremgår af nedenstående **figur ??**. Reelt findes de udregnede modstande ikke, hvorfor der benyttes de modstande der kommer tættest på den teoretiske værdi.

Af bodeplottet fremgår det, at det simulerede filter med reelle værdier har en maksimal amplitude i dB -2.985 ved en knækfrekvens på 25Hz , hvilket overholder kravspecifikationerne i afsnit 3.3.2, side 27. Der aflæses, at ved stopbåndsfrekvensen på 45Hz er amplituden i dB -15.389 , hvilket fortsat er acceptabelt ift. kravspecifikationerne for filterkonfigurationen.

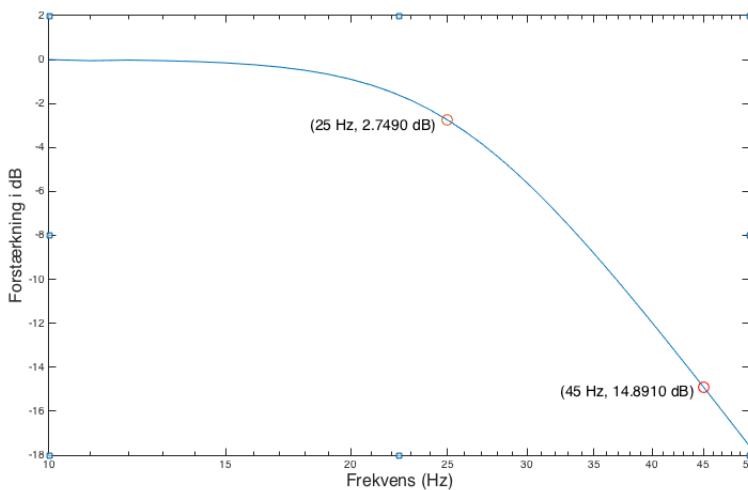
Implementering og test

Der ses på **figur 3.18** at der benyttes 3 modstande og 2 kondensatorer til at designe kredsløbet. Af **tabel 3.8** fremgår, hvorledes modstandene sammensættes for at få de ønskede værdier, der fremgår i **figur ??**, samt modstandenes afvigelse fra de ideelle modstande. For at finde afvigelsen er der foretaget målinger på tre ens reelle modstande og kondensatorer og på denne måde vurderes det, hvilke komponenter, der afviger mindst fra de teoretiske værdier. Dette er ydermere illustreret i **tabel 3.8**.

	<i>Teoretisk</i>	<i>Måling</i>	<i>Afvigelse</i>
$R_1(\text{Parallel}) :$	$1\text{M}\Omega$	$1.0046\text{M}\Omega$	0.46%
	$68\text{K}\Omega$	$68.0350\text{K}\Omega$	0.05%
$R_2(\text{Parallel}) :$	$680\text{K}\Omega$	$1.0037\text{K}\Omega$	0.37%
	$47\text{K}\Omega$	$47.0540\text{K}\Omega$	0.11%
$R_3(\text{Parallel}) :$	$32\text{K}\Omega$	17.9600Ω	0.22%
	$32\text{K }\Omega$	816Ω	0.49%
$C_1 :$	100n	98n	2.00%
$C_2 :$	470n	464n	1.29%
$C_3 :$	100n	98n	2.00%

Tabel 3.8: I tabellen ses der, at de anvendte modstande og kondensatorer afviger fra den teoretiske værdi, hvilket er forventet af reelle komponenter. Det er en acceptabel afvigelse, så modstandene kan derfor anvendes til implementering

Herefter implementeres kredsløbet. I testen anvendes en spændingsforsyning på 5.5V og en funktionsgenerator som inputsignal, samt et multimeter til aflæsning af dæmpningen. Funktionsgeneratoren sættes til de ønskede frekvenser i intervaller af 1Hz fra 10Hz til 50Hz. Outputtet i dB måles for hver frekvens. Ud fra disse målinger plottes en graf af dæmpningen i MatLab, hvilket er illustreret på **figur 3.19**.



Figur 3.19: Figuren viser dæmpningen som en graf over de målte frekvenser i Hz som funktion af outputtet i dB. På grafen er der angivet knækfrekvens og stopbåndsfrekvens

Ud fra de testede værdier i **tabel 3.9** og kravspecifikationer i afsnit ?? på side ?? er der ingen afvigelse på knækfrekvensen og stopbåndsfrekvensen. Der er en variation ift.

dæmpningen for både stop- og pasbånd på hhv. 6.36% og 8.37% i forhold til kravet.

	Krav	Test	Afvigelse
Knækfrekvens	25Hz	25Hz	0%
Stopbåndsfrekvens	45Hz	45Hz	0%
Dæmpning på stopbånd	14dB	14.8910dB	6.36%
Dæmpning på pasbånd	3dB	2.7490dB	8.37%

Tabel 3.9: I tabellen ses afvigelserne for hhv. knækfrekvens, stopbåndsfrekvens og dæmpning af stopbånd og pasbånd ift. krav og test

I forhold til tolerancekravene i afsnit 3.3.2 på side 27 skulle dæmpningen på stopbåndet være minimum 14dB og måtte maksimalt have en afvigelse herfra på +10%. Denne tolerance overholderes ved testen, da de acceptable dæmpningsværdier vil ligge i intervallet 14-15.4db. For pasbåndet skulle dæmpningen maksimalt være 3dB med en maksimal afvigelse på -15%. Dette vil sige at testen passer inden for tolerancekravene, da der accepteres værdier i intervallet 2.55-3dB. På baggrund af dette accepteres alle målte afvigelser ved testen af filteret.

3.4.5 Forstærker i tilpasningsblok

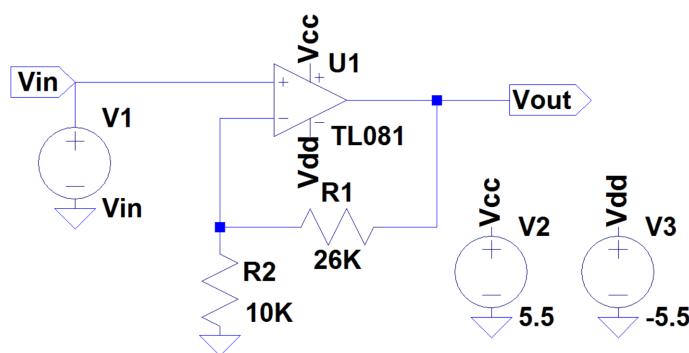
Teori og design

I afsnit 3.4.3, side 37 er teorien samt designet af en forstærker forklaret. Da blokken tilpasning skal tilpasse det filtrerede signal til komparatoren, afgrænses måleintervallet til $\pm 25^\circ$. Et range på $\pm 90^\circ$ er unødvendigt ift. at vurdere hvorvidt patienten er faldet. Derfor ønskes det, at V_{out} fra denne blok er $\pm 3V$, når accelerometret mäter $\pm 25^\circ$. Der skal dermed ske en forstærkning med en faktor 3.6, hvilket svarer til 11.1261dB, som beskrevet i afsnit 3.3.3 på side 28.

For at udregne modstandene er R_2 blevet valgt til $10K\Omega$. Ud fra dette er R_1 blevet bestemt ved følgende udregning:

$$3.6 = 1 + \left(\frac{R_1}{10K\Omega} \right) \quad R_1 = 26K\Omega \quad (3.34)$$

Forstærkerens opbygning kan ses på figur 3.20.



Figur 3.20: På figuren ses opbygningen af den ikke-inverterende forstærker, der forstærker med en faktor 3.6.

Simulering

Forstærkeren testes i fire simuleringer for at undersøge, om den opfylder de opstillede krav. Det forstærkede signal(V_{out}), skal være 3.6 gange større end blokkens inputsignal(V_{in}).

Resultaterne af fire simuleringer ses i **tabel 3.10**. Der er benyttet de teoretiske værdier, som er udregnet fra start.

<i>Inputsigalet</i>	<i>Forstærkning</i>	<i>Forventet outputsignal</i>	<i>Outputsigalet</i>	<i>Forstærkning</i>	<i>Afvigelse</i>
3.0148V	3.6	Forventer mætning 10.8533V	3.9765V	×	×
0.8418VV	3.6	3.0305V	3.0304V	3.6	0%
-0.8190V	3.6	-2.9484V	-2.9482V	3.6	0%
-2.9420V	3.6	Forventer mætning -10.5912V	-3.97703V	×	×

Tabel 3.10: I tabellen ses resultaterne af de fire simuleringer.

Der ses i **tabel 3.10**, at der er en lav afvigelse er i forstærkningen, men dette lægger ikke for referencerne. Kredsløbet fungerer rent teoretisk med ideelle komponenter, som bliver brugt i LTspice. På **figur 3.21** ses simuleringen af et inputsignal på 0.8325V, som ideelt vil komme fra filtreringsblokken, hvis accelerometret hælder i 25°.



Figur 3.21: På figuren ses simuleringen for et inputsignal på 0.8418 V, som giver 3.0304 V i output. Der er således sket en forstærkning med en faktor 3.6.

Der ses på afvigelserne, at der arbejdes med ideelle komponenter. Det er herved bevist, at kredsløbet fungerer teoretisk og kan derfor implementeres.

Implementering og test

På **figur 3.20** kan der ses, at der skal benyttes to modstande på $10\text{K}\Omega$ og $26\text{K}\Omega$ til opbygningen af forstærkeren. Reelt findes der dog ikke en $26\text{K}\Omega$, hvorfor der istedet benyttes $27\text{K}\Omega$ - og $680\text{K}\Omega$ modstande i parallel forbindelse, hvilket teoretisk vil give en 0.12% afvigelse fra en ideelt $26\text{K}\Omega$ modstander. Disse tre modstande blev målt inden implementering, hvilket fremgår i **tabel 3.11**.

Teoretisk	Ved måling	% afvigelse
10KΩ	9.98KΩ	0.2%
680KΩ	684.53KΩ	0.67%
27KΩ	26.99KΩ	0.4%

Tabel 3.11: I tabellen ses det, at de tre modstande har en lille afvigelse fra deres teoretiske værdi, hvilket er forventet af reelle komponenter. Det er en acceptabel afvigelse, og modstandene kan derfor anvendes i implementeringen.

Herefter implementeres kredsløbet. Til afbildning af signalet blev benyttet et multimeter. De aflæste resultater for spændingen efter forstærkningen er angivet under "Output" i tabel 3.12.

Ønsket input	Input	Forventet output	Output	Forstærkning	% afvigelse
3.0148V	3.0146V	mætning 10.8526V	4.8403V	×	×
0.8418V	0.8417V	3.0301V	3.0286V	3.6	0%
-0.8190V	-0.8192V	-2.9491V	-2.9584V	3.61	0.28%
-2.9420V	-2.9439V	mætning -10.5980V	-4.1651V	×	×

Tabel 3.12: I tabellen ses resultaterne fra testen med forstærkeren med en faktor 3.6.

Det ses i tabel 3.12, at forstærkeren overholder kravene fra afsnit 3.3.1 på side 25 samt ligger inde for tolerancerne. Derfor anses disse afvigelser som acceptable.

3.4.6 Komparator

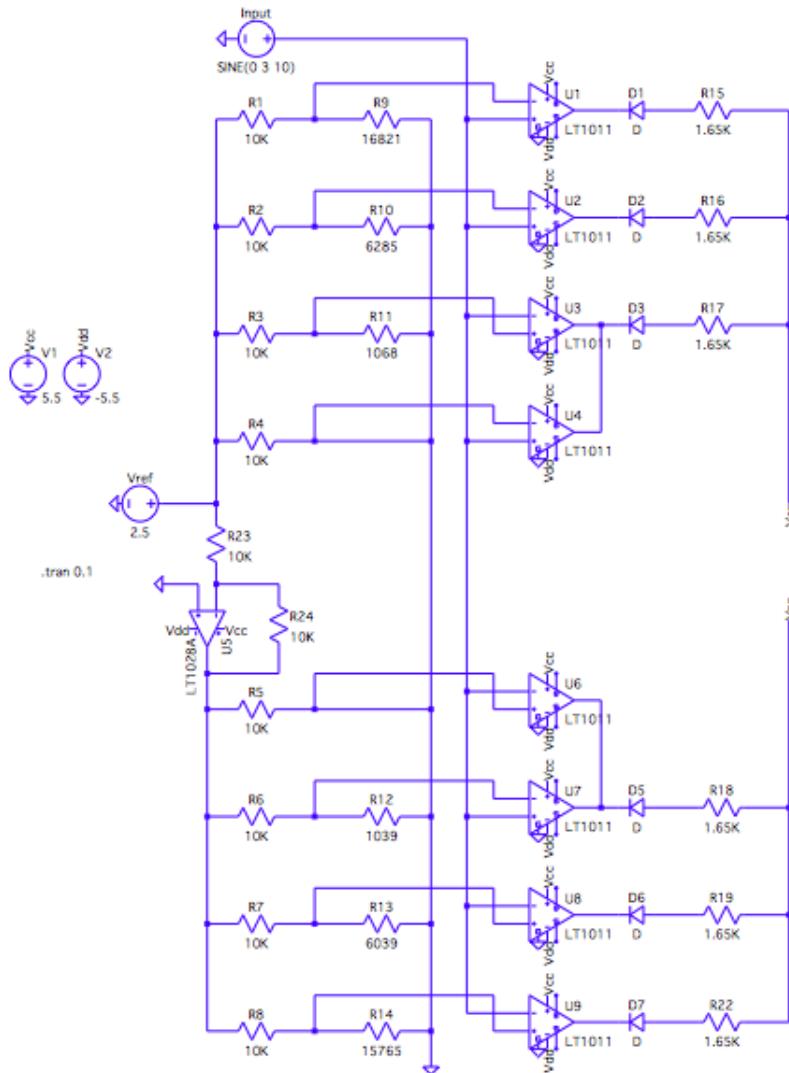
Teori og design

Som nævnt i afsnit 2.6.4 på side 19 anvendes en komparator til at sammenligne to inputspændinger. Der vil blive anvendt flere komparatorer og i dette tilfælde vil komparatorerne output blive tilkoblet en LED-diode, en modstand, den positive spændingsforsyning ($+V_{cc}$) og/eller en vibrator. I komparatorerne ikke-inverterende terminaler skal outputtet fra forrige blok tilsluttes. Inputtet til de inverterende terminaler skal fungere som referencespænding, hvilket anvendes til at forsyne med de beregnede tærskelværdier. Komparatorerne kan derfor have to forskellige outputs afhængig af inputspændingen. Hvis inputsignalet ligger udenfor de beregnede tærskelværdier, vil outputtet være 0V, og dioderne og vibratoren vil ikke aktiveres. Er inputtet indenfor de beregnede tærskelværdier, vil outputtet svare til jord, da strømmen fra $+V_{cc}$ vil løbe igennem komparatorerne og derefter til jord. Derved opnås et spændingsfald over den positive (anode) og negative (katode) pol for LED-dioden og vibratoren på en værdi, der ligger over det minimale spændingsfald, der kræves for en aktivering. LED-dioderne og vibratorerne vil derved blive aktiveret og give feedback til patienten.

Visuel komparator kredsløb

Til den visuelle del af komparatorkredsløbet anvendes LED-dioder. LED-dioidernes katode tilkobles komparatorens output, imens anoden tilkobles $+V_{cc}$. Jævnfør kravspecifikationerne i afsnit 3.3.4 på side 28 er der valgt fem forskellige stadier for aktivering af LED-dioderne. For

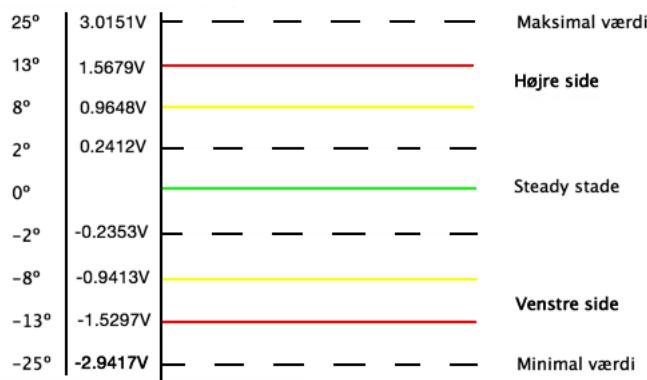
denne aktivering vil der blive anvendt otte komparatorer, da det første stадie, indeholdende den grønne LED-diode, både har en positiv og negativ tærskelværdi og derfor kræver to komparatorer. Tærskelværdierne kan både implementeres som to spændingstræer eller som otte spændingsdeler, hvor fire indgår i to vindues-komparatorer og fire almindelige komparatorer. Dette design vælges til fordel for to spændingstræer, da modstandene i et spændingstræ påvirker hinanden, hvilket kan ændre tærskelværdierne, hvis én af modstandene ikke fungerer ideelt. For at modvirke dette, anvendes en spændingsdeler for hver tærskelværdi, der fremgår af **figur 3.22**. Konfigurationen indeholder en spændingsreference $+V_{ref}$ på 2.5V og fire modstande (R13-R17) mellem LED-dioderne og $+V_{cc}$ for at beskytte LED-dioderne mod for høj strømstyrke og at batteriet ikke drænes. Der udarbejdes en vindues-konfigurationen, hvor LED-dioden D3) er placeret mellem ground-terminalen på den ene komparatorer og output-terminalen på en anden komparator, som kan ses på **figur 3.22**, hvor komparatorerne er U3 og U4.



Figur 3.22: På figuren ses komparatorkonfigurationen for den visuelle del. Kredsløbet består af to dele; en for hældning i positiv retning og en for hældning i negativ retning. Der er en vindues-komparator dannet af U3 og U4, som bruger en tærskelværdi fra både den negative og positive del af kredsløbet. Der er implementeret en buffer samt en inverterende forstørker for at gøre referencespændingen negativ, så hældning i den negative retning kan dedekteres og gør kredsløbet mere stabilt⁸. Derudover er en buffer placeret i toppen af kredsløbet, hvor inputtet fra forrige blok skal igennem. ⁹ Kredsløbet er udarbejdet i LTspice og derved er der brugt LT1011 som komparator i stedet for LM311.

Beregning af tærskelværdier og tilhørende R1-R12 modstande for aktivering af LED-dioder

Inputsignalet fra forrige blok, tilpasningsblokken, ligger mellem -2.9417V og 3.0151V jævnfør afsnit 3.3.4 på side28. Jævnfør systemets funktionelle krav afsnit 3.1.4 på side 24 ønskes det, at de enkelte LED-dioder skal lyse ved bestemte kropshældninger, dvs. ved en bestemt tærskelværdi. Tærskelværdierne er udregnet til at være:



Created by Paint X

Figur 3.23: På figuren ses de beregnede tærskelværdier og hvilket farve, der lyser ved de enkelte tærskler.

Der vælges en spændingsreference, som består af en regulator så den kan leve 2.5V til komparatorkredsløbet jævnført 3.4.1 på side 32. Spændingsreferencen indgår som del af en spændingsdeler og benyttes for at holde en fast referencespænding, da spændingen ved anvendelse af et batteri vil falde som funktion af tid. For at muliggøre anvendelsen af spændingsforsyningen på 2.5V til negative tærskelværdier benyttes en inverterende forstærker med et gain på 1, der fremgår af figur **figur 3.22**. Ved denne konfiguration vendes signalet uden at blive forstærket og kan på denne måde benyttes som referencespænding til negative inputspændinger. Når referencespændingen er kendt kan modstandene i spændingsdelen bestemmes. Da kredsløbet trækker strøm har modstandene (R13-R17) til formål at sikre, at spændingsforsyningen ikke drænes. Hvis modstanden er høj, vil strømmen til kredsløbet være lav, og batterierne i spændingsreferencen vil derved holde længere, men hvis modstanden er høj kan det påvirke LED-diодernes lysstyrke.

Der anvendes seks spændingsdeler, hvor to indgår som vindues-komparatorer og de resterende som almindelige komparatorer, hvilket fremgår af **figur 3.22**. For at opstille spændingsdelerne skal R1-R12 bestemmes så LED-dioderne lyser ved de ønskede tærskelværdier. For at modstandene kan bestemmes defineres R1 til en bestemt værdi, der her fastsættes til at være $10\text{K}\Omega$. Den samme værdi er gældende for R2-R6, eftersom der anvendes en spændingsdeler for hver tærskelværdi. Herefter kan R7-R12 udregnes vha. den generelle formel for en spændingsdeler jævnført **ligning (3.19)**. Hvor følgende er kendt:

- V_{out} = den ønskede tærskelværdi
- V_{in} = spændingsreferencen
- $R1-R6 = 10\text{K}\Omega$

Dette medfører at R7-R12 giver følgende resultater:

$$R7 = 16821\Omega$$

$$R8 = 6285\Omega$$

$$R9 = 1068\Omega$$

$$R10 = 783\Omega$$

$$R_{11} = 6039\Omega$$

$$R_{12} = 15765\Omega$$

Beregning af R13-R17 modstande for aktivering af LED-dioder

Jævnfør kravspecifikationerne i afsnit 3.3.4 på side 28 for komparatoren skal forsyningsspændingen være 5.5V. De anvendte LED-dioder i systemet er: en grønne L-53LG 5mm (D3), to røde L-53LI 5mm (D1 og D5) og to gule L-53LY 5mm (D2 og D4). Disse LED-dioder kræver en minimum spænding på 2mA for at lyse, men omkring 20mA for tydeligt lys, hvilket der er ønsket jævnført 3.3.5 på side 29. Spændingsfaldet over LED-dioderne ligger maksimalt i intervallet 2.0V til 2.2 V (rød: 2.0, gul: 2.1 og grøn: 2.2), men typisk mellem 1.7V-1.9V. LED-dioderne skal derudover forsynes med 2mA for at fungere, men kan forsynes med op til ¹⁰150mA, før de brændes af. LED-dioderne forsynes af en 5.5V spændingsforsyning og tilkobles, som sagt, tilhørende modstande for bla. at undgå at LED-dioderne brænder af. Spændingsfaldet over dioderne samt den spænding LED-dioderne som minimum skal bruge for at lyse er kendte værdier, dvs. modstandene R12-R17 kan derfor findes vha. Ohms lov. Nedenstående udregning giver en værdi af modstandene, hvis spændingsforsyningen giver 5.5V til kredsløbet og hvor der tages udgangspunkt i den minimale strøm for LED-dioderne:

$$R = \frac{5.5V - 2.2V}{0.02A} = 165\Omega \quad (3.35)$$

Dermed sættes modstandene R12-R17 alle til 165Ω for at sikre, at der er tilstrækkeligt med strøm i kredsløbet til at dioderne kan lyse, uden at de brændes af eller at batterierne drænes. Opsætningen af LED-dioderne fremgår af figur **figur 3.22**.

Beregning af tærskelværdier og tilhørende R1-R5 modstande for aktivering af vibratrorerne

Jævnfør kravspecifikationerne i afsnit 3.3.4, side 28 skal vibratrorerne have to tærskelværdier. For aktivering af vibratrorerne anvendes derfor to komparatorer. Vibratorernes tærskelværdier konstrueres ligeledes vha. to parallel forbundede modstande og spændingsreferencer, samt de resterende modstande mellem vibratrorerne og $+V_{cc}$. På figur X vises konstruktionen af kredsløbet med de to vibratrorer og tilhørende modstande.

indsæt billede og word dokument

Beregning af R6-R10 modstande for aktivering af vibratrorerne

Vibratrorerne der anvendes i systemet er af typen XX... Afsnit skal skrives, når vi har information om vibratrorer.

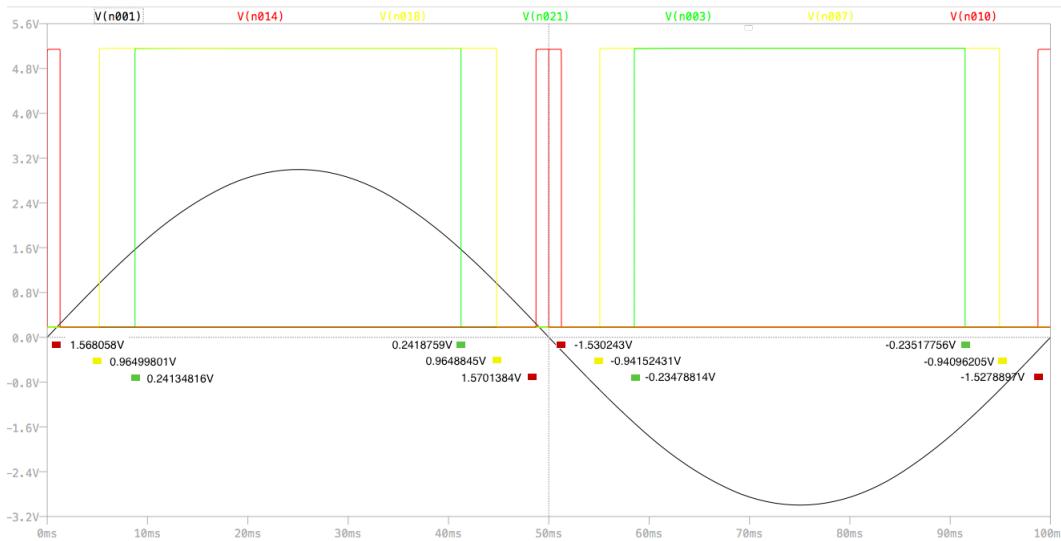
Simulering

Simulering af visuel komparatorkonfiguration

Til simulering af den visuelle komparatorkonfiguration anvendes komparatorer af typen LT1011, da operationsforstærkerne til det reelle kredsløb er af denne type. For at udføre en simulering af den visuelle komparatorkonfiguration tilkobles kredsløbet et sinus-signal, der svinger mellem $\pm 3V$. Dette gøres for at simulere signalet, der kommer fra den forrige blok,

¹⁰FiXme Note: Tjek og 150mA er rigtigt

hvor arbejdsområdet er på $\pm 3V$. Under simuleringen i LTspice testes det, hvorvidt den visuelle komparatorkonfiguration opfylder de opstillede specifikke krav, jævnfør kravspecifikationerne i afsnit 3.3.4 på side 28. Simuleringen af den visuelle komparatorkonfiguration fremgår af figur **figur 3.24**.¹¹



Figur 3.24: På figuren ses simuleringen af den visuelle komparatorkonfiguration. Den sorte kurve er et sinus signal, der illustrerer blokvens inputsignal. De resterende kurver er de enkelte komparatorer, som under tærskelværdien er i negativ mætning. De røde kurver symboliserer den røde diode, de gule kurver de gule dioder og de grønne kurver de grønne dioder. Når inputsignalet når de definerede tærskelværdier, vil kurverne gå i positiv mætning og LED-dioderne vil lyse. Ved vindue-komparatoren er den positive og negative mætning ikke så høj, som ved de normale komparatorer. Dette skyldes, at signalet skal passere yderligere to LED-dioder, hvilket giver et spændingsfald. Kredsløbet er simuleret i LTspice.

På figur **figur 3.24** fremgår det, at ved de enkelte tærskelværdier går signalet i positiv mætning, hvilket får LED-dioderne til at lyse. Mætningen er under 5.5V som er den spænding LED-dioderne maksimalt kan forsynes med¹², men samtidig nok til at få dioderne til at lyse tydeligt, hvilket krævede mellem 1.7 – 1.9V og 0.02A.

	Tærskelværdier	Måling til højre	Måling til venstre	Afvigelse for højre	Afvigelse for venstre
2°	0.2412V	0.23815127V	-0.17571651V	1.3%	??%
8°	0.9648V	0.96551609V	0.96777598V	0.07%	0.3%
-8°	-0.9413V	-0.96784376V	-0.92251539V	2.8%	2%
13°	1.5679V	1.5583895V	1.5705552V	0.6%	0.2%
-13°	-1.5297VV	-1.5297296V	-1.5297259V	0.002%	0.002%

Tabel 3.13: I tabellen ses der, at de anvendte tærskelværdier afviger fra den teoretiske værdi, hvilket er forventet af reelle komponenter. Det er en acceptabel afvigelse, så tærskelværdierne kan derfor anvendes til implementering

Det kan udfra 3.13 konkluderes at afvigelsen fra de udregnede tærskelværdier stemmer overens med tolerance for tærskelværdierne jævnfør afsnit 3.3.4, side 28 som var på $\pm 1\%$.

¹¹FiXme Note: Vi kan starte med at simulere tærskelværdier og derefter hvordan komparatoren fungerer.

¹²FiXme Note: Kontrollere af denne værdi (5.5) er rigtig

Simulering af somasensorisk komparator kredsløb

Implementering og test

3.4.7 Feedback - Visuel

Teori og design

Simulering

Implementering og test

3.4.8 Feedback - Somatosensorisk

Teori og design

Simulering

Implementering og test

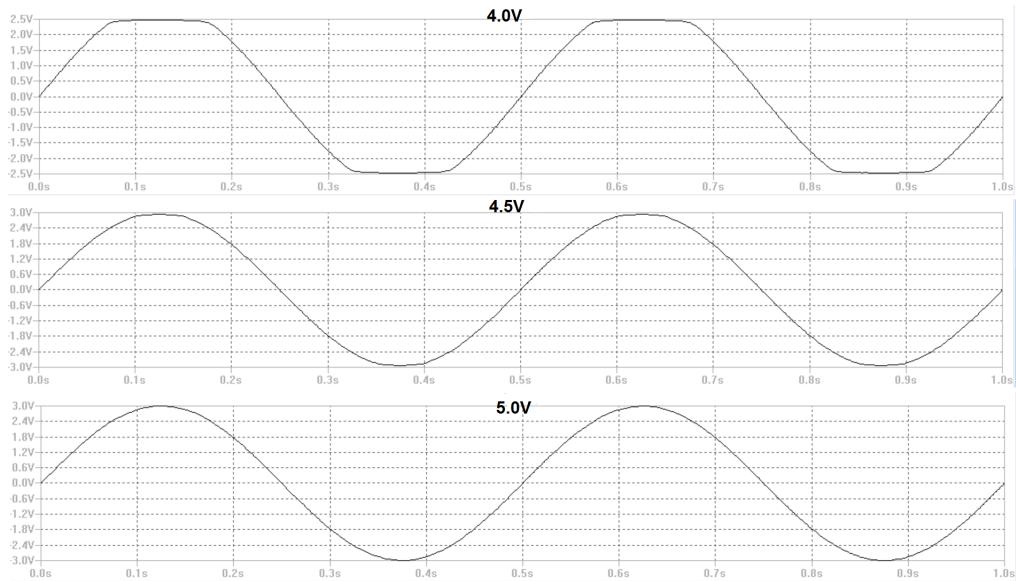
3.4.9 Spændingsforsyning

Teori og design

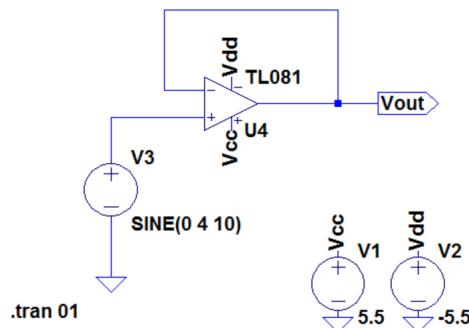
Til systemet anvendes to 1.5V batterier som spændingsforsyning, der sidder i en spændingsregulator. Denne kan leverer en spænding på $\pm 5.5V$ og $\pm 3.3V$ fra to forskellige terminaler. Derudover besidder spændingsregulatoren en jordkobling, som øvrige komponenter i systemet kan kobles til. I dette projekt benyttes terminalalen med en spændingen på $\pm 5.5V$. Spændingsregulatoren er designet således, at den leverer en spænding koblet i et splitsupply. Spændingsregulatorens negative spændingsforsyning kaldes $-V_{cc}$ og den positive kaldes $+V_{cc}$. Da batterierne ikke leverer den samme spænding over hele batteriernes levetid, skal batteriet skiftes ud, når de ikke leverer den nødvendige spænding til systemet. Batteriernes levetid afhænger af, hvor meget strøm systemet trækker.

Simulering

Ved simulering af spændingsforsyningen anvendes LTspice, hvor der simuleres en spænding igennem en buffer, som også er beskrevet og benyttet i afsnit 3.4.2 på side 34. Herved kan konsekvensen af et faldende input simuleres. Der undersøges flere forskellige spændinger ved at ændre på spændingsforsyningen, hvilket er illustreret på **figur 3.26**. Der undersøges for hhv. 5V, 4.5V og 4.3V.



Figur 3.25: Figuren viser simuleringen af spændingsforsyningen ved hhv. 5 V, 4.5 V og 4 V. Det fremgår at figuren at spændingen går i klippet ved ved 4.5 V og går i mætning ved 4 V



Figur 3.26: Figuren viser opbygningen af spændingsforsyningen. Inputsignalet er en sinuskurve. Spændingsforsyningen til operationsforstærkeren er på billede $\pm 5.5V$, hvilket er den spænding der anvendes i systemet.

Det fremgår ud fra at spændingen ved 4.3V bliver klippet, hvor spændingen går i mætning ved 4V.

Implementering og test

Der undersøges hvorvidt spændingsregulatoren leverer en spænding på 5.5V, jævnfør afsnit 3.3.6 på side 3.3.6. Derudover skal der testes for hvornår spændingen går i mætning, for at undgå klipning af signalet.

Batteriernes levetid undersøges ved at teste, hvor mange ampere systemet bruger. På baggrund af dette vil informationen omkring batteriernes levetid give en estimering af, hvornår de skal udskiftes. Testningen foregår ved en serieforbindelse mellem den negative spændingsforsyning $-V_{cc}$ eller positive spændingsforsyning $+V_{cc}$ og systemet. Selve opsætningen af testen illustreres på

3.4.10 ADC

Teori og design

I dette projekt anvendes en ADC af typen NI USB-6009 til at konvertere det analoge signal til digital som beskrevet i afsnit 2.6.5 på side 19. Med denne ADC kan der samples med 13 bits single-ended¹³. ADC'en kan dermed inddeltes i $2^{13} = 8192$ niveauer. Den maksimale sampling rate er på 48kS/s, hvormed det er muligt at sample med minimum det tidobbelte af båndbredden. Arbejdsområdet for ADC'en ift. spænding ligger på 10Vpp og har en typisk præcision på 14.7mV ved 25°C. [70] Ud fra oplysningerne er det muligt at udregne LSB ud fra ligningen i afsnit 2.6.5 på side 19. Udregningen ser således ud:

$$LSB = \frac{FSR}{2^n} \quad (3.36)$$

FSR er arbejdsområdet, dvs. 10Vpp, som indsættes i formlen som 20V, imens n er antallet af bits, der kan samples med, dvs. 13. Værdierne indsættes i formlen:

$$LSB = \frac{20V}{2^{13}} LSB = 0.00244V = 2.44mV \quad (3.37)$$

Det opsamlede signal bliver forvrænget, og vil dermed ikke være repræsentativt, hvis der opsamles værdier på under 2.44mV.

Simulering

Ifølge tolerancerne for ADC'en beskrevet i afsnit 2.6.5 på side 19 skal der testes, om ADC'en kan modtage og konvertere et inputsignal på $\pm 4V$ samt sample 500 gange i sekundet.

Der kan ikke laves en simulering af en ADC i programmet LTSpice, da inputsignalet i LTSpice allerede er et digitalt signal, og der er derfor ikke noget, som skal konverteres.

Implementering og test

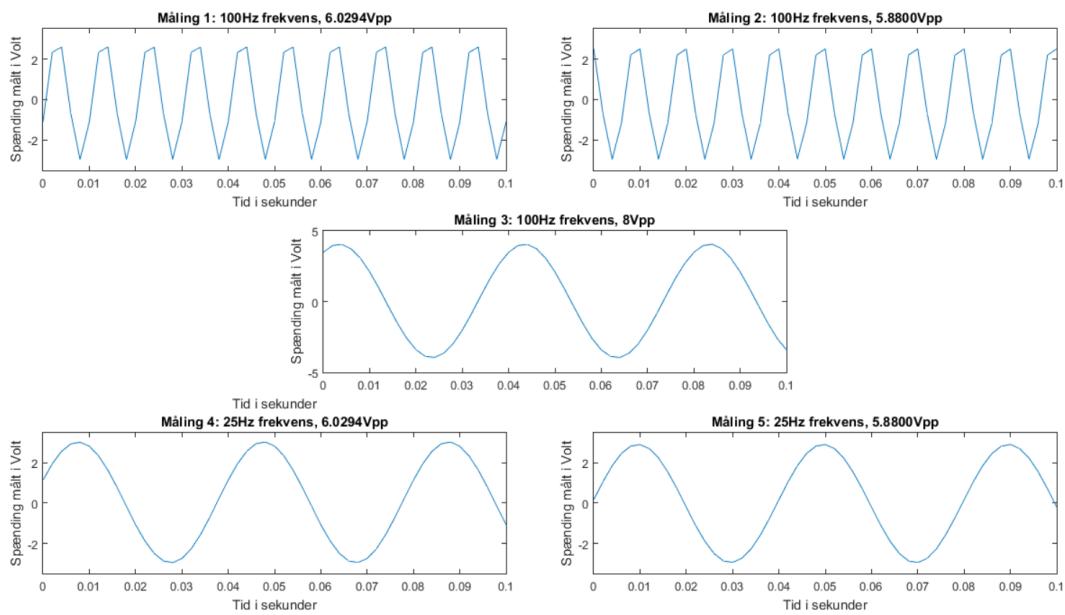
ADC'en skal implementeres og tilkobles efter lavpasfiltret, som det kan ses på **figur 3.2** på side 24.

Der benyttes en tonegenerator til at undersøge, om den valgte ADC overholder kravene beskrevet i afsnit 2.6.5 på side 19. Tonegeneratoren skal sende fem forskellige input til ADC'en;

1. Et sinussignal med en frekvens på 100Hz og den højeste forventede amplitude, dvs. $3.0147 \times 2 = 6.0294V_{pp}$.
2. Et sinussignal med en frekvens på 100Hz og den laveste forventede amplitude, dvs. $-2.9400 \times 2 = -5.8800 \approx 5.8800V_{pp}$.
3. Et sinussignal med en frekvens på 25Hz og en amplitude på 8Vpp, da der ses i **tabel 3.12**, at operationsforstærkerne går i mætning ved ca. 4V, når de forsynes med 5.5V.
4. Et sinussignal med en frekvens svarende til knækfrekvensen i lavpasfiltret, dvs. 25Hz, og den højeste forventede amplitude, dvs. $3.0147 \times 2 = 6.0294V_{pp}$.
5. Et sinussignal med en frekvens svarende til knækfrekvensen i lavpasfiltret, dvs. 25Hz, og den laveste forventede amplitude, dvs. $-2.9400 \times 2 = -5.8800 \approx 5.8800V_{pp}$.

¹³FiXme Note: Hvad betyder det?

Der samples med 500Hz, selvom 250Hz havde været nok, da vores båndbredte er 25Hz, men ScopeLogger kan enten sample med 200 eller 500, så derfor samples der med 500Hz. På figur 3.27 ses resultatet af målingerne.



Figur 3.27: På figuren ses resultatet af de fem målinger plottet i Matlab. Der ses, at x-aksen for alle plots er sat til 0.1 sekunder.

Dataen optaget med ADC'en, som er plottet i figur 3.27, blev efterfølgende bearbejdet i Matlab. Derudover blev et oscilloskop tilkoblet outputtet fra tonegeneratoren. Resultatet herfra betragtes som det faktiske output fra tonegeneratoren, hvilket indgår i beregningen af afvigelsen i ADC'ens sampling. Resultaterne ses i tabel 3.14:

Måling nr	Indstillet frekvens	Indstillet amplitude	Målte amplitude på oscilloscop	Målte amplitude via ADC	Afvigelse
1	100Hz	3.0147V	3.0800V	2.5989V	15.62%
2	100Hz	2.9400V	2.9200V	2.5284V	13.32%
3	25Hz	4V	4.0400V	4.0442V	0.10%
4	25Hz	3.0147V	3.0800V	3.0689V	0.36%
5	25Hz	2.9400V	2.9200V	2.9207V	0.02%

Tabel 3.14: I tabellen ses resultaterne af de beregnede afvigelser.

Der kan ses på figur 3.27, at sinussignalet i måling 1 og 2 er mere kantet end signalerne i måling 3-5. Årsagen til dette kan være, at vi sampler med 500Hz, mens signalets frekvens er 100Hz. Dette gør, at ADC'en sampler med 5 gange pr. periode og derved bliver signalet kantet. Derfor giver ADC'ens værdi for amplituden en procentafvigelse på henholdsvis 15.62 og 13.32, da der ikke samples med nok ift. frekvensen. Det vurderes dermed, at det er samplingsfrekvensen, som er årsagen til de høje afvigelser.

I måling 3-5 er sinussignalets frekvens nedsat, hvilket gør, at signalet bliver mere regelmæssigt. Der samples med en samplingshastighed, der er 20 gange større end frekvensen, og der opsamles derved tilstrækkeligt med datapunkter. Derfor er procentafvigelserne fra måling

3-5 mere repræsentative for ADC'ens afvigelse. Men afigelserne kan også skyldes afigelser i oscilloskopet. Der vurderes derfor, at ADC'en viser det forventede og er dermed godkendt.

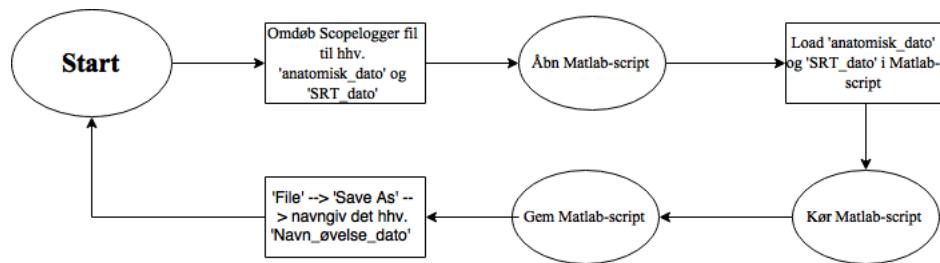
3.4.11 USB-isolator

Efter konvertering fra et analogt signal til et digitalt signal af ADC'en anvendes en USB-isolator til at skabe en adskillelse imellem computeren og systemet. Dette gøres for at undgå lækstrøm fra elnettet, der kan dannes, hvis computeren kobles til strøm. Der anvendes USB-isolatoren USI-01, som er godkendt til brug ved sikkerhedsklassifikation BF og CE som isoleringsspænding. Derudover fungerer USB-isolatoren som en galvanisk adskillende af systemet, hvilket har til formål at overføre signal mellem to isolerede kredsløb. For yderligere sikring af computerens forbindelse til elnettet er denne ikke tilkoblet elnettet. USB-isolatoren implementeres mellem ADC'en og computeren, hvilket er illustreret på **figur 3.2** på side 24. Ifølge databladet for USB-isolatoren kan den modtage op til 4KV, hvilket gør, da den lever op til kravet beskrevet i afsnit 3.3.8 på side 31.

3.4.12 Software

Teori og design

Efter konverteringen af det analoge signal til digitalt i ADC'en indsendes data til en computer. Jævnfør afsnit 3.3.9, side 31 skal patienternes data behandles i form af grafisk visualisering af deres hældningsresultater, samt gemmes til senere brug og analyse. For at imødekomme disse krav, bruges en computer med software programmerne; Scopelogger og Matlab, hvor Scopelogger anvendes til at optage det digitale signal fra NIDAQ'en og Matlab benyttes til at behandle opsamlede data. Til behandling og lagring af data udarbejdes en manual for at gøre programmets design brugervenligt for det fagkyndige personale, som skal bruge disse data til analyse af patienternes udvikling ift. balancefunktionen. For at programmet skal kunne skelne imellem de forskellige datoer, skal patienternes øvelsesresultater gemmes under navne som f.eks. '16-12-15'. Det fagkyndige personale skal åbne scriptet 'Patient_Oevelse' i Matlab for at kunne køre computerprogrammet, der skal behandle apopleksipatienternes data fra Scopelogger. Indsamlede data hentes ind i Matlab. Af nedestående flowdiagram på **figur 3.28** fremgår computerprogrammets manual.



Figur 3.28: I flowdiagrammet ses computerprogrammets manual, der omhandler hvorledes det fagkyndige skal behandle og gemme apopleksipatienterne øvelsesresultater.

Når patientens data er loadet i Matlab-scriptet, ændres grafens titel ift. patientens navn og dato på hvornår øvelsen er udført. Efter Matlab-scriptet er kørt, vil der fremkomme en graf af patienternes hældning, hvor tærskelværdierne vil være markeret med horisontale linjer i hhv. gul, grøn, rød og sort. Det fagkyndige personale kan derfor se, hvor hyppigt patienterne

har bevæget sig ud i det enkelte risikozoner. Derudover kan det fagkyndige personale ændre på grafens tidsaksen, så der er mulighed for at udvælge data i en bestemt tidsperiode, da testperioden kan have forskellig varighed afhængig af den enkelte patient. På denne måde kan det fagkyndige personale udvælge og undersøge data i en specifik tidsperiode, hvis dette har interesse for analysen af patienternes øvelsesresultater.

Implementering og test

For at teste computerprogrammet foretages en testmåling af hele systemet og efter konverteringen i ADC'en anvendes ovenstående manual til at visualisere en graf, samt gemme data.

TEST AF SOFTWARE IND HER. TJEK AT VI TESTER FOR KRAVSPECIFIKATORER

Blokken indeholdende softwaren implementeres i systemet for at kunne behandle og gemme patienternes øvelsesresultater. Denne del af systemet er brugerfladen for det fagkyndige personale og skal derfor kunne fremvise information omkring patienternes balance i form af grafer eller lignende. Det fagkyndige personale skal vha. af softwaren kunne følge med i patienternes udvikling ift. balancen.

Krav:

- Skal kunne fremvise data med information om patientens hældning i de enkelte øvelser, herunder hvor ofte patienten har bevæget sig ud i risikozonerne.
- Skal kunne gemme data med information om patientens hældning.

Tolerance:

- Der accepteres ingen afvigelse ift. software.

Litteratur

- [1] Hjernesagen. Fakta om apopleksi, April 2015. URL <http://www.hjernesagen.dk/om-hjerneskader/bloedning-eller-blodprop-i-hjernen/fakta-om-apopleksi>.
- [2] Sundhedsstyrelsen. Bilag til forløbsprogram for rehabilitering af voksne med erhvervet hjerneskade - apopleksi og tci. *Sundhedsstyrelsen*, 2011.
- [3] Ældre Sagen. Antal Ældre. *Danmarks Statistik*, 2014.
- [4] Christina Rostrup Kruuse. Apopleksi - blodprop eller blødning i hjernen, August 2014. URL <https://www.sundhed.dk/borger/sygdomme-a-aa/hjerte-og-blodkar/sygdomme/apopleksi/apopleksi-blodprop-eller-bloedning-i-hjernen/>.
- [5] Ingrid Muus, Karin C Ringsberg, Max Petzold, and Lars-Olof Persson. *Helbredsrelateret livskvalitet efter apopleksi: Validering og anvendelse af SSQOL-DK, et diagnosespecifikt instrument til måling af helbredsrelateret livskvalitet blandt danske apopleksipatienter*. PhD thesis, Nordic School of Public Health NHV Göteborg, Sweden, 2008.
- [6] Doris Karnath, Hans-Otto Broetz. Understanding and treating “pusher syndrome”. *Physical Therapy. Volume 83. Number 12*, 2003.
- [7] National Stroke Association. Recovery after stroke: Movement and balance. *National Stroke Association*, 2006.
- [8] Sundhed.dk. Apopleksi og tci(=tia), September 2014. URL <https://www.sundhed.dk/sundhedsfaglig/laegehaandbogen/hjerte-kar/tilstande-og-sygdomme/apopleksi-og-tia/apopleksi-og-tia-tci/#1>.
- [9] D.S. Nichols. Balance retraining after stroke using force platform biofeedback. *Physical Therapy. Volume 77. Number 5. Page 553-558*, 1997.
- [10] Sundhedsstyrelsen. Hjerneskaderehabilitering - en medicinsk teknologivurdering. *Sundhedsstyrelsen*, 2010.
- [11] Christina Rostrup Kruuse. Apopleksi, rehabilitering, April 2015. URL <https://www.sundhed.dk/borger/sygdomme-a-aa/hjerte-og-blodkar/sygdomme/apopleksi/apopleksi-rehabilitering/>.
- [12] Britannica Academic. Stroke, September 2015. URL <http://academic.eb.com.zorac.aub.aau.dk/EBchecked/topic/569347/stroke>.
- [13] Sundhedsstyrelsen. Referenceprogram for behandling af patienter med apopleksi. *Sundhedsstyrelsen*, 2009.
- [14] Leslie Ritter and Bruce Coull. Lowering the risks of stroke in women (and men), 2015. URL <http://heart.arizona.edu/heart-health/preventing-stroke/lowering-risks-stroke>.

- [15] Svend Schulze and Torben V. Schroeder. *Basisbog i Sygdomslære*. Munksgaard Danmark, 2011. URL https://books.google.dk/books?id=vNK8CRu4t9sC&pg=PA444&lpg=PA444&dq=karakterklistning&source=bl&ots=jAu__8N40z&sig=I4LKVLfRFQVE4NZYjHpUepM6jms&hl=da&sa=X&ved=0CEMQ6AEwB2oVChMI1Lbp_fv4xwIVCANzCh0AmgAV#v=onepage&q=apopleksi&f=false.
- [16] Britannica Academic. Nervous system disease, September 2015. URL <http://academic.eb.com/EBchecked/topic/1800831/nervous-system-disease/75792/Stroke?anchor=ref606262>.
- [17] Elias A. Giraldo. Overview of stroke, 2015. URL <http://www.merckmanuals.com/home/brain-spinal-cord-and-nerve-disorders/stroke-cva/overview-of-stroke>.
- [18] Louis R. Caplan. *Stroke*. Demos Medical, 2006.
- [19] Frederic H. Martini et al. *Fundamentals of Anatomy & Physiology*. Pearson Education, 2012.
- [20] Christina Rostrup Kruuse, John Sahl Andersen, Nanna Witting, and Finn Klamer. Apopleksi, kognitive symptomer, 2015. URL <https://www.sundhed.dk/sundhedsfaglig/laegehaandbogen/hjerte-kar/tilstande-og-sygdomme/apopleksi-og-tia/apopleksi-kognitive-symptomer/>.
- [21] Anders Gade, Annelise Smed, and Palle Møller Pedersen. Neuropsykologiske opslag og temae til "gads psykologileksikon". Bog, 2004. URL <http://gade.psy.ku.dk/Undervis/a.htm>.
- [22] B. J. Boss. Pathophysiology: The biologic basic for disease in adults and children. *Mosby Elsevier*, 2010.
- [23] Cindy L. Stanfield. *Principles of Human Physiology*. Pearson Education, 2014.
- [24] Torben Moos and Morten Møller. *Basal neuroanatomi*. FADL's forlag, 2010.
- [25] Yurong Mao et al. Virtual reality training improves balance function. *Neural Regeneration Research*, 2014.
- [26] Dhakshin Ramanathan, James M. Conner, and Tuszynski Mark H. A form of motor cortical plasticity that correlates with recovery of function after brain injury. *Pubmed*, 2006. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1544093/>.
- [27] Sue Raine, Linzi Meadows, and Mary Lynch-Ellerington. *Bobath Concept - Theory and Clinical Practice in Neurological Rehabilitation*. Wiley-Blackwell, 2009. URL <http://faculty.mu.edu.sa/public/uploads/1348328471.2341Bobath.Concept.2009.pdf>.
- [28] Michael Ruggenetta. Neuroplasticity, Oktober 2015. URL <http://academic.eb.com.zorac.aub.aau.dk/EBchecked/topic/410552/neuroplasticity>.
- [29] Naoyuki Takeuchi and Shin-Ichi Izumi. Maladaptive plasticity for motor recovery after stroke: Mechanisms and approaches. *Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Tohoku University Graduate School of Medicine*, 2012.

- [30] Mi Young Leea, Ji Won Parkb, et al. Cortical activation pattern of compensatory movement in stroke patients. *NeuroRehabilitation*, 2009.
- [31] Debbie Hampton. Your plastic brain: The good, the bad, and the ugly, Oktober 2015. URL <http://www.thebestbrainpossible.com/the-good-the-bad-and-the-ugly-2/>.
- [32] Birgitte R. Sønderborg. Hjerneblødninger svære at behandle akut, April 2013. URL <http://www.hjernesagen.dk/om-hjerneskader/behandling/hjernebloedning>.
- [33] Hjernesagen. Trombolysebehandling af blodprop i hjernen, 2015. URL <http://www.hjernesagen.dk/om-hjerneskader/behandling/trombolyse>.
- [34] Jesper Kjærgaard. Antikoagulationsbehandling (blodfortyndende medicin), 2015. URL <https://www.sundhed.dk/borger/sygdomme-a-aa/hjerte-og-blodkar/sygdomme/behandlinger/antikoagulationsbehandling-blodfortyndende-medicin/>.
- [35] Hanne Christensen. Forebyggelse, 2015. URL <http://www.hjernesagen.dk/forebyggelse>.
- [36] Patricia; Shortland Peter Michael-Titus, Adina; Revest. *The nervous system : basic science and clinical conditions*. Edinburgh : Churchill Livingstone, 2010.
- [37] DSfA. Referenceprogram for behandling af patienter med apopleksi. *Dansk Selskab for Apopleksi*, 2009.
- [38] Den store danske Redaktionen. Agnosi, 2015. URL http://www.denstoredanske.dk/Krop,_psyke_og_sundhed/Psykologi/Psykologiske_termer/agnosi.
- [39] S. T. Pedersen, P. M. og Olsen. Kognitive forstyrrelser ved apopleksi - hyppighed, betydning og genoptræning. *Munksgaard*, 1999.
- [40] Lene Vistrup. Paralyse, 2015. URL http://www.denstoredanske.dk/Krop,_psyke_og_sundhed/Sundhedsvidenskab/Medicinske_nervesygdomme/paralyse.
- [41] D. s. d. Redaktionen. Ataksi, 2015. URL http://www.denstoredanske.dk/Krop,_psyke_og_sundhed/Sundhedsvidenskab/B\T1\ornesygdomme_og_medf\T1\odte_misdannelser/ataksi.
- [42] Mary Ann Watson and F. Owen Black, 2015. URL <http://vestibular.org/understanding-vestibular-disorder/human-balance-system>.
- [43] Fang Wang, Marjorie Skubic, et al. Body sway measurement for fall risk assessment using inexpensive webcams. 2010.
- [44] Feng Huo. Limits of stability and postural sway in young and older people. Master's thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1999.
- [45] Mary Beth Badke et al. Tongue-based biofeedback for balance in stroke: Results of an 8-week pilot study. *Physical Medicine and Rehabilitation*, 2009.
- [46] Sundhedsstyrelsen. Forløbsprogram for rehabilitering af voksne med erhvervet hjerneskade. *Sundhedsstyrelsen*, 2011.

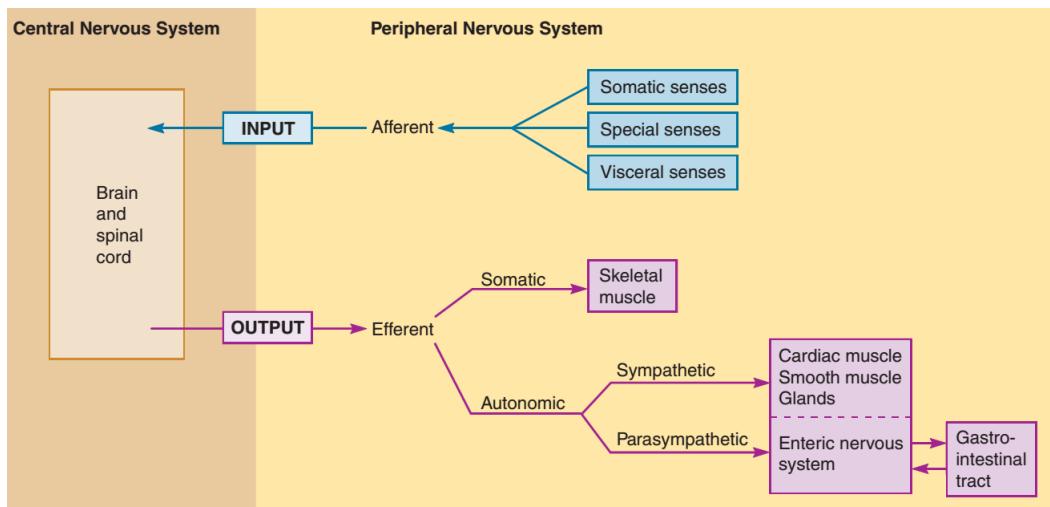
- [47] Ruth E. Barclay-Goddard et al. Force platform feedback for standing balance training after stroke. *The Cochrane Library*, 2004.
- [48] Tom Jørgensen. Vestibular rehabilitering. 2004. URL https://fysio.dk/Upload/Graphics/PDF/Artikeltillaeg/vestibulaer_rehabilitering.pdf.
- [49] Timothy C. Hain. What is balance and vestibular rehabilitation therapy?, 2008. URL http://www.brainline.org/content/2011/02/what-is-balance-and-vestibular-rehabilitation-therapy_pageall.html.
- [50] Morton Glanz et al. Biofeedback therapy in poststroke rehabilitation: A meta-analysis of the randomized controlled trials. *Physical Medicine and Rehabilitation*, 1995.
- [51] William E. Prentice and Michael I. Voight. *Techniques in musculoskeletal rehabilitation*. The McGraw-Hill Companies, 2007.
- [52] Oonagh M Giggins, Ulrik McCarthy Persson, et al. Biofeedback in rehabilitation. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2013.
- [53] John G Webster, John W Clark, and Walter H. Olson. *Medical Instrumentation Application and Design - Application and Design*. John Wiley And Sons Ltd, 2009.
- [54] Edward B. Blanchard and Larry D. Young. The relative efficacy of visual and auditory feedback for self-control of heart rate. 1972.
- [55] Hristijan Gjoreski et al. Accelerometer placement for posture recognition and fall detection. *Intelligent Enviroments*, 2011.
- [56] Hjælpemiddelbasen. Biofeedback udstyr til bevægelses-, styrke- og balancestræning. URL <http://www.hmi-basen.dk/r4x.asp?linktype=iso&linkinfo=044824&P=1>.
- [57] Morton Glanz et al. Biofeedback therapy in stroke rehabilitation: a review. 1997.
- [58] Susan J. Middaugh et al. Biofeedback in treatment of urinary incontinence in stroke patients. *Biofeedback and Self-regulation*, 1989.
- [59] James W. Nilsson and Susan A. Riedel. *Electric circuits*. Pearson Education, 2011.
- [60] Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith. *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 2010.
- [61] Suresh R. Devasahayam. *Signals and Systems in Biomedical Engineering: Signal Processing and Physiological Systems Modelling*. Springer Science+Business Media, LLC, 2000.
- [62] Stanley Wolf and Richard F.M. Smith. *Student Reference Manual for Electronic Instrumentation Laboratories*. Prentice Hall, 2004.
- [63] George Zouridakis and James Moore. *Biomedical Technology and Devices Handbook*. CRC Press, 2003.
- [64] Peter Konrad. *The ABC of EMG - A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography*. Noraxon INC. USA., 2006.

- [65] Analog Devices. Accelerometer adxl335. 2009. URL <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adxl335.pdf>.
- [66] National Semiconductor Corporation. *TL081 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier*. Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/ds/sn08bw6a/sn08bw6a.pdf>, 1995.
- [67] Rigoberto Martinez-Mendez, Masaki Sekine, et al. Postural sway parameters using a triaxial accelerometer: comparing elderly and young healthy adults. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2011.
- [68] Texas Instruments. *LM285-2.5, LM385-2.5, LM385B-2.5 Micropower Voltage References*, 2005.
- [69] Bruce Carter. *Op Amps for Everyone*. Newnes, 2013.
- [70] National Instruments. *Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB 12- or 14-Bit, Up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs*, November 2014.
- [71] Britannica Academic. Human nervous system, Oktober 2015. URL <http://academic.eb.com.zorac.aub.aau.dk/EBchecked/topic/409709/human-nervous-system/75529/The-brain>.
- [72] Finn Bojsen-Møller, Erik B. Simonsen, and Jørgen Tranum-Jensen. *Bevægeapparatets Anatomi*. Gyldendal Akademisk, 2012.
- [73] John E Hall. *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*. Elsevier - Health Sciences Division, 2015.
- [74] Diana L. Schulmann et al. Effect of eye movements on dynamic equilibrium. 1987.

Bilag A

Nervesystemer og nervefysiologi

Kroppens nervesystem kan inddeltes i to dele; det centrale nervesystem (CNS) og det perifere nervesystem (PNS). CNS indeholder encephalon og columna, mens PNS indebærer kommunikationen imellem CNS og kroppens øvrige dele. PNS kan yderligere opdeles i det somatiske nervesystem, som består af det motoriske og sensoriske nervesystem, og autonome nervesystem, som består af en sympathisk og parasympatisk del. Det somatiske nervesystem styrer kroppens bevidste bevægelser og sender afferente signaler tilbage til CNS, hvorimod det autonome nervesystem regulerer kroppens ubevidste funktioner. Det er altså PNS, som registrerer signaler, CNS integrerer disse signaler og dirigerer et motorisk signal, som PNS skal omsætte til en handling. [19, 23] Et overblik over dette ses på **figur A.1.**



Figur A.1: På figuren ses en opdeling af PNS og CNS samt hvordan et signal proceseres til en handling af nervesystemerne. [23]

A.1 Hjernens anatomi

Cerebrum er encephalons største del og er involveret i sanseintegration, styring af frivillige bevægelser og højere intellektuelle funktioner, såsom tale og abstrakt tænkning. [71] Cerebrums ydre lag hedder cerebral cortex men kaldes hjernens grå substans. Her ligger nervers soma med dendritter. Cerebral cortex har forskellige centre, men kan også inddeltes i højre og venstre halvdel. Den del af cerebral cortex, der kontrollerer kroppens motorik med motor cortex, kaldes gyrus præcentralis. Nerverne i dette område leder motoriske impulser til kroppens muskler igennem nervebanerne i den hvide substans, som indeholder nervernes aksoner og fungerer derved som transportvej. [19, 23, 71] Disse aksoner krydser i medulla oblongata og medulla spinalis og løber derefter til den modsatte legemeshalvdel fra, hvor

impulsen afsendes. [19]

Når en bevægelse udføres, starter det med en idé eller en intention om at lave en bevægelse. Denne tanke opstår i det præfrontale cortex. Præfrontal cortex er specielt aktivt under udførelse af nye situationer / bevægelser og har forbindelse til motor cortex, som sætter indlærte bevægelser i gang. Samtidig modtager basalganglier i cerebellum signalet, hvorved kroppen kan modificere bevægelsen i forhold til omgivelserne. Cerebellum samarbejder altså med motor cortex, så bevægelsesplanen kan samles og sendes via de decenderende baner i medulla spinalis til bestemmelsesstedet. [72]

Hvis en bevægelse gentages, vil præmotor cortex gemme stimulationsmønstret. Dette gør, at bevægelsen kan udføres nemmere og mere præcist end ellers. Bevægelsen lagres i basalganglierne ved at synapseforbindelserne er styrket. [19]

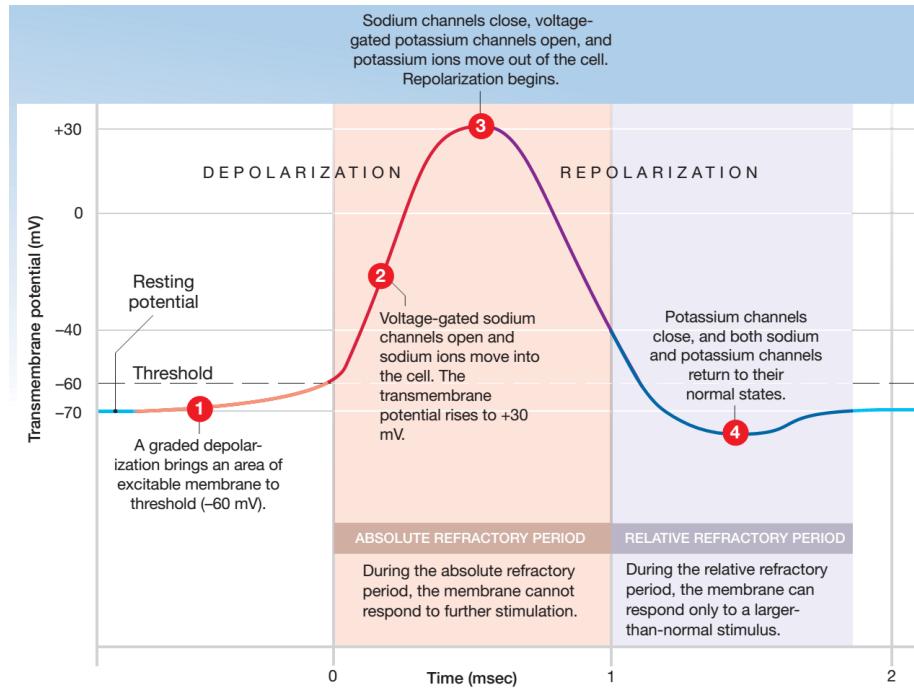
A.2 Nervens anatomi

En nerve består af soma, dendritter og et myelineseret akson. Soma indeholder cellekernen, endoplasmatiske reticulum, golgi apparater og de fleste frie ribosomer. Indholdet i soma bestemmer, hvordan cellen agerer med andre samt dets funktion og vedligeholdelse. Dendritter er udløbere fra soma, som modtager impulser fra en anden nerve og fører signalet ind til cellekroppen. Aksonet leder impulser fra soma til sin ende, der har mange små forgreninger, kaldet aksonterminaler. Disse danner synapser med targetorgan eller andre nervers dendritter. [23]

En nerve kan kun lede signaler, hvis der forekommer en tilstrækkelig høj elektrisk spændingsforskel mellem det intracellulære og ekstracellulærvæske af membranen. Dette danner et aktionspotentiale. I en hvilende nerve er der et overskud af negative ioner i den intracellulære væske i forhold til den ekstracellulære væske. Denne spændingsforskel mellem det intracellulære og ekstracellulære kaldes membranpotentialet. [19, 23]

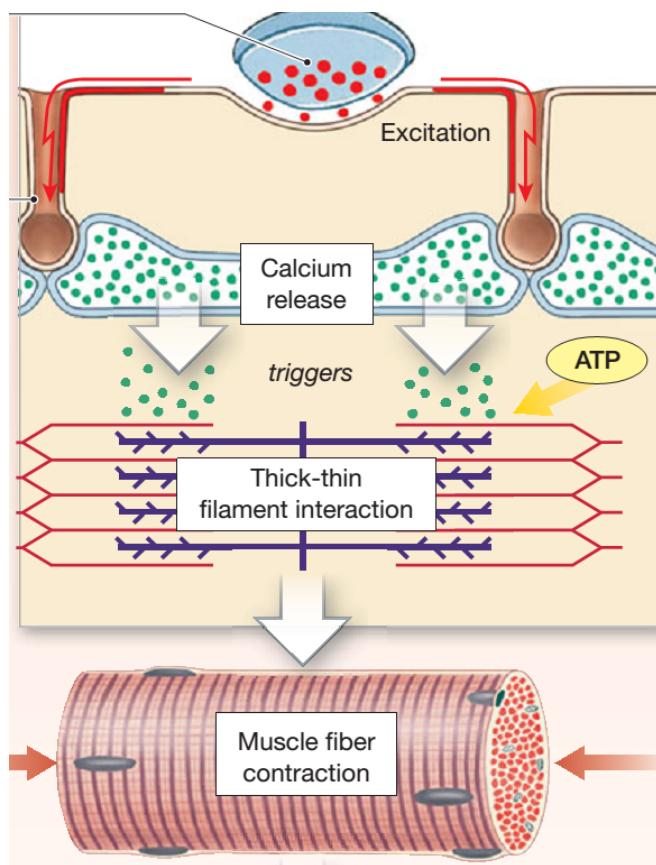
A.3 Aktionspotentiale

Signaler i kroppen videresendes vha. aktionspotentiale. En celle i hvile har et spændingsniveau på ca. -70 mV, hvilket skyldes koncentrationsforskellen mellem natrium-ion (Na^+) udenfor cellen og kalium-ion (K^+) indvendigt i cellen. Begge ioner kan diffundere over cellemembranen, men spændingsniveauet kan stadig opretholdes af natrium/kalium-pumpen. Denne pumpe skaber en ligevægt imellem indpumpning af K^+ og udpumpning af Na^+ . Hvis en nercecelle modtager et stimulus, påvirker dette mekanisk- eller kemisk styrede Na^+ kanaler, som vil åbne sig og pumpe mere Na^+ ind i cellen. Derved stiger permeabiliteten af Na^+ og den samlede ladning af cellen ændres. Hvis den påbegyndte stimulus, som skaber et gradet potential, ikke var stærk nok til, at cellen når sin tærskelværdi, vil natrium kanalerne lukkes. Natrium/kalium-pumpen vil derefter arbejde sig tilbage til hvile spændingsniveauet. Hvis stimulus var stærkt nok til, at mange natriumkanaler åbner sig og cellen når sin tærskelværdi, så vil de elektrisk styrede natriumkanaler også åbne sig som reaktion på, at spændingsforskellen bliver mindre. Herved ender cellen med et overskud af negativ ladning udenfor ift. indenfor cellemembranen dvs. den modsatte situation af hvile, hvilket skaber et aktionspotentiale. [19, 23]



Figur A.2: På figuren ses stadierne for et aktionspotentiale. [19]

Når et nervesignal skal overføres til en muskel, sker det i en neuromuskulær synapse, som er en kemisk synapse. Den kemiske synapse består generelt af en præsynaptisk terminal, en synapsekloft og en postsynaptisk celle. En vigtig egenskab ved den kemiske synapse er, at aktionspotentialer udelukkende kan bevæge sig i én retning; fra den præsynaptiske terminal imod den postsynaptiske terminal.[73] Vesiklerne i den præsynaptiske terminal rummer neurotransmittere, som er et kemisk stof, der overfører signalet på tværs af synapsen. I neuromuskulære synapser vil neurotransmitteren ofte være acetylcholin (ACh). Ved et aktionspotentiale vil den præsynaptiske terminal frigive ACh, som bevæger sig ud i synapsekloften mod receptorerne på muskelfiberen. Bindingen af ACh til receptorerne medfører en depolarisering af den synaptiske kloft ved diffusion af Na^+ . Herved bliver aktionspotentialet transporteret ned til sarcoplasmatiske reticulum i muskelfiberen, som frigiver Ca^{2+} til filamenterne i myofibrillerne, der gør kontraktion af musklen mulig.[73, 19] Dette ses på **figur A.3**.



Figur A.3: På figuren ses, hvordan nervens frigivelse af ACh sætter en muskelkontraktion i gang. [19]

Kroppens balance

Apopleksipatienter oplever ofte problemer med balancen, da den ofte er nedsat eller slet ikke funktionsdygtig af forskellige årsager. [6] Proprioceptorer og sansereceptorer hjælper kroppen med balancen. Proprioceptorerne kontrollerer muskler, sener og ledenes position, hvorimod sansereceptorer er en bestemt slags celler, som er placeret i ørerne og øjnene. [19] Disse celler sender balanceinformationer til det centrale nervesystem og encephalon. Sansereceptorerne opfanger indtryk fra sanserne, som omsættes til bestemte signaler, der sendes til områder i cerebral cortex, cerebellum og til centre i hele hjernestammen. Her bearbejdes informationen, hvorefter der konkluderes den korrekte fysiske position af kroppen og dens lemmer. Når encephalon har bearbejdet indtrykkene, udsender den nerveimpulser til skeletmuskulaturen om at foretage jævne og koordinerede bevægelser, hvorved kropsbalancen opretholdes.[19]

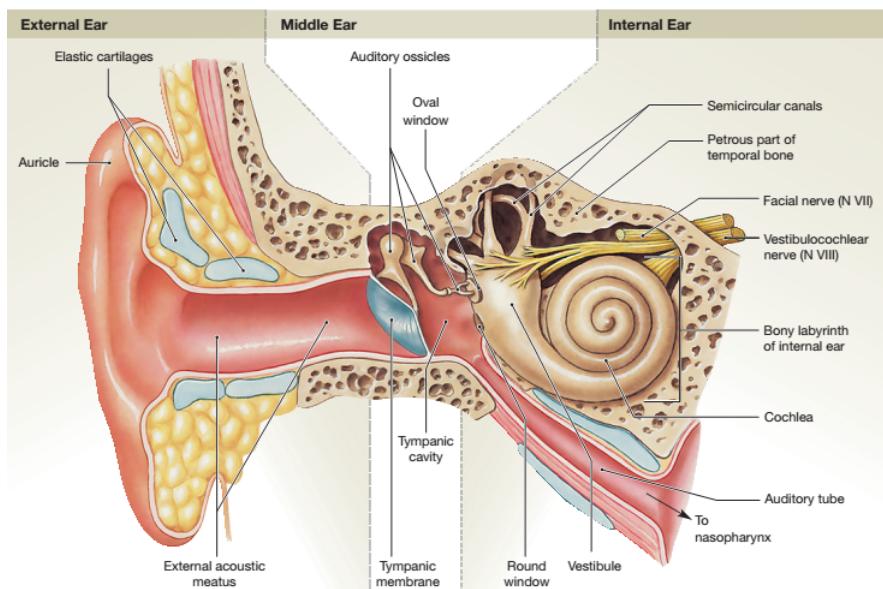
Øjet opfanger lys og er med til orienteringen af kroppen og dens lemmer. Hårceller i øret registrerer derimod f.eks. hovedets bevægelser vha. tyngdekraften. Selvom et balanceorgan er ude af funktion, er kroppen stadig i stand til at opretholde balancen ved hjælp fra andre balanceorganer. Det er til gengæld vanskeligt for kroppen at opretholde balancen, hvis de behandelende centre i encephalon bliver skadet, som det kan ske ved apopleksipatienter. [19]

B.1 Ørets bidrag til balance

Øret består overordnet af tre dele; det ydre øre, mellemøret og det indre øre, som kan ses på figur B.1. Det indre øre er med til at kontrollere balancen vha. hårcellerne, som sættes i bevægelse. Det ydre øre modtager trykbølger, som sætter trommehinden i svingninger. Disse transporteres af mellemørets knogler, der forstærker svingningerne. Væsken i mellemøret modtager svingningerne fra knoglerne, hvilket sætter væsken i bevægelse. Denne bevægelse trækker i hårcellerne, og der skabes derved et aktionspotentiale. I det indre øre findes et netværk af sammenhængende væskeholdige kanaler, som er indkapslet i knoglen. Det er i disse kanaler receptorerne sidder. Det indre øre kan opdeles i tre underdele; vestibulen, øresneglen og buegangen. De centrale dele, der har med balancen at gøre er vestibulen og buegangen, hvorimod øresneglen kun bidrager til hørelsen.[19]

Vestibulen består af to membransække; sacculen og utriclen, der opfanger sanseindtryk vedrørende tyngdekraft og lineær acceleration. Buegangens sansereceptorer opfanger stimuli omkring hovedets bevægelse, og hvor hurtigt bevægelsen foregår. Sansereceptorerne er placeret i buegangens tre væskefyldte knoglekanaler ved ampulla, der er forbundet til utriclen. Hårcellerne er kun aktive, når kroppen er i bevægelse ved at videregiv information vedrørende hovedets bevægelse ift. tyngdekraften. Når hovedet er i bevægelse, sættes væskens i kanalerne også i bevægelse således, at væskebevægelser i den ene retning stimulerer hårcellerne, mens bevægelser i den modsatte retning forhindrer dem. For at få mest mulig information

angående hovedets position, stimuleres de tre buegange af forskellige hovedbevægelser. Bevægelsesinformationerne sendes via vestibulocochlearnerven, der sender både information vedrørende balancen og hørelsen til encephalon i området mellem pons og medulla oblongata. [19]



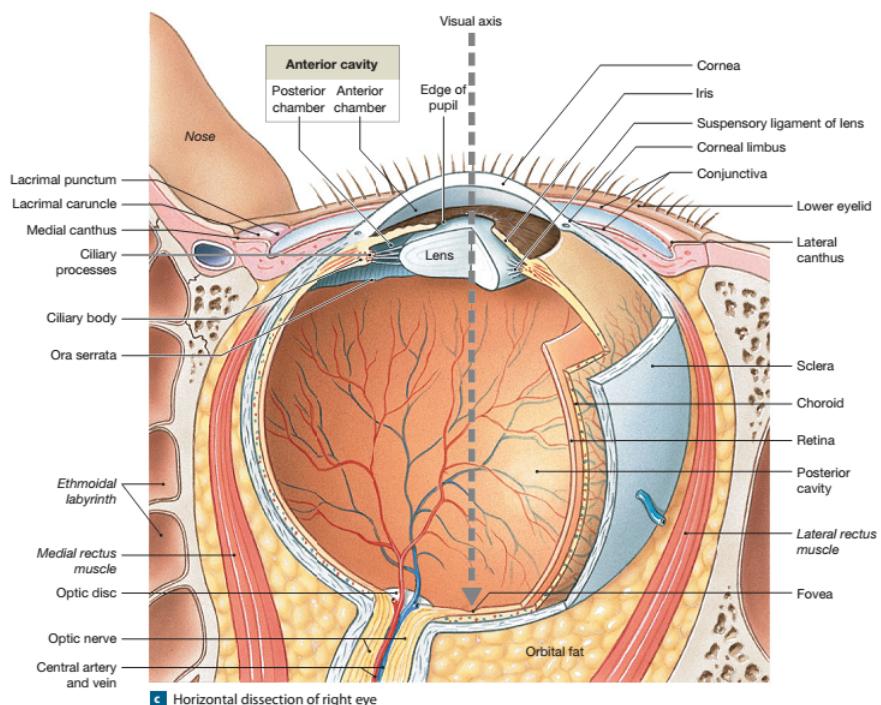
Figur B.1: På figuren ses en anatomisk beskrivelse af øret [19].

B.2 Øjets bidrag til balance

Synet er en central faktor for, hvordan encephalon holdes informeret omkring kroppens balance og generel orientering. Dette gøres ved at give et indtryk af, hvordan kroppen og dens lemmer er placeret ift. omgivelserne [74]. Øjet har tre hinder omkring sig; fibrøs hinde, uvea og retina, som kan ses på **figur B.2**. Den fibrøse hinde¹ er den yderste, som beskytter og støtter øjet. Den midterste hinde, kaldet uvea, indeholder blod og lymfekar samt regulerer mængden af lys, der kommer ind i øjet. Retina² er den inderste hinde, som er placeret bagerst i øjet. Den består af en pigmentdel og en indre neuraldel. Den neurale del indeholder fotoreceptorer, kaldet stave og tappe. Stave er følsomme overfor skarp lys og gør det muligt at se i tusmørke. Tappe er følsomme overfor farvers bølgelængde, hvilket giver farvesyn. Pigmentdelen absorberer lys, der passerer gennem den neurale del og gør, at lyset ikke har mulighed for at reflektere tilbage. Foto- og lysreceptorerne konverterer lyset fra omgivelserne til elektrisk nervesignal, der giver information omkring det objekt, der betragtes, herunder dets størrelse, form og bevægelser. Informationerne processeres således, at horisontale celler lokaliserer områdets størrelse. Hvis der er kommet nok signal ind, der kræver en reaktion, sendes informationen først til bipolære celler herefter via synsnerven til det visuelle cortex, hvor informationen bearbejdes. [19]

¹FiXme Note: hornhindern

²FiXme Note: nethinden



Figur B.2: På figuren ses en anatomisk beskrivelse af øjet. [19]

B.3 Proprioceptorerne og skeletmuskulaturens bidrag til balancen

Proprioceptorer monitorer ledernes position, muskelkontraktioners tilstand, samt spændinger i ledbånd og sener og de er placeret i skeletmuskulaturen. Informationerne sendes via nervesignaler til medulla spinalis og herfra igennem CNS til cerebellum. Proprioceptorer inddeltes i tre overordnet grupper; muskelspindlere, golgi-sene organer og receptorer i ledkapsler. [19]

Muskelspindlere styrer og kontrollerer ændringer af muskellængder og kan udløse en strækrefleks. Den sensoriske nerve er forbundet centralt på muskelspindleren, hvor den kontinuert sender sensoriske impulser til CNS. Hvis den sensoriske nerve modtager stimuli, i form af stræk, vil den motoriske nerve på muskelspindleren blive stimuleret. Stimulation af den motoriske nerve vil forkorte musklens længde. Nogle strækreflekser er holdningsreflekser, som hjælper os med at holde balancen. I stående position kræves der samarbejde mellem forskellige muskelgrupper for at forblive stående. Dette ses f.eks. hvis kroppen lænes forover, vil strækreflekserne i læggene blive aktiveret og kontraherer. Derved vil kroppen læne sig bagud og igen stå i en opret position. Hvis der sker en overcompensation fra lægmusklene og kroppen læner sig for meget bagud, vil strækreflekser i skinnebenet og lårerne aktiveres. Derved vil kroppen læne sig forover igen. Kroppen foretager mange af disse ubevistste korrektioner. [19]

Golgi-sene organer sidder i en kløft³ mellem skeletmusklen og tilhørende sene. Dendritterne fra golgi-sene organet kopler sig på den tætteste sene og stimuleres af spændingen i denne, hvorved den eksterne spænding i en muskelkontraktion bliver målt. [19]

Ledkapsler er fyldt med frie nerveender, som kaldes receptorer. Disse receptorer detekterer

³Fixme Note: junction

tryk, spænding og bevægelse i leddet. [19]

Det er en lille del, af den information propriocepterne sender, der opfanges af bevidstheden, eftersom størstedelen foregår på et underbevidst niveau. [19]

Pilotforsøg

Det er nødvendigt at kunne skelne det reelle signal fra støjkomponenter, før systemet kan designes. Signalet skal aktivere komponenter i slutningen af det analoge system og skal derfor være adskilt fra støj, der kan påvirke outputtet. For at undgå dette frafiltreres støjsignaler. Derudover er det nødvendigt at vide, hvilket outputsignal accelerometeret giver ift. den valgte hældningsgrad. Dette gøres ud fra sensitiviteten, der måles. Ud fra disse oplysninger er det muligt at kravspecifcere de enkelte blokke i systemet.

C.1 Formål med pilotforsøg

1. Identificere de frekvenser, der udgør støj i outputsignalet fra accelerometeret.
2. Identificere maksimum og minimum outputsignal af accelerometeret.
3. Kontrollere om offset og sensitivitets værdierne fra databladet på accelerometeret stemmer overens med målt data.

C.2 Materialer

- ADXL335 accelerometer.
- To stk. $0.1\mu F$ kondensatorer.
- en stk. TL081 operationsforstærker
- Ledninger.
- Breadboard.
- 5.5V fra spændingsforsyning fra batterier.
- NI USB-6009.
- USB isolator USI-01.
- Computer med ScopeLogger og MATLAB R2015a.
- Hæftemasse.
- Vinkel.
- Vaterpas.
- Termometer

C.3 Metode

Formål 1: Støjfrekvenserne i outputsignalet identificeres ved først at måle en baseline ved $0g$ dvs. uden hældning. Dette medfører at signalet kan analyseres uden nogen påvirkning på outputsignalet. Dernæst måles en påvirkningen ved $1g$, hvilket svarer til en hældning på 90° . Dette måles både til højre og venstre. Derudover udføres en langsom rotation fra 0° til 90° til både højre og venstre. Det vil på denne måde være muligt at identificere den støj som accelerometeret kan udsættes for.

Formål 2: For at simulere den påvirkning, accelerometeret udsættes for, og derved identificere accelerometerets maksimum og minimums outputsignal, roteres accelerometret i en langsom rotation fra 0° til 90° til både højre og venstre.

Formål 3: På baggrund af identificering af de forrige formål samt ved måling af temperaturen i lokalet før, under og efter, kontrolleres temperaturens indvirkning på accelerometerets sensitivitet samt om de forrige formål stemmer overens med værdierne fra databladet på accelerometeret. [65]

C.4 Forsøgsopsætning på breadboard

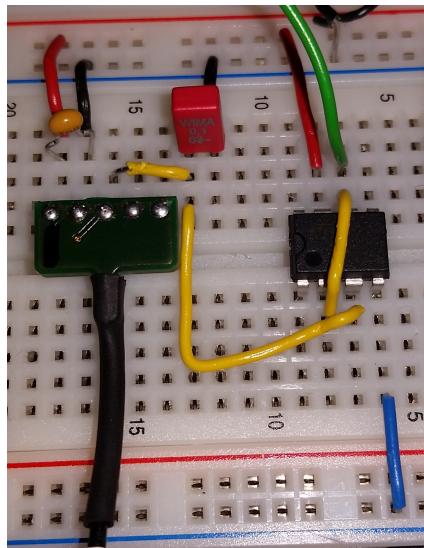
Opsætning

Der ses et billede af forsøgsopsætningen på breadboardet på **figur C.1**.

- Accelerometeret tilkobles breadboardet.
- To kondensatorer på $0.1\mu F$ tilkobles breadboardet. Kondensatorerne er valgt på baggrund af databladet for accelerometeret ift. power supply decoupling og båndbredde.¹
- Accelerometeret tilnyttes en forsyningsspænding på $5.5V$ - en regulator sikrer at accelerometret kun forsynes med en spænding indenfor dets arbejdsmønster, som er $3.3V$.
- En buffer designes med en operationsforstærkeren TL081 og en ledning fra den inverterende kanal til outputkanalen. Derved påvirker indgangsimpedansen fra ADC'en af typen NI USB-6009 ikke signalet fra accelerometret.²
- Outputtet fra bufferen sendes igennem en ADC af typen NI USB-6009.
- Signalet fra NI USB-6009 sendes igennem en USB-isolator af typen USI-01.
- Outputsignalet fra USI-01 sendes ind i computeren, hvor det optages med ScopeLogger og behandles i MATLAB R2015a.

¹Fixme Note: Den som sidder på pin 1 og 2 i accelerometeret fjerner støj fra strømforsyningen, mens kondensatoren fra pin 3 giver en båndbredde på $50Hz$.

²Fixme Note: Modstanderen i NI USB-6009 er $144Kohm$ er ikke 100 gange større end den $32Kohm$ fra accelerometret. derfor påvirker det signalet.



Figur C.1: På billedet ses opsætningen på breadboardet. De røde ledninger symboliserer den positive spænding fra den 5.5V spændingsforsyning. De sorte ledninger leder til ground, og den blå ledning symboliserer den negative spænding fra spændingsforsyning. De gule ledning fungerer som ledere for signalet igennem systemet (den gule ledning fra accelerometret kan skiftes imellem pin 3, 4 og 5 alt efter hvilken akse, der skal måles på). Den grønne ledning symboliserer outputtet fra kredsløbet, som sendes til NI USB-6009.

C.5 Fremgangsmåde

C.5.1 Forsøgets udførelse

Hele pilotforsøgets opsætning ses på **figur C.2**.

For at måle 0g påvirkning på accelerometerets x-akse, lægges det fladt ned på et plant bord, som er tjekket med et vaterpas. Målingen gøres over tre omgange i 30 sekunder. Herefter holdes accelerometeret fast på en vinkel, hvor ledningerne påsættes med hæftemaske. Accelerometeret sættes så der igen måles på x-aksen, når der sker en rotation til højre og venstre. Vinklen sættes således, at der måles 1g påvirkning i positiv retning og negativ retning, hvilket svarer til $\pm 90^\circ$ fra accelerometerets nulpunkt.

Dette giver tre baselines for hver g påvirkning, som opsamles og gemmes i ScopeLogger. Til sidst måles g påvirkningen af accelerometeret under rotation fra 0° til $\pm 90^\circ$ for både højre og venstre. Her måles 10 sekunders baseline inden og efter rotationen, som varer 5 sekunder og foretages langsomt og kontrolleret. Disse to målinger optages og gemmes ligeså i ScopeLogger.

C.5.2 Behandling af data

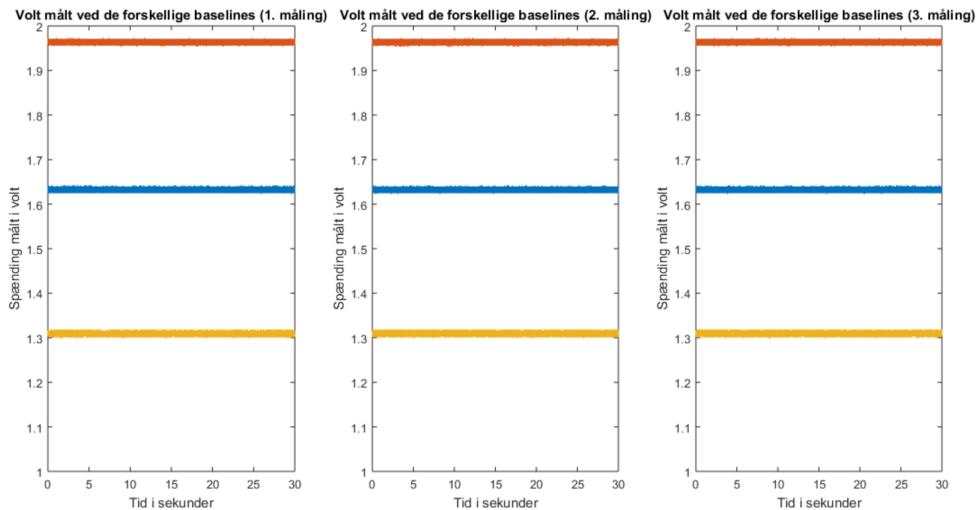
Efter udførelse af forsøget vil alt data blive behandlet i MATLAB R2015a, hvor der beregnes en gennemsnitsværdi for henholdsvis de tre baselines målt ved 0g påvirkning samt 1g påvirkning i positiv retning og negativ retning. Der foretages desuden en Fast Fourier Transformation (FFT) på de ni målinger (tre målinger ved hver g påvirkning). FFT foretages for at få en grafisk repræsentation af det målte signal i frekvensdomænet. Baseline optages for at se hvilken påvirkning omgivelserne har på signalet, da der ikke er nogen bevægelse på disse.



Figur C.2: På billedet ses (fra venstre til højre) den 5V spændingsforsyning, som leder strømmen til og fra ground fra breadboardet. Fra breadboardet sendes outputtet videre til ADC'en(NI USB-6009). Herefter ledes signalet igennem USB-isolatoren(USI-01) og til sidst ind i computeren, hvor det optages i ScopeLogger. Over breadboardet i midten på billedet ses vaterpasset. Forrest i midten på billedet ses accelerometeret fastgjort på vinklen.

C.6 Resultater

I dette afsnit vil der grafisk blive vist, hvordan accelerometerets output ændrer sig ift. g påvirkning. På **figur C.3** ses accelerometerets output i tidsdomænet. Der udføres herefter en FFT på de tre målinger for hver baseline, hvilket giver ni grafiske skiltninger af, hvorledes accelerometerets egne frekvenser adskiller sig fra støjfrekvenser.



Figur C.3: På graferne ses henholdsvis første, anden og tredje måling for hver g påvirkning af accelerometeret. Den røde graf repræsenterer outputtet målt ved 1g påvirkning i positiv retning. Den blå graf repræsenterer outputtet målt ved 0g påvirkning. Den gule graf repræsenterer outputtet målt ved 1g påvirkning i negativ retning.

Offsettet for accelerometerets x-akse udregnes ved at tage den målte gennemsnitsværdi ved 0g for alle tre målinger og yderligere tage gennemsnittet af disse. De tre målinger ses som

de blå grafer på **figur C.3**. Udregningen ses på C.1:

$$\text{Offset} = \frac{1.6326 + 1.6323 + 1.6325}{3} = 1.6325 \quad (\text{C.1})$$

Offsettet burde ifølge databladet for accelerometret være halvdelen af spændingsforsyningen, som i dette tilfælde leder en spænding på $3.3V$. [65] Derfor burde offsettet være $1.65V$. Afvigelsen kan derved udregnes:

$$\text{Afvigelse for offset} = \frac{1.6325 - 1.65}{1.65} \cdot 100 = -1.0614\% \approx 1.06\% \quad (\text{C.2})$$

Herefter kan sensitiviteten for accelerometeret udregnes. Dette gøres ved først at udregne en gennemsnitsværdi for $1g$ påvirkning i henholdsvis positiv og negativ retning. Værdierne for $1g$ påvirkning i positiv retning er angivet som de røde grafer på **figur C.3**, imens de i negativ retning er angivet som de gule grafer. Efter udregningen af gennemsnittet trækkes den udregnede offset værdi fra.

$$\text{Gennemsnit } 1g \text{ positiv retning} = \frac{1.9640 + 1.9636 + 1.9639}{3} = 1.9638 \quad (\text{C.3})$$

$$\text{Gennemsnit } 1g \text{ negativ retning} = \frac{1.3091 + 1.3093 + 1.3093}{3} = 1.3092 \quad (\text{C.4})$$

$$\text{Sensitivitet positiv retning} = 1.9638 - 1.6325 = 0.3313 \quad (\text{C.5})$$

$$\text{Sensitivitet negativ retning} = 1.3092 - 1.6325 = -0.3233 \quad (\text{C.6})$$

$$\text{Volt pr grad positiv retning} = \frac{0.3313}{90} = 0.0037V \quad (\text{C.7})$$

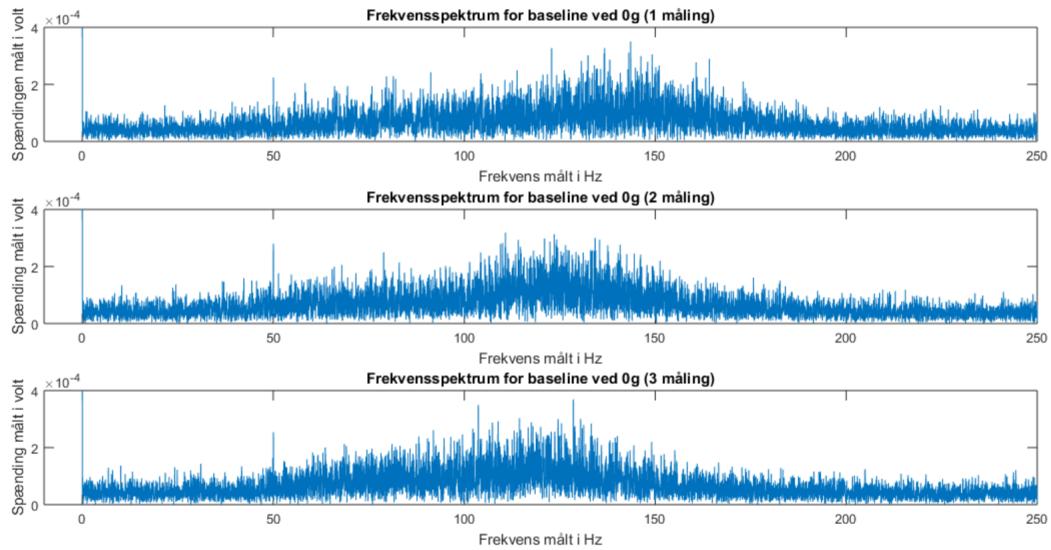
$$\text{Volt pr grad negativ retning} = \frac{-0.3233}{90} = 0.0036V \quad (\text{C.8})$$

Da der findes en lineær sammenhæng imellem g påvirkning og outputtet burde sensitiviteten for accelerometret med en spændingsforsyning på $3.3V$ være $330mV/g$. Der kan derved udregnes afvigelse for både negativ og positiv retning:

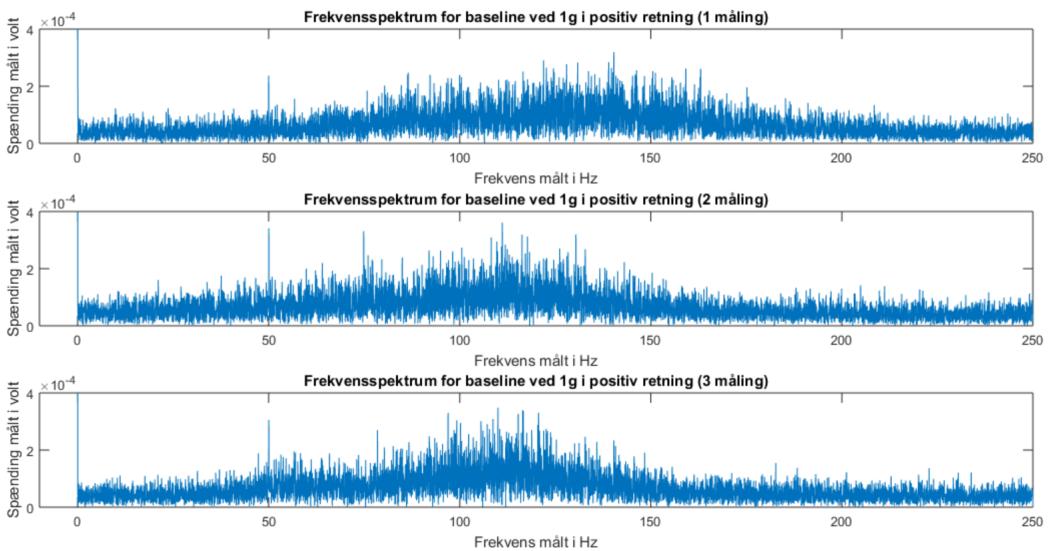
$$\text{Afvigelse for sensitivitet i positiv retning} = \frac{0.3313 - 0.330}{0.330} \cdot = 0.3939\% \approx 0.39\% \quad (\text{C.9})$$

$$\text{Afvigelse for sensitivitet i negativ retning} = \frac{0.3233 - 0.330}{0.330} \cdot = -2.0303\% \approx 2.03\% \quad (\text{C.10})$$

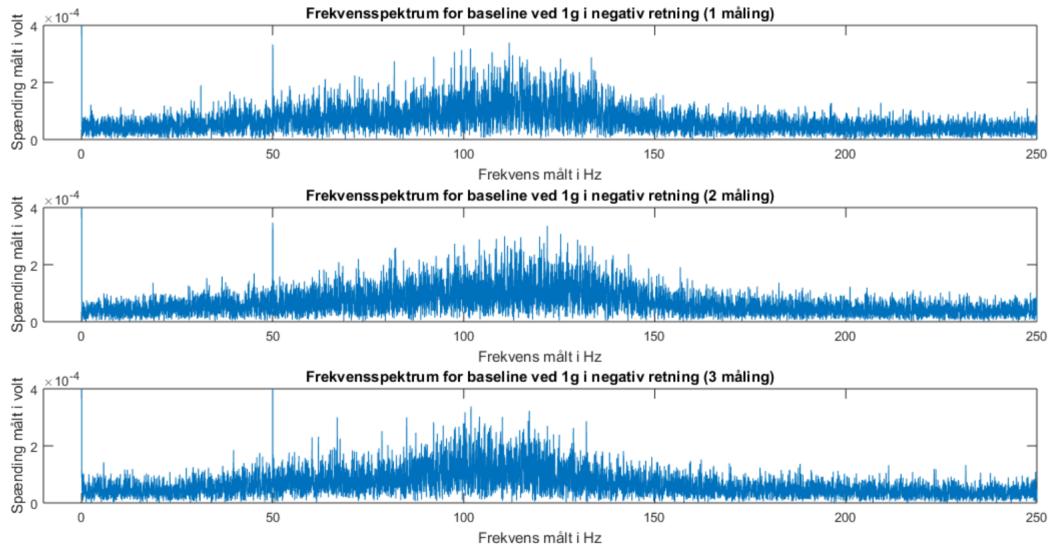
På **figur C.4**, **figur C.6** samt **figur C.5** ses en FFT af det målte data for statisk acceleration.



Figur C.4: På de tre grafer ses en FFT af første, anden og tredje måling ved 0g påvirkning af accelerometret. Peaken ved 0Hz går op til ca. 1.63V men dette ses ikke på grafen, da resten af værdierne derved vil være meget svære at se.

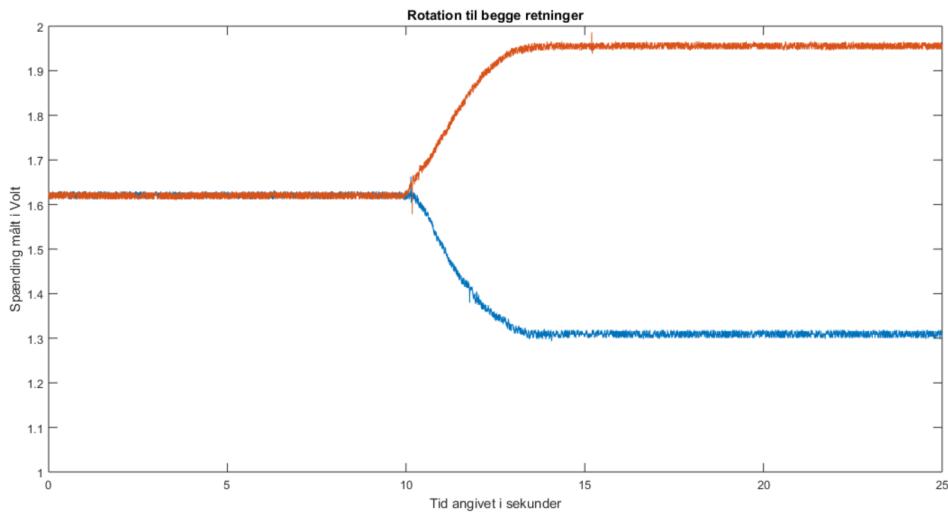


Figur C.5: På de tre grafer ses en FFT af første, anden og tredje måling ved 1g påvirkning af accelerometret i positiv retning. Peeken ved 0Hz går op til ca. 1.96V, men dette ses ikke på grafen, da resten af værdierne derved vil være meget svære at se.

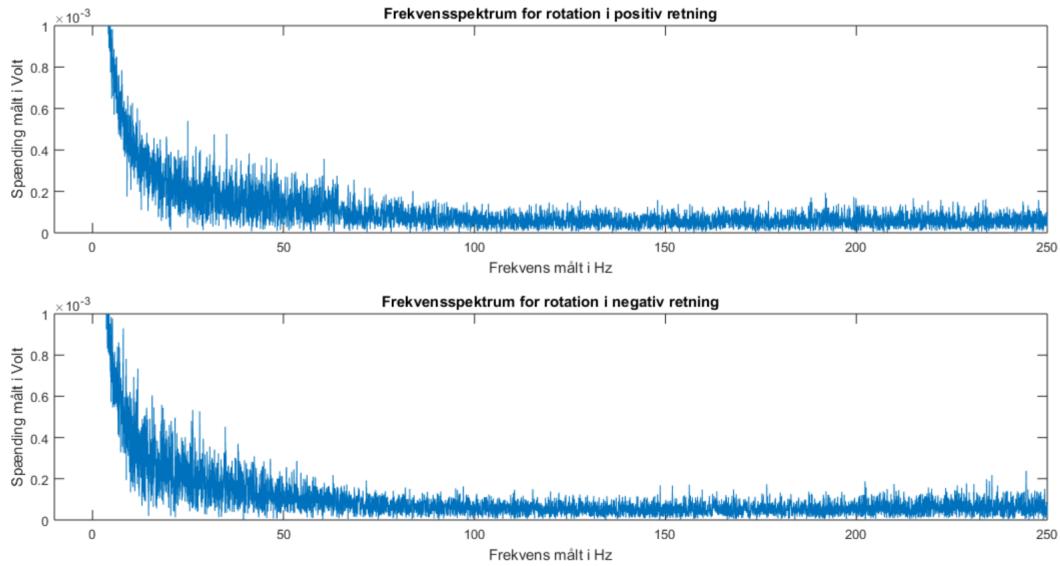


Figur C.6: På de tre grafer ses en FFT af første, anden og tredje mæling ved $-1g$ påvirkning af accelerometret i negativ retning. Peaken ved $0Hz$ går op til knap $1.30V$, men dette ses ikke på grafen, da resten af værdierne derved vil være meget svære at se.

Sammenlignes peakværdierne ved $0Hz$ på de tre ovenstående figurer med peakværdierne i resten af signalet fremgår det, at signal to noise ratioen er lav, hvilket betyder, at der ikke er meget støj ift. ønsket signal. Der ses altså, at accelerometerets frekvensområde ligger i de lave frekvenser. Der ses ved en statisk acceleration at, signalet stort set kun er til stede ved $0Hz$. Alt over $0Hz$ betragtes derfor som støj.



Figur C.7: På graferne ses accelerometerets output ved rotation fra $0g$ påvirkning til $1g$ påvirkning. Den orange graf repræsenterer rotation i positiv retning, hvorimod den blå graf repræsenterer rotation i negativ retning.



Figur C.8: På graferne ses en FFT af målinger for rotation i henholdsvis positiv og negativ retning.

På figur C.7 ses der en lineær sammenhæng imellem g-påvirkning af accelerometret og outputtet. Der ses, at de tre baselines ved $0g$ påvirkning samt $1g$ påvirkning i henholdsvis positiv og negativ retning, som måles i de første og sidste 10 sekunder af målingen, stemmer overens med de målte baselines uden rotation.

På figur C.8 ses en FFT af målingerne af rotationerne. Ud fra dette kan der ses, at der er kommet større udsving i de lavere frekvenser fra 0– til ca. 25Hz sammenlignet med de statiske baseline målinger. Signalet regnes altså for at være i frekvensspektrummet $0 – 25\text{Hz}$. Alt uden for dette spektrum regnes derfor som støj.

C.7 Diskussion og konklusion

Der kan argumenteres for og imod at accelerometret er blevet udsat for $0g$ påvirkning, da det kan være svært at vurdere hvorvidt bordet er plant. Bordets hældning blev målt med et vaterpas, men der er mulighed for, at vaterpasset kan være upræcist. Accelerometret har desuden ujævnheder på overfladen i form af ledninger, hvilket kan betyde, at det muligvis ikke har lagt plant på bordet.

Der kan også være faktorer som har betydning for $1g$ påvirkningen, da vinklen nødvendigvis ikke er helt vinkelret. Ujævnheder på accelerometret samt vores holdemåde på det kan også have påvirket målingen.

Accelerometerets output afhænger også af rumtemperaturen, da denne påvirker aksernes offset samt sensitiviteten. Ved dette forsøg var temperaturen før, under og efter forsøget **X**, **X** og **X**, hvilket vil gå ind og påvirke målingerne.

Alle disse faktorer som er udregnet for pilotforsøget kan have indflydelse på de afvigelser der fås ift. databladet for accelerometeret. Det er altså igennem forsøget lykkedes at udregne afvigelserne for offset samt sensitiviteten, som står i accelerometrets datablad.

I outputsignalet fra accelerometret ved den statiske acceleration udgør alt over 0Hz støj, hvorimod det vurderes, at alt over 25Hz for rotationsmålingerne er støj. Maksimum og mini-

rum outputsignalet fra accelerometret vil for langsom rotation eller svajning henholdsvis være $1.9638V$ og $1.3092V$, hvilket bliver til $0.3313V$ og $-0.3233V$ efter offsettet er blevet justeret, der udregnes til $0.0037V$ og $-0.0036V$ pr grad.