

Kapitel 1

Indledning

1.1 Indledning

I Danmark er omkring 3.000 mennesker diagnosticeret med en muskelsvindssygdom [1]. Muskelsvind dækker over forskellige neuromuskulære sygdomme, hvilket er sygdomme, der påvirker samspillet mellem nerver og muskler.¹ De fleste af disse sygdomme opstår som følge af gendefekter og andre skyldes autoimmune sygdomme, hvor immunsystemet reagerer på kroppens eget væv [2]. Over 80 % af patienterne med muskelsvind vil under sygdomsforløbet få behov for hjælpemidler og behandling. Disse hjælpemidler og behandlingsformer gør, at flere med muskelsvind kan leve længere, selvom sygdommen ikke kan helbredes [3].

De enkelte muskelsvindssygdomme er forskellige, og der er derfor forskel på udviklingen og konsekvenserne af dem. De fleste muskelsvindssygdomme er ikke livstruende, hvis de rette hjælpemidler benyttes, men en af de mest alvorlige muskelsvindssygdomme, der medfører dødsfald grundet sygdommens komplikationer, er Amyotrofisk Lateral Sklerose (ALS) [4].

ALS er en hurtigt fremskridende neurodegenerativ sygdom, der nedbryder motorneuroner i hjernen, hjernestammen og rygmarven. Det betyder derfor, at nervecellerne degenereres, så der opstår atrofi². I Danmark er incidensen af ALS 1 – 3 per 100.000, og prævalensen er 3 – 7 per 100.000 [5]. Den gennemsnitlige levetid for ALS-patienter er tre til fem år efter symptomdebut, hvorefter motoriske neuroner er nedbrudt i en sådan grad, at der ofte opstår fatalt respirationssvigt [6, 7].

Patienterne er udfordrede under progressionen af sygdommen, hvor musklerne degenererer, eftersom sygdommen udvikler sig hurtigt. Af denne grund mister patienterne gradvist kontrol over sine muskler og derved kropsfunktioner. Disse funktioner ønskes opretholdt, hvilket leder frem til følgende initierende problemstilling.

1.1.1 Initierende problemstilling

Hvilken indvirkning har ALS på patienterne, og hvilke muligheder er der for opretholdelse af funktioner, der er tabt grundet mistet muskelkraft?

¹FiXme Note: Der findes omkring 25 forskellige sygdomme.

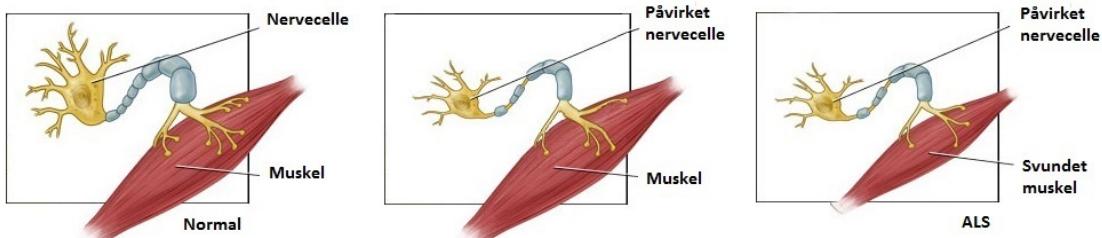
²FiXme Note: Svind af væv, legeme eller organ

Kapitel 2

Problemanalyse

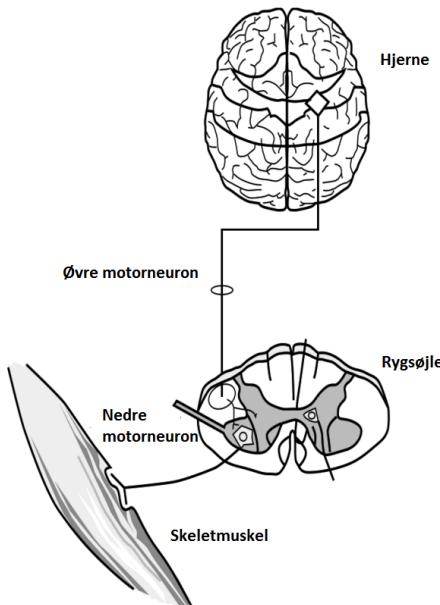
2.1 Amyotrofisk lateral sklerose

ALS er en neurodegenerativ sygdom, der påvirker motorneuronerne i hjernen og rygsøjlen i takt med sygdommens fremskriden, hvilket resulterer i muskelsvaghed [4]. En illustration af, hvordan ALS påvirker motorneuroner, ses af figur 2.1. De første symptomer herpå er kramper, svaghed samt stive muskler, hvilket kan opstå som muskelsvaghed i arme eller ben, talebesvær eller svaghed i de muskler, som styrer respirationen. Symptomer, der begynder i arme eller ben kaldes ”limb onset ALS”, mens talebesvær samt synkebesvær refereres til ”bulbar onset ALS” [8]. Symptomerne og følgerne af ALS varierer fra patient til patient, hvorved nogle patienter først oplever muskelsvaghed i deres ben, mens andre oplever muskelsvaghed i deres hænder og arme eller besvær i form af tale- eller synkebesvær [9, 8].



Figur 2.1: Tre stadier for en ALS-patient. Det første stadiet illustrerer en normal motorneuron samt en upåvirket muskel. Ved andet stadiet ses motorneuronet påvirket af ALS, dog ses musklen endvidere upåvirket. I det tredje stadiet ses motorneuronet påvirket samt musklen svundet ind. Svindet skyldes en manglende stimulering af musklen som følge af den påvirkede motorneuron [10].

Muskelsvagheden skyldes abnormiteter i de nedre motorneuroner. De nedre motorneuroner er de nerveceller, der videregiver information fra rygmarven til musklerne. Symptomer på abnormiteter i de nedre motorneuroner ses som muskelsvaghed samt muskelkramper og atrofi. Ligeledes kan de øvre motorneuroner påvirkes. Disse motorneuroner sørger for kommunikationen mellem hjernen og de nedre motorneuroner i rygmarven. Dette medfører, at beskeden fra hjernen har komplikationer med at komme til det givne sted. Dette ses som spasticitet samt overdrevne reflekser [8]. Opdelingen af de nedre samt øvre motorneuroner ses af figur 2.2. Årsagen til, at ALS opstår er oftest ukendt, dog ses en arvelighed i 5 – 10 % af tilfældene. Herudaf anslås 20 % til at have det muterede Superoxide dismutase 1-gen (SOD-1), hvilket resulterer i tab af motorneuroner [9].



Figur 2.2: Illustrerer opdelingen af de nedre samt øvre motoneuroner [9].

På trods af, at ALS opleves individuelt både i forhold til sygdomsprogressionen samt, hvilke komplikationer de oplever, kan sygdommen inddeltes i tre stadier: et tidligt, midter og endeligt stadiet. Et flowdiagram af de tre stadier framgår af figur 2.3.



Figur 2.3: Tre stadier samt de tilhørende symptomer.

I det tidlige stadiet kan patienter ignorere symptomerne, da disse fremstår som milde og kun påvirker mindre dele af kroppen. Ved det midterste stadiet vil symptomerne begynde at udbrede sig, hvortil nogle muskler paralyseres. Andre muskler vil blive svagere med tiden, hvilket blandt andet kan medføre problemer med synkning og vejtrækningen. I det endelige stadiet vil de fleste voluntære muskler være paralyserede, og det vil derfor forringe deres mulighed for indtage føde eller væske normalt. Herudover vil patienter oftest i dette stadiet miste even til selv at trække vejret, og bliver derfor afhængig af ventilationsstøtte [11]. Den mest almindelige dødsårsag er respirationssvigt, hvilket oftest sker inden for 3 år efter diagnosen er stillet. 25 % af patienterne har en overlevelsesrate på 5 år, og kun 10 % lever længere end 10 år efter diagnosen er stillet [6, 9].

2.1.1 Livskvalitet hos ALS-patienter

Livskvaliteten hos patienter med ALS undersøges for at vurdere, hvilken påvirkning sygdommen samt dens progression har på patienten. Der er ingen behandling for at stoppe sygdomsprogressionen, men der eksisterer forskellige palliatative behandlinger [12]. Det er

fordelagtigt at kende patienternes livskvalitet for at vurdere den optimale palliative behandling [13].

Livskvalitet defineres ud fra en persons fysiske sundhed, psykologiske tilstand, grad af selvstændighed, sociale relationer og personlig tro [14].

Der kan fremhæves to forskellige typer af livskvalitetsvurderinger: en overordnet livskvalitet og en sundhedshedsrelateret livskvalitet. Den overordnede livskvalitet relaterer til patienternes samlede livskvalitet, og den sundhedsrelaterede livskvalitet dækker over de fysiologiske og mentale aspekter ved sygdommen [13, 12]. Da ALS påvirker patienters fysiske formåen, ses der et fald i denne type livskvalitet, som sygdommen fremskridt [13]. Dette fremgår ligeledes af tabel 2.1, der viser en forringet livskvalitet hos ALS-patienter når der sammenlignes med resten af befolkningen. Livskvaliteten vurderes ud fra mobilitet, selvplege, udførelse af normale aktiviteter, oplevelse af smerte eller ubehag samt diagnoser som angst og depression, hvor næsten 3 gange så mange ALS-patienter lever med disse problemer sammenlignet med den resterende befolkning.

	ALS-patienter	Normativ tysk population
Mobilitet	83,7 %	16,6 %
Selvplege	77,6 %	2,9 %
Normale aktiviteter	85,7 %	10,2 %
Smerte eller ubehag	61,2 %	27,9 %
Angst eller depression	67,4 %	4,4 %

Tabel 2.1: Moderate eller alvorlige problemer målt ud fra europæisk livskvalitetsvurdering. Tabellen sammenligner livskvaliteten for ALS-patienter med livskvaliteten for den tyske population. Det ses heraf at ALS-patienter har en forringet livskvalitet i forhold til den resterende tyske befolkning [13]. (Revideret)

Til trods for, at der sker et fald i den sundhedsrelaterede livskvalitet, er der tidligere vist, at den overordnede livskvalitet forbliver stabil [13, 12]. Dette kan forklares ved et "response shift" eller "frame shift", der er en måde at håndtere sin sygdom, hvor social støtte under sygdomsforløbet vægtes højere end normalt i bestemmelsen af livskvalitet [13]. Af denne grund foreslås det, at faldet i sundhedsrelateret livskvalitet i forhold til mobilitet og selvhjælp afhjælpes ved teknologiske hjælpemidler. På denne måde vil ALS-patienternes sociale interaktioner kunne have fokus på deres sociale netværk, da disse sociale interaktioner er begrænsede på baggrund af ALS [13, 15].

2.2 Hjælpemidler til brug ved ALS

Som tidligere nævnt er ALS en livstruende sygdom, hvor følgerne udvikler sig gradvist. Dette gør, at patienternes funktionelle evner svækkes over sigt, hvorfor der er behov for en række hjælpemidler, som helt eller delvist kan være en hjælp i hverdagen. Nogle af hjælpemidlerne anvendes i starten af sygdommen, således patienterne kan klare sig selvstændigt, hvor der senere er behov for andre hjælpemidler samt helt eller delvist hjælp fra familie eller plejepersonale [16].

2.2.1 Teknologiske hjælpemidler

Nogle af de mest anvendte hjælpemidler for ALS-patienter er kørestole, toiletstole og stokke, [16] samt hjælpemidler til respiration, der bliver nødvendige sent i sygdomsforløbet [17]. Dette kan være en respirator til at lindre og håndtere vejrtrækningsproblemer. Ved brug af respirator, bliver patienter i højere grad afhængige af hjælp, da det kræver plejepersonale at betjene denne [18]. Hjælpemidlerne er alle redskaber, der støtter og aflaster patienterne, så de kan leve bedst muligt. Hjælpemidlerne kan tilpasses individuelt til den enkelte patients behov, for eksempel i form af en tilpasset kørestol [16].

Udfordringer ved brug af hjælpemidler

Som nævnt i afsnit 2.2 mister patienter muskelkraft, som sygdommen udvikler sig, og de bliver derfor mere og mere afhængige af hjælpemidler, da tabet af muskelkraft til sidst medfører, at kørestolsbrug kan blive nødvendigt. På denne måde forsvinder patienternes selvstændighed, da de er afhængige af hjælpemidler samt assistance fra plejepersonale eller familie [16]. Dette fører til nogle begrænsninger for patienten og medvirker til en forringet livskvalitet. En mulig måde at give ALS-patienter nye muligheder, i takt med at muskelkraften bliver mindre, er anvendelse af et body augmentation-system. Et sådant system bidrager som et supplement til tabte kropsfunktioner [19].

2.2.2 Body augmentation som hjælpemiddel

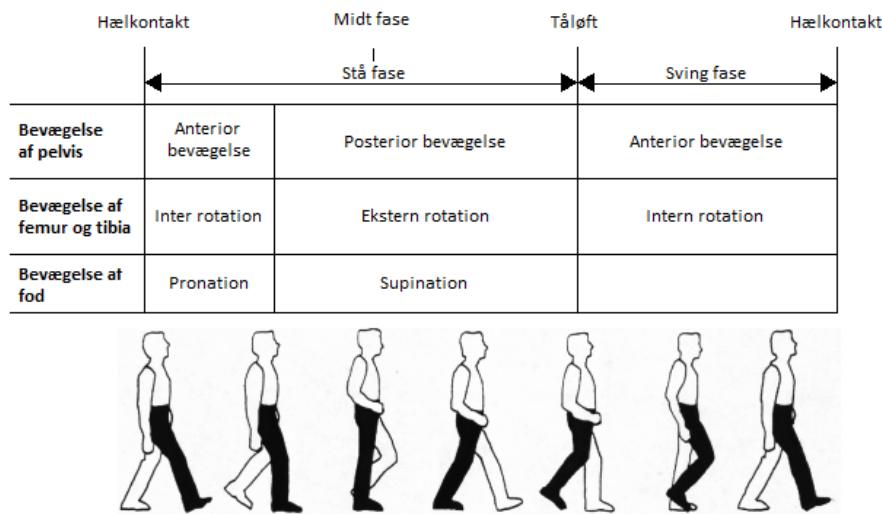
Én form for body augmentation er et exoskelet. Et exoskelet anvender biologiske signaler, og kombinerer disse signaler med kraften fra en maskine. På denne måde er det muligt, at maskinen fungerer som en menneskelig operatør, som kan forbedre menneskets styrke eller genoprette bevægelse [20]. Dette gør, at exoskelettet kan anvendes som et hjælpemiddel til patienter, som lider af handicap eller skader, hvorved exoskelettet gør det muligt at aflaste patienten [21].

Forsøg har påvist, at det er muligt for patienter, som er lammet fra brystet og ned, at gå ved brug af exoskelet for patienter. Exoskelettet kan registrere, når patienten bevæger sig til siden og herved hjælpes benene til at gå, selvom patienten er uden muskelkraft og følesans. Foruden fordele ved at gå, formodes det, at det har en positiv indflydelse på patientens kredsløb, knogler, led og fordøjelse [22].

2.3 Gangfunktion

Efterhånden som ALS-patienter mister muskelkraft, vil bevægeligheden i deres led nedsættes, eftersom de ikke har tilstrækkelig muskelkraft til at udnytte leddenes bevægelighed. Af denne grund opstår der kontrakturer i leddene, og muskelstramninger i de muskler, der er omkringliggende. Ved gang anvendes knæ-, hofte- og ankelleddet, hvilket fremgår af figur 2.4, og hvis disse led ikke akviteres, opstår der muskelstramninger i benenes muskler [23]. Knæleddet vælges som udgangspunkt for et muligt body augmentation-system i form af et exoskelet, da knæleddet er et hængselle og derfor har et begrænset antal frihedsgrader. Knæleddet har én frihedsgrad, modsat andre mere komplekse led, hvilket gør at leddet kun kan bevæge sig i en akse. Det antages derfor at knæleddet er et af de led som er simplest at opbygge et system omkring og opsamle signaler fra de omkringliggende muskler. Hvis der kan

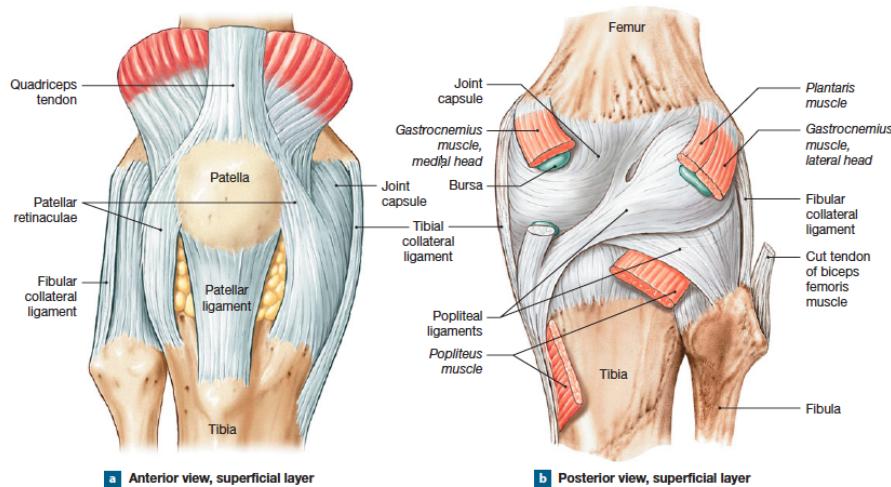
laves et exoskelet omkring knæleddet, vil det kunne antages, at samme princip kan muliggøres ved henholdsvis hofte- og ankelleddet, hvorved gangfunktionen kan opretholdes.



Figur 2.4: Aktivering af hofte, knæ og ankel under gang [24].

2.3.1 Knæets opbygning

Knæleddet er som tidligere nævnt et hængselled, hvilket medvirker til få frihedsgrader, som gør at knæet kan rotere begrænset samt fleksere og ekstensere. Knæet består af tre separate ledforbindelser. To, der er forbundet mellem femur og tibia, samt et mellem patella og femur, hvilket fremgår af figur 2.5. Ud over de tre separate ledforbindelser stabiliseres knæet af syv ledbånd. Ét af de syv ledbånd er patellarsenen, som er ansvarlig under extension af knæet. Derudover er der to ledbånd, som strækker sig mellem femur, tibia og fibia, hvilket er med til at styrke knæleddets overflade posteriort. Inde i ledkapslen befinner det forreste korsbånd (ACL) og det bagerste korsbånd (PCL), som har til opgave at fastgøre indre knoglefremspring af tibia til knoglefremspringet på femur. Korsbåndene har til opgave at begrænse anteriore og posteriore bevægelser af femur og er med til at opretholde retningen af knoglefremspringene. Det tibiale kollaterale ligament forstærker den mediale flade af knæleddet og det fibulære kollaterale ligament forstærker sidefladen. Disse ligamenter anvendes kun ved fuld ekstension [25].



Figur 2.5: Knæets anatomiske opbygning [25]

2.3.2 Knæets funktion

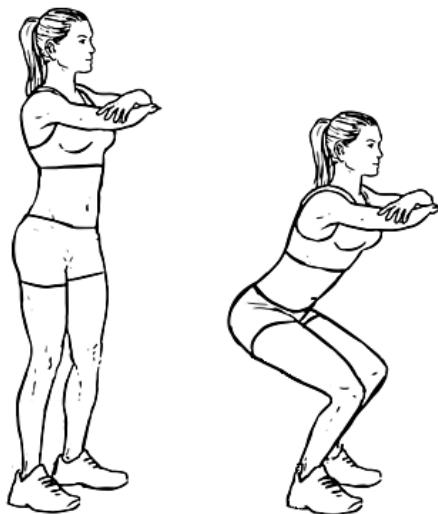
Ved gang aktiveres quadricepsmusklerne, der sidder anteriort på femur, og hasemusklerne, der sidder poseriort på femur, hvilket fremgår af figur 2.5. Quadricepsmusklerne består af rectus femoris, vastus intermedius, vastus medialis og vastus lateralis. Hasemusklerne består af biceps femoris, semitendinosus og semimembranosus. Ved bevægelse foretager quadriceps- eller hasemusklerne ekstension eller fleksion, hvorved de fungerer som hinandens agonister eller antagonister under bevægelse [25].

Som tidligere nævnt anvendes hofte, knæ og ankler under gang. Udover disse led er også kropsposituren og sving af leddene afgørende for gangfunktionen. Det fremgår af figur 2.4, hvordan de forskellige led udfører fleksion, ekstension og ændres fra ekstension til neutral bevægelse under gang [25].

Knæets funktion under en squat-øvelse

Den dynamiske squat-øvelse er en udbredt træningsøvelse, som kræver et højt niveau af styrke i flere muskelregioner. Squat aktiverer primært hofte-, lår- og rygmuskulaturen, som alle er vigtige muskler under gang, løb, spring og løft. Herudover anvendes squat som et redskab til rehabilitering af knæet, hvilket skyldes den måde, som knæet belastes under squat [26].

Knæets funktion for bøjningen af benet kan dermed ses ved udførelse af en squat-øvelse. En squat-øvelse udføres ved at stå i en oprejst position med knæ og hofte fuldt udstrakt. Herefter udføres en squat-øvelse i en kontinuerlig bevægelse, indtil den ønskede dybde nåes, hvorefter der udføres en kontinuerlig bevægelse tilbage til oprejst position [26]. En illustration af en squat-øvelse ses af figur 2.6.



Figur 2.6: Squat-øvelse [27].

Squat-øvelser udføres med varierende fleksion af knæet. De mest anvendte varianter af øvelsen er halv eller fuld squat. En halv squat-øvelse udføres indtil lærene er parallelle med jorden, hvilket svarer til en fleksion af knæet fra omkring $0 - 100^\circ$. En fuld squat-øvelse udføres indtil det posteriore del af låret og læggen kommer i kontakt med hinanden. Den fulde squat anbefales mere trænede personer, hvorfor den halve squat typisk er foretrukket til genoptræning af knæet [26].

Ved udførelse af en squat-øvelse aktiveres blandt andet musklen rectus femoris. Aktiviteten i rectus femoris, og de resterende quadricepstmuskler, er størst ved $80 - 90^\circ$ fleksion af knæleddet og er derefter relativt konstant [28]. Fra udgangspositionen for squat; oprejst posistion med en vinkel i knæet på 180° , vil muskelaktiviteten i rectus femoris være progressivt stigende indtil $80 - 90^\circ$ graders knæfleksion og derefter progressivt faldende, som knæet bevæger sig tilbage til 180° [?].

2.4 Problemafgrænsning

I dette projekt fokuseres der på ALS-patienter samt muligheden for styre et exoskellet som har til formål at opretholde kropsfunktioner.

Da ALS-patienter oplever progressivt muskelsvind, har dette indflydelse på deres selvstændighed, da de gradvist mister kontrollen over deres muskler. Da der kun eksisterer palliative behandlinger til ALS-patienter, fokuseres der i dette projekt på at afhjælpe deres fysiske mangler ved brug af et exoskelet som støtte. Ved opretholdes af de fysiske funktioner vil dette ligeledes have en gavnlig effekt på den sundhedsrelaterede livskvalitet, da det vil kunne resultere i en større selvstændighed [13, 15].

Idet ALS vil resultere i, at patienten mister evnen til at kunne gå, fokuseres der på at opretholde denne funktion. Fokus ligges på knæets funktion under en squat-øvelse, med henblik på at støtte de omkringliggende muskler ved anvendelse af et exoskelet.

2.4.1 Problemformulering

Hvordan kan et exoskelet styres og derved anvendes under en squat-øvelse med henblik på at støtte ALS-patienters lårmuskulatur?

Kapitel 3

Systemudvikling

3.1 Systembeskrivelse

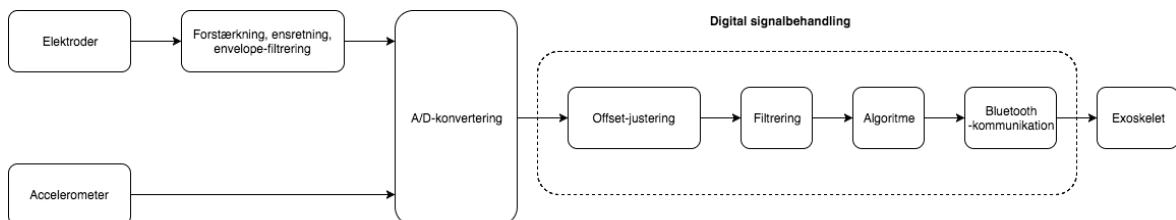
Der ønskes at udvikle et system, med formål at støtte musklerne omkring knæleddet hos ALS-patienter under udførelse af en squat-øvelse. Dette gøres for at aflaste patienterne med henblik på at kunne undgå kørestol i de tidlige stadier af ALS. Systemet skal kunne opsamle EMG-signaler fra rectus femoris samt en spænding fra de påsatte accelerometre, for således at kunne beregne vinklen over knæet. Disse signaler skal behandles således, at de kan omsættes til signaler, så en prototype af et exoskelet kan udføre en tilsvarende bevægelse. Systemet har yderligere til formål at have mulighed for forstærkning af signalet, således mindre muskelkraft også vil kunne udløse den samme bevægelse af knæleddet. Derudover skal systemet være brugervenligt ved at være kompakt, mobilt og ikke generende over for brugeren.

3.1.1 Overordnet krav til systemet

- Systemet skal registrere muskelaktivitet af rectus femoris og vinklen af knæleddet
- Systemet skal være batteridrevet
- Systemet skal kunne overføre data trådløst til en computer
- Systemet skal kunne ende ud i en prototype af et exoskelet
- Systemet skal være sikkert og ikke til gene for brugeren
- Systemet skal kunne indikere, hvis der ikke er strøm nok til at virke optimalt
- Systemets skal følge kroppens naturlige bevægelse under udførelsen af en squat-øvelse

3.1.2 Blokdiagram

1 2



Figur 3.1: Systemets opbygning.

I dette projekt er der valgt at udarbejde en prototype, som har til formål at bevæge knæleddet, når rectus femoris kontraherer. Opbygningen af systemet fremgår af figur 3.1. Der

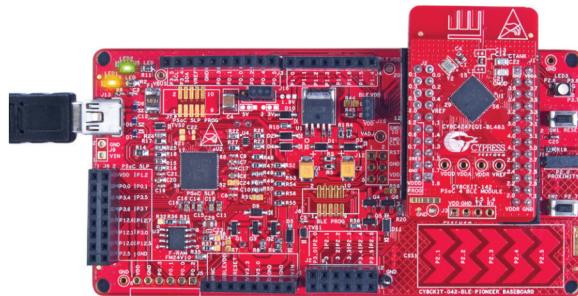
¹FiXme Note: ADC: Hvad drift betyder offset og ADC'en ikke kan anvendes fordi den går i mætning?

²FiXme Note: Sker der den samme digitale behandling af begge signaler?

anvendes to sensorer, EMG-elektroder og accelerometre, til at opsamle biologiske signaler. For at registrere muskelaktivitet anvendes elektroder og en EMG-forstærker, der har til formål at forstærke, filtrere og ensrette muskelsignalet, der opsamles. Der anvendes accelerometre som inputsignal. Inputsignalet omregnes til en vinkel svarende til knæleddets vinkel under en squat-øvelse. Det opsamlede signal sendes herefter videre til den digitale del af systemet, hvilket er bestående af et Bluetooth Low Energy Pioneer kit (CY8CKIT-042-BLE), som opfanger de biologiske signaler og overfører dem trådløst til en CySmartUSB BLE Dongle sat i en computer, som kan kommunikere med prototypen af exoskelettet udarbejdet i LEGO Mindstorm³.

3.2 Løsningsstrategi

Til dette system benyttes komponenter fra Cypress's CY8CKIT-042-BLE udviklingskit. Ud fra dette sæt er der udvalgt de nødvendige komponenter, således der kan fortages analog til digital konvertering af de signaler, der måles via sensorerne i ???. Yderligere skal systemet være i stand til at kommunikere trådløst med andre enheder, hvilket er muligt ved anvendelse af Bluetooth Low Energy (BLE).



Figur 3.2: CY8CKIT-042 BLE Pioneer baseboard, samt CY8CKIT-142 PSoC 4 BLE modulet [29].

I figur 3.2, ses de valgte komponenter, der består af et CY8CKIT-042 BLE Pioneer baseboard, som fremover vil refereres til som en mikrokontroller. Derudover et CY8CKIT-142 PSoC 4 BLE modul, der vil refereres til som et BLE-modul, hvilket har en operationsfrekvens på 2,4 GHz. Baseboardet er platformen, hvorpå sensorerne vil blive tilkoblet, og hvor de analoge signaler konverteres til digitale signaler. Baseboardet har mulighed for tilkobling af en spændingsforsyning, bestående af et 3 V knapcelle batteri, eller via mikro USB tilslutningen [30]. Der er mulighed for udvidelse af baseboardet, ved anvendelse af moduler fra Cypress, samt Arduino shields eller 6-pins Digilent Pmod udvidelseskort [30].

³Fixme Note: tjek om dette er rigtigt

Kapitel 4

Teori og design

4.1 Analog del



Figur 4.1: Blokdiagrammets analoge del

I det analoge system, som er illustreret på figur 4.1, benyttes sensorer til at opsamle biologiske signaler, der videresender disse informationer til exoskelettet. Systemet skal være i stand til at opsamle EMG-signaler, hvor der ønskes en repræsentation af energimængden i signalet. For at dette opnås skal signalet envelopefiltreres. Yderligere ønskes at kunne justere forstærkningen, for at tilpasse amplituden af EMG-signalet, og dermed gøre systemet mere alsidigt, således det kan benyttes til flere personer. Den justerbare forstærkning vil muliggøre, at ALS-patienter kan benytte systemet i takt med det progressive muskelsvind. Systemet skal ligeledes være i stand til at opsamle signal fra accelerometre, så accelerationen fra to accelerometre kan omregnes til knæets vinkel.

4.1.1 Opsamling af EMG-signaler

EMG er en målemetode, som mäter elektrisk aktivitet genereret af muskler [31]. Som tidligere nævnt i afsnit 2.1 er ALS en neurodegenerativ sygdom, hvor musklen svinder ind med tiden, hvilket resulterer i mindsket muskelaktivitet. Dette påvirker EMG-målingerne, da den elektriske aktivitet hos ALS patienter derfor er mindre.

Almindeligvis kan der anvendes to former for EMG-målinger. Den ene er en ikke-invasiv metode, der betegnes overflade-EMG, og den anden er en invasiv metode, intramuskulær-EMG [31, 32]. I dette projekt anvendes overflade-EMG for at opfylde projektets overordnede krav afsnit 3.1.1, om at være til mindst mulig gene for patienten. Ved overflade-EMG foretages en måling over et samlet antal potentialer fra måleområdet via differensmåling, herved er det muligt at se aktivering af muskelfibrene [32]. EMG har et frekvensområde på 10 – 500 Hz, hvorfor signaler uden for dette frekvensområde, betegnes som støj [33, 32].

Denne metode kan påvirkes af flere artefakter, som bevægelsespåvirkning og støjpåvirkning fra elnettet (50 Hz) [32]. Ligeledes kan der ved EMG-målinger fremkomme elektrisk støjpåvirkning fra omkringliggende muskler i forhold til området, der måles på. Dette betegnes som crosstalk [32].

Krav:

- Skal opsamle signaler fra rectus femoris

- Skal være anvendeligt med overflade elektroder
- Skal opsamle muskelsignaler i frekvensområdet mellem $10 - 500 \text{ Hz}$
- Skal forsynes med en spænding på $\pm 5,5 \text{ V}$
- Skal have et justerbart gain, der ikke kan forstærke over ADC'en arbejdsområde på XX.
- EMG signalet skal være en energirepræsentation.

4.1.2 Opsamling af accelerometer-signaler

Et accelerometer er en elektromekanisk enhed, som både kan måle statisk og dynamisk acceleration. Den statiske acceleration er på $1 g$, hvilket svarer til tyngdekraften. Alt efter hvilken retning accelerometeret holdes i, ændres aksen, hvor der måles $1 g$ -påvirkning i. Ud fra dette er det muligt at bestemme orienteringen af accelerometeret i forhold til jorden. De dynamiske kræfter såsom bevægelse, stød og vibrationer, gør det muligt at analysere accelerometers bevægelse samt hastighed. Ved bevægelse udsættes accelerometeret både for dynamisk og statisk acceleration. Studier har vist, at den højest mulige acceleration ved bevægelse af en arm går fra $0,5$ til $2,0 \text{ g}$ -påvirkning. Herved forventes dette ligeledes for et ben under en squat-øvelse [34]. I dette projekt måles vinkelen af knæet under en squat-øvelse, derfor vil det være mest hensigtsmæssigt at placere accelerometeret, så det mäter i enten X- eller Y-asken. På baggrund af dette vælges Y-aksen.

Krav:

- Skal mæle på minimum Y-aksen
- Skal forsynes med en spænding på $3,3 \text{ V}$
- Skal mæle accelerationer i $\pm 2 g$

4.1.3 Spændingsforsyning

Spændingsforsyningen skal være i stand til at forsyne kredsløbets aktive komponenter med en konstant spænding. Den anvendte spændingsforsyning er en færdigudviklet komponent, som består af to batterier på $1,5 \text{ V}$, der sidder i en spændingsregulator. Batteriernes kobling danner et split supply, og derfor dannes der en jordforbindelse fra det ene batteris negative pol og den andens positive pol. De andre poler, som ikke anvendes til jordforbindelse, benyttes som systemets positive spændingsforsyning, V_{cc} og negative spændingsforsyning, V_{dd} . Spændingsregulatoren sørger for at give en jævn spænding på henholdsvis $3,4 \text{ V}$ og $\pm 5,5 \text{ V}$. Dette gøres ved, at spændingsregulatoren oplagre spænding fra de to tilkoblede batterier i spoler, når switchfunktionen lukkes. Switchfunktionen åbnes når spolerne er mættet og en spænding ledes videre i kredsløbet via en diode. Denne switchfunktion åbner og lukker skiftevis i kort tid, hvilket gør, at der hele tiden ledes en konstant spænding til systemet. Konfigurationen af spændingsforsyningen fremgår af figur 4.2, hvor terminalerne for $\pm 5,5 \text{ V}$ fremgår som rød(V+) og blå(V-) og sort(Gnd), mens der på den modsatte side fremgår terminalerne for $3,4 \text{ V}$ som brun(Vcc) og sort(Gnd).



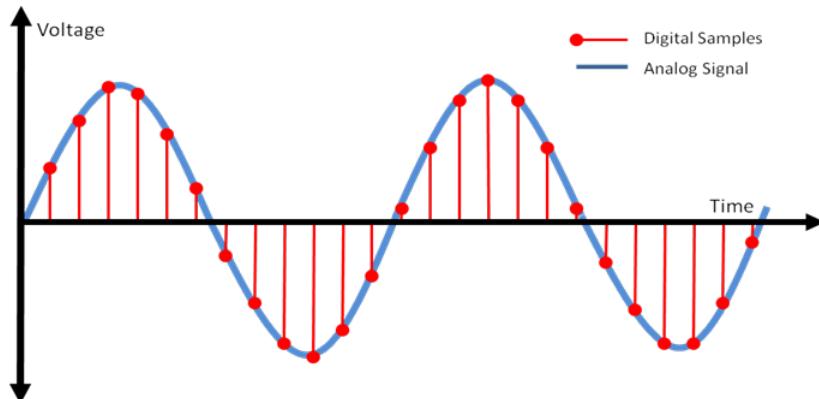
Figur 4.2: Spændingsforsyning, der består af to 1,5 V batterier i et split supply. Den røde prik illustrerer $V+$, den blå $V-$, den sorte Gnd og den brune Vcc .

Krav:

- Skal kunne forsyne aktive komponenter i den analoge del af kredsløbet
- Skal give tegn hvis batteriet ikke leverer en tilstrækkelig spænding til kredsløbet ¹

4.1.4 Analog-to-Digital Converter

Outputtet fra målinger foretaget på biologiske signaler fremstår som et analogt signal, der er kontinuert i tid og amplitude. For at kunne behandle signalet digitalt, skal signalet konverteres fra analog til digital, denne konverteringen sker ved anvendelse af en Analog-to-Digital Converter (ADC). Det analoge signal kvantificeres under konverteringen, hvilket gør, at det digitale signal bliver diskret i tid og amplitude [35]. Dette er illustreret på figur 4.3. Konverteringsprocessen består af sampling og kvantificering [33].



Figur 4.3: Illustration af konvertering fra analogt til digital signal. Den blå graf viser det analoge signal mens den røde graf viser signalet efter det er konverteret til digitalt

Samplingsprocessen sker ved diskretisering i tidsdomænet, hvor det kontinuerte signal konverteres til et diskret signal. Det er vigtigt at vælge en passende samplingsfrekvens for at undgå, at information fra det oprindelige signal går tabt [33]. Ved for høj samplingsfrekvens vil en større mængde data opsamles og derved benytte mere plads og processering [36]. En for lav samplingsfrekvens vil derimod kunne rekonstruere signalet, således kurven ikke kan repræsentere det oprindelige signal, hvilket fremgår som alias [33]. I følge Nyquists sætning er det hensigtsmæssigt, at samplingsfrekvensen er mindst det dobbelte af frekvensen i det oprindelige signal [33]. I praksis anbefales det dog at sample med det ti dobbelte.

¹FiXme Note: Find ud af hvornår spændingsregulatoren gør dette

Kvantificering sker ved diskretisering af amplituden. Det oprindelige signals amplitudeværdier inddeltes ved kvantificering i trin. Værdierne mellem to trin repræsenteres af den samme digitale værdi. Dette gør at flere værdier kan ligge indenfor den samme digitale værdi [33]. Amplitudenevauer, der er tilgængelige til at repræsentere det analoge signal, determineres af antal bits. En ADC med en oplosning på 12-bit inddeltes i 2^{12} , svarende til 4096 niveauer. Den mindste amplitudenevau² som ADC'en kan opnå omtales Least Significant Bit (LSB) og bestemmes ud fra ligning 4.1, hvor FSR, hvilket er en betegnelse for Full Scale voltage Range og n antal bits [35, 36].

$$LSB = \frac{FSR}{2^n} \quad (4.1)$$

Hvis spændingen, der pålægges ADC'en overstiger dens arbejdsområde, vil dette resultere i, at signalet går i mætning [35, 36].³

Krav:

- Skal sample minimum tre inputs
- Skal have en hastighed på XX
- Skal have en oplosning på XX bit
- Skal maksimalt have en LSB på XX

4.2 Digital filtrering

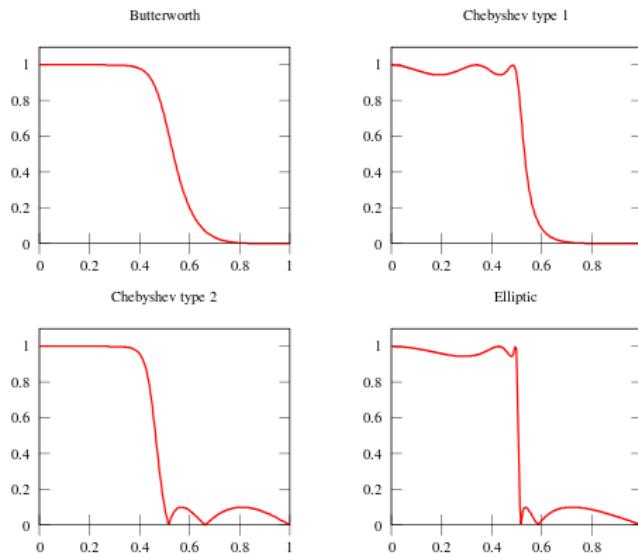
Der findes to former for digital filtrering; Infinite Impulse Response (IIR) og Finite Impulse Response (FIR). Der ses hertil både fordele og ulemper ved begge filtertyper [37].

FIR-filtre kan laves, således de har en lineær fase, og vil altid være stabile. FIR-filtre designes ved at benytte eksempelvis frekvenssampling eller en bestemt vindue-type, hvilket giver en overførselsfunktion. Denne overførselsfunktion kan herved benyttes som et digitalt filter [37].

I modsætning til FIR-filtre, har IIR-filtre ikke en lineær fase, og kan være ustabile. Udover dette har IIR-filtre stejlere sidelobes end et FIR-filter med samme antal koefficenter. Dette betyder, at filteret er mindre hukommelseskrevende og kan arbejde hurtigere. IIR-filtres designprocedure er udledt af den procedure, som de analoge filtre er designet efter. Af denne grund laves IIR-filtre, ligesom analoge filtre, som Butterworth, Chebyshev type 1 og 2 og elliptiske filtre [37]. Disse er illustreret på figur 4.4.

²FiXme Note: Steffens kommentar - sensitivitet?

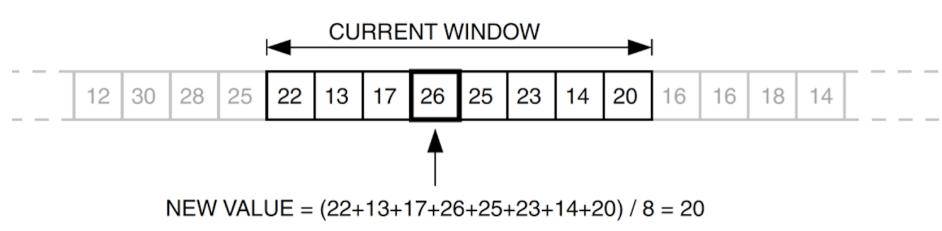
³FiXme Note: Der skal skrives noget om hvor mange bit der er acceptabel samt hastigheden



Figur 4.4: De fire filtertyper; Butterworth, Chebyshev 1 & 2 og elliptisk [38]

Et Butterworth filter er karakteriseret ved ikke at have nogle rippels i hverken pasbåndet eller stopbåndet. Hertil er der, uanset filterorden, en dæmpning på 3 dB ved knækfrekvensen [39]. Et Chebyshev filter har i modsætning til Butterworth et kortere transitionsbånd, som følge af en støjtere dæmpning, dog forekommer der ved et Chebyshev filter enten rippels i pasbåndet eller i stopbåndet. Ved et type 1 Chebyshev filter ses rippels i pasbåndet samt en monoton variation i stopbåndet. For type 2 Chebyshev ses der derimod rippels i stopbåndet og en monoton variation i pasbåndet [39]. Ved det elliptiske filter ses en endnu støjtere dæmpning og dermed et kortere transitionsbånd end ved Butterworth samt Chebyshev filtre. Ved dette filter ses der dog både rippels i pasbånd og stopbånd [39].

Et moving average filter er et simpelt lavpas FIR-filter, der oftest anvendes til at udglatte et array af data, der er samplet. Der kan vælges forskellig filterlængde ved implementeringen af filteret. Et moving average filter er et vindue med en bestemt størrelse, der bevæger sig henad et array med ét element ad gangen. Værdien af det midterste element i vinduet vil erstattes med gennemsnitsværdien for de data, der er i hele vinduet. Det midsterste element i vinduen må dog ikke erstattes med gennemsnitsværdien før vinduet har passeret, således alle gennemsnitsværdier er baseret på de originale data. Det er derfor vigtigt at huske på de beregnede gennemsnitværdier. Det fremgår af figur 4.5 et vindue, der i dette tilfælde har en størrelse på 8. Her tages gennemsnittet af de 8 elementer i vinduet, hvorefter denne værdi erstatter værdien på den 4. plads i vinduet.[?]



Figur 4.5: Gennemsnitsværdien beregnes for et vindue for et moving average filter

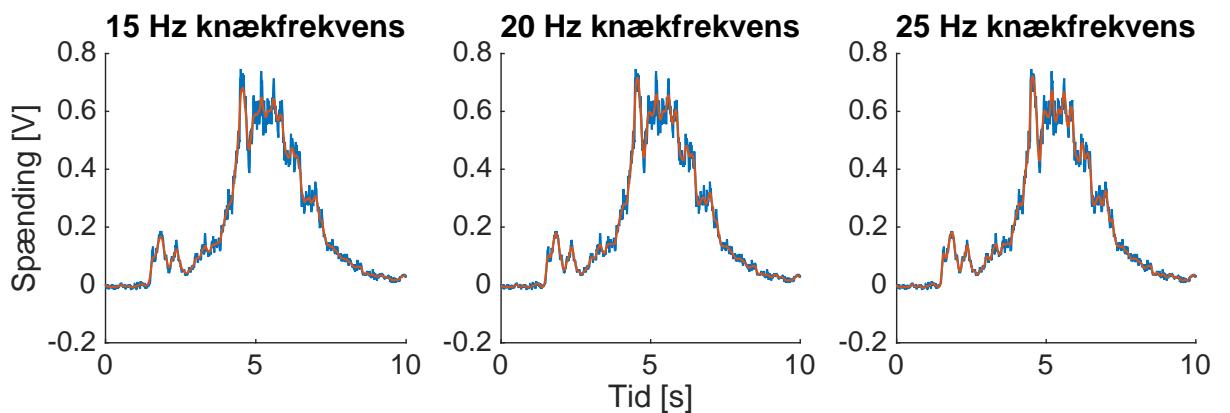
Af ligning 4.2 fremgår formlen for udregningen af et moving average filter.

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i-j] \quad (4.2)$$

Filtrering af EMG-signal

Under pilotforsøget i afsnit A.1 kunne det ses, at udglatningen af signalet fra det analoge envelopefilter ikke er tilstrækkeligt i forhold til, at signalet skal få et exoskelet til at bevæge sig efter en ALS-patientens ben. Da der derfor ønskes at frafiltrere yderligere højfrekvent støj fra det forstærkede, ensrettede og lavpasfiltrerede EMG-signalet, vil et IIR-lavpasfilter være fordelagtigt at implementere, da et FIR-filter kan være for tungt for mikrokontrolleren at arbejde med. Dette andet, og digitale, lavpasfilter skal fungere som endnu et envelopefilter, så signalet bliver yderligere udglattet, men skal stadig følge muskelsignalet under øvelsen. Af denne grund testes forskellige filterdesigns på resultaterne fra pilotforsøget. Dette indebærer, at forskellige knækfrekvenser og filterordener undersøges for at teste, hvordan disse valg påvirker signalet. På denne måde bliver det muligt at beslutte, hvordan filteret skal designes, og hvilke krav der skal opstilles. Filterne designes som Butterworth-konfigurationer, da der ønskes maksimal fladhed i både pas-, transistions- og stopbåndet.⁴

Først vælges filterets knækfrekvens ved at afprøve flere forskellige. Eksempler på disse knækfrekvenser ses på 4.6, hvor 15 Hz, 20 Hz og 25 Hz er repræsenteret.

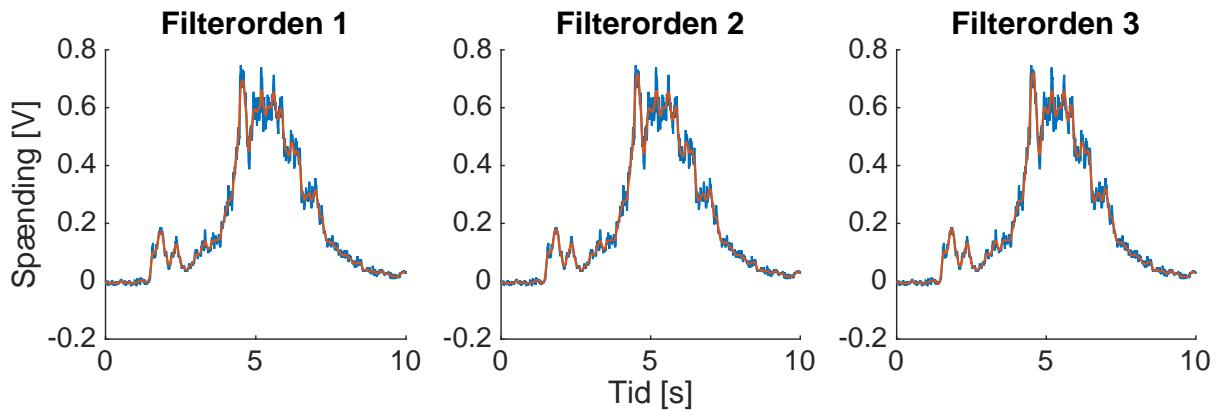


Figur 4.6: De blå linjer på graferne viser resultater fra pilotforsøget. De røde linjer på hver graf viser lavpas IIR-filtre med knækfrekvenser på hhv. 15, 20 og 25 Hz.

Ud fra 4.6 vælges en knækfrekvens på 20 Hz, da denne følger signalet samtidigt med at udglatte spikes, der vil kunne forstyrre signalet til exoskelettet, hvilket de to andre knækfrekvenser ikke formår at gøre.

Herefter bestemmes, på samme måde som ved knækfrekvensen, hvilken filterorden der vil være mest optimal til filteret.

⁴Fixme Note: Hvorfor ønskes dette og vil vi kunne acceptere ripple i båndene? ARGUMENTER



Figur 4.7: De blå linjer på grafen viser resultater fra pilotforsøget. De røde linjer på hver graf viser lavpas IIR-filtre med ordner på hhv. 1, 2 og 3.

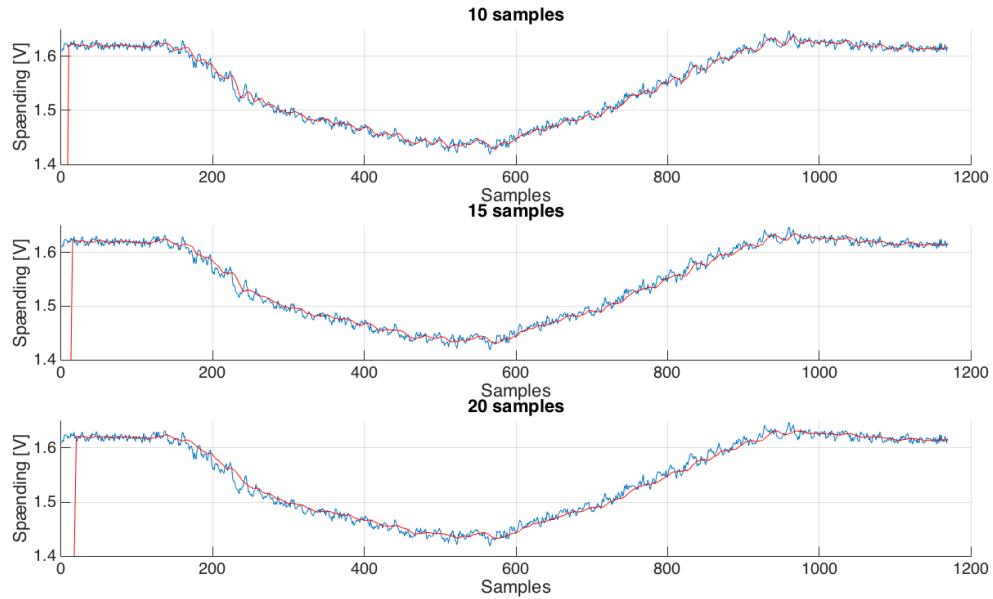
Ud fra 4.7 vælges en filterorden på 2, da denne vurderes til være tilstrækkelig. Der ses ingen større forskel i outputsignalet fra filteret, hvis filterordenen hæves yderligere. Dertil vurderes det, at en filterorden på 1 ikke er tilstrækkelig, da dette filters outputsignal afviger mest fra inputsignalet.

Krav:

- Skal følge inputsignalet mest muligt
- Skal udformes som et Butterworth lavpasfilter
- Skal have en knækfrekvens på 20 Hz
- Skal have en filterorden på 2

Filtrering af accelerometer-signaler

Ud fra accelerometer målingerne i pilotforsøget i afsnit A.1, vælges det at anvende et moving average filter. Dette forventes at give en mere anvendelig repræsentation af vinklen for det givede accelerometer. Ud fra figur 4.8 vælges en filterlængde på 10, da det vurderes, at dette giver en acceptabel forsinkelse af det filtrerede signal uden at påvirke signalet yderligere. Herudover vurderes det at være en passende filterlængde, da det filtrerede signal repræsenterer signalerne fra pilotforsøget i højere grad sammenlignet med de andre filterlængder.



Figur 4.8: De blå linjer på grafen viser resultater fra pilotforsøget. De røde linjer på hver graf viser et moving average filter med filterlængde på hhv. 10, 15 og 20 samples.⁵

Krav:

- Skal muliggøre en repræsentation af vinkler.
- Skal have en filterlængde på 10 samples

4.2.1 Trådløs kommunikation

For at kunne kommunikere trådløst benyttes Cypress BLE modul. Kommunikationstypen BLE [30] er en energi-effektiv form for Bluetooth-teknologi. Bluetooth er en standard for kortdistance trådløs teknologi, som muliggør kommunikation mellem flere enheder gennem radiobølger. Dette betyder, at systemet benytter mindre batteri på Bluetooth-kommunikationen, end almindelig Bluetooth gør. Af denne grund kan der benyttes små batterier, uden det bliver nødvendigt at skifte dem ofte [40].

Ud over de to mikrocontrollere til det endelige system, benyttes en BLE-dongle, der giver mulighed for at en computer kan kommunikere trådløst med systemet. Dette tillader således trådløs test og debugging af systemet. BLE-donglen forsynes via USB-porten på den givne computer med 5 V [30]. Denne form for BLE-kommunikation anvendes for at kommunikere med LEGO mindstorm NXT trådløst, som benyttes som exoskelet.

Krav:

- Mikrocontrolleren skal kommunikere trådløst med LEGO mindstorm NXT
- Skal maksimalt have en forsinkelse på 100 ms⁶
- BLE-dongle skal forsynes via USB

⁶Fixme Note: argumentation??

Kapitel 5

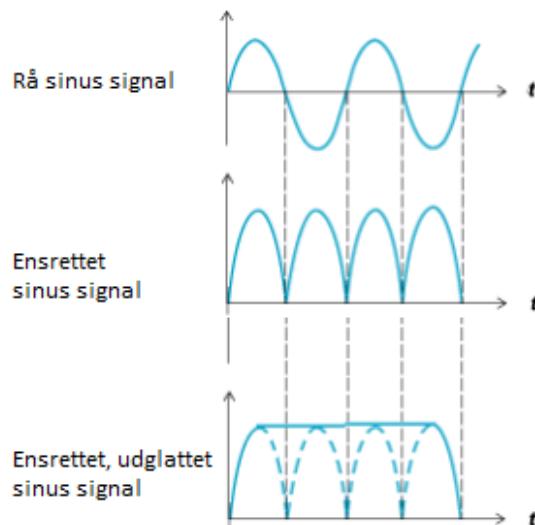
Implementering

I dette projekt tages der udgangspunkt i overflade-EMG, hvortil der placeres elektroder på hudoverfladen.

5.0.2 Elektromyografi

Til behandling af EMG-signalet, anvendes Muscle Sensor V3 fra Advancer Technologies, der fremover vil refereres til som 'EMG-forstærker'. Denne komponent mäter en differens mellem de elektriske potentialer, der måles gennem elektroderne. EMG-forstærkeren overholder de opstillede krav, og kan anvendes direkte med mikrokontrolleren. EMG-forstærkeren består af en instrumenteringsforstærker, et passivt højpasfilter, en full-wave rectifier, et aktivt lavpasfilter og en justerbar forstærker [41].

En illustration af, hvordan EMG-forstærkeren behandler et inputsignal fremgår af figur 5.1.



Figur 5.1: Tre sinussignaler. Henholdsvis et råt, ensrettet og ensrettet samt udglattet. [41].

Med udgangspunkt i figur 5.1 opfattes sinuskurven som muskelsignalet. Dette passerer et passivt højpasfilter bestående af en kondensator, der dæmper DC-støjen og dermed offsettet i signalet. Dette betyder, at muskelsignalet centeres omkring 0 på tids-aksen, hvilket er nødvendigt for at få ensretningen til at virke efter hensigten. Dernæst helbølgeensrettes signalet på midterste graf, ved at invertere signalets negative værdier, så signalet udelukkende består af positive værdier samtidigt med at beholde hele dets originale energi. Herefter envelopefiltreres signalet, hvilket ses som det udglattede signal på nederste graf. Til denne filtrering er der beregnet en knækfrekvens på $1,94 \text{ Hz}$ ud fra ligning 5.1. C og R kan i

databladet for EMG-forstærkeren aflæses til at være henholdsvis $1 \cdot 10^{-6} F$ og $80,6 \cdot 10^3 \Omega$ [41].

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-6} F \cdot 80,6 \cdot 10^3 \Omega} = 1,94 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

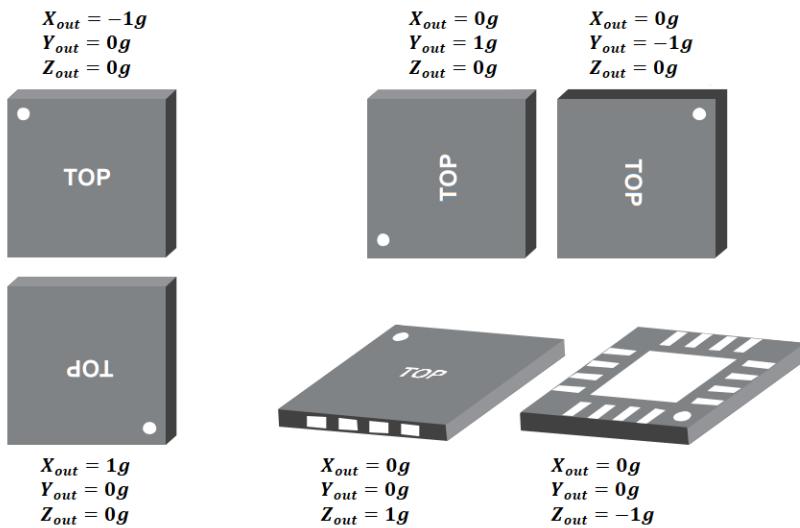
EMG-forstærkeren har en minimum spændingsforsyning på $\pm 3 \text{ V}$ samt en maksimal spændingsforsyning på $\pm 30 \text{ V}$. Herudover er der mulighed for at justere modstanden heri fra $0,1 \Omega$ til $100 \text{ k}\Omega$, hvilket giver et justerbart gain fra 0,002 til 20.700 gange. [41].

5.0.3 Accelerometer

I dette projekt anvendes accelerometeret ADXL335Z fra Analog Devices. Accelerometeret er en 3-aksialt sensor, som har et arbejdsområde på minimum $\pm 3 \text{ g}$, og en spænding som output. Det analoge outputsignal er proportionalt med accelerationen [42].

Accelerometeret har en single-supply spændingsforsyning, som skal ligge mellem $1,8 - 3,6 \text{ V}$. Offsettet er afhængig af spændingen i spændingsforsyningen, da spændingen er $3,4 \text{ V}$, bliver offsettet $1,7 \text{ V}$, som er det halve af spændingsforsyningen. Båndbredden og støjen varierer for akserne. For x- og y-aksen ligger båndbredden mellem $0,5 - 1.600 \text{ Hz}$ og støjen normalt på $150 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ RMS, mens båndbredden for z-aksen ligger mellem $0,5 - 550 \text{ Hz}$ og støjen normalt på $300 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ RMS.¹ [43].

Da accelerometrets output er direkte proportionelt med dets input, afhænger sensitiviteten og offsettet af spændingen i spændingsforsyningen. Ved 3 V er sensitiviteten typisk 300 mV/g [43].



Figur 5.2: Påvirkning af accelerometeret i forskellige positioner. Til venstre måles accelerometeret lodret, til højre øverst vandret og til højre nederst i plan [43].

Ved hældning af accelerometeret vil der ske en acceleration i forhold til tyngdekraften. Hvilken acceleration, der sker, er afhængigt af plan og hældningens retning. Dette fremgår af figur 5.2. Herved vil der ske en ændring i outputspændingen ved en hældning på 0° . Hvis accelerometeret

¹FiXme Note: Den spektrale effekttæthed måles i $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Hvis dette divideres med kvadratroden af båndbredden af signalet $\sqrt{\text{Hz}}$, fås RMS af accelerationsstøjen ved en temperatur på 25°C

eksempelvis befinner sig i den øverste situation på figur 5.2, påvirkes x-aksen med -1 g [44]. Denne sammenhæng og derved patientens hældning kan udtrykkes ved følgende ligning:

$$V_{out} = V_{offset} + sensitivitet \cdot \sin(\phi) \quad (5.2)$$

Hvor ϕ er vinklen i forhold til udgangspunktet for den pågældende akse [44].

5.0.4 Analog til digital konvertering

² Mikrokontrolleren indeholder en SAR ADC, som gör det muligt at konvertere det analoge signal til et digitalt. Det er muligt at konfigurere op til 8 analoge kanaler og læse dem samlet eller kun en enkelt indgang ad gangen. Der kan vælges mellem at anvende 8, 10 og 12 bit og kan sample op til 1 Million Samples Per Sekund (MSPS) med en oplosning på 12 bit. SAR ADC'en understøtter single ended og differentiale indgange. Derudover er det muligt at tilføje en indsprøjtning kanal ved scanningssekvens med firmwarekontrol ved runtime. ADC'en kan den sættes op så den i hardware udfører en gennemsnitsberegning. [45]

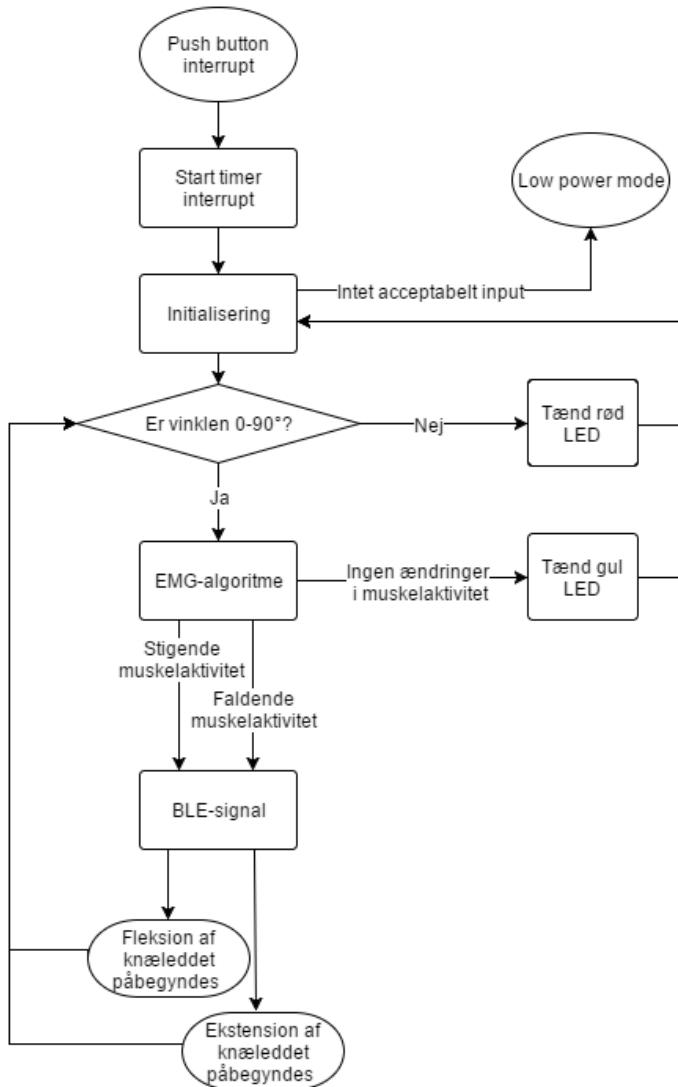
5.1 Flowdiagram

I dette afsnit fremgår implementeringen af systemets blokke afsnit 3.1.2. Flowdiagrammer er anvendt for at visualisere opbygningen og sammenhængen mellem blokkene. Flowdiagrammene er opdelt og består af et overordnet, som beskriver hele processen og et initialiserende samt et, der viser EMG-algoritmen. Udober den visualiserende del vil det blive uddybet, hvilke funktioner de enkelte figurer indeholder. Anvendelsen af de forskellige figurer er beskrevet i ??.

5.1.1 Overordnet flowdiagram

Det analoge signal, som optages af de implemterende sensorer skal konverteres fra analogt til digitalt, hvorved det efterfølgende kan implementeres i softwaren. Det overordnede flowdiagram fremgår af figur 5.3. For at implementering af softwaren vil foreløbe skal der ske et interrupt, som igangsætter de efterfølgende funktioner. Dette igangsætter et timer interrupt, der tæller inden for XX interval. Herefter sker der en initialisering af systemet.

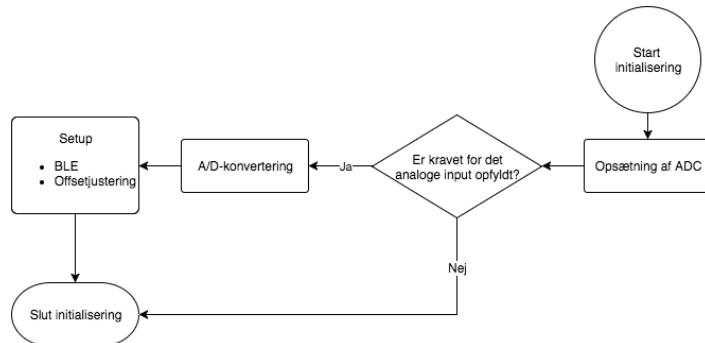
²Fixme Note: Dette afsnit er meget uklart - omformuler og uddyb



Figur 5.3: Initialiserende flowdiagram som viser opbyggelsen af den initialiserende del af systemet

5.1.2 Initialiserende flowdiagram

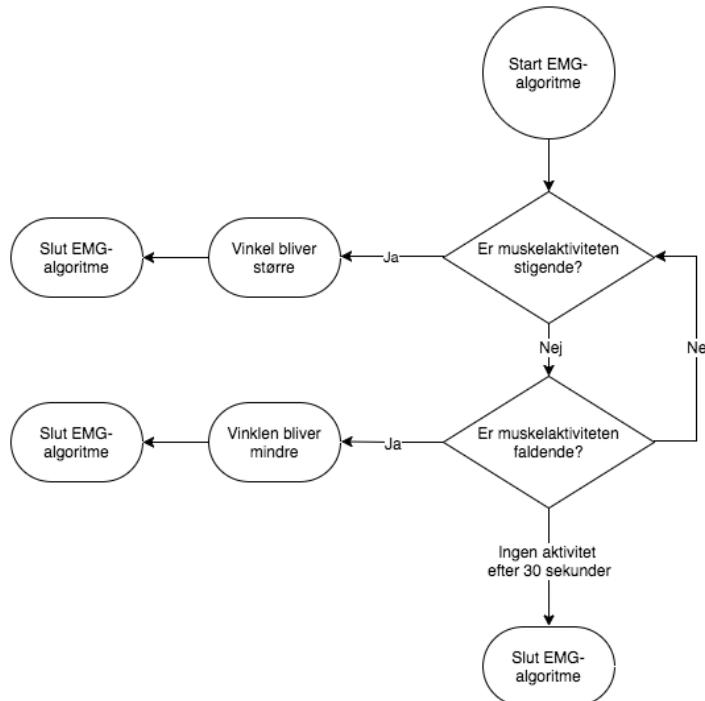
I initialiseringsprocessen, der fremgår af figur 5.4 sker opsætningen af ADC'en, hvorefter det er muligt at se, hvorvidt kravet for det analoge input opfyldes. Ved et analogt input sker en A/D-konvertering, hvor det analoge signal digitaliseres. For at kunne behandle dataen og kommunikere trådløst igangsættes et setup, hvor BLE tilkobes og signalet offsetjusteres. Hvis kravet for det analoge input ikke opfyldes, vil systemet gå i low power mode. Efter setup skal det vurderes, hvorvidt inputtet befinner sig inden for en spænding svarende til 0 til 90 graders vinkel, hvis dette er tilfældet vil signalet starte EMG-algoritmen, hvilket fremgår af det overordnede flowdiagram, der fremgår af figur 5.3. Hvis inputsignalet ikke er tilstrækkeligt, vil en rød LED lyse og initialiseringsprocessen vil starte på ny.



Figur 5.4: Initialiserende flowdigram som viser opbyggelsen af den initialiserende del af systemet

5.1.3 EMG-algoritme

EMG-algoritmen fremgår af figur 5.5. Hvis inputtet svarer til en spændingen mellem 0 til 90 grader vurderes det, hvorvidt muskelaktiviteten er faldende eller stigende. Hvis der ingen muskelaktivitet er, påbegyndes en loop, hvor det igen vurderes om muskelaktiviteten er stigende eller faldende. Hvis der efter 30 sekunder fortsat ingen muskelaktivitet er, afsluttes EMG-algoritmen. Hvis der er en muskelaktivitet sammenlignes den forrige sample med den efterfølgende sample for at vurdere om muskelaktiviteten er stigende eller faldende. Hvis muskelaktiviteten er stigende, vil vinklen blive større, og herved slutter EMG-algoritmen og sender et input videre til BLE, hvorved en fleksion af knæleddet påbegyndes. Hvis muskelaktiviteten er faldende vil vinklen blive mindre, hvilket ligeledes slutter EMG-algoritmen og sender et input videre til BLE, hvorved en ekstension af knæleddet påbegyndes.



Figur 5.5: EMG-algoritmen viser opbyggelsen af EMG-algoritmens del af systemet.

Litteratur

- [1] Københavns Universitet. *Ny viden om alvorlig muskelsygdom*. Københavns Universitet, 2015. URL
<http://sund.ku.dk/nyheder/nyheder2013/ny-viden-om-alvorlig-muskelsygdom/>.
- [2] K. Arahata. Muscular dystrophy. *Neuropathology*, 2014. doi: 10.1046/j.1440-1789.2000.00321.x.
- [3] Muskelsvindsfonden. *Hvad er muskelsvind?* Muskelsvindsfonden, 2016. URL
<http://muskelsvindfonden.dk/om-muskelsvind/hvad-er-muskelsvind/>.
- [4] C. Henschke. Provision and financing of assistive technology devices in germany: A bureaucratic odyssey? the case of amyotrophic lateral sclerosis and duchenne muscular dystrophy. *Department of Health Care Management, Technische Universität Berlin, Germany*, 2012. doi: 10.1016/j.healthpol.2012.01.013.
- [5] M. B. Russell, J. S. Andersen, and et. al. N. Witting. *Amyotrofisk lateral sklerose*. Lægehåndbogen.
- [6] T. Grehl, M. Ruppand, and et. al. P. Buddle. *Depression and QOL in patients with ALS: How do self-ratings and ratings by relatives differ?* Springer Netherlands, 2011. doi: 1573-2649.
- [7] J. Morris. Amyotrophic lateral sclerosis (als) and related motor neuron diseases: An overview. *The Neurodiagnostic Journal*, 2015. doi: 10.1080/21646821.2015.1075181.
- [8] National Institute of Neurological Disorders and Stroke. *Amyotrophic lateral sclerosis (ALS) Fact sheet*. National Institute of Neurological Disorders and Stroke, 2016. URL nih.gov/disorders/amyotrophictlateralsclerosis/detail_ALS.htm.
- [9] R. G. Miller, D. F. Gelinas, and P. O'Connor. et. al. *American Academy of Neurology: Amyotrophic Lateral Sclerosis*. Demos Medical Publishing, 2005. doi: 9781934559062.
- [10] M. E. Drake. *Amyotrophic lateral sclerosis - neurological disorder*. Biotechnology forums, 2015. URL <http://www.biotechnologyforums.com/thread-6946.html>.
- [11] The Muscular Dystrophy Association. *Amyotrophic lateral sclerosis - Stages of ALS*. The Muscular Dystrophy Association, 2016. URL <https://www.mda.org/disease/amyotrophic-lateral-sclerosis/signs-and-symptoms/stages-of-als>.
- [12] C. Neudert, M. Wasner, and G. D. Borasio. Individual quality of life is not correlated with health-related quality of life or physical function in patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Journal of palliative medicine*, 7, 2004. doi: 10.1089/1096621041838443.
- [13] B. Ilse, T. Prell, and et. al. M. Walther. Relationships between disease severity, social support and health-related quality of life in patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Social Indicators Research*, 2015. doi: 10.1007/s11205-014-0621-y.

- [14] F. Pagnini. Psychological wellbeing and quality of life in amyotrophic lateral sclerosis: A review. *International Journal of Psychology*, 48, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/00207594.2012.691977>.
- [15] F. Tramonti., P. Bongioanni., and et. al. C. Fanciullacci. Balancing between autonomy and support: Coping strategies by patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Journal of the Neurological Sciences*, 320, 2012. doi: 10.1016/j.jns.2012.07.006.
- [16] Å. Brandt and L. Jensen. *Grundbog om hjælpemidler: til personer med funktionsnedsættelse*, volume 1. Gyldendal Akademisk, 2010. doi: 9788762808034.
- [17] C. Heffernan, C. Jenkinson, and et. al. T. Holmes. Management of respiration in mnd/als patients: An evidence based review. *Amyotrophic Lateral Sclerosis*, 7, 2006. doi: 10.1080/14660820510043235.
- [18] et. al. O. Gredal. *ALS og vejrtrækning: Hjælpemidler og behandlingsmuligheder*. RehabiliteringsCenter for Muskelsvind, 2001. URL <http://rcfm.dk/wp-content/uploads/2015/02/ALS-og-respiration.pdf>.
- [19] J. A. Erlen. Technology: possibilities and pitfalls. *Orthopedic nursing*, 2003.
- [20] C. J. Yang, J. F. Zhang, and et. al. Y. Chen. A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 222, 2008. doi: 10.1243/09544062JMES936.
- [21] R. Bogue. Robotic exoskeletons: a review of recent progress. *Emerald Group Publishing Limited*, 42, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/IR-08-2014-0379>.
- [22] Region Midtjylland. *Rygmarvsskadet lammet mand lærer at gå*, 2015. URL <http://www.rm.dk/om-os/aktuelt/nyheder/nyhedsarkiv-2015/december/rygmarvsskadet-lammet-mand-larer-at-ga1/>.
- [23] Institut for Muskelsvind. *Muskelsvind*, 2008. URL <http://www.aarhus.dk/~media/Subsites/HandiInfo/Docs/Leksikon/Muskelsvind.pdf>.
- [24] TIS Orthopedics II. *Typical Foot Function During Walking*, 2016 . URL <http://www.therapyedu.com/ortho2/ortho2-02.htm>.
- [25] F. H. Martini, J. L. Nath, and E. F. Bartholomew. *Fundamentals of Anatomy and Physiology*. Pearson, 2012. doi: 978-0-321-70933-2.
- [26] R. F. Escamilla and M.l W. Krzyzewski. Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2001. doi: 0195-9131/01/3301-0127/\$3.00/0.
- [27] Workout Labs. *Chair Squat*, 2015. URL <http://workoutlabs.com/exercise-guide/chair-squat/>.
- [28] B. J. Schoenfeld. Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2010. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181bac2d7.

- [29] Cypress Semiconductor Corporation. *CY8CKIT-142 PSoC 4 BLE module*, 2015. URL <http://www.cypress.com/file/140711/download>.
- [30] Cypress Semiconductor Corporation. *CY8CKIT-042-BLE Bluetooth Low Energy (BLE) Pioneer Kit Guide*, 2014. URL <http://www.cypress.com/file/229211/download>.
- [31] R. H. Chowdhury, M. B. I. Reaz, and M. A . B . M. Ali et al. Surface electromyography signal processing and classification techniques. *Department of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia*,, 2013. doi: 10.3390/s120912431.
- [32] K. G Keenan and R. M Enoka. Electromyography. *Encyclopedia of exercise medicine in health and disease*, 2012. doi: 10.1007/978-540-29807-6_298.
- [33] G. Zouridakis and J. Moore. *Biomedical Technology and Devices Handbook*. 2003. doi: 978-1-4398-7071-6.
- [34] E. Bernmark and C. Wiktorin. A triaxial accelerometer for measuring arm movements. *Applied Ergonomics*, 33, 2002. doi: 10.1016/S0003-6870(02)00072-8.
- [35] J. G. Webster and J. W. Clark. *Medical Instrumentation Application and Design*, volume 3. John Wiles And Sons Ltd., 1998. doi: 0471153680.
- [36] S. Wolf and R. F. M. Smith. *Student Reference Manual for Electronic Instrumentation Laboratories*, volume 2. Prentice Hall, 2004. doi: 978-0130421821.
- [37] J. Parr and D. Blandford. *Introduction to Digital Signal Processing*. Pearson Education, 2012. doi: 9780131394063.
- [38] Wikipedia. *Filter signal processing*. Wikipedia, 2016. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Filter_\(signal_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Filter_(signal_processing)).
- [39] J. W. Nilsson and S. A. Riedel. *Electric Circuits*, volume 10. Pearson Education Limited, 2015. doi: 1-292-06054-9.
- [40] N. Gupta. *Inside Bluetooth Low Energy*. Artech House, 2013. doi: 9781608075799.
- [41] Advancer Technologies. *Three-lead Differential Muscle/Electromyography Sensor for Microcontroller Application*, 2013. URL <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/Muscle%20Sensor%20v3%20Users%20Manual.pdf>.
- [42] Analog Devices. *EVAL-ADXL335Z*. Analog Devices, 2009. URL <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/EVAL-ADXL335Z.pdf>.
- [43] Analog Devices. *ADXL335*, 2010. URL <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>.
- [44] M. Clifford and L. Gomez. *Measuring Tilt with Low-g Accelerometers*, 2005. URL http://www.nxp.com/files/sensors/doc/app_note/AN3107.pdf.
- [45] Cypress Semiconductor Corporation. *PSoC 4 Sequencing Successive Approximation ADC*, 2014. URL <http://www.cypress.com/file/135111/download>.

- [46] H. J. Hermens, B. Freriks, and R. Merletti et al. *SENIAM 8: European Recommendations for Surface Electromyography*. Roessingh Research and Development, 1999. doi: 90-75452-15-2.
- [47] PA Foot. *Ankle Fracture*, 2016. URL <http://pafootdoctors.com/ankle-fractures-stress-fractures-broken-ankle/>.

Bilag A

Bilag

A.1 Pilotforsøg

I dette bilag beskrives pilotforsøgets fremgangsmåde samt, hvilke resultater, der opsamles.

A.1.1 Formål

Dette pilotforsøg har til formål at kunne præcisere samt optimere kravspecifikationerne i de enkelte blokke, hvorved uklare parametre forventes besvaret ud fra pilotforsøgets resultater. Disse parametre omfatter identificering af støjsignaler samt EMG-signalets frekvensområde, da der ses variation i litteraturen. Parametrene vil forsøges besvaret ud fra målinger ved udførelse af en squat-øvelse. Hertil anvendes elektroder og to accelerometre som sensorer. På baggrund af dette opstilles følgende formål:

EMG-måling

1. Opsamling af signal fra rectus femoris
 - Identificering af frekvensområde
 - Identificering af støjsignaler

Accelerometer måling

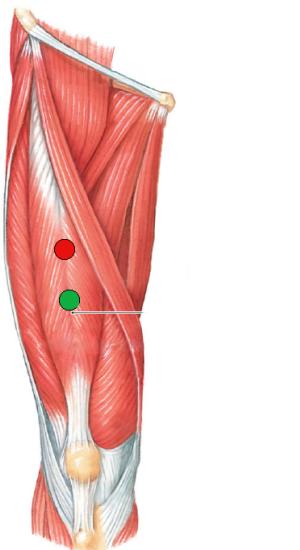
1. Identificering af støjsignaler
2. Identificering af knæleddets vinkel

A.1.2 Materialer

- EMG-forstærker, Muscle Sensor V3
- Elektroder
- Desinfektionsservietter
- Skraber
- To accelerometre ADXL335Z
- Tape
- Tusch
- Breadboards
- Linial
- Vinkelmåler
- Computer med Scopelogger og MATLAB
- Ni USB-6009
- USB-isolater USI-01

A.1.3 Forsøgsopstilling

Til forsøget benyttes en EMG-forstærker, der mäter en differensmåling over rectus femoris. Hertil anvendes én positiv-, negativ- samt én referenceelektrode. Forinden påsættelse af elektroder, prepereres huden for således at fjerne hår samt døde hudceller. For at identificere elektrodeplacering på musklen tages der udgangspunkt i SENIAM's anvisning for elektrodeplacering [46]. Elektroderne placeres midt for linjen mellem anterior spina iliaca superior og den superior del af patella [46]. Placeringen af elektroderne illustreres af figur A.1.



Figur A.1: Låret set anteriot. Placering af positiv (rød) samt negativ (grøn) elektrode ses på rectus femoris [25].

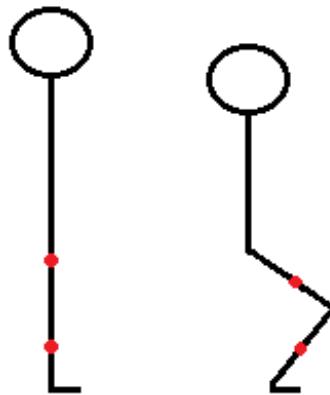
Referenceelektroden placeres, ligeledes efter SENIAM's anvisninger, omkring anklen [46]. Placeringen af reference elektroden ses af figur A.2.



Figur A.2: Placering af referenceelektrode omkring anklen [47].

Til forsøget benyttes endvidere to accelerometre, som mäter i X-, Y- samt Z-aksen. Disse benyttes for at kunne identificere vinklen af knæet under øvelsen. For så vidt muligt at stabilisere accelerometrene under udførelsen af forsøget, placeres disse på breadboards. Som det fremgår af figur A.3 placeres det ene accelerometer midt på den laterale side af låret,

parallelt med femur. Det andet accelerometer placeres midt på den laterale side af underbenet, parallelt med tibia. Disse breadboards påsættes benet ved brug af tape. Knæets vinkel i oprejst position mäter 180° , hvilket svarer til en 0 g-påvirkning. Vinklen af knæet ændres i takt med udførelse af en squat-øvelse, hvorved g-påvirkningen bevæger sig mod 1. Den samlede vinkel af knæet bestemmes ud fra de to accelerometres parametre. Udregningen for dette kan ses i afsnit A.3.



Figur A.3: Placering af accelerometrene på låret samt underbenet. Disse placeringer er markeret med rød. Personen til venstre står i oprejst position, hvilket svarer til at knæets vinkel er 180° . Personen til højre sidder i en squat-øvelse, hvilket svarer til knæets vinkel som maksimalt er 90° .

Til identificering af støj fra EMG-forstærkeren fortages der baselinemålinger, som senere analyseres via en frekvensanalyse. Det samme gør sig gældende for identificeringen af EMG-signalets frekvensområde. Dette vil foregå under udførelsen af en squat-øvelse. En squat-øvelse defineres, således den kan gengives på tværs af forsøgspersonerne.

1. Forsøgspersonen står i oprejst position. Fødderne placeres med en afstand svarende til ens skulderbredde, hvortil tåspidserne peges let ud til siderne
2. Armene placeres over kors, som vist på figur 2.6
3. Hofte og knæ bøjes således kroppen sænkes kontrolleret. Dette fortsættes indtil en vinkel på maksimalt 90° af knæet er opnået.
 - Ryggen holdes ret under squat-øvelsen
 - Knæene må ikke gå ud over tåspidserne
4. Kroppen returneres til udgangspunktsposition

En illustration af squat-øvelsen ses af figur 2.6.

En nedadgående squat-øvelse defineres som punkt 1 – 2 i overstående, hertil forbliver forsøgspersonen i en siddende squat indtil den givne måling er gennemført.

For at præcisere øvelsen således alle forsøgspersoner så vidt muligt rammer den samme vinkel på maks 90° af knæet ved gentagende squat-øvelser, måles hver enkel forsøgsperson forinden forsøget udføres. Målingen foregår ved at placere forsøgspersonen på et givent sted med siden til en væg, hvorved en squat-øvelse til maksimum 90° udføres. Vinklen måles med en vinkelmåler, hvortil der påsættes tape på væggen, som udgør underbenet samt lårets position. Ved udførelsen af forsøget irtettesætter forsøgspersonen sig efter det påsatte tape på væggen,

for således at genskabe squat-øvelsen med mindst mulig afvigelse. Under dette kontrollerer øvrige deltager forsøgspersonens position samt squat-bevægelse.

A.1.4 Oversigt af forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen ses nedenfor i punktform, for således at give bedre overblik herover.

- Identificering af musklen rectus femoris
- Huden præparereres ved fjernelse af hår og døde hudceller samt desinficering
- Elektroderne påsættes
 - Positiv og negativ på rectus femoris
 - Reference på anklen
- Accelerometrene placeres
 - Accelerometer 1: midt på den laterale side af låret, parallelt med femur
 - Accelerometer 2: midt på den laterale side af underbenet, parallelt med tibia
- Accelerometrene vælges til at måle i X-, Y- og Z-aksen

A.1.5 Fremgangsmåde

Forsøgspersonen placeres på et fast punkt under forsøget. Øvelserne gentages tre gange, hvoraf der ud fra målingerne foretages en senere databehandling.

Pilotforsøg

Siddende baselinemåling

- 10 sekunders måling, hvor forsøgspersonen sidder afslappet på et bord med benene hængende frit

Stående baselinemåling

- 10 sekunders måling, hvor forsøgspersonen står oprejst

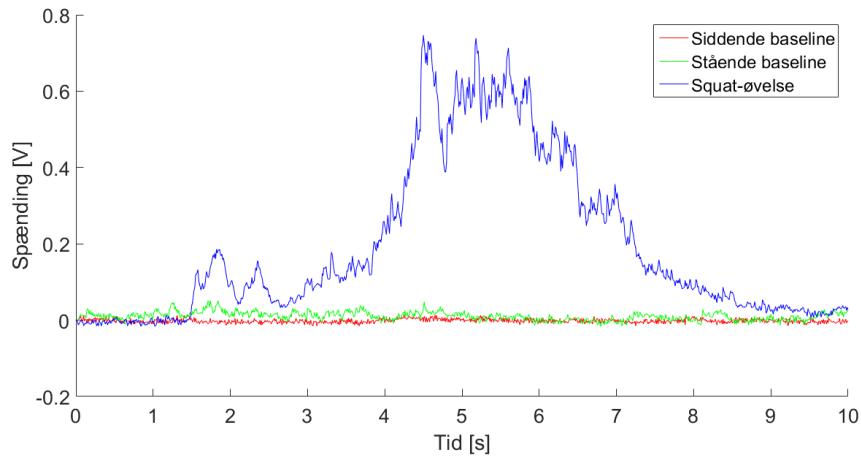
Squat-øvelse

- Måling i en squat-øvelse
 - 1 sekunds stående baseline oprejst
 - 4 sekunder nedadgående squat
 - 4 sekunder opadgående squat
 - 1 sekunds stående baseline oprejst

A.2 Databehandling

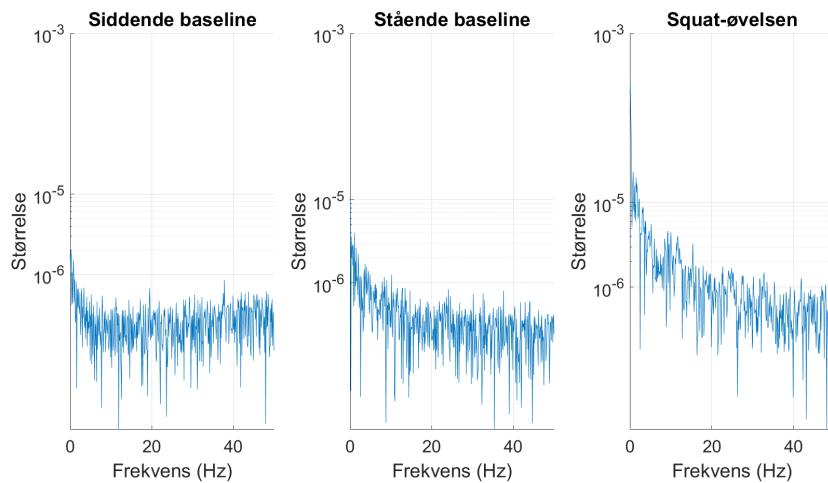
I det præsenterede data tages der udgangspunkt i forsøgsperson 1. Dette er som følge af, at der i EMG-målingerne for forsøgsperson 2 ses et udsving i EMG-signalet, der ligner rystelser, hvilket er grundet rystende ben. Til trods for disse muskelrystelser ses der ligheder mellem målingerne for forsøgspersonerne.

Resultater for EMG-målinger



Figur A.4: EMG-målinger af siddende baseline, stående baseline og squat-øvelse.

Ud fra figur A.4, ses baseline samt squat-øvelse for forsøgsperson 1. Ved squat-øvelsen ses en stigning ved $1,5\text{ s}$, hvilket relateres til forsøgspersonens nedadgående bevægelse til maks 90° flektion af knæet under squat-øvelsen. Yderligere ses et fald i amplitude ved ca. 6 s , der relateres til en opdagående bevægelse til øvelsens udgangsposition.

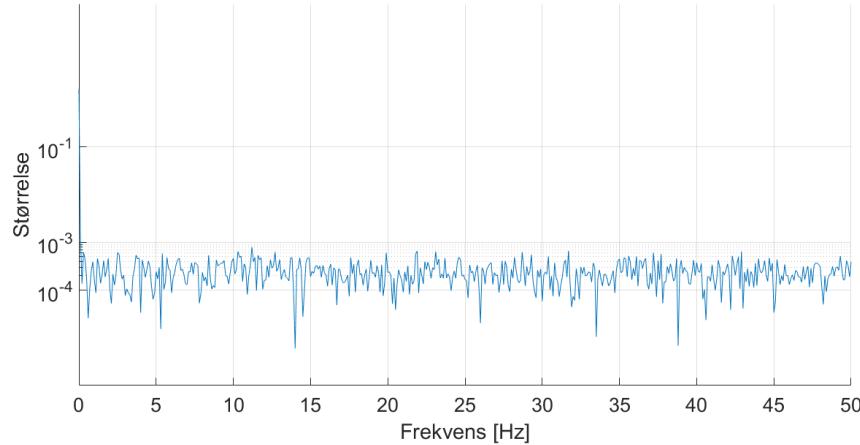


Figur A.5: Frekvensanalyse med semilogaritmisk skala på Y-aksen af EMG-måling for siddende baseline, stående baseline og ved squat-øvelse.

Der er foretaget en frekvensanalyse af siddende og stående baselinemåling for at identificere støjsignaler. Dette ses af figur A.5, hvor der yderligere fremgår en frekvensanalyse af squat-øvelsen for identificering af frekvensområdet for bevægelsen. For graferne er der foretaget en semilogaritmisk skala på Y-aksen, for således at tydeliggøre de lavfrekvente signaler. Det ses ud fra målingerne et højere støjniveau på squat-øvelsen end baselinemålingerne, dette støjniveau er dog relativt lav. Der observeres en DC-komponent ved 0 Hz , hvilket svarer til det offset, der er på signalet. Det fremgår ikke af figuren, hvorvidt der er 50 Hz støj på signalet, da der samples med 100 Hz , hertil er Nyquist-frekvensen 50 Hz . Herudover viser frekvensanalysen ikke amplituden af 50 Hz støj, dog antages den for at være tilstede, da dette er en kendt

støjfaktor. Af frekvensanalysen for squat-øvelsen identificeres frekvensområdet som værende relativt lavfrekvent $0,4 - 10 \text{ Hz}$, hvorefter støjsignalerne dæmpes gradvist. Dette kan relateres til, at EMG-forstærkeren har en knækfrekvens på $1,94 \text{ Hz}$, hvortil udregningen ses i ??.

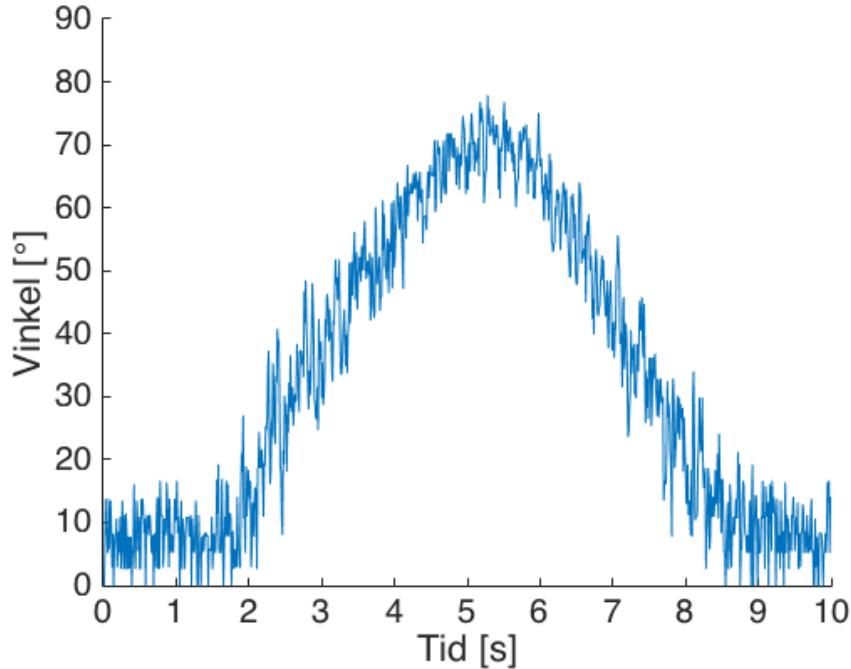
Resultater for accelerometer målinger



Figur A.6: Frekvensanalyse af baselinemåling for accelerometeret, hvor Y-aksen er en semilogaritmisk skala

Af figur A.6 ses frekvensanalysen for accelerometeret i X-aksen. Ud fra dette ses yderligere støjsignaler end DC-komponent, der er dæmpet ved $0,1 \text{ Hz}$. Grundet samplingsfrekvensen er der ingen 50 Hz støj, hvor årsagen er beskrevet under frekvensanalysen for EMG-målingen.

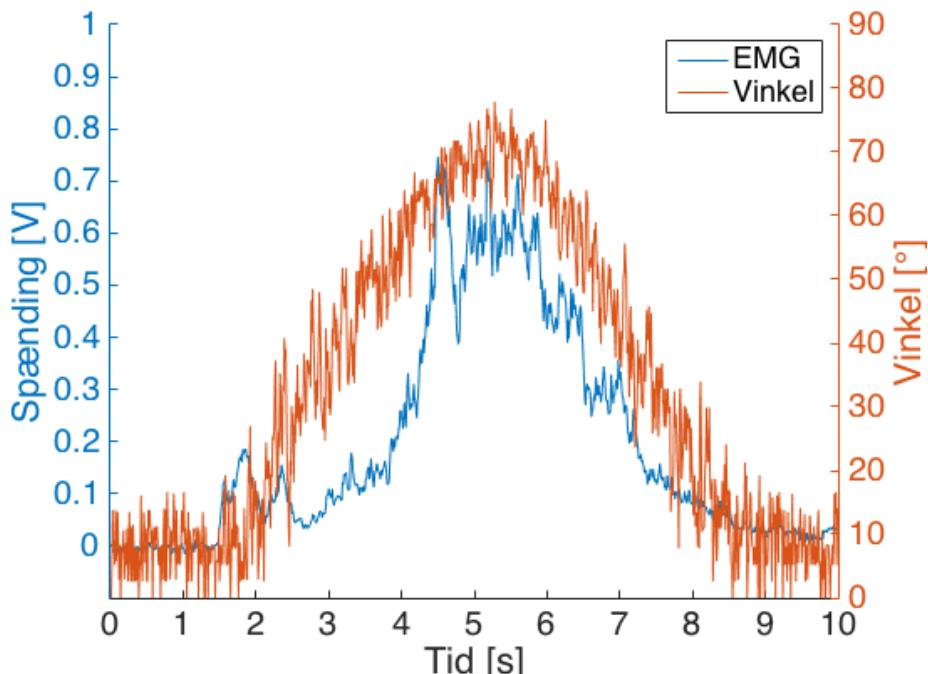
Spændingerne fra accelerometeret repræsenterer vinklerne for femur og tibia i Y-aksen. Denne spændingsværdi ønskes omregnet til grader, for således at undersøge vinklen af knæet. Til at omregne spændingen fra begge accelerometre til grader anvendes målingerne anvendt i afsnit A.3.6. Disse resultater er anvendt i funktionerne, hvor lineær interpolation benyttes. EMG-spændingerne for squat-øvelsen er hertil anvendt i funktionerne, således graderne for EMG-målingen findes. Resultaterne fra omregningen visualiseres af figur A.7.



Figur A.7: Vinkler fra accelerometrene under squat-øvelsen

Det fremgår af figur A.7, at forsøgspersonen udfører en fleksion af knæet under squat-øvelsen når ned til en grad på ca. 78° .

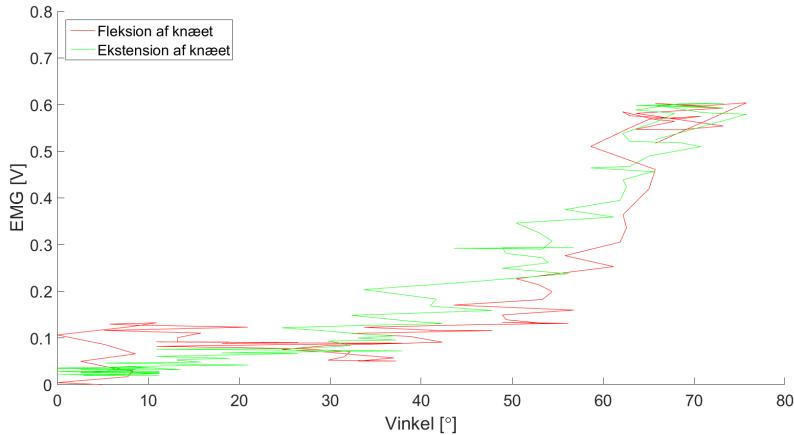
For at kunne se relationen mellem udslag i EMG samt for accelerometrene, plottes begge disse målinger på samme graf. Dette ses af figur A.8.



Figur A.8: EMG-signal og vinkler fra acceleromtre under squat-øvelsen

For at se sammenhængen mellem muskelaktivitet og de forskellige vinkler, plottes EMG

signalerne som funktion af vinklerne. Det fremgår af figur A.9, at der er en sammenhæng mellem vinklerne og mængden af muskelaktivitet. Ved fleksion bliver vinkelen større og muskelaktiviteten stiger dermed. Ved ekstension, hvor vinkelen bliver mindre, falder muskelaktiviteten.



Figur A.9: EMG-målingen vist i forhold til vinkler

A.3 Test af accelerometer

I dette projekt anvendes to accelerometere, som er beskrevet i afsnit 5.0.3. Disse anvendes som sensorer til opsamling af acceleration, der giver et outputsignal i form af en spænding. For at kunne anvende et accelerometer er det vigtigt at kende forskellige tolerancer i forhold til deres datablade, hvorfor et forsøg udføres for at kunne tage højde for disse parametre.

A.3.1 Formål

Denne test har til formål at identificere en given spænding for forskellige vinkler. Derudover identificeres offsettet og sensitiviteten for at teste accelerometerenes tolerancer.

1. Test af linearitet
2. Identificering af offsettet for accelerometerne

A.3.2 Materialer

- Accelerometre ADXL335
- Tape
- Vaterpas
- Breadboard
- Vinkeltester, fremgår af figur A.10
- Computer med Scopelogger og MATLAB
- Spændingsforsyning på 3, 4 V
- NI USB-6009

A.3.3 Metode

Der opstilles en metode til hvert formål i afsnit A.3.1. Formål 1 opfyldes ved deltest 1, og formål 2 og 3 opfyldes ved deltest 2. Der testes ligeledes for støj i afsnit A.2.

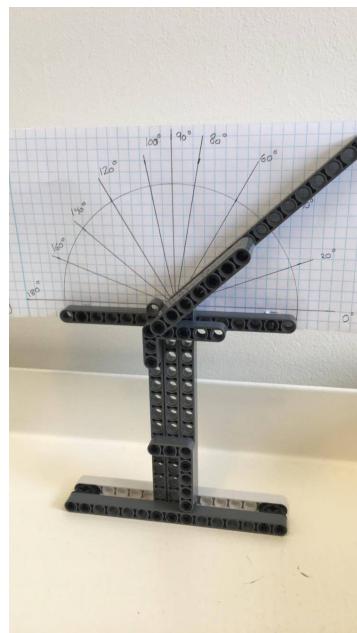
1. Der foretages målinger i accelerometerets tre akser i 11 positioner, hvorved der testes for linearitet
2. Der foretages målinger i accelerometerets tre akser i de seks positioner, hvorefter offset kan bestemmes ud fra målingerne. Offsettet bestemmes ud fra accelerometerets 0 g-påvirkning, der måles vinkelret på planet, hvilket svarer til at accelerometeret ikke udsættes for tyngdekraften.

A.3.4 Forsøgsopstilling

Hver forsøgsopstilling udføres for begge accelerometre.

Forsøgsopstilling af deltest 1

- Accelerometeret påsættes vinkeltesteren på figur A.10
 - Accelerometeret indstilles efter fremgangsmåden for hver øvelse, som er illustreret i afsnit A.3.5
- Accelerometeret tilkobles NI USB-6009
- NI USB-6009 tilkobles en computer



Figur A.10: Vinkeltester, som anvendes under forsøget til at holde accelerometeret i bestemte vinkler.

Forsøgsopstilling af deltest 2

- Accelerometeret påsættes breadboardet med tape
- Accelerometeret stilles skiftevis vertikalt og horisontalt, således de forskellige akser testes
 - Accelerometeret placeres efter fremgangsmåden for hver øvelse, hvilket er illustreret af afsnit A.3.5
- Accelerometeret tilkobles NI USB-6009
- NI USB-6009 tilkobles en computer

A.3.5 Fremgangsmåde

Fremgangsmåde for deltest 1

Hver vinkel måles og samples for hvert accelerometer i hver akse i 10 sekunder ved 100 Hz , hvilket er udregnet ud fra Nyquist. Samplingsfrekvensen er dermed det dobbelte af båndbredden for accelerometrene [43]. Målingerne er udført for begge accelerometre i henholdsvis X-, Y- og Z-aksen, og vinklen ændres ved at justere vinkeltesteren på figur A.10, så følgende vinkler fremgår af modellen:

- 0° til 180° med 20° 's intervaller
- 90°

Fremgangsmåde for deltest 2

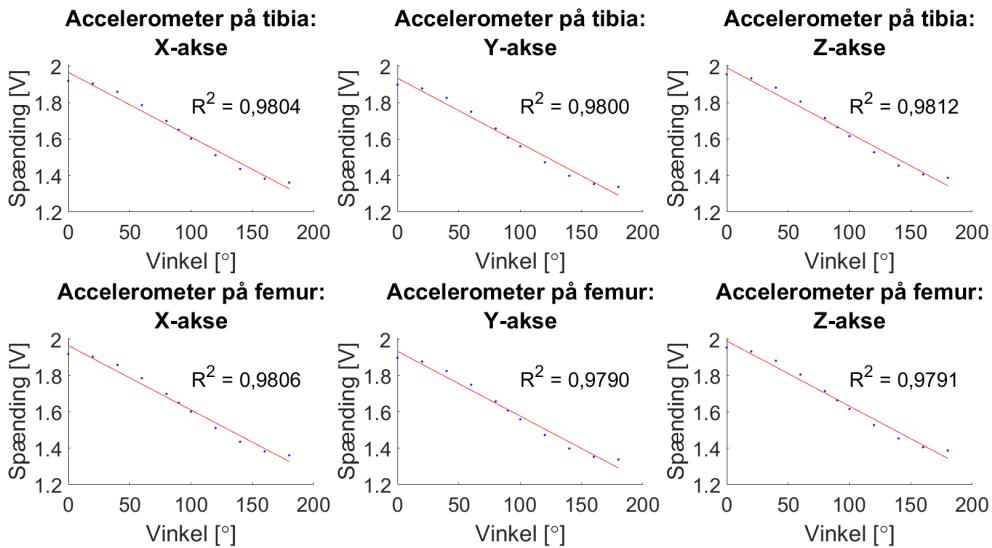
Der foretages målinger i seks forskellige positioner. Hver position måles tre gange og samles i 10 sekunder ved 100 Hz . De forskellige positioner er illustreret på figur 5.2, og er som følger:

- Accelerometeret stilles lodret opad
- Accelerometeret stilles lodret nedad
- Accelerometeret stilles vandret mod højre
- Accelerometeret stilles vandret mod venstre
- Accelerometeret ligges plan på bordet med toppen opad
- Accelerometeret ligges plan på bordet med toppen nedad

A.3.6 Resultater

Resultater for deltest 1

For deltest 1 udføres en lineær regression, hvor data fra målingerne af begge accelerometres output ved hver målt vinkel plottes som en funktion af vinklerne. Derefter udføres den lineære regression, og R^2 -værdien findes, så det kan bestemmes, om punkterne er lineære. Plots, regressioner og R^2 -værdier kan ses på figur A.11.



Figur A.11: Lineær regression for hver akse på hvert accelerometer. Målingerne er plottet med blå prikker, og den lineære regression er illustreret med rød. R^2 -værdien er angivet for hvert plot.

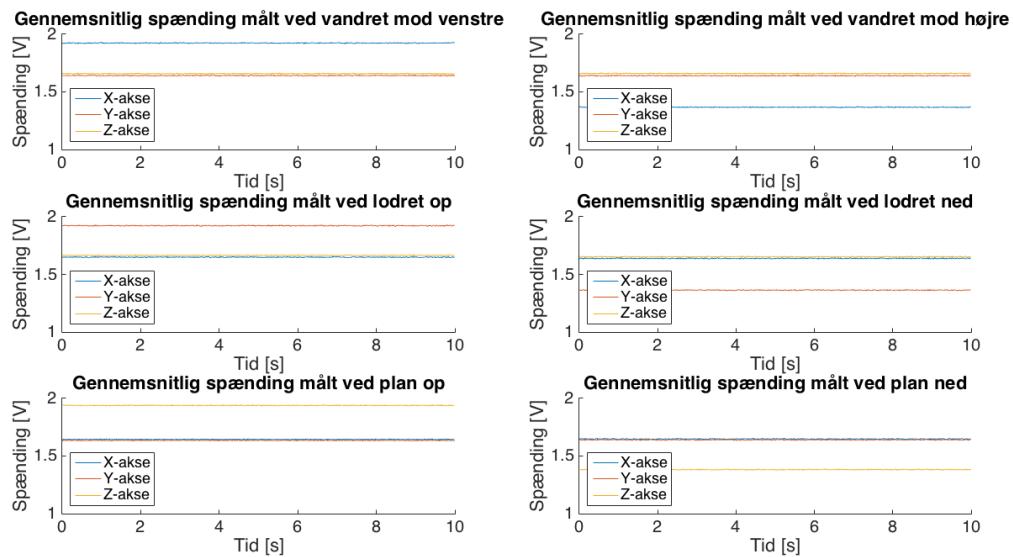
Ud fra figur A.11 kan det ses, at R^2 -værdierne er mellem 0,9790 og 0,9812. Graferne ville have en perfekt lineær sammenhæng, hvis $R^2 = 1$. Det kan derfor siges, at der her ses en lineær tendens ud fra disse målinger, selvom punkterne på alle seks grafer viser en s-formet bølge omkring regressionslinjen, hvilket giver afvigelserne fra den perfekte lineære sammenhæng.

Resultater for deltest 2

De viste resultater heri er for det ene accelerometer¹, da offsettet ændrer sig hver gang, der udføres et forsøg. Det vil derfor ikke være muligt at fastsætte konstante værdier for offset, hvorfor det centrale at udlede er metoden til at bestemme værdierne.

Ud fra de tre målinger foretaget i de seks forskellige positioner beregnes den gennemsnitlige værdi af målingerne på de forskellige akser, herefter plottes disse i en graf. På denne måde bliver det muligt at se, hvilken akse der påvirkes mest under øvelsen. Målingerne fremgår af figur A.12.

¹FiXme Note: resultaterne er fra det røde accelerometer



Figur A.12: Påvirkningen af accelerometrets tre akser ved de seks forskellige positioner.

Offset bestemmes ud fra de målinger, hvor accelerometeret påvirkes med 0 g. Den akse, hvor accelerometeret påvirkes med 0 g i alle seks forskellige positioner fremgår af figur 5.2. Resultaterne fra målingerne fremgår af tabel A.1.

Målt retning	Målt offset	Målt afvigelse
Positiv	1,6362 V	3,75%
Negativ	1,6413 V	3,45%

Tabel A.1: Offsettet for accelerometeret, samt dens afvigelse i forhold til databladet bestemt for Y-aksen. Accelerometeret udsættes for en 0 g-påvirkning.