

---

---

# Bodyaugmentation som hjælpemiddel til aflastning af ALS-patienter

Projektrapport 4. semester

---

Skrevet af  
Gruppe 16gr4405





School of Medicine and Health  
Sundhedsteknologi  
Fredrik Bajersvej 7A  
9000 Aalborg  
<http://www.smh.aau.dk>

**Titel**

Bodyaugmentation som hjælpemiddel til aflastning af ALS-patienter

**Projekt**

Behandling af fysiologiske signaler

**Projektperiode**

01-02-2016 - 27-05-2016

**Projektgruppe**

16gr4405

**Gruppemedlemmer**

Linette Helena Poulsen  
Mads Kristensen  
Maria Kaalund Kroustrup  
Nirusha Jeevanandan  
Signe Hejgaard Kristoffersen

**Vejleder**

Steffen Frahm

**Synopsis**

The purpose of this project is to examine the possibility to control an exoskeleton during a squat exercise to support amyotrophic lateral sclerosis patients' muscles. This study consists of measurements from the muscle, rectus femoris, and two accelerometers. The muscle activity shows the patients movement during a squat. The inputs signals from the accelerometers are calculated to show the knee's angle. A digital has system has been designed, implemented and tested to evaluate the system. The study is based on grey literature, articles, books and tests which has been analyzed and interpreted. It is not possible to use the system to help the patients currently since the prototype has not been developed. The test of the system shows that it possible to detect whether the user is moving upwards or downwards during a squat exercise, when the angle of the knee is between  $90^\circ$  og  $180^\circ$ , by analysing the input signals from the rectus femoris and the accelerometres.

**Antal sider: ???**

**Antal bilag: ???**

**Afleveret: 27-05-2016**

*Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.*

# Forord

---

Denne rapport og dette projekt er udarbejdet af gruppe 16gr4405, 4. semesters-studerende på Sundhedsteknologi, Aalborg Universitet. Projektet er udarbejdet i perioden mellem den 1. februar og den 27. maj 2016 og tager udgangspunkt i semestrets tema *Behandling af fysiologiske signaler*. Yderligere er projektet udarbejdet på baggrund af projektforslaget *Udvikling af et EMG-baseret kontrolsystem til body-augmentation systemer*. Ifølge studieordningen for Sundhedsteknologi på 4. semester har projektet følgende formål: "*Med udgangspunkt i opnået viden, færdigheder og kompetencer på 3. semester arbejdes der med teori og metoder til opsamling og præsentation af signaler fra kroppen, men nu med fokus på digital signalbehandling og datakommunikation*". [1]

Der rettes tak til vejleder Steffen Frahm for god vejledning og et godt samarbejde. Herudover rettes der tak til John Hansen for hjælp til datakommunikation samt programmering.

## Læsevejledning

Projektrapporten er opdelt i 7 kapitler samt tilhørende bilag. Det første kapitel indeholder en indledning til projektet samt den initierende problemstilling. Andet kapitel består af problemanalysen, der er udarbejdet på baggrund af den initierende problemstilling. Problemanalysen leder op til en projektafgrænsning samt problemformulering. Fra tredje til sjette kapitel beskrives problemløsningen, der består af systemudvikling, løsningsstrategi, teori og design, implementering samt test af de enkelte blokke og det samlede system. Det syvende og sidste kapitel består af syntese, der indeholder en diskussion, konklusion samt perspektivering af projektet. Dette efterfølges af bilag samt litteraturlisten.

I dette projekt anvendes Vancouver-metoden til refereringen af kilder. Kilderne referes som tal, der er omgivet af kantede parenteser. I litteraturlisten ses kilderne, der eksempelvis er angivet med forfatter, titel og årstal. Hvis kilden er angivet før et punktum, er der referet til den forrige sætning. Hvis kilden er angivet efter punktum, er der refereret til hele afsnittet. Forkortelser i rapporten er skrevet i en parentes første gang, hvorefter forkortelsen bliver anvendt i den resterende del af rapporten.

Denne projektrapport er udarbejdet i LaTex. Herudover er der anvendt MATLAB til at visualisere diverse grafer. Yderligere er PSoC Creator anvendt til behandling af data samt programmering af systemet.

## Flowdiagram-håndtering

For at kunne forstå og læse flowdiagrammerne, som anvendes i projektet, forklares betydningen af de forskellige former. De forskellige former fremgår af figur 1.



**Figur 1:** Illustration af de anvendte former i flowcharts.

Cirklen indikerer start og stop af funktion. Firkanten indikerer en beslutning. Diamant formen indikerer en midtvejs proces.

# Indholdsfortegnelse

---

<b>Kapitel 1 Indledning</b>	<b>1</b>
1.1 Initierende problemstilling . . . . .	1
<b>Kapitel 2 Problemanalyse</b>	<b>2</b>
2.1 Amyotrofisk lateral sklerose . . . . .	2
2.1.1 Livskvalitet hos ALS-patienter . . . . .	3
2.2 Hjælpemidler til brug ved ALS . . . . .	4
2.2.1 Teknologiske hjælpemidler . . . . .	5
2.2.2 Body augmentation som hjælpemiddel . . . . .	5
2.3 Gangfunktion . . . . .	5
2.3.1 Knæets opbygning . . . . .	6
2.3.2 Knæets funktion . . . . .	7
2.4 Problemafgrænsning . . . . .	8
2.4.1 Problemformulering . . . . .	8
<b>Kapitel 3 Systemudvikling</b>	<b>9</b>
3.1 Systembeskrivelse . . . . .	9
3.1.1 Overordnet krav til systemet . . . . .	9
3.1.2 Blokdiagram . . . . .	9
3.2 Løsningsstrategi . . . . .	10
<b>Kapitel 4 Teori og design</b>	<b>11</b>
4.1 Analog del . . . . .	11
4.1.1 Opsamling af EMG-signaler . . . . .	11
4.1.2 Opsamling af accelerometer-signaler . . . . .	12
4.1.3 Spændingsforsyning . . . . .	12
4.2 Digital del . . . . .	13
4.2.1 Analog-to-Digital Converter . . . . .	13
4.2.2 Digital filtrering . . . . .	14
4.2.3 Vinkelberegning . . . . .	19
4.2.4 EMG-algoritme . . . . .	20
4.2.5 Trådløs kommunikation . . . . .	20
<b>Kapitel 5 Implementering</b>	<b>22</b>
5.1 Analog del . . . . .	22
5.1.1 Opsamling og behandling af EMG-signaler . . . . .	22
5.1.2 Opsamling af accelerometer-signaler . . . . .	23
5.1.3 Spændingsforsyning . . . . .	24
5.2 Digital del . . . . .	25
5.2.1 Analog-to-Digital Converter . . . . .	25
5.2.2 Digital filtrering . . . . .	26

5.2.3	Vinkelberegning . . . . .	27
5.2.4	EMG-algoritme . . . . .	29
5.2.5	Trådløs kommunikation . . . . .	29
5.2.6	Low power mode . . . . .	30
5.2.7	Flowdiagram . . . . .	30
5.2.8	Samlet system . . . . .	34
<b>Kapitel 6</b>	<b>Test</b>	<b>36</b>
6.1	Analog del . . . . .	36
6.1.1	EMG-forstærker . . . . .	36
6.1.2	Accelerometre . . . . .	38
6.1.3	Spændingsforsyning . . . . .	38
6.2	Digital del . . . . .	39
6.2.1	Analog-to-Digital Converter . . . . .	40
6.2.2	Digital filtrering . . . . .	41
6.2.3	Vinkelberegning . . . . .	44
6.2.4	EMG-algoritme . . . . .	47
6.2.5	Trådløs kommunikation . . . . .	49
<b>Kapitel 7</b>	<b>Systemtest</b>	<b>51</b>
7.1	Systemtest med kendt input . . . . .	51
7.1.1	Beskrivelse . . . . .	51
7.1.2	Resultater af test . . . . .	51
7.2	Systemtest med bruger-input . . . . .	53
7.2.1	Beskrivelse . . . . .	53
7.2.2	Resultater af forsøg . . . . .	53
7.3	Konklusion af systemtest . . . . .	56
<b>Kapitel 8</b>	<b>Syntese</b>	<b>57</b>
8.1	Diskussion . . . . .	57
8.1.1	Test af blokke . . . . .	57
8.1.2	Samlet systemtest . . . . .	58
8.2	Konklusion . . . . .	58
8.3	Perspektivering . . . . .	59
8.3.1	Et ideelt system . . . . .	60
<b>Litteratur</b>		<b>61</b>
<b>Bilag A</b>	<b>Bilag</b>	<b>65</b>
A.1	Pilotforsøg . . . . .	65
A.1.1	Formål . . . . .	65
A.1.2	Materialer . . . . .	65
A.1.3	Forsøgsopstilling . . . . .	66
A.1.4	Oversigt af forsøgsopstilling . . . . .	68
A.1.5	Fremgangsmåde . . . . .	68
A.1.6	Databehandling . . . . .	68
<b>Bilag B</b>	<b>Test af accelerometer</b>	<b>73</b>

B.0.7 Formål . . . . .	73
B.0.8 Materialer . . . . .	73
B.0.9 Metode . . . . .	73
B.0.10 Forsøgsopstilling . . . . .	73
B.0.11 Fremgangsmåde . . . . .	74
B.0.12 Resultater . . . . .	75
<b>Bilag C Forståelsesgrundlag</b>	<b>77</b>
C.1 Analog-to-digital converter . . . . .	77

# Kapitel 1

## Indledning

---

I Danmark er omkring 3.000 mennesker diagnosticeret med en muskelsvindssygdom [2]. Muskelsvind dækker over forskellige neuromuskulære sygdomme, hvilket er sygdomme, der påvirker samspillet mellem nerver og muskler.<sup>1</sup> De fleste af disse sygdomme opstår som følge af gendefekter og andre skyldes autoimmune sygdomme, hvor immunsystemet reagerer på kroppens eget væv [3]. 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 [4].

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) [5].

ALS er en hurtigt fremskridende neurodegenerativ sygdom, der nedbryder motorneuroner i hjernen, hjernestammen og rygmarven. Det betyder derfor, at nervecellerne degenereres, så der opstår atrofi<sup>2</sup>. I Danmark er incidensen af ALS 1 – 3 per 100.000, og prævalensen er 3 – 7 per 100.000 [6]. 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 [7, 8].

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 Initierende problemstilling

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

---

<sup>1</sup>FiXme Note: Der findes omkring 25 forskellige sygdomme.

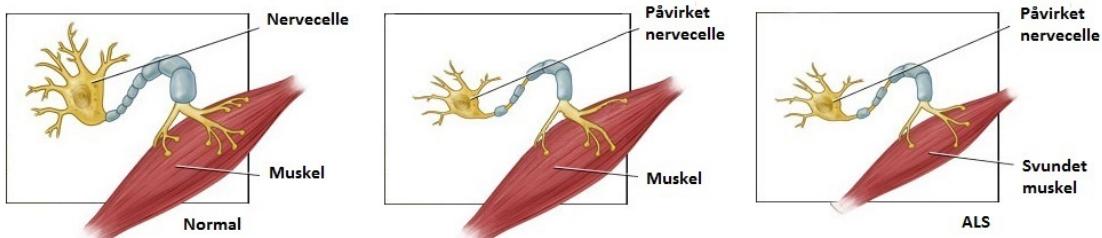
<sup>2</sup>FiXme Note: Svind af væv, legeme eller organ

# Kapitel 2

## Problemanalyse

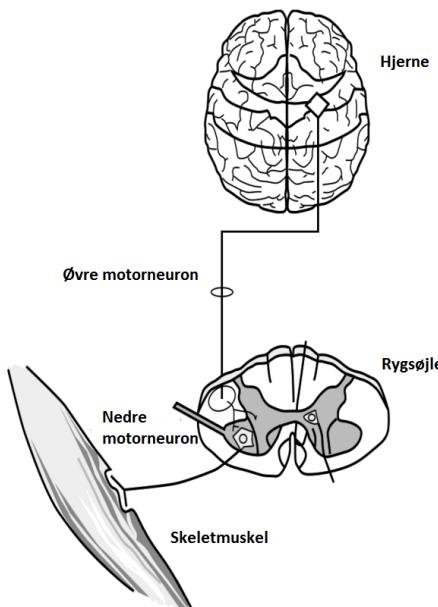
### 2.1 Amyotrofisk lateral sklerose

ALS er en neurodegenerativ sygdom, der påvirker motorneuronerne i hjernen og rygsøjlen i takt med sygdommens fremskriden, hvilket resulterer i muskelsvaghed [5]. 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” [9]. 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 [10, 9].



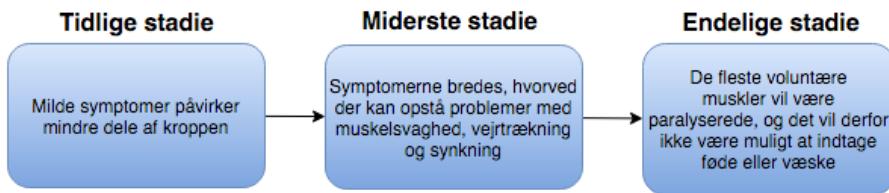
**Figur 2.1:** Tre stadier for en ALS-patient. Det første stadie illustrerer en normal motorneuron samt en upåvirket muskel. Ved andet stadie ses motorneuronet påvirket af ALS, dog ses musklen endvidere upåvirket. I det tredje stadie ses motorneuronet påvirket samt musklen svundet ind. Svindet skyldes en manglende stimulering af musklen som følge af den påvirkede motorneuron [11].

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 [9]. 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 ansłas 20 % til at have det muterede Superoxide dismutase 1-gen (SOD-1), hvilket resulterer i tab af motorneuroner [10].



**Figur 2.2:** Illustrerer opdelingen af de nedre samt øvre motoneuroner [10].

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 vejirtrækningen. 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 [12]. 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 [7, 10].

### 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 [13]. Det er

fordelagtigt at kende patienternes livskvalitet for at vurdere den optimale palliative behandling [14].

Livskvalitet defineres ud fra en persons fysiske sundhed, psykologiske tilstand, grad af selvstændighed, sociale relationer og personlig tro [15].

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 [14, 13]. Da ALS påvirker patienters fysiske formåen, ses der et fald i denne type livskvalitet, som sygdommen fremskridt [14]. 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, selvpbleje, 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 %
Selvpbleje	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 [14]. (Revideret)

Til trods for, at der sker et fald i den sundhedsrelaterede livskvalitet, er der tidligere vist, at den overordnede livskvalitet forbliver stabil [14, 13]. 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 [14]. 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 [14, 16].

## 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 hjælpemidllerne 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 [17].

### 2.2.1 Teknologiske hjælpemidler

Nogle af de mest anvendte hjælpemidler for ALS-patienter er kørestole, toiletstole og stokke, [17] samt hjælpemidler til respiration, der bliver nødvendige sent i sygdomsforløbet [18]. 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 [19]. 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 [17].

#### 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 [17]. 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 [20].

### 2.2.2 Body augmentation som hjælpemiddel

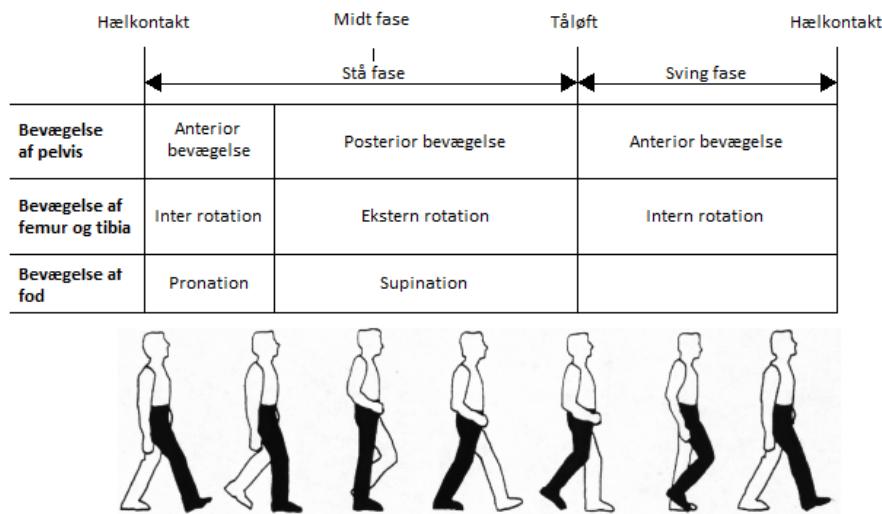
Én form for body augmentation er et exoskelet. Et exoskelet anvender biologiske signaler, og kombinerer disse signaler med kraften fra en maskine. På denne måde er det muligt, at maskinen fungerer som en menneskelig operatør, som kan forbedre menneskets styrke eller genoprette bevægelse [21]. Dette gør, at exoskelettet kan anvendes som et hjælpemiddel til patienter, som lider af handicap eller skader, hvorved exoskelettet gør det muligt at aflaste patienten [22].

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 hjælper 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 [23].

## 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 [24]. Knæleddet vælges som udgangspunkt for et muligt body augmentation-system i form af et exoskelet, da knæleddet er et hængselled 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

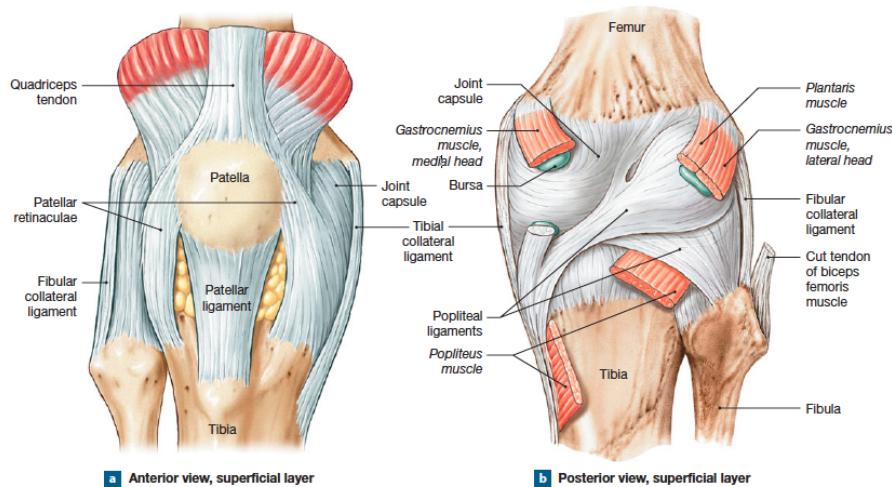
laves et exoskelet omkring knæleddet, vil det kunne antages, at samme princip kan muliggøres ved henholdsvis hofte- og ankelleddet, hvorved gangfunktionen kan opretholdes.



*Figur 2.4: Aktivering af hofte, knæ og ankel under gang [25].*

### 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 [26].



**Figur 2.5:** Knæets anatomiske opbygning [26]

### 2.3.2 Knæets funktion

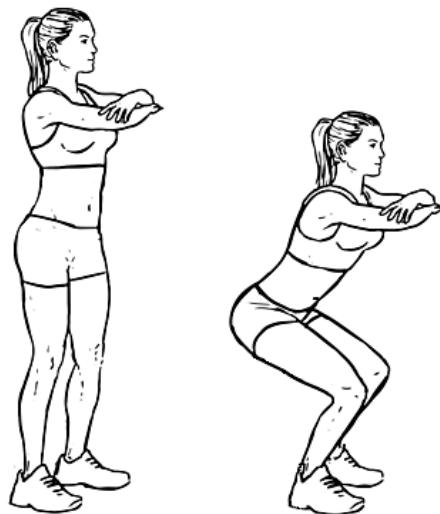
Ved gang aktiveres quadricepsmusklerne, der sidder anteriort på femur, og hasemusklerne, der sidder poserioert på femur, hvilket fremgår af figur 2.5. Quadricepsmusklerne består af rectus femoris, vastus intermedius, vastus medialis og vastus lateralis. Hasemusklerne består af biceps femoris, semitendinosus og semimembranosus. Ved bevægelse foretager quadriceps- eller hasemusklerne ekstension eller fleksion, hvorved de fungerer som hinandens agonister eller antagonister under bevægelse [26].

Som tidligere nævnt anvendes hofte, knæ og ankler under gang. Udover disse led er også kropspositionen 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 [26].

#### 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 [27].

Knæets funktion for bøjningen af benet kan dermed ses ved udførelse af en squat-øvelse. En squat-øvelse udføres ved atstå 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 [27]. En illustration af en squat-øvelse ses af figur 2.6.



*Figur 2.6: Squat-øvelse [28].*

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  $180 - 80^\circ$ . 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 genoptraening af knæet [27].

Ved udførelse af en squat-øvelse aktiveres blandt andet musklen rectus femoris. Aktiviteten i rectus femoris, og de resterende quadricepsmuskler, er størst ved  $90 - 100^\circ$  fleksion af knæleddet og er derefter relativt konstant [29]. Fra udgangspositionen for squat; oprejst posistion med en vinkel i knæet på  $180^\circ$ , vil muskelaktiviteten i rectus femoris være progressivt stigende indtil  $90 - 100^\circ$  graders knæfleksion og derefter progressivt faldende, som knæet bevæger sig tilbage til  $180^\circ$  [? ].

## 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 [14, 16].

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

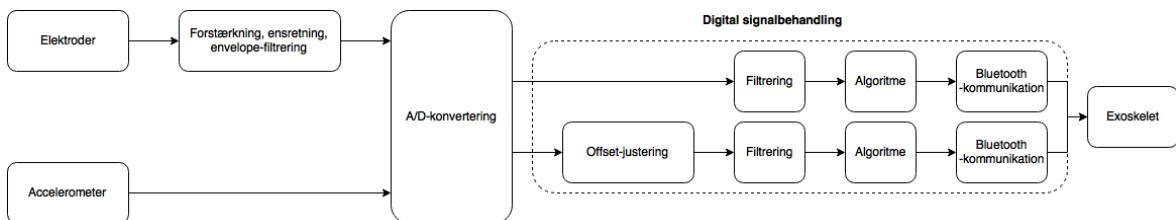
### 3.1 Systembeskrivelse

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 være sikkert og ikke til gene for brugeren
- Systemet skal kunne indikere, hvis der ikke er strøm nok til at virke optimalt
- Systemet skal reagere på kroppens naturlige bevægelse under en squat-øvelse, så det vil kunne benyttes til en prototype af et exoskelet

#### 3.1.2 Blokdiagram



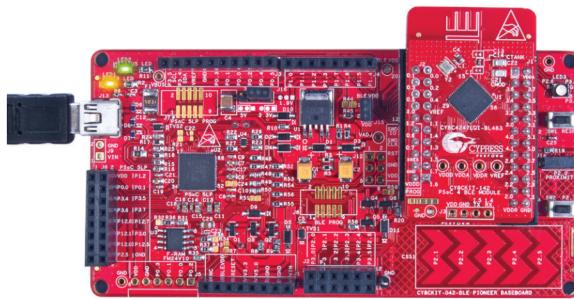
*Figur 3.1: Systemets opbygning.*

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 anvendes to sensorer, EMG-elekroder 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. De opsamlede signaler 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 Mindstorm<sup>1</sup>.

## 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 sensorer. 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 [30].

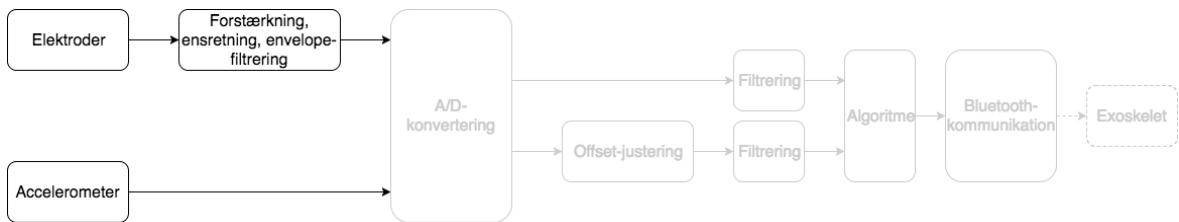
I figur 3.2, ses de valgte komponenter, der består af et CY8CKIT-042 BLE Pioneer baseboard, som fremover vil refereres til som en mikrokontroller. Derudover et CY8CKIT-142 PSoC 4 BLE modul, der vil refereres til som et BLE-modul, hvilket har en operationsfrekvens på 2,4 GHz. Baseboardet er platformen, 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 batteri, eller via mikro USB tilslutningen [31]. Der er mulighed for udvidelse af baseboardet, ved anvendelse af moduler fra Cypress, samt Arduino shields eller 6-pins Digilent Pmod udvidelseskort [31].

<sup>1</sup>FiXme 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 [32]. 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 [32, 33]. 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 aktiveringstenget af muskelfibrene [33]. EMG har et frekvensområde på  $10 - 500 \text{ Hz}$ , hvorfor signaler uden for dette frekvensområde, betegnes som støj [34, 33].

Denne metode kan påvirkes af flere artefakter, som bevægelsespåvirkning og støjpåvirkning fra elnettet, hvilket ligger på frekvenser omkring  $50 \text{ Hz}$ . [33]. Ligeledes kan der ved EMG-målinger fremkomme elektrisk støjpåvirkning fra omkringliggende muskler i forhold til området, der måles på. Dette betegnes som crosstalk [33].

**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 minimum en spænding på  $\pm 5 \text{ V}$
- Skal have et justerbart gain, der ikke kan forstærke over ADC'ens arbejdsområde

#### 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. Da det ønskes, at spændingen fra accelerometerne skal omregnes til vinkler, jf. afsnit 3.1.1 ønskes der en lineær sammenhæng mellem input og outputssignal, hvorfor accelerometeret skal have en linearitet med en afvigelse på 1%.

De dynamiske kræfter såsom bevægelse, stød og vibrationer, gør det muligt at analysere accelerometeres 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 g-påvirkning. Herved forventes dette ligeledes for et ben under en squat-øvelse [35]. 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 måle på minimum Y-aksen
- Skal forsynes med en spænding på minimum  $3 \text{ V}$
- Skal have en linearitet med en afvigelse på 1 %
- Skal mæle accelerationer i  $\pm 2 g$

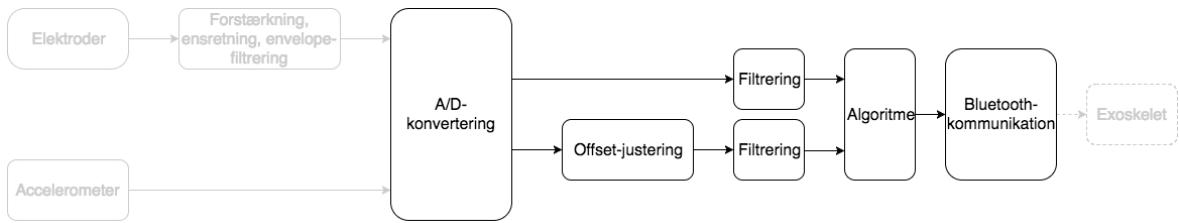
#### 4.1.3 Spændingsforsyning

Spændingsforsyningen skal være i stand til at forsyne EMG-forstærkeren med en konstant spænding, så en svigende eller faldende spænding ikke vil forstyrre signalet. Da systemet yderligere skal benyttes trådløst, kræves det, at spændingsforsyningen er batteridrevet. EMG-forstærkeren, der bliver udvalgt i afsnit 4.1.1 kræver en forsyningsspænding på mellem  $\pm 3 \text{ V}$  og  $\pm 30 \text{ V}$ , typisk  $\pm 5 \text{ V}$  [36].

**Krav:**

- Skal kunne forsyne aktive komponenter i den analoge del af kredsløbet
- Skal kunne levere en jævn spænding
- Skal kunne give et signal, hvis der ikke leveres en konstant spænding

## 4.2 Digital del

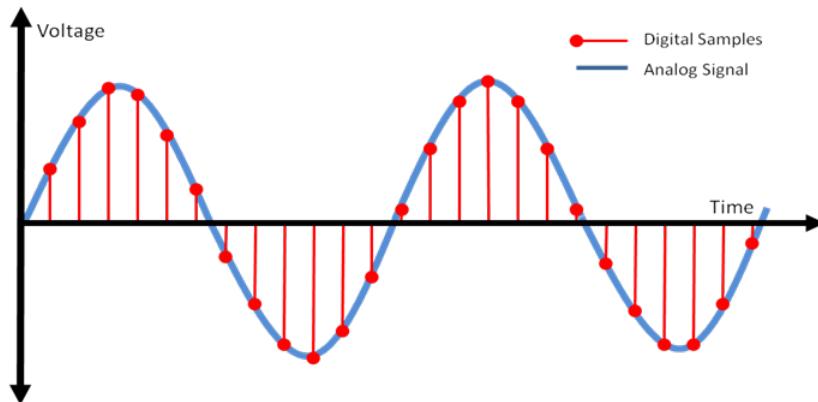


**Figur 4.2:** Blokdiagrammets digitale del

Efter opsamling af det analoge signal skal dette konverteres til et digitalt signal. Systemets digitale del, der fremgår af figur 4.2, skal være i stand til at behandle data digitalt. Der ønskes en offsetjustering af det analoge signal fra accelerometrene for at centralisere signalet omkring 0, og en filtrering af alle de analoge signaler for at mindske eventuelt støj. Der ønskes ligeledes en trådløs kommunikation mellem mikrokontrolleren og exoskelettet, da systemet skal kunne visualiseres analogt for at muliggøre en anvendelse af exoskelettet som støtte til musklerne omkring knæet ved udførelse af en squat-øvelse.

### 4.2.1 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 [37]. Dette er illustreret på figur 4.3. Konverteringsprocessen består af sampling og kvantificering [34].

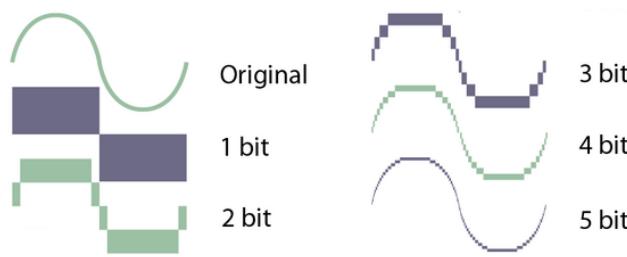


**Figur 4.3:** Illustration af konvertering fra analogt til digitalt signal. Den blå graf viser det analoge signal, mens den røde graf viser signalet efter det er konverteret til digitalt.

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 [34]. Ved for høj samplingsfrekvens vil en større mængde data opsamles og derved benytte mere plads og processering [38]. En for lav samplingsfrekvens vil derimod kunne rekonstruere signalet, således kurven ikke kan

repræsentere det oprindelige signal, hvilket fremgår som alias [34]. I følge Nyquists sætning er det hensigtsmæssigt, at samplingsfrekvensen er mindst det dobbelte af frekvensen i det oprindelige signal [34]. I praksis anbefales det dog at sample med det ti dobbelte.

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 [34]. Amplitudenniveauer, der er tilgængelige til at repræsentere det analoge signal, determineres af antal bits. Ved en højere bit værdi vil det analoge signal repræsenteres bedre, hvilket er illustreret på figur 4.4.



**Figur 4.4:** Illustration af betydningen af bits. Ved en større bitværdi vil signalet blive repræsenteres bedre [39].

En ADC med en opløsning på 12-bit inddeltes i  $2^{12}$ , svarende til 4096 niveauer. Dette giver en repræsentation af værdier fra 0 til 4096 eller fra -2048 til 2047. Den sensitivitet som ADC'ens sensitivitet kan opnå, omtales Least Significant Bit (LSB) og bestemmes ud fra ligning 4.1, hvor Full Scale voltage Range (FSR) er det totale spændingsområde for ADC'en angivet i  $V$ , og  $n$  er antallet af bits i ADC'en [37, 38].

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

Hvis spændingen, der pålægges ADC'en overstiger dens arbejdsmængde, vil dette resultere i, at signalet går i mætning [37, 38]. Derudover accepteres en afvigelse på 2 % for samplingsfrekvensen, for så vidt muligt at tage højde for kvantificeringsfejl.

#### Krav:

- Skal sample minimum tre inputs
- Skal have en opløsning, der ikke forringes signalet
- Skal have en samplingsfrekvens omkring 10 gange større end den højeste signalfrekvens
- Skal undgå, at signalet ikke overstiger ADC'ens arbejdsmængde
- Samplingsfrekvensen skal have en maksimal afvigelse på 2 %

#### 4.2.2 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 [40].

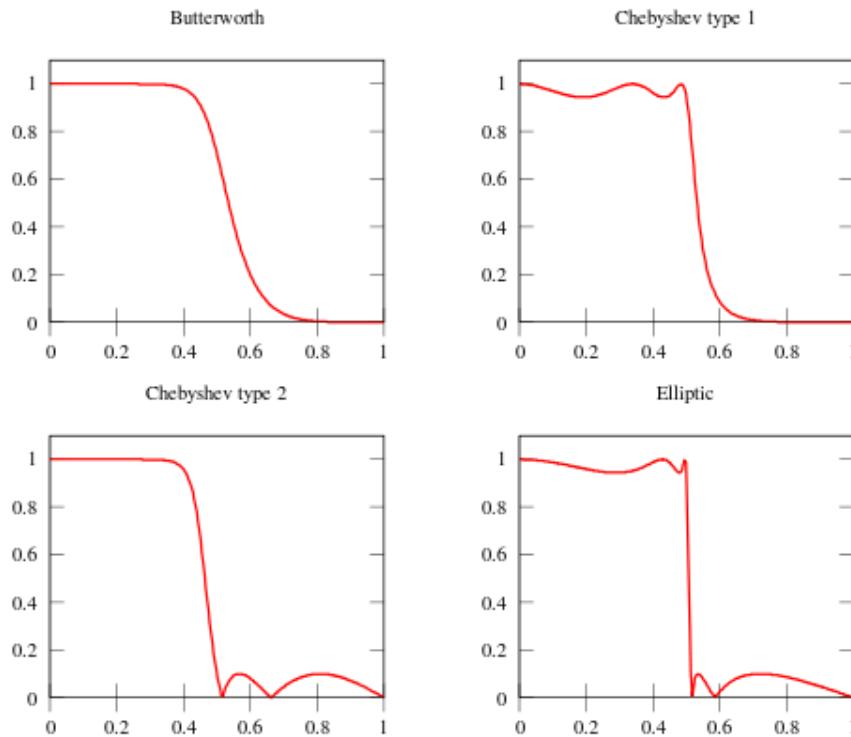
FIR-filtre kan laves, således de har en lineær fase, og vil altid være stabile. FIR-filtre designes ved at benytte eksempelvis frekvenssampling eller en bestemt vindue-type, hvilket giver en overførselsfunktion. Denne overførselsfunktion kan herved benyttes som et digitalt filter [40].

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 koefficienter. Dette betyder, at filteret er mindre hukommelseskrævende 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 [40]. Disse er illustreret på figur 4.5.

IIR-filteret består af et forward FIR-filter, der omfatter tællerne,  $b$  koefficienter, for nullene samt et feedback FIR for nævneren,  $a$  koefficienterne, for polerne. IIR-filtret udregnes ved anvendelse af følgende formel, der fremgår af ligning 4.2 [41].

$$y(n) = \sum_{i=0}^n b_{(i)} \cdot x(n-i) + \sum_{i=0}^m a_{(i)} \cdot y(m-i) \quad (4.2)$$

Hvor  $a_{(i)}$  samt  $b_{(i)}$  er IIR-filtrets koefficienter. Kvantiseringen af koefficienterne påvirker frekvensens responsen. Nævner koefficienterne samt deres position som poler har en betydning for IIR-filtrets stabilitet[41].

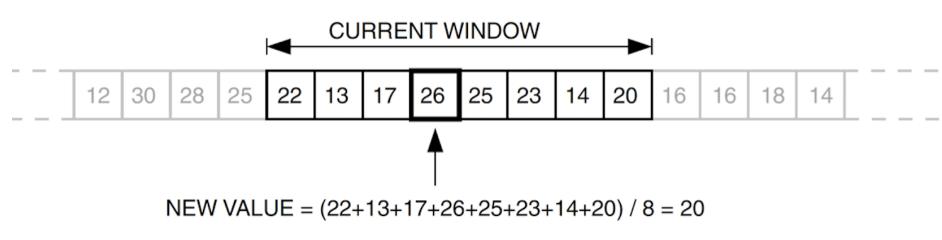


**Figur 4.5:** De fire filtertyper; Butterworth, Chebyshev 1 & 2 og elliptisk [42].

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 [43]. Et Chebyshev filter har i modsætning til Butterworth et kortere transitionsbånd, som følge af en stejlere 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 imod rippels i stopbåndet og en monoton variation i pasbåndet [43]. Ved det elliptiske filter ses en endnu stejlere dæmpning

og dermed et kortere transitionsbånd end ved Butterworth samt Chebyshev filtre. Ved dette filter ses der dog både rippels i pasbånd og stopbånd [43].

Et moving average filter er et simpelt lavpas FIR-filter, der oftest anvendes til at udglatte et array af data, der er samplet. Dette er et FIR-filter, da impulsresponsen har en begrænset varighed i forhold til vinduets længde. 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 midterste 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 4.6 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.[44]



**Figur 4.6:** Gennemsnitsværdien beregnes for et vindue for et moving average filter [44].

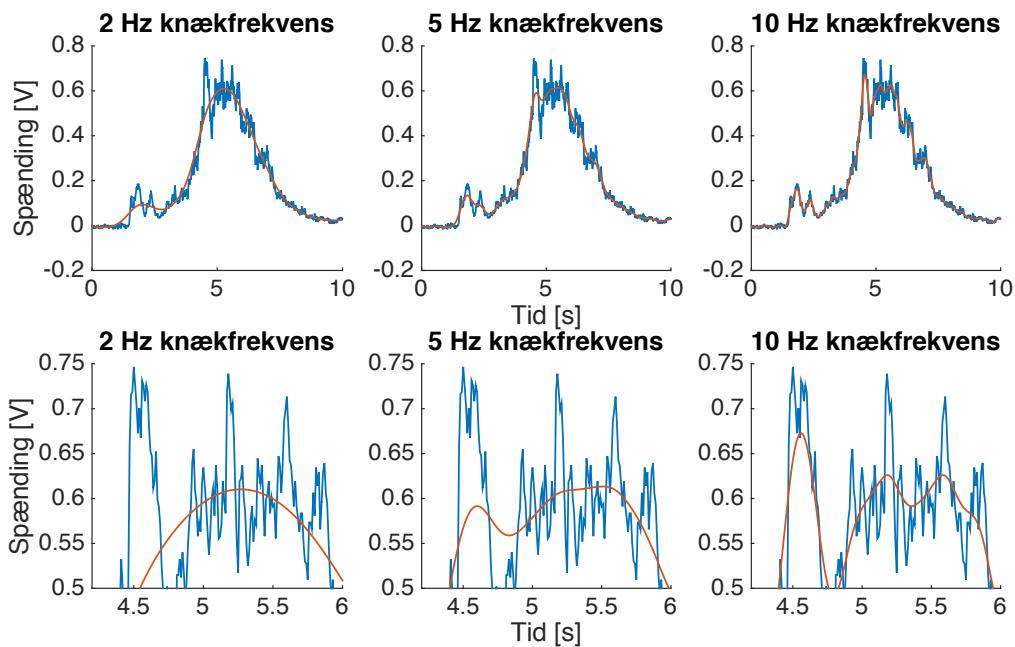
Af ligning 4.3 fremgår formlen for udregningen af et moving average filter.

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i-j] \quad (4.3)$$

### 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-patients ben. Da der derfor ønskes at frafiltrere yderligere højfrekvent støj fra det forstærkede, ensrettede og lavpasfiltrerede EMG-signal, 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 filterordneder 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 og ingen rippels i pas- og stopbåndet, da dette vil påvirke signalet.

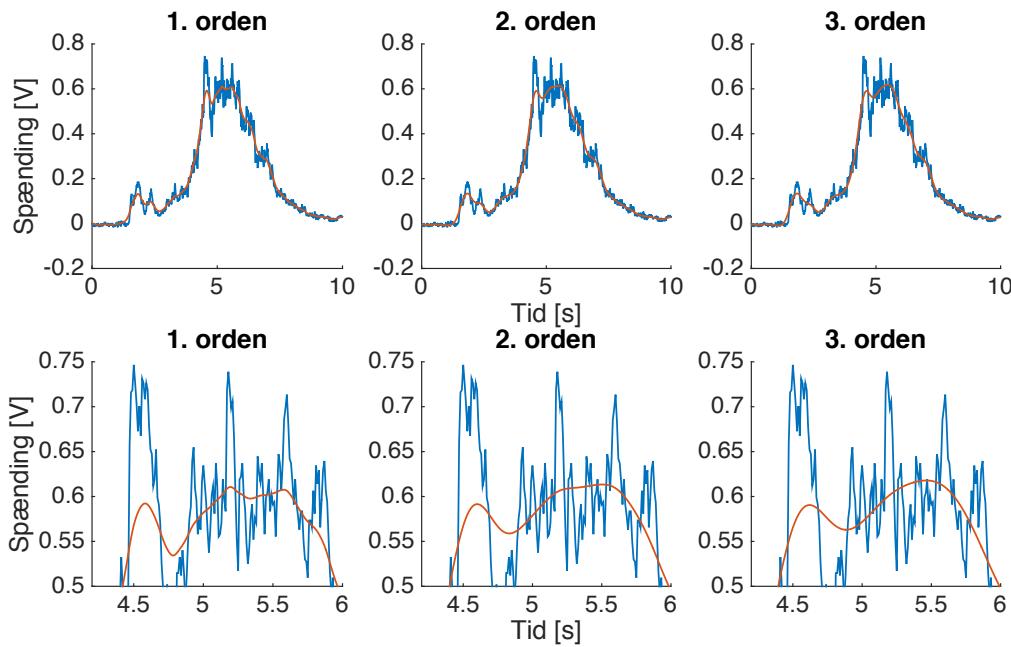
Først vælges filterets knækfrekvens ved at afprøve flere forskellige. Eksempler på disse knækfrekvenser ses på figur 4.7, hvor 2 Hz, 5 Hz og 10 Hz er repræsenteret.



**Figur 4.7:** Øverst ses graferne, hvor de blå linjer på graferne viser resultater fra pilotforsøget. De røde linjer på hver graf viser lavpas IIR-filtre med knækfrekvenser på henholdsvis 2, 5 og 10 Hz. Nederst ses et udsnit af samme grafer for at illustre filterets påvirkning på signalet.

Ud fra 4.7 vælges en knækfrekvens på 5 Hz, da filteret med denne knækfrekvens udglatter spikes og små svingninger i EMG-signalet, der vil kunne forstyrre signalet til exoskelettet. Samtidigt følger filteret signalet, som det kan ses på udsnittene nederst på 4.7, 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.



**Figur 4.8:** Øverst ses graferne, hvor de blå linjer på grafen viser resultater fra pilotforsøget. De røde linjer på hver graf viser lavpas IIR-filtre med ordner på henholdsvis 1, 2 og 3. Nederst ses et udsnit af samme grafer for at synliggøre, hvilken påvirkning de forskellige ordner har på signalet.

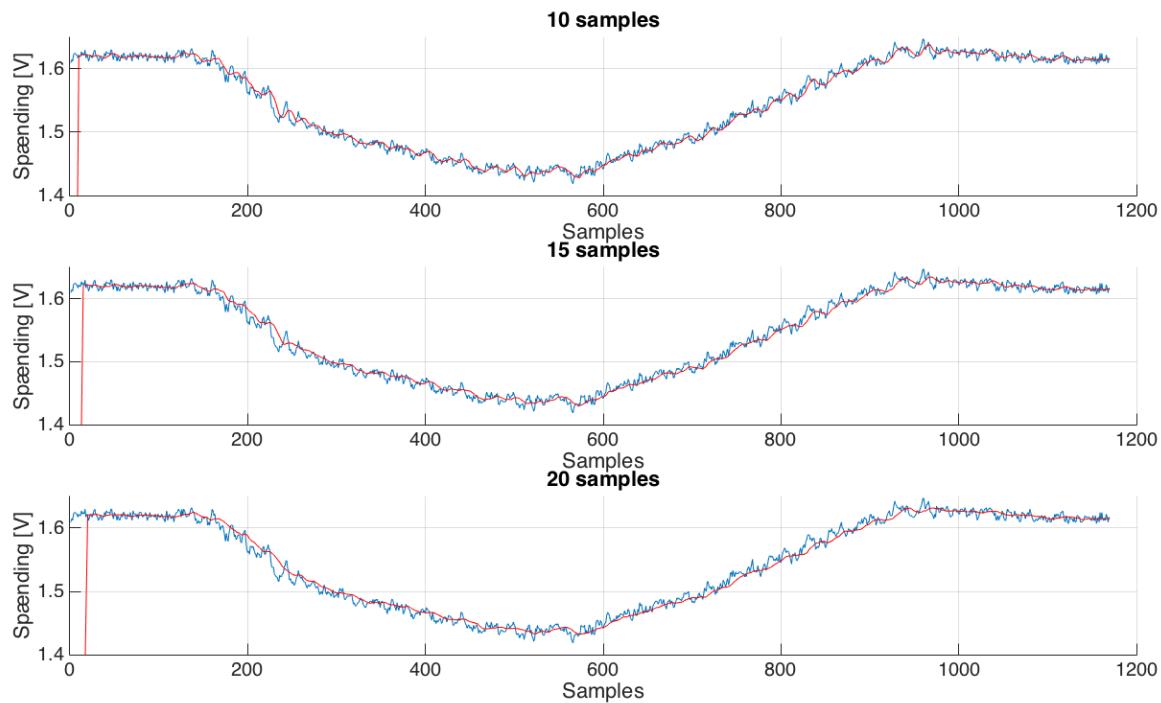
Ud fra 4.8 vælges en filterorden på 2, da denne vurderes til være tilstrækkelig. Der ses ingen større forskel i outputsignalet fra filteret, hvis filterordenen hæves yderligere. Dertil vurderes det, at en filterorden på 1 ikke er tilstrækkelig, da dette filters outputsignal afviger mest fra inputsignalet.

#### Krav:

- Skal følge inputsignalet mest muligt
- Skal udformes som et Butterworth lavpasfilter
- Skal have en knækfrekvens på 5 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 givende accelerometer. Ud fra figur 4.9 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. Ved implementeringen af et moving average filter opstår der en forsinkelse, der svarer til filterlængden. Denne forsinkelse fremgår af figur 4.9, hvor der ses et udslag i starten, der medfører denne forsinkelse. Denne forsinkelse opstår, da filtreringen først påbegyndes efter de antal samples, der svarer til filterlængden på 10, hvilket er svarende til en forsinkelse på 10 samples à 0,1 ms.



**Figur 4.9:** De blå linjer på grafen viser resultater fra pilotforsøget. De røde linjer på hver graf viser et moving average filter med filterlængde på henholdsvis 10, 15 og 20 samples. I starten af grafen ses et udslag, der svarer til forsinkelsen, som dannes på grund af det implementerede moving average filter. Denne forsinkelse er svarende til filterlængden.

#### Krav:

- Skal muliggøre en repræsentation af spændinger
- Skal have en filterlængde på 10 samples
- Skal have en maksimal forsinkelse på 100 ms

#### 4.2.3 Vinkelberegning

Beregningen af vinkler har til formål at udregne, hvor meget knæets vinkel har ændret sig under udførelse af en squat-øvelse. Vinklen af knæet udgøres af de to accelerometre målinger, hvor disse er lagt sammen for at få den samlede vinkel over knæet. Ifølge afsnit 2.3.2 udføres en squat mellem 0 til 90°, dette svarer til at knæet befinner sig mellem 180 og 90°. Det er på denne måde muligt, at vurdere hvordan knæets vinkel har ændret sig ved udførelse af en squat-øvelse. For at sikre at knæet befinner sig inden for intervallet 180 til 90° under squat-øvelsen indikeres dette ved en LED, hvis intervallet overskrides. Yderligere ønskes det at outputtet ændres, hvis knæets vinkel er over 180°.

#### Krav:

- Skal kunne udsende ét signal som repræsenterer en given vinkel
- Skal kunne måle knæets vinkel mellem 180° og 90°
  - En grøn LED skal lyse når knæets vinkel befinner sig inden for dette interval
- Skal indikere hvornår knæets vinkel er over 180° og under 90°
  - En rød LED skal lyse hvis knæets vinkel er over 180° eller under 90°

- Skal indikere, hvornår knæet overstrækkes, hvilket svarer til  $180^\circ$ 
  - Hvis vinklen for ét accelerometer overstiger  $90^\circ$ , indikeres dette som  $-200^\circ$ , hvortil det andet accelerometers vinkel ligges til de  $-200^\circ$
  - Hvis vinklen overstiger  $90^\circ$  for hvert accelerometer, skal dette indikeres som et output på  $-400^\circ$

#### 4.2.4 EMG-algoritme

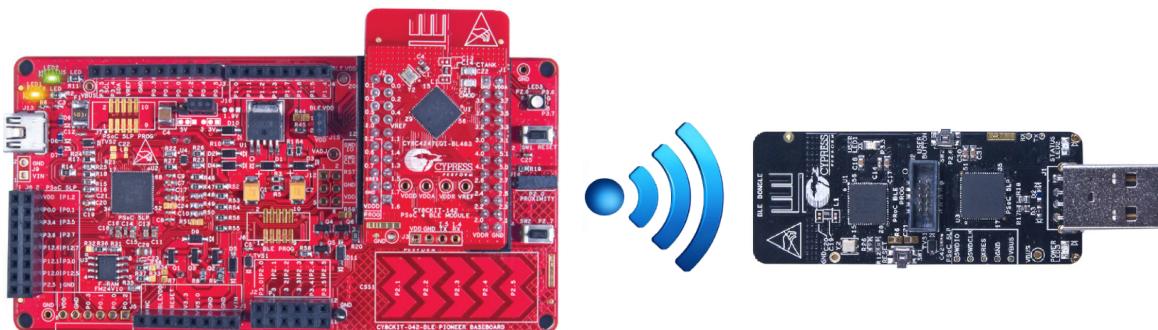
EMG-algoritmen har til formål at få prototypen, og dermed knæleddet, til at fleksere, når muskelaktiviteten fra rectus femoris er stigende, og at få prototypen til at ekstendere, når muskelaktiviteten er faldende. Dette skal gøres ved, at EMG-algoritmen skal finde hældningen af EMG-signalet mellem samples og derefter udsende et signal alt efter, om hældningen er faldende eller stigende. Dette signal skal indikere ændringen i outputsignalet. For at undgå, at prototypen eksentrenderer uden for det definerede område for squat-øvelsen, beskrevet i afsnit 2.3.2 ønskes det, at der sker en ændring i outputsignalet, hvis signalet er over  $180^\circ$  og under  $90^\circ$ .

##### Krav:

- Skal kunne udsende ét signal, når muskelsignalet er faldende og et andet, når det er stigende
- Skal kunne detektere, om muskelaktiviteten er faldende eller stigende mellem to samples med 0,01 sekunders mellemrum
  - Ved stigende muskelaktivitet skal dette indikeres som et outputsignal på  $+10$
  - Ved faldende muskelaktivitet skal dette indikeres som et outputsignal på  $-10$
- Skal kunne indikere, hvis vinklen befinder sig over  $180^\circ$  og under  $90^\circ$ 
  - Dette skal indikeres ved, at outputsignalet går i 0

#### 4.2.5 Trådløs kommunikation

For at kommunikere trådløst benyttes Cypress BLE modul. Kommunikationstypen BLE [31] er en energi-effektiv variation af Bluetooth-teknologi. Bluetooth er en standard for kortdistance trådløs teknologi, som muliggør kommunikation mellem flere enheder via radiobølger. Dette betyder, at systemet anvender mindre batteri på Bluetooth-kommunikationen, end på almindelig Bluetooth. Af denne grund kan der benyttes små batterier, uden det bliver nødvendigt at skifte dem ofte [45].



**Figur 4.10:** Illustration af kommunikation mellem mikrokontroller og BLE dongle [30, 31].

Til det endelige system benyttes der udover mikrokontrolleren også en BLE-dongle. Dette er etableret for at tillade trådløst kommunikation mellem en computer og mikrokontrolleren, hvortil en illustration kan ses af figur 4.10. Dette tillader således trådløs test, visualisering, og debugging af mikrokontrolleren. BLE-donglen forsynes via USB-porten på den givne computer med 5 V [31]. Denne form for BLE-kommunikation anvendes for at kommuinkere trådløst med en computer, således en visualisering er mulig. For at systemet senere skal kunne anvendes til ALS-patienter med gang, skal der tages højde for en maksimal forsinkelse, for at systemet kan følge almindelig gang. Gangfunktionen for ALS-patienter varierer alt efter, hvor mange funktioner der er nedsat, eksempelvis vil patienter med luftvejsproblemer gå langsommere. ALS-patienter har en gennemsnitlig gangfunktion på  $1,02 \text{ m/s}$  [46], hvorfor en forsinkelse på 100 ms vurderes at være acceptabel. Da systemet skal placeres på benet, vurderes det at en kommunikationsrækkevidde på 2 m er tilstrækkeligt.

**Krav:**

- Mikrokontrolleren skal kommunikere trådløst med en computer
- BLE-dongle skal forsynes via USB
- Skal have en maksimal forsinkelse på 100 ms <sup>1</sup>
- Skal have en kommunikationsrækkevidde på 2 m

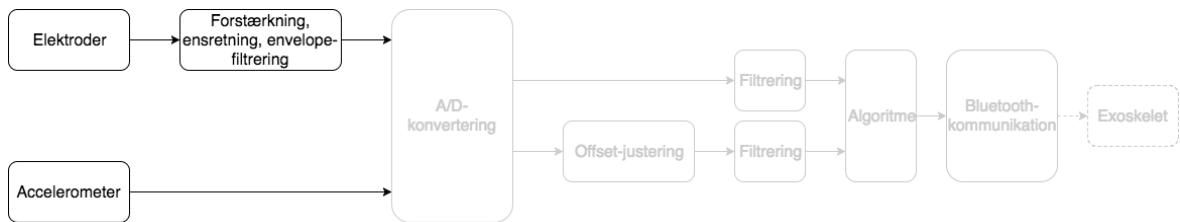
---

<sup>1</sup>FiXme Note: skal denne forsinkelse være større eller mindre?? - HUSK at ændre i brødteksten også!

# Kapitel 5

## Implementering

### 5.1 Analog del



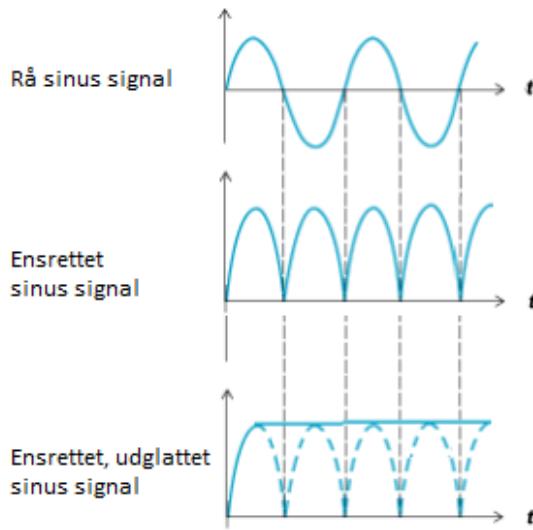
*Figur 5.1: Blokdiagrammets analoge del, der vil blive implementeret i følgende afsnit.*

Til implementering af det analoge system, som er illustreret på figur 6.1, bestemmes der ud fra de opstillede krav i afsnit 4.1, at der skal indgå en EMG-forstærker og accelerometre, der introduceres i afsnit 4.1.1 og afsnit 4.1.2 i implementeringen af systemet. På baggrund af de overordnet krav til systemet er der valgt at anvende EMG og accelerometre, hvorudfra disse krav samt de opstillede krav har medvirket til tilvalg og fravalg af sensorer. Derudover har valget af EMG-forstærker og accelerometre til opsamling af EMG-signal og vinkler været afhængige af, hvilke komponenter der er til rådighed, som opfylder de opstillede krav.

#### 5.1.1 Opsamling og behandling af EMG-signaler

For at opfylde de krav, der er opstillet i afsnit 4.1.1 anvendes Muscle Sensor V3 fra Advancer Technologies, der fremover vil refereres til som 'EMG-forstærker'. Denne komponent måler 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 [36].

En illustration af, hvordan EMG-forstærkeren behandler et inputsignal fremgår af figur 5.2.



**Figur 5.2:** Tre sinussignaler. Henholdsvis et råt, ensrettet og ensrettet samt udglatte [36].

På figur 5.2 kan sinuskurven opfattes 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, da ensretningen foregår omkring denne akse. 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 udgattede signal på nederste graf. Envelopefilteret har til formål at stabilisere signalet, hvilket er implementeret i EMG-forstærkeren ved et lavpasfilter. Til denne filtrering er der beregnet en knækfrekvens på  $1,94 \text{ Hz}$  ud fra ligning 5.1. I databladet for EMG-forstærkeren kan  $C$  og  $R$  aflæses til at være henholdsvis  $1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$  og  $80,6 \cdot 10^3 \Omega$  [36].

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

For at sikre, at EMG-forstærkerens forstærkning, ensretning og udglatning fungerer, kræver EMG-forstærkeren en spændingsforsyning på minimum  $\pm 3 \text{ V}$  og maksimalt  $\pm 30 \text{ V}$ . Herudover er der mulighed for at justere modstanden fra  $0,1 \Omega$  til  $100 \text{ k}\Omega$ , hvilket giver et justerbart gain fra 0,002 til 20.700 gange [36].

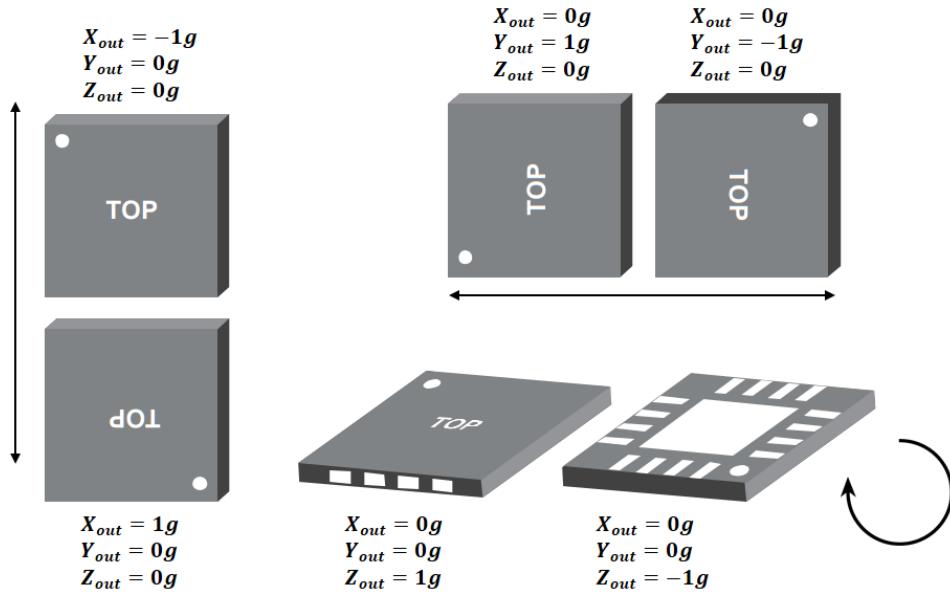
### 5.1.2 Opsamling af accelerometer-signaler

I dette projekt anvendes der på baggrund af krav opstillet i afsnit 4.1.2 to accelerometer ADXL335Z fra Analog Devices. Accelerometerne er en triaksialt sensor, som har et arbejdsområde på minimum  $\pm 3 \text{ g}$ , og en spænding som output. Det analoge outputsignal er proportionalt med accelerationen [47].

Accelerometrene har en single-supply spændingsforsyning, som skal ligge mellem  $1,8 - 3,6 \text{ V}$ . Offsettet er afhængig af forsyningsspændingen fra mikrokontrolleren, der forsyner accelerometerne. Forsyningsspændingen er  $3,3 \text{ V}$ , og derved bliver offsettet  $1,65 \text{ V}$ , som er

det halve af forsyningsspændingen. Båndbredden og støjen varierer for akserne. For y-aksen ligger båndbredden mellem  $0,5 - 1.600 \text{ Hz}^1$  [48].

Accelerometrenes outputsensitivitet varierer ligefrem proportionelt med forsyningsspændingen. Sensitiviteten har et range på  $\pm 10\%$  [48]. Ved en forsyningsspænding på  $3,3 \text{ V}$  er sensitiviteten  $330 \text{ mV/g} \pm 10\%$ .



**Figur 5.3:** Påvirkning af accelerometeret i forskellige positioner. Til venstre måles accelerometeret lodret, til højre øverst vandret og til højre nederst i plan [48].

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 5.3. Herved vil der ske en ændring i outputspændingen ved en hældning på  $0^\circ$ . Hvis accelerometeret eksempelvis befinner sig i den øverste situation på figur 5.3, påvirkes y-aksen med  $-1 \text{ g}$  [49]. Denne sammenhæng og derved patientens hældning kan udtrykkes ved ligning 5.2, hvor  $\phi$  er vinklen i forhold til udgangspunktet for den pågældende akse [49].

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

### 5.1.3 Spændingsforsyning

For at opfylde kravene, der er specifieret i afsnit 4.1.3, vælges det at benytte en færdigudviklet komponent, som benytter to  $1,5 \text{ V}$ 's AA-batterier, der sidder i en spændingsregulator. Batteriernes kobling danner et split supply. De andre poler, som ikke anvendes til jordforbindelse, benyttes som systemets positive spændingsforsyning,  $V_{cc}$  og negative spændingsforsyning,  $V_{dd}$ .

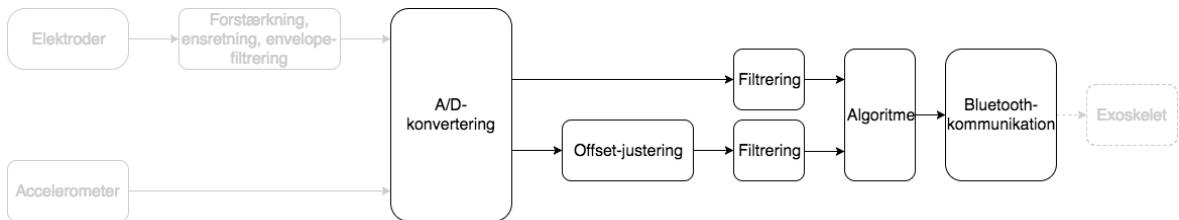
<sup>1</sup>FiXme Note: Den spektrale effekttæthed måles i  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Hvis dette divideres med kvadratroden af båndbredden af signalet  $\sqrt{\text{Hz}}$ , fås RMS af accelerationsstøjen ved en temperatur på  $25^\circ\text{C}$

Spændingsregulatoren sørger for at give en konstant spænding på henholdsvis 3,4 V og  $\pm 5,5$  V.<sup>2</sup> På sigt vil spændingsforsyningen ikke være i stand til at leve en jævn spænding grundet afladning af batterierne. I dette tilfælde vil spændingsregulatoren indikere dette ved at få en LED til at blinke, når der ikke leveres en konstant spænding. Yderligere vil LED'en stoppe med at lyse, når batterierne er helt afladede. Konfigurationen af spændingsforsyningen fremgår af figur 5.4, hvor terminalerne for  $\pm 5,5$  V fremgår som rød(V+) og blå(V-) og grå(Gnd), mens der på den modsatte side fremgår terminalerne for 3,4 V som grøn(Vcc) og grå(Gnd).



**Figur 5.4:** Spændingsforsyning, der består af to 1,5 V batterier i et split supply. Den røde prik illustrerer  $V_+$ , den blå  $V_-$ , den grå Gnd og den grøn  $V_{cc}$ .

## 5.2 Digital del



**Figur 5.5:** Blokdiagrammets digitale del, der vil blive implementeret i følgende afsnit.

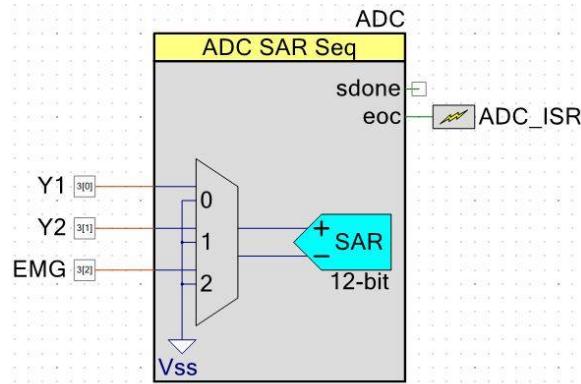
Til implementering af det digitale system, som er illustreret på figur 6.5, stilles der fra afsnit 4.2 krav i forhold til implementeringen af ADC, filtrering og trådløs kommunikation. Da mikrokontrolleren er udleveret på dette semester er det et krav at anvende ADC'en på denne samt BLE-modulet, hvorfor A/D-konvertering og den trådløse kommunikation implementeres på denne. Derudover testes det, hvorvidt de forskellige filtre filtrere det uønskede signal fra.

### 5.2.1 Analog-to-Digital Converter

Mikrokontrolleren indeholder en SAR ADC, som gør det muligt at konvertere det analoge signal til et digitalt. Der ønskes en konfigurering af 3 analoge kanaler, herunder Y-aksen på begge accelerometre samt EMG-forstærkeren. Opsætningen af ADC'en på mikrokontrolleren fremgår af figur 5.6. Det ønskes at kunne læse signalerne ved at måle single ended, hvorfor hvert input er tilkoblet  $V_{ss}$ , der fungerer som jord. Da der ligeledes ønskes at anvende en 12 bits-ADC på baggrund af kravet i afsnit 4.2.1, indstilles denne til en oplosning på 12 bit. Da der anvendes en single ended konfiguration af kanalerne, svarer dette til, at ADC'en anvender

<sup>2</sup>FiXme Note: Dette gøres ved, at spændingsregulatoren oplagrer spænding fra de to tilkoblede batterier i spoler, når switchfunktionen lukkes. Switchfunktionen åbnes, når spolerne er mættede og en spænding ledes videre i kredsløbet via en diode. Denne switchfunktion åbner og lukker skiftevis i kort tid, hvilket resulterer i, at en konstant spænding ledes til systemet hele tiden.

11 bit. ADC'en har et arbejdsområde fra  $0 - 5 V$  [50]. LSB'en for ADC'en kan beregnes ud fra ligning 4.1, hvilket giver  $2,44 mV$ . Hvis der sker ændringer i signalet, der er mindre end LSB på  $2,44 mV$ , vil dette ikke komme til udtryk i det konverterede signal.



**Figur 5.6:** ADC'ens opsætning på PSoC. Sucessive Approximation Register (SAR) er typen af ADC. Kanalerne  $Y_1$ ,  $Y_2$  og  $EMG$  er de kanaler, der modtager signaler fra henholdsvis accelerometret, der er placeret på femur, accelerometret, der er placeret på tibia, og  $EMG$ -signal.  $sdone$  er en outputterminal, der signalerer, at ADC'en har samplet det aktuelle input.  $eoc$  signalerer, når en konversionscyklus er gennemført, dermed kan værdierne fra de samplede kanaler aflæses i samplingsregistret. Når  $eoc$  signalerer dette, laver  $ADC\_ISR$  et interrupt, der igangsætter endnu en læsning af kanalerne [50].

I ADC'en er der indbygget en clock frekvens. Det er muligt at reducere konverteringstiden ved at øge ADC'ens clock frekvens, der kan indstilles mellem  $1000 MHz$  og  $9000 MHz$  [50]. Clock cycles betegner tiden mellem to efterfølgende impulser fra en oscillator, og samplingtiden måles i clock cycles. Der er forskellige parametre, der kan indstilles ADC'en, herunder opløsning, samplingsrate og clock frekvens. Disse parametre bestemmer ADC'ens konverteringsrate. Konvertingstiden er den inverse af konverteringsraten.

Da der ønskes at samples med 10 gange det opsamlede signals frekvensområde, hvilket i følge afsnit A.1 er mellem  $0,4$  og  $10 Hz$ , vælges der at samples med  $100 Hz$ . I det der defineres en samplingsfrekvens på  $100 Hz$  oplyser ADC'en en aktuel samplingsfrekvens per kanal og aktuel clock frekvens. Den aktuelle samplefrekvens oplyses til  $97 Hz$ . Til at opnå den ønskede frekvens ændres i clock perioden, der ændre tiden for samplingstiden for hver kanal. Dette ændre til at der opnås en samplingstid på  $3,32 ms$ . Hertil oplyses den aktuelle samplingsfrekvens som værende  $100 Hz$  samt en clock frekvens på  $1600 kHz$ . Som det fremgår af figur 5.6, og figurteksten dertil, er outputtet fra ADC'en tilkoblet via  $eoc$  til ADC'ens Interrupt Service Routine (ISR). Hvis der er sker et interrupt vil dette resultere i, at de aktiverede kanaler er klar til at blive aflæst fra registrene, hvorved AD-konverteringen igangsættes [50].

### 5.2.2 Digital filtrering

Der blev på baggrund af målinger i afsnit A.1 samt afsnit 4.2.2 valgt at implementere et IIR-lavpasfilter og et moving average filter. Lavpasfiltreret har til formål at filtrere  $EMG$ -signalet og samtidig følge det oprindelige signal mest muligt, mens moving average filteret har til

formål at udglatte accelerometre-signalerne så ændringerne i spænding bliver repræsenteret bedre.

### IIR-lavpasfilter

Det ønskede 2. ordens IIR-lavpasfilter ud fra kravene opstillet i afsnit 4.2.2, implementeres digitalt ved anvendelse af MATLAB samt PSoC. Ved implementering af dette filter benyttes MATLAB for således at beregne a- og b-koefficienterne for et Butterworth filter, der er nødvendigt for at kode filteret. Teorien hertil er beskrevet i afsnit 4.2.2.

Disse koefficienter fremgår af tabel 5.1. Dertil defineres a- og b-koefficienterne samt filterlængden i PSoC, hvorefter disse anvendes til programmering af lavpasfilteret.

<b>a</b>	1,0000	-1,8890	0,0015
<b>b</b>	0,0015	0,0029	0,0015

**Tabel 5.1:** De udregnede a og b koefficienter for et butterworth filter

### Moving average filter

Det ønskes at implementere et moving average filter ved anvendelse af MATLAB samt PSoC. Koefficienten, a, defineres til at have en værdi på 1, da denne er konstant ved FIR-filtre. Koefficienten, b, defineres ved at dividere a med filterlængden, som er valgt til 10. Disse koefficienter findes i MATLAB, og fremgår af tabel 5.2.

<b>a</b>	1								
<b>b</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

**Tabel 5.2:** De udregnede a og b koefficienter for moving average filteret

Koefficienterne implementeres herefter til moving average filteret, der er programmeret i PSoC.

### 5.2.3 Vinkelberegning

I bilag B fremgår det, at der er lineær sammenhæng mellem vinklerne over tid. Det er derfor muligt at udføre en lineær interpolation over dataen af målinger fra accelerometrene i forskellige vinkler. På denne måde er det muligt at bestemme, hvilken som helst vinkel for en tilsvarende spænding. Derfor udføres der en ny måling af linearitet med mikrokontrolleren, hvor spændingen i de forskellige vinkler er målt. Efterfølgende er der aflæst et offset, som er trukket fra, for at centrere signalet omkring 0. Offsettet for accelerometeret placeret på låret er aflæst til  $-1002$ , hvilket svarer til et offset på  $-1,6162\text{ V}$  og accelerometeret placeret på skinnebenet til  $-972$ , svarende til et offset på  $-1,5743\text{ V}$ . Det digitale output ved forskellige vinkler fremgår af tabel 5.3. Disse digitale output kan omregnes til spænding ved ligning 5.3, hvor  $3,3\text{ V}$  er forsyningsspændingen, og  $2^{11}$  er ADC'ens antal niveauer.

$$\text{spænding} = \text{digitalt output} \cdot \frac{3,3\text{ V}}{2^{11}} \quad (5.3)$$

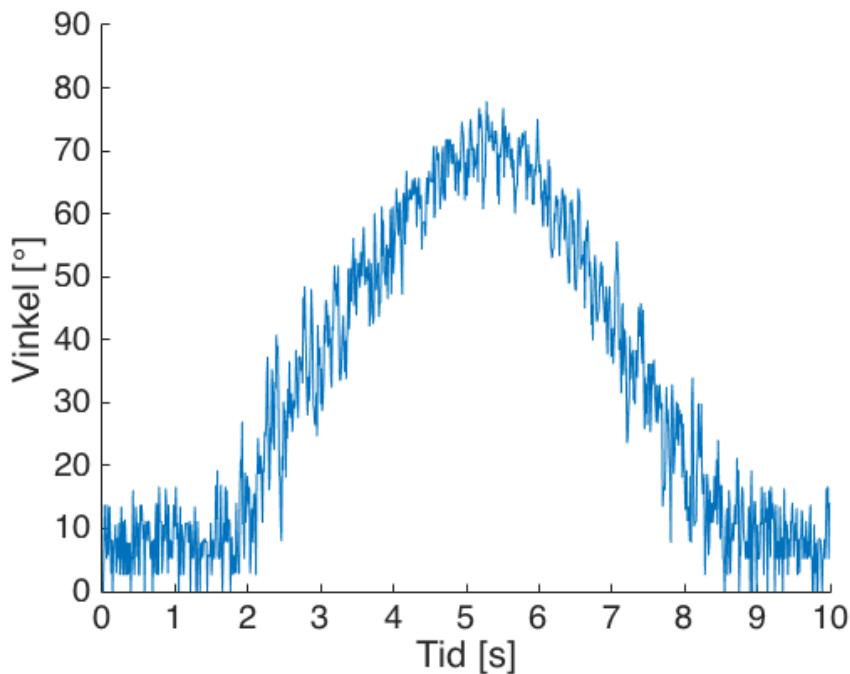
Vinkel [°]	Digital output fra acclerometer placeret på låret	Digital output fra accelerometer placeret på skinnebenet
0	-186	-179
10	-185	-176
30	-168	-153
50	-126	-111
70	-76	-52
80	-31	-16
90	0	0

**Tabel 5.3:** Digital output fra accelerometer placeret på både låret og skinnebenet svarende til en given spænding.

Spændingen er målt for vinklerne 0, 10, 30, 50, 70, 80 og 90° for accelerometrene placeret på både låret og skinnebenet. Den første målte spænding er for startværdien i intervallet og den sidste spænding er slutværdien i intervallet.

Ud fra de målte værdier i de ovenstående vinkler, er der opstillet en funktion indeholdt ifelse-løkker, hvorved det er muligt at vurdere, hvilket interval en given spænding befinder sig i. I hver enkelt løkke anvendes lineær interpolation, som har til opgave at finde en vinkel, der er svarende til en spænding som ligger mellem intervallet og returnerer denne.

Når der er udført lineær interpolation over dataen skal de målte data fra låret samt skinnebenet ligges sammen for at få den samlede vinkel af, hvor langt personen har bevæget sig, og derved befinner sig i squat-øvelsen. Resultaterne er optaget på mikrokontrolleren og visualiseres i MATLAB, hvilket fremgår af figur 5.7.



**Figur 5.7:** Samlet vinkel af accelerometrene under udførelse af squat-øvelsen, der er defineret i afsnit 2.3.2.

### 5.2.4 EMG-algoritme

For at opfylde kravene fra afsnit 4.2.4 skal hældningen af EMG-signalen findes. Dette kan gøres ved differentiering, hvorved det vil være muligt at finde hældningen af én sample ved differentialkvotienten. Det vælges at implementere en mere simpel metode til at tilnærmedesvist at finde hældningen ved ligning 5.4, hvorved tangentens hældning findes.

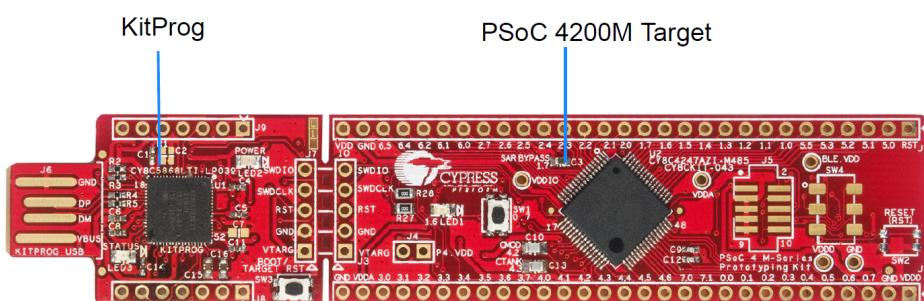
$$f'(x) \approx \frac{\Delta y(x)}{\Delta x} \quad (5.4)$$

I ligning 5.4 er  $\Delta x$  tiden mellem to samples, og  $\Delta y(x)$  den målte spænding fra rectus femoris til tiden  $x$ .

Hvis  $f'(x) > 1$  kommer der et output, som signalerer til prototypen, at knæleddet skal fleksere. Hvis derimod  $f'(x) < 1$  kommer der et andet output, som signalerer til prototypen, at knæleddet skal ekstendere.

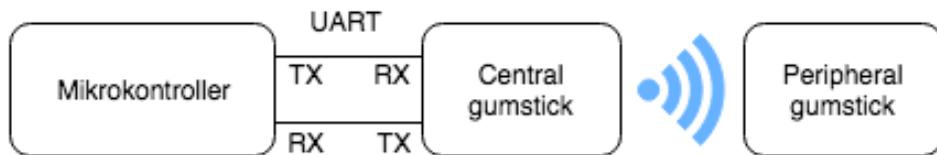
### 5.2.5 Trådløs kommunikasjon

Den trådløse kommunikation er designet til direkte kommunikation mellem mikrokontrolleren og prototypen, hvorved exoskelettet kan styres. Herudover skal der etableres en trådløs forbindelse til en computer til debugging og test af mikrokontrolleren samt datavisualisering. Til implementeringen af den trådløse kommunikation tages der ikke udgangspunkt i det oprindelige design. Dette er grundet, at opsætningen af bluetooth kommunikationen i mikrokontrolleren er mere kompliceret end først antaget. Af denne grund vælges det at implementere et mere simpelt og anvendeligt alternativ, bestående af to PSoC 4 M-Series Prototyping Kit boards, der ses af figur 5.8. Disse vil efterfølgende refereres til som gumsticks.



**Figur 5.8:** Opbygningen af en gumstick [51].

Gumstickens board på figur 5.8 består af en KitProg og en PSoC 4200M enhed. KitProgen anvendes til at debugge og programmere koden. PSoc 4200M er processoren, hvorpå koden eksekveres. Yderligere er boardet udstyret med et EZ-BLE modul, der tillader trådløs kommunikation ved brug af bluetooth low energy. Den ene gumstick tilkobles mikrokontrolleren via en Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)-forbindelse, der både kan sende og modtage data ved at forbinde mikrokontrollerens transmitter med gumstickens receiver, og forbinde mikrokontrollerens receiver med gumstickens transmitter. Den anden gumstick tilsluttes computeren via en USB-forbindelse og erstatter BLE-donglen fra det oprindelige design. En illustration af, hvordan kommunikationen transmiteres i det implementerede system fremgår af figur 5.9.



**Figur 5.9:** Illustration af kommunikation mellem mikrokontroller og computer. Der ses UART forbindelse til venstre, hvor der er anvendes RX (receive) og TX (transmit). Til højre ses indikeringen af trådløskommunikation ved brug af BLE [30, 51].

Opsætningen, der fremgår af figur 5.9 er mere anvendelig, da der findes kodeeksempler til gumsticken, hvorpå den trådløse kommunikation i forvejen er programmeret. Dertil er det ikke nødvendigt at opsætte BLE-kommunikation, men alene, hvordan data'en skal videregives. Begge gumsticks programmeres til at 'echo' information, der modtages via BLE eller UART og transmitere det videre. Dertil vil data modtaget fra mikrokontrolleren blive videregivet til den ene gumstick, hvorpå data transmiteres trådløst til den anden gumstick. Derfra sendes data via UART til computeren.

For at de to gumsticks kan kommunikere med hinanden, programmeres EZ-BLE modulerne til at være henholdsvis central og peripheral. Dette betegner en rolle, der gives de to gumsticks, hvor central oftest er enheden med mest processorkraft og hukommelse og den peripheral enhed oftest er en mindre og ressourcebegrænset enhed [52]. I dette system er central og peripheral sat op som illustreret på figur 5.9. Mikrokontrolleren bliver anset som en primær komponent, hvortil den UART-forbundne gumstick defineres som central. Gumsticken, der modtager data via BLE, bliver dermed peripheral. Ved aktiv data transmission vil en indikering i form af en blå led på den centrale gumstick lyse.

### 5.2.6 Low power mode

Der findes forskellige grader af low power mode. Herunder sleep mode, deep-sleep mode, hibernate mode og stop mode. Systemet anvender sleep mode, hvor kun CPU'en er slukket, mens alle systemets andre enheder er aktive. Systemet befinner sig i sleep mode størstedelen af tiden, men dette bliver afbrudt, når der forekommer et interrupt. Et hvert interrupt kan anvendes til at vække systemet fra sleep mode, herefter vil systemet gå ud af sin sleep mode, når der er udløst et interrupt.

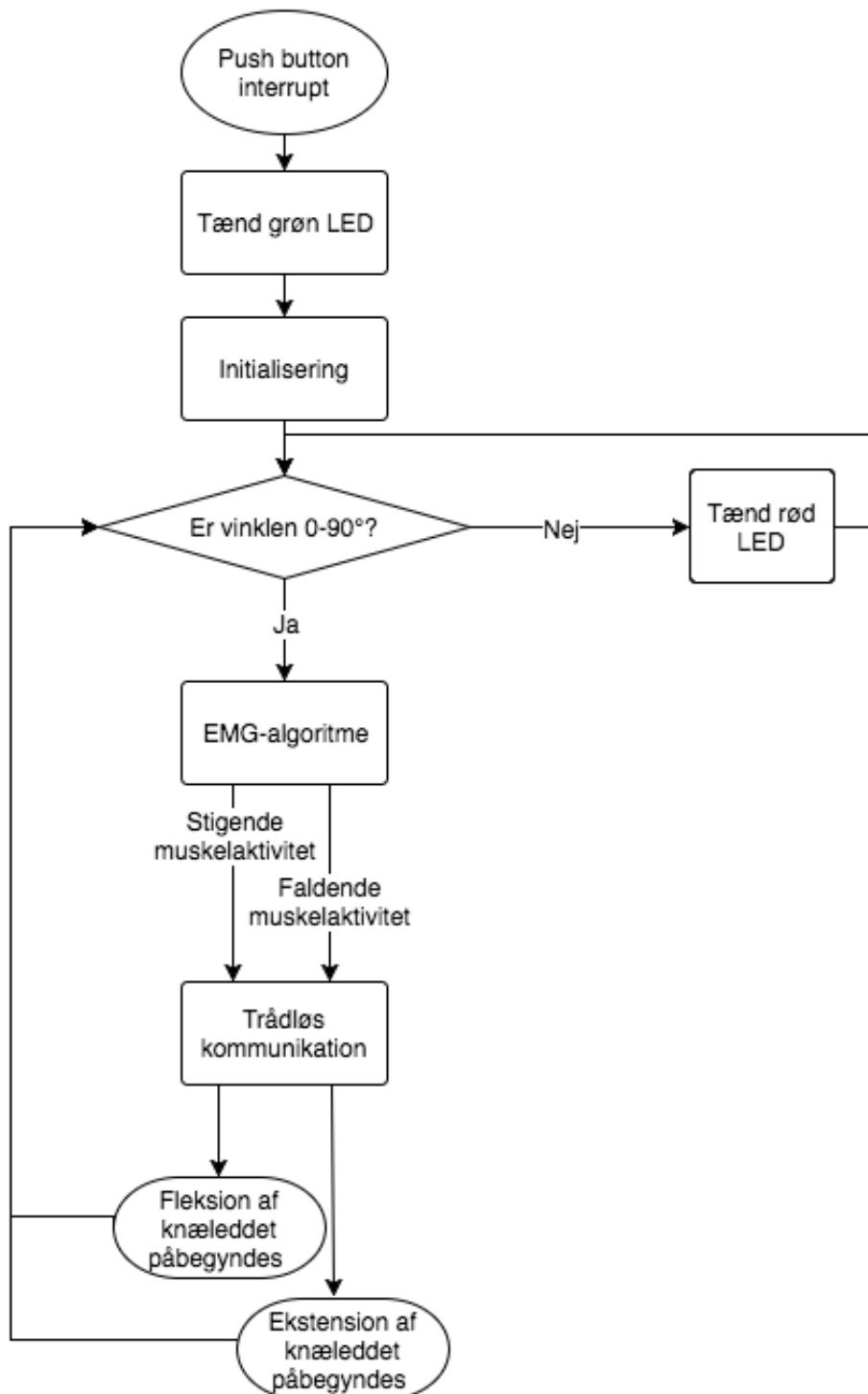
Det kan være fordelagtigt at anvende sleep mode, når eksempelvis ADC'en eller digital kommunikation, hvor andre peripherals skal forblive aktive, men uden CPU'ens aktivitet er nødvendig. På denne måde vil det være muligt at reducere strømforbruget mellem AD-converteringer samt transaktioner under den digitale kommunikation.[53]

### 5.2.7 Flowdiagram

I dette afsnit fremgår implementeringen af systemets digitale blokke, der er illustreret på figur 6.5. Disse flowdiagrammer er anvendt for at visualisere opbygningen samt sammenhængen mellem blokkene. Flowdiagrammene er opdelt og består af et overordnet, som beskriver hele processen og et initialiserende samt et, der viser EMG-algoritmen. Udover den visualiserende del vil det blive uddybet, hvilke funktioner de enkelte figurer indeholder. Anvendelsen af de forskellige figurer i flowdiagrammerne er beskrevet i afsnit .

### Overordnet flowdiagram

Det analoge signal, som optages af de implementerende sensorer skal konverteres fra analogt til digitalt, hvorved det efterfølgende kan implementeres i softwaren. Det overordnede flowdiagram fremgår af figur 5.10. For at implementering af softwaren vil foreløbe skal der ske et interrupt ved at trykke på PSoC'ens user button, som får en grøn LED til at lyse og derefter igangsætter de efterfølgende funktioner.

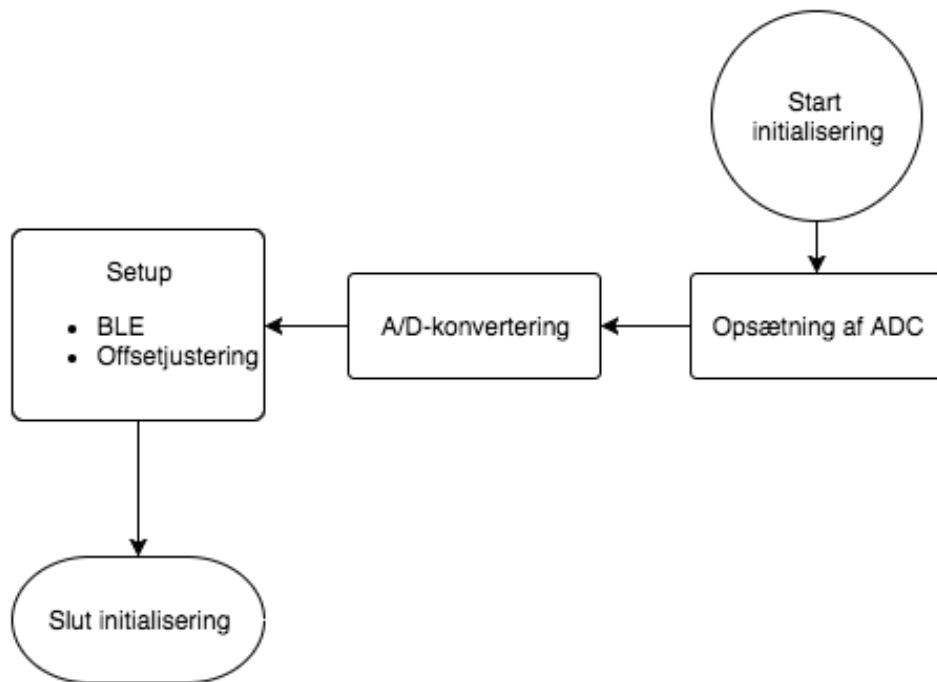


**Figur 5.10:** Overordnet flowdiagram, der viser systemets opbygning. Blokkene Initialisering og EMG-algoritme er yderligere uddybet på hhv. figur 5.11 og figur 5.12.

### Initialiserende flowdiagram

I initialiseringsprocessen, der fremgår af figur 5.11 sker opsætningen af ADC'en. A/D-konverteringen igangsættes, hvilket muliggør konverteringen af det analoge input, hvor det analoge signal digitaliseres. For at kunne behandle dataen og kommunikere trådløst igangsættes et setup, hvor BLE tilkobes og signalet offsetjusteres. Efter setup skal det

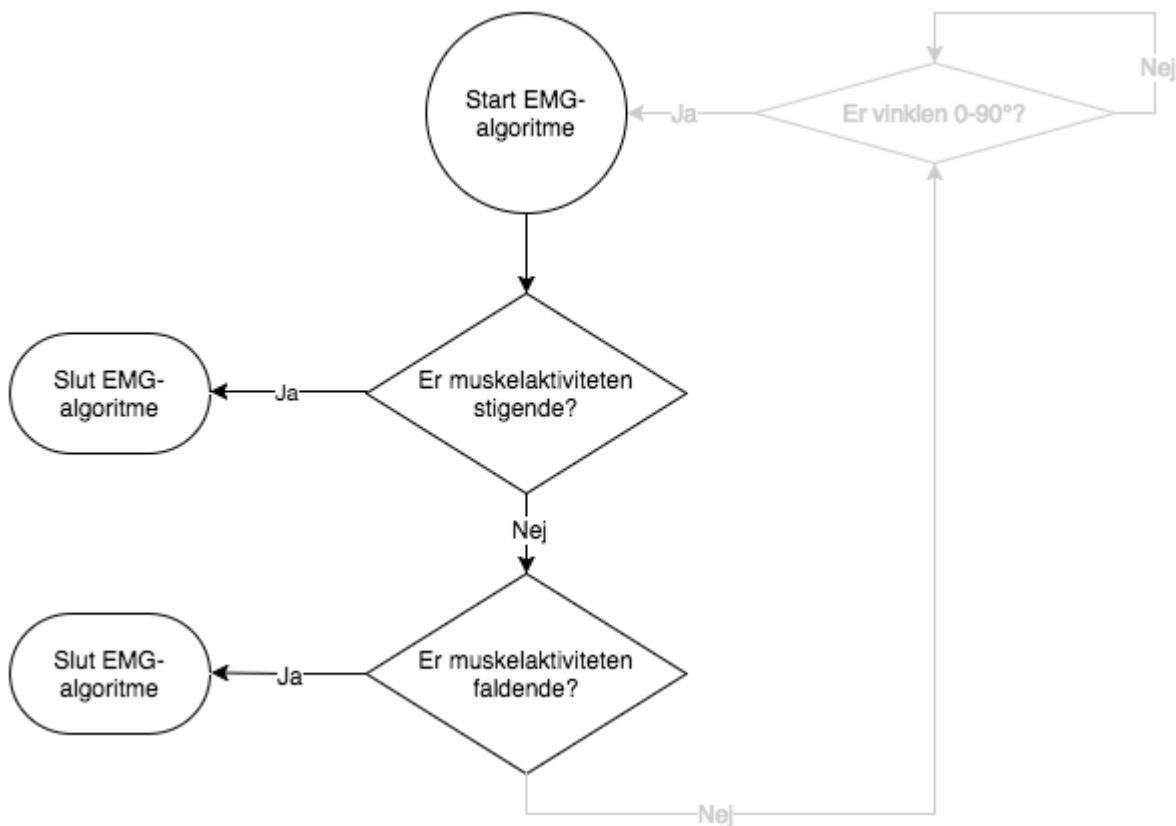
vurderes, hvorvidt vinklen over knæet befinder sig mellem 90 og 180°'s vinkel, hvis dette er tilfældet, vil signalet starte EMG-algoritmen, hvilket fremgår af det overordnede flowdiagram, der fremgår af figur 5.10.



**Figur 5.11:** Initialiserende flowdiagram, der viser opbygningen af systemets initialiserende del. Dette er et uddybende flowdiagram, der passer sammen med det overordnede flowdiagram på figur 5.10.

### EMG-algoritme

EMG-algoritmen fremgår af figur 5.12. Hvis inputtet fra accelerometret svarer til en spænding, der kan omregnes til en vinkel over knæet mellem 90 og 180° vurderes det, hvorvidt muskelaktiviteten er faldende eller stigende. Denne omregning sker ved ligning 5.3 og derefter ligning 5.2. Én sample sammenlignes derefter 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 til prototypen med 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.



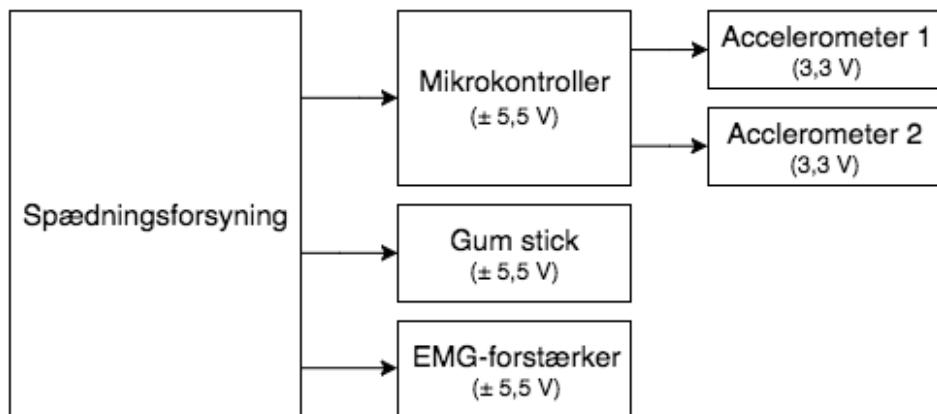
**Figur 5.12:** EMG-algoritmens flowdiagram, der viser opbyggelsen af EMG-algoritmen. Den lyse grå del af dette flowdiagram er ikke en del af EMG-algoritmen, men viser algoritmens sammenhæng med resten af systemet. Dette er et uddybende flowdiagram, der passer sammen med det overordnede flowdiagram på figur 5.10.

### 5.2.8 Samlet system

Under implementering af det samlede system er det nødvendigt at ændre flere parametre for at kunne opfylde de overordnet krav, beskrevet i afsnit 3.1.1. Dette omfatter ændring af forsyningen af spænding til de enkelte komponenter, hvilket forårsager at spændingen for de udregnede vinkler er ændret.

#### Forsyning af spænding

Da systemet skal være batteridrevet, skal alle komponenter kobles til et batteri. Dette implementeres ved at mikrokontroleren, gum sticken og EMG-forstærkeren får spænding fra spændingensregulatoreren, der leverer en spænding på 5,5 V til disse komponenter. Mikrokontrolleren er koblet til de to accelerometre og forsyner disse med en spænding på 3,3 V. Opsætningen af dette er illustreret på figur 5.13.



**Figur 5.13:** Illustration af koblingen af sp\u00e5nding til de enkelte komponenter.

### Beregning af vinkler

Da sp\u00e5ndingen accelerometrene modtager \u00e5ndres fra 3,4 til 3,3 V, bliver offsettet for disse ligeledes \u00e5ndret. Dette g\u00f8r sig g\u00e5eldende da disse afh\u00e5nger af hinanden, som beskrevet i afsnit 5.1.2. Offsettet for accelerometeret placeret p\u00e5 l\u00e5ret er -1,5904 V, og for accelerometeret placeret p\u00e5 skinnebenet er -1,5598 V. Dette medvirker til, at de udregnede vinkler for intervallet 90 – 180° \u00e5ndres. De nye vinkler fremg\u00f8r af tabel 5.4.

Vinkel [°]	Digital output fra acclerometer placeret p\u00e5 l\u00e5ret	Digital output fra accelerometer placeret p\u00e5 skinnebenet
0	-195	-170
10	-191	-164
30	-165	-142
50	-122	-101
70	-60	-42
80	-25	-4
90	0	0

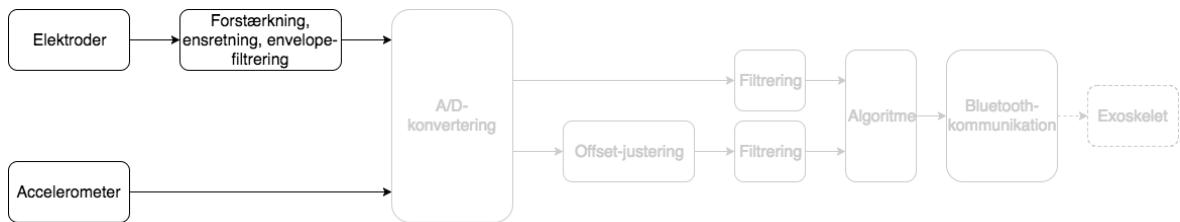
**Tabel 5.4:** Digitalt output fra accelerometer placeret p\u00e5 l\u00e5ret og skinnebenet svarende til en given vinkel.

# Kapitel 6

## Test

---

### 6.1 Analog del

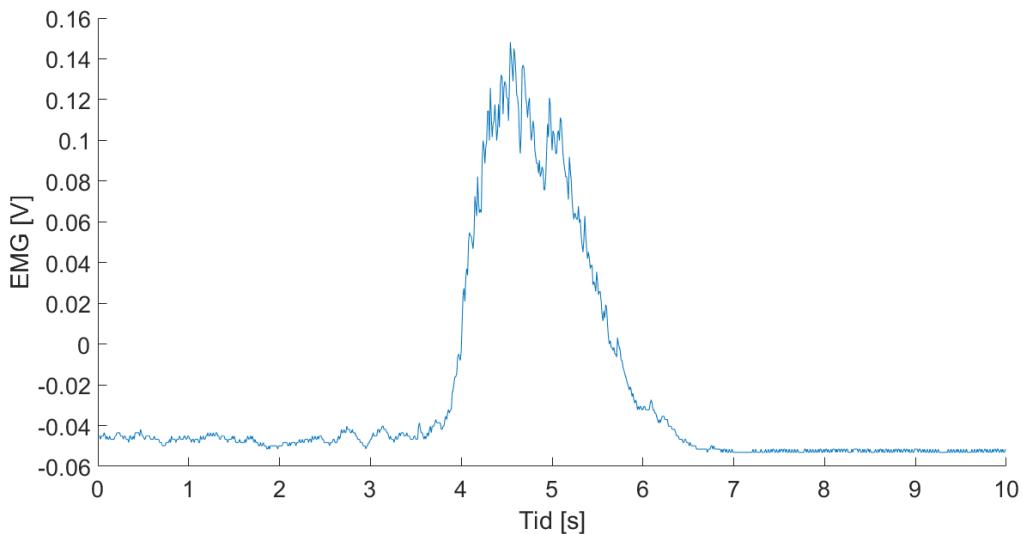


*Figur 6.1: Blokdiagrammets analoge del*

For at kunne teste om de enkelte komponenter i den analoge del, som fremgår af figur 6.1, opfylder kravene stillet i afsnit 4.1 testes delene hver for sig. Testen af EMG-forstærkeren og accelerometre omhandler signalopsamling og databehandling af EMG-forstærkeren samt hvorvidt målingerne opfylder de opstillede krav. Derudover testes spændingsforsyningen om den leverer en jævn spændingen for at sikre at systemet fungerer optimalt.

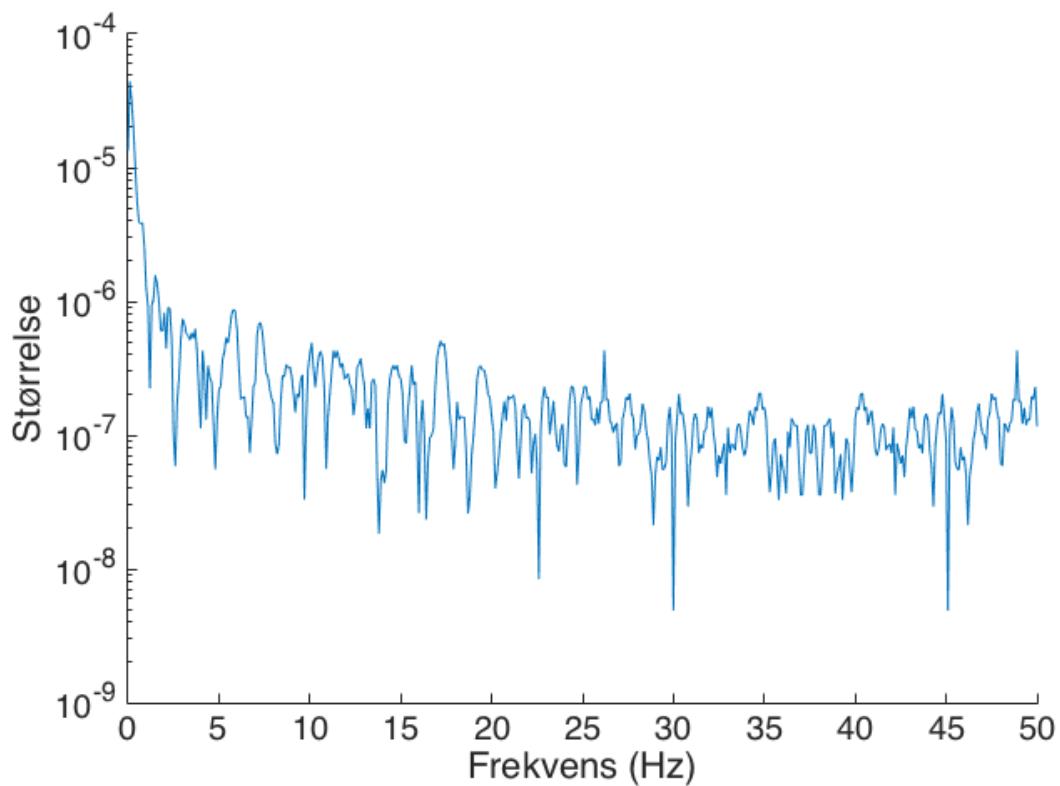
#### 6.1.1 EMG-forstærker

EMG-forstærkeren testes for at vurdere, hvorvidt der kan opsamles muskelaktivitet fra rectus femoris. Overfladeelektroderne placeres ud fra SENIAM's anvisning om elektrodeplacering, jf. afsnit A.1. En squat-øvelse udføres, mens muskelsignaler opsamles i MATLAB. Denne øvelse er beskrevet i afsnit 2.3.2. Muskelsignalet under udførslen af squat-øvelsen fremgår af figur 6.2.



**Figur 6.2:** Et samplede EMG-signal fra rectus femoris under udførsel af en squat-øvelse.

Ud fra figur 6.2 ses det at der opsamles muskelaktivitet fra rectus femoris. For således at undersøge, hvorvidt muskelsignalerne ligger i frekvensområdet mellem  $10 - 500 \text{ Hz}$  er en frekvensanalyse foretaget. Denne ses af figur 6.3



**Figur 6.3:** Frekvensanalyse af samplet EMG-signal under en squat-øvelse, hvor Y-aksen er en semilogaritmisk skala

Det fremgår af figur 6.3 at signalet ligger inden for frekvensområdet. EMG-forstærkerne

forsynes med en spænding på  $\pm 5,4 V$ , hvilket er testet i afsnit 6.1.3. På EMG-forstærkeren findes et justerbart gain, således forstærkningen kan tilpasses den enkelte bruger af systemet. Ud fra dette og figur 6.2 vurderes det, at EMG-forstærkeren opfylder de opstillede krav i afsnit 4.1.1.

#### **Opsummering af krav:**

- ✓ Skal opsamle signaler fra rectus femoris
- ✓ Skal være anvendeligt med overflade elektroder
- ✓ Skal opsamle muskelsignaler i frekvensområdet mellem  $10 - 500 Hz$
- ✓ Skal forsynes med en spænding på minimum  $\pm 5 V$
- ✓ Skal have et justerbart gain, der ikke kan forstærke over ADC'ens arbejdsområde

### **6.1.2 Accelerometre**

Accelerometrene testes for at vurdere, hvorvidt de opstillede krav i afsnit 4.1.2 opfyldes. Det fremgår af databladet, at accelerometrene er triaksiale, samt at accelerometrene kan forsynes med en DC-forsyning fra  $1,8 - 3,6 V$ . Kravet hertil er, at accelerometrene skal forsynes med en minimum spænding på  $3 V$ . Det er derfor testet, hvorvidt om mikrokontrolleren forsyner accelerometrene med denne spænding. Testen er udført ved brug af et multimeter, hvortil der måles en spænding på  $3,2 V$ . Kravet om den minimum spænding på  $3 V$  er derfor opfyldt. Ud fra målinger foretaget i bilag B ses en linearitet på  $0,03 \%$ , hvilket derfor lever op til kravet for linearitet. Da det ikke er muligt at teste om accelerometrene har accelerationer i  $\pm 2 g$ , tages der udgangspunkt i databladet. I databladet beskrive det, at accelerometrene har et lineært arbejdsområde på  $\pm 3 g$ .

#### **Opsummering af krav:**

- ✓ Skal måle på minimum Y-aksen
- ✓ Skal forsynes med en spænding på minimum  $3 V$
- ✓ Skal have en linearitet med en afvigelse på  $1\%$
- ✓ Skal måle accelerationer i  $\pm 2 g$

### **6.1.3 Spændingsforsyning**

Det forventes, at spændingsforsyningen leverer en konstant spænding til EMG-forstærkeren, så denne fungerer optimalt, og så EMG-signalerne ikke forstyrres. For at undersøge, om spændingsforsyningen opfylder de opstillede krav i 4.1.3, testes spændingsforsyningen med et multimeter, hvor outputspændingen måles. Ud fra dette er den positive spænding målt til  $5,574 V$  og den negative spænding til  $-5,341 V$ , hvilket giver en peak-to-peak-amplitude på  $10,815 V$ .

Under testen, blev der ikke set udslag på multimeteret, hvorved spændingsforsyningen overholder kravet om at skulle kunne levere en jævn spænding. Dette betyder at spændingsforsyningen kan udsende en spænding, som er passede for at forsyne EMG-forstærkeren, der typisk kræver en spænding på typisk  $\pm 3V$ , jf. afsnit 4.1.1. Derudover testets der for om spændingsregulatoren udsender et signal, hvis den ikke leverer en konstant spændingen. Dokumentation for denne test fremgår af figur 6.4. Det blev målt at spændingsregulatoren leverede en spænding på omkring  $\pm 5,4 V$  når LED'en var tændt, mens den leverede en spænding på  $0,0985 mV$  når LED'en var slukket.

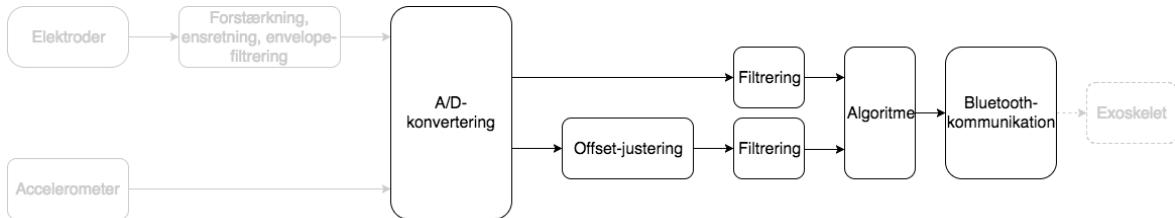


**Figur 6.4:** Billedet til højre viser spændingsregulatorens når den leverer en spænding på 5,4 V, hvorved en LED lyser grønt for indikere dette. Billedet til venstre viser spændingsregulatorenen når den ikke leverer en passende spænding, hvormed LED'en er slukket.

#### Opsummering af krav:

- ✓ Skal kunne forsyne aktive komponenter i den analoge del af kredsløbet
- ✓ Skal kunne levere en jævn spænding
- ✓ Skal kunne give et signal, hvis der ikke leveres en konstant spænding

## 6.2 Digital del

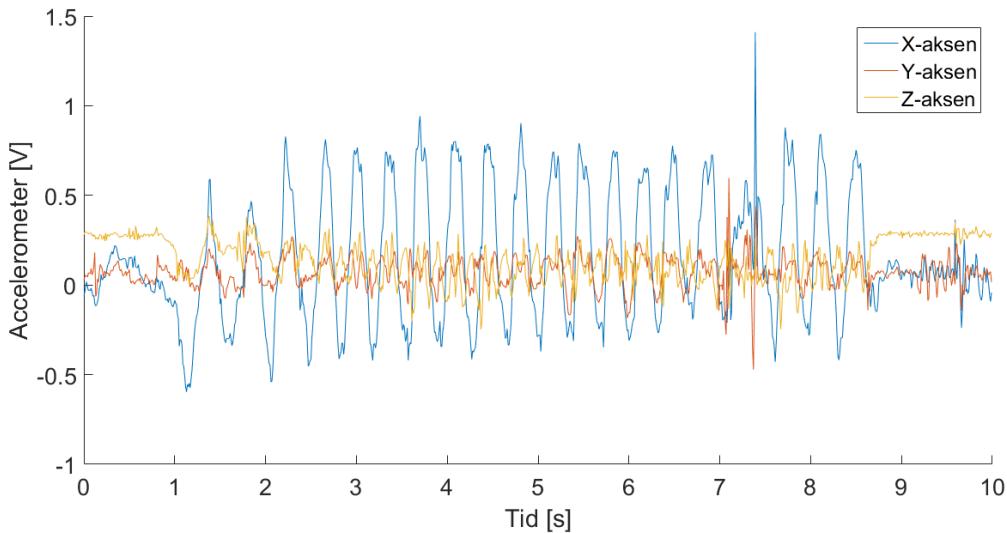


**Figur 6.5:** Blokdiagrammets digitale del

For at undersøge om systemet opfylder kravene i afsnit 4.2, skal den digitale del af systemet som vist på figur 6.5 testes. Dette gøres ved at teste de enkelte blokke hver for sig og vurdere om de opfylder de stillede krav. Udover de viste blokke i blokdiagrammet testes der for vinkelberegning og EMG-algoritme, som anvendes for at systemet kan udføre en squat-øvelse på baggrund af disse funktioner.

### 6.2.1 Analog-to-Digital Converter

For at teste, hvorvidt ADC'et kan sample tre inputs, foretages en test, hvorpå 3 kanaler opsættes. Dette fremgår af figur 6.6.



**Figur 6.6:** Tre input samlet samt visualiseret i MATLAB. Input-signalet er samlet fra accelerometrets tre akser.

Det ses af figur 6.6, at ADC'en herved kan sample 3 inputs fra et accelerometer. Kanalerne kan herved ændres til et ønsket inputsignal eksempelvis et muskelsignal.

På baggrund af afsnit 5.2.1 er der valgt at anvende en ADC med et arbejdsområde på  $2^{11}$ , hvilket vurderes at være acceptabel og ikke forringer det ønskede signal under konverteringen. Dette ses ligeledes af figur 6.6.

Det fremgår afsnit A.1 at frekvensområdet for muskelaktivitet befinner sig relativt lavfrekvent mellem  $0,4 - 10\text{ Hz}$ . Derved anses en samplingfrekvens på  $100\text{ Hz}$  tilstrækkelig.

Derudover fremgår det af figur 6.6, at signalet ikke overstiger ADC'ens arbejdsområde under store udsving af accelerometersignalet. Hertil forventes det, at signalet ikke overstiger arbejdsområdet ved det endelige system, da bevægelsen herunder er kontrolleret og med mindre udsving.

ADC'ens samplingsfrekvens testes for at undersøge om den indstillede og reelle samplerate er identisk. Til denne test defineres en variable, som tæller op for hver gang, at der er konverteret data fra ADC'en. Hvis en konvertering mislykkes vil den givende sample ikke registreres. De registrerede værdier videresendes via USB-forbindelse mellem computer og mikrokontroller, hvorefter dataen aflæses i MATLAB. Testen foretages i 30 minutter, hvorved konverteringen samt tid startes på samme tid. De registrerede data aflæses, hvorved en samplingsfrekvens udregnes af ligning 6.1. Antallet af konverteringer målt under testen er 177066 samples over en periode af 1800, 16 s.

$$F_s = \frac{177066 \text{ samples}}{1800, 16 \text{ s}} \quad (6.1)$$

Der forventes en samplingsfrekvens på  $100\text{ Hz}$ . Den reelle frekvens er udregnet til  $98,36\text{ Hz}$  ud fra ligning 6.1. Dette giver en afvigelse på 1,64%. Afvigelsen kan relateres til, at tiden

og konverteringen ikke har været startet og stoppet på præcis samme tid. Dette resulterer i, at der ikke er en direkte relation mellem køretiden for ADC'en og tiden. Yderligere tillader indstillingerne for ADC'en, at der kan ændres i konverteringstiden for de enkelte kanaler, men samtidig oplyse, at der bevares en aktuel samplingsfrekvens på  $100\text{ Hz}$ . Dette antages ligeledes at have en indflydelse på samplingsfrekvensen, selvom den oplyses som værende  $100\text{ Hz}$ .

Tilstrods for afvigelsen godkendes ADC'en indstillinger. Dette relateres til, at lavfrekvente signaler samples, og at størrelsen på afvigelsen ikke har betydning for repræsentationen af signalerne. Med henblik på den endelige anvendelse i form af et exoskellet, vil systemet ligeledes skulle følge kroppens naturlige bevægelse. Hertil fremhæves, at exoskellet ikke skal tilpasse en ny position 100 gange i sekundet, da det ville være uhensigtsmæssigt.

#### Opsummering af krav:

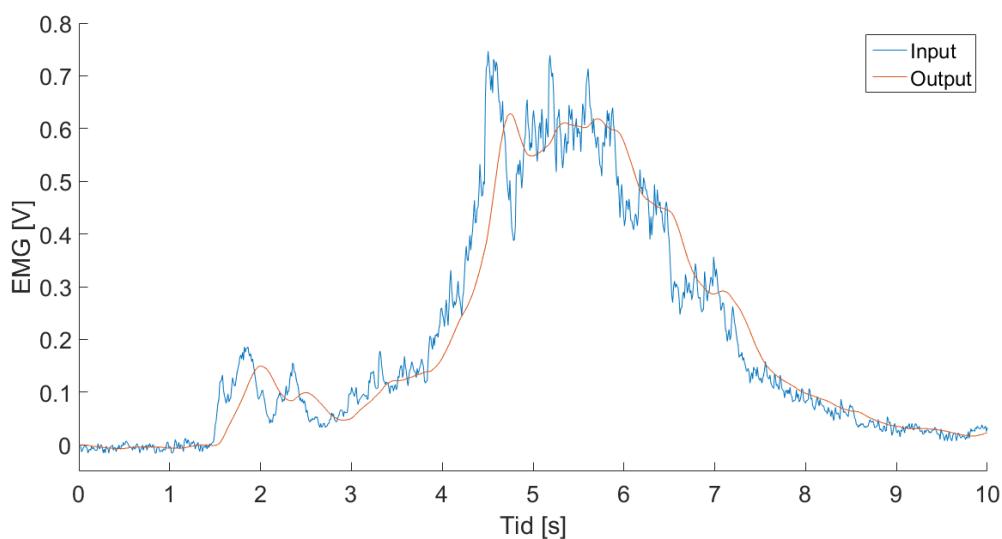
- ✓ Skal sample minimum tre inputs
- ✓ Skal have en oplosning, der ikke forringer signalet
- ✓ Skal have en samplingsfrekvens omkring 10 gange større end den højeste signalfrekvens
- ✓ Skal undgå, at signalet ikke overstiger ADC'ens arbejdsmøråde
- ✓ Samplingsfrekvensen skal have en maksimal afvigelse på 2 %

### 6.2.2 Digital filtrering

De implementerede filtre på PSoC, herunder lavpasfilter og moving average, testes for at se om de opfylder de opstillede krav i afsnit 4.2.2. Det vurderes hvorvidt detfiltrede signal følger det ufiltrede signal og efterfølgende undersøges forsinkelsen af signalet.

#### Lavpasfilter

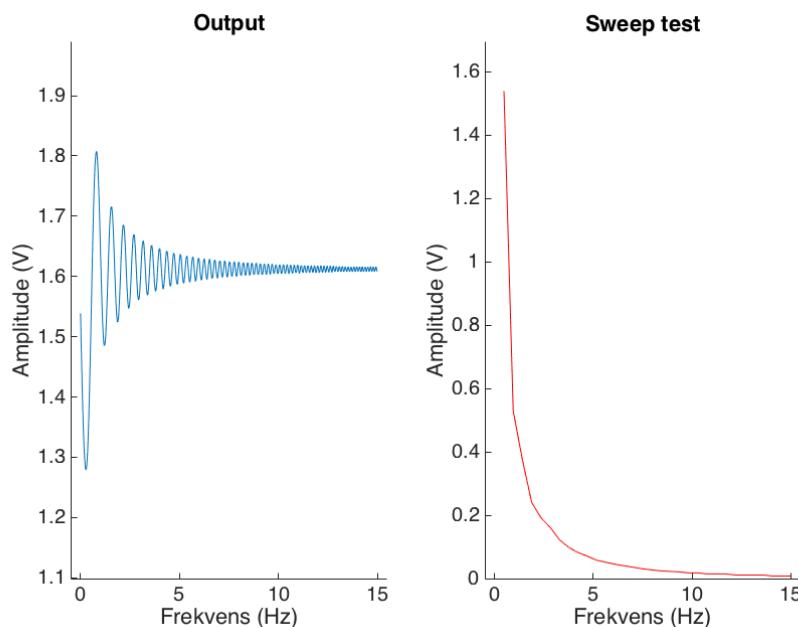
For at undersøge, hvilken betydning det digitalt filtrede signal har i forhold til det samplede signal, visualiseres disse. De samplede signaler er fra pilotforsøget, som er beskrevet i afsnit A.1. Signalerne sendes til mikrokontroleren via en UART-forbindelse, hvorved den retunerede værdi modtages og visualiseret i MATLAB, hvilket fremgår af figur 6.7.



**Figur 6.7:** Den blå graf illustrerer et samplede muskelsignal og den røde graf illustrerer et digitalt filtrede muskelsignal.

Figuren illustrerer, at inputsignalet følger det samplede signal dog med forsinkelse, for at teste forsinkelsen i det filteret eksekveres, defineres en debug-pin. Denne pin sættes høj før funktionskaldet og lav efter funktionskaldet. For at måle, hvor længe pinen er høj, tilsluttes et oscilloskop. Ud fra dette kan der aflæses en forsinkelse på  $175 \mu s$ , hvilket er den forsinkelse der går før data har passeret det digitale filter. Denne forsinkelse vurderes ikke at have nogen signifikant betydning.

For at vurdere om filteret dæmper nok i forhold til de opstillede krav i afsnit 4.2.2, udføres en sweep-test af frekvenser fra  $0 - 15 \text{ Hz}$  med en funktionsgenerator. Dette frekvensområde er valgt på baggrund af målinger fra afsnit A.1, hvor det fremgår, at signalet ligger mellem  $0,4 - 10 \text{ Hz}$ . Da funktionsgeneratoren ikke kan indstilles til en frekvens på  $0 \text{ Hz}$  indstilles denne til  $1 \mu \text{Hz}$ . Amplituden sættes til  $1 \text{ V}_{pp}$  med et offset på  $1,65 \text{ V}$ , som er det halve af spændingsforsyningen på  $3,3 \text{ V}$ . De målte værdier er multipliceret med spændingsforsyningen divideret med ADC'ens arbejdsområde, for således at omregne dette til spænding. Spændingensforsyningen er på  $3,3 \text{ V}$  og ADC'ens arbejdsområde er 2048. Resultatet af sweep-testen fremgår af figur 6.8.



**Figur 6.8:** Lavpasfiltrering af sweep-test fra  $0$  til  $15 \text{ Hz}$ . Målingen er foretaget med et inputsignal svarende til en sinusbølge med en peak-to-peak på  $1 \text{ V}$ . Signalet samples med en frekvens på  $100 \text{ Hz}$ . Den venstre figur viser signalet efter filtrering, mens den højre figuren viser  $V_{pp}$  gennem en sweep-test. Signalet er opdelt i vinduer af  $500$  millisekunders varighed og overlapper hinanden med  $50\%$ .

En dæmpning på  $-3 \text{ dB}$  for den valgte knækfrekvens på  $5 \text{ Hz}$  bestemmes, samt en dekade længere ude svarende til en frekvens på  $50 \text{ Hz}$ . Da der anvendes et 2. ordens filter, skal denne frekvens dæmpes ved  $-40 \text{ dB}$ . Da der er anvendt EMG-forstærkeren fremgår  $50 \text{ Hz}$  ikke, hvilket er beskrevet i afsnit 5.1.1. Outputspændingen ved disse dæmpningsfaktorer er udregnet ved ligning 6.2 og ligning 6.3.

$$-3 \text{ dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{out}}{0,1} \right) \Rightarrow V_{out} = 0,07V \quad (6.2)$$

$$-40 \text{ dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{out}}{0,1} \right) \Rightarrow V_{out} = 0,01V \quad (6.3)$$

Da målingerne for  $V_{pp}$  ikke er muligt at aflæse nøjagtige værdier, hvorfor der tages udgangspunkt i de nærmeste værdier. Værdierne for  $5 \text{ Hz}$  er  $0,06 \text{ V}$ . Afgivelsen fremgår af ligning 6.4 og ??.

$$Afvigelse_{5 \text{ Hz}} = \frac{0,06V - 0,07V}{0,07V} = -0,14 = -14\% \quad (6.4)$$

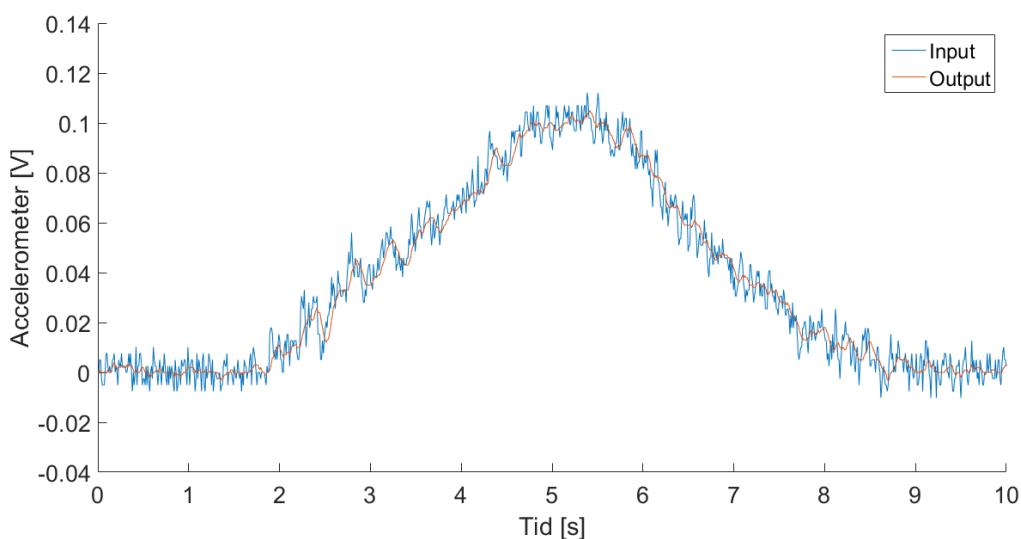
Afgigelserne for  $5 \text{ Hz}$  er  $14\%$ . Dette betyder at filteret ikke dæmper signalet nok. Da målingerne for outputspændingen, målt ved de forskellige frekvenser, ikke er nøjagtig aflæst er det forventet, at der er en større afgivelse fra værdierne udregnet i ligning 6.2. På baggrund af dette godtages filteret.

#### Opsumming af krav:

- ✓ Skal følge inputsignalet mest muligt
- ✓ Skal udformes som et Butterworth lavpasfilter
- ✓ Skal have en knækfrekvens på  $5 \text{ Hz}$
- ✓ Skal have en filterorden på 2

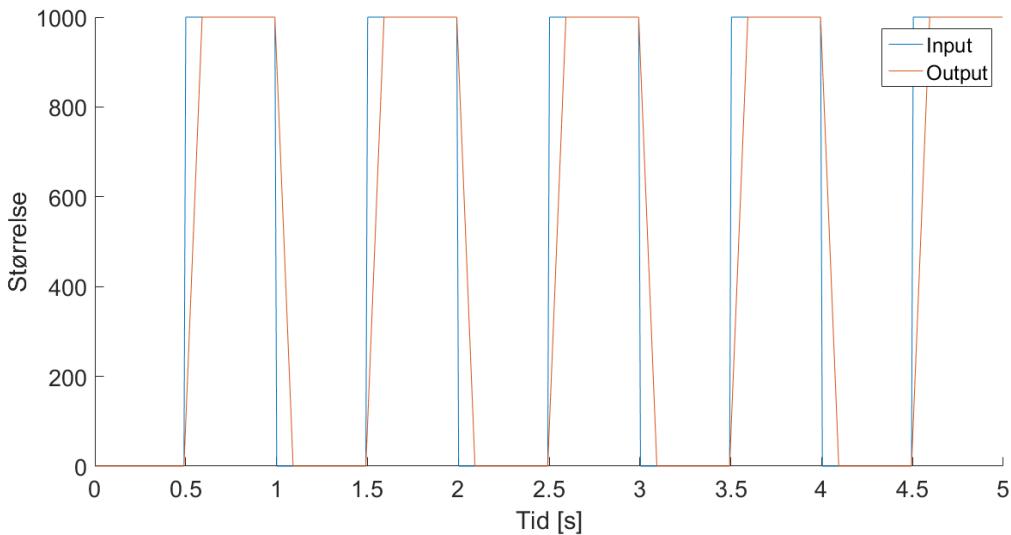
#### Moving average filter

Moving average filteret testes for at undersøge, hvorvidt de opstillede krav overholdes, samt undersøge om designet er korrekt implementeret. Måden, hvorpå dette testes er ved anvendelse af data fra pilotforsøget, da dette giver kontrolleret testforhold. En computer med MATLAB benyttes til at sende en givende måling til mikrokontrolleren, hvorpå det digitale filter er implementeret. Mikrokontrolleren returnerer løbende den filtrerede værdi, der visualiseres i MATLAB. Ud fra dette ses om filteteret virker hensigtsmæssigt. Resultatet af denne test fremgår af figur 6.9.



**Figur 6.9:** Den blå graf illustrerer et ufiltreret signal fra accelerometer og den røde graf illustrerer et filtreret signal fra accelerometer, visualiseret i MATLAB

Da filteret kræver 10 samples for at returnere den første værdi testes det, hvorvidt dette stemmer overens med det forventede forsinkelse på  $100\text{ ms}$ . Dertil er endnu en test foretaget, hvor et signal genereres i MATLAB. Dette signal sendes igen ind i mikrokontrolleren, hvortil et moving average filter pålægges. Herved er forsinkelsen beregnet. En visualisering af denne test ses af figur 6.10



**Figur 6.10:** Den blå graf illustrerer et ufiltreret signal, genereret i MATLAB og den røde graf illustrerer det filtreret signal, visualiseret i MATLAB

Resultatet fra denne test viser en forsinkelse af moving average filteret på  $0,09$  sekundt, hvilket er lavere end den forventede forsinkelse på  $0,1$  sekundt og derfor accepteres.

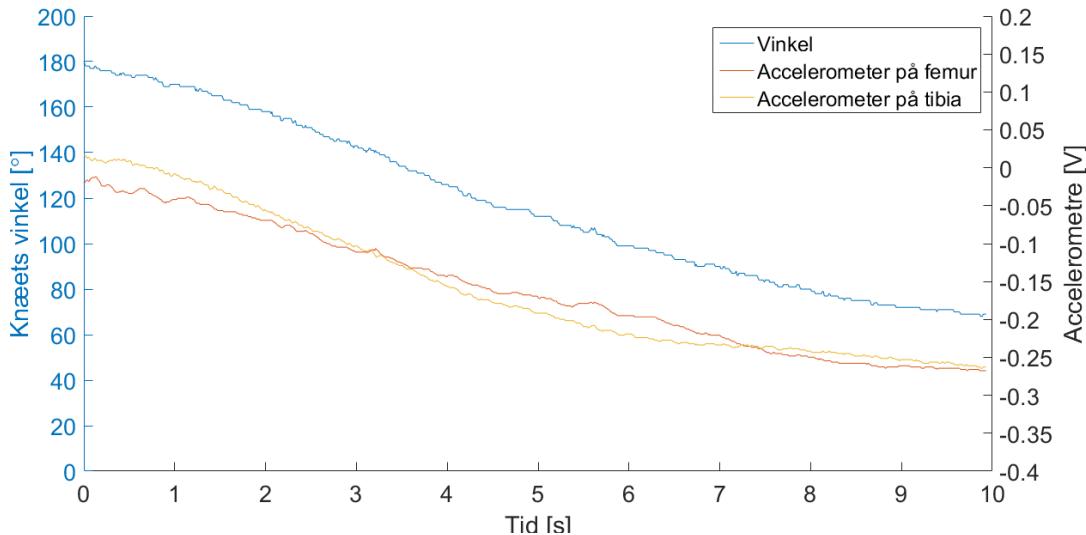
Yderligere foretages en test af forsinkelsen. Testen er udført på samme måde som forklaret i afsnit 6.2.2. Resultatet fra testen er en forsinkelse på  $320\text{ }\mu\text{s}$  for data at passere filteret. Dette betragtes som værende ikke af signifikant betydning. Ud fra ovenstående resultater vurderes det, at det filterede signal opfylder kravene for afsnit 4.2.2.

#### Opsummering af krav:

- ✓ Skal muliggøre en repræsentation af spændinger
- ✓ Skal have en filterlængde på 10 samples
- ✓ Skal have en maksimal forsinkelse på  $100\text{ ms}$

#### 6.2.3 Vinkelberegning

For at teste, om omregningen fra spændingen fra accelerometeret til grader fungerer i praksis, bevæges vinkeltesteren, der er vist på figur B.1, fra  $180^\circ$  til  $70^\circ$ . Figur 6.11 illustrerer dette i MATLAB, hvor vinklen er illustreret på den venstre Y-akse, og hvor accelerometrenes spænding er illustreret på den højre Y-akse.



**Figur 6.11:** Test af vinkelberegning. Vinkel, som er den blå graf, er svarende til den samlede vinkel mellem de to accelerometre, hvor værdierne er illustreret på Y-aksen til venstre i grader. Spændingen målt for de to accelerometre måles i forhold til Y-aksen til højre og er vist ved en rød og gul graf.

Det ses på figur 6.11, at der er en sammenhæng mellem spænding og den samlede vinkel for accelerometrene. Der tages udgangspunkt i tabel 5.3 for omregningen, hvor spændingen for hvert accelerometer omregnes til grader. Disse lægges sammen for at udregne den samlede vinkel. Derudover illustrerer figuren, at vinklerne virker inden for det forventede arbejdsmønster på  $180^\circ$  til  $90^\circ$ , men ligeledes kan måle vinkler, der er lavere end  $90^\circ$ .

På figuren aflæses, at systemet registrerer en vinkel på  $90^\circ$ , når accelerometeret på femur giver en spænding på  $-0,2191\text{ V}$  og accelerometeret på tibia giver en spænding på  $-0,2336\text{ V}$ . For at teste vinkelberegningen, sammenlignes de målte spændinger for accelerometrene, der er illustreret på figur 6.11, og de beregnede værdier i afsnit 5.2.3 omregnet en tilsvarende spænding. Spændingerne der er målt for accelerometrene er lagt sammen for, at få den samlede spænding der opnås. Resultaterne heraf fremgår på tabel 6.1.

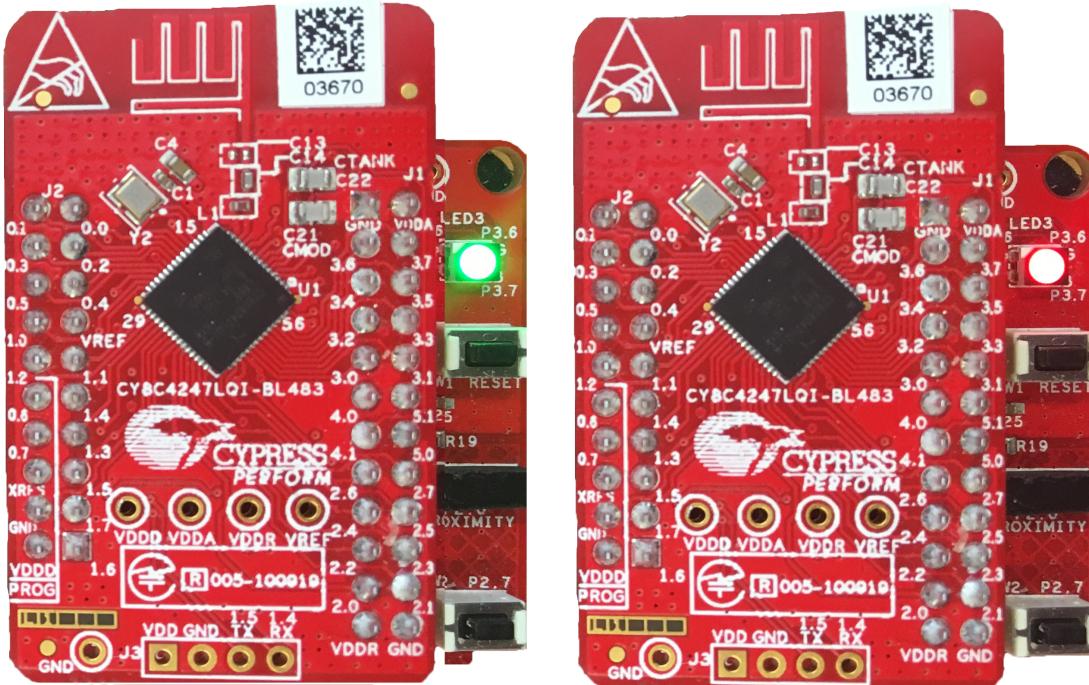
Vinkel [ $^\circ$ ]	Test spænding[V]	Implementeret spænding [V]	Afvigelse [%]
<b>180</b>	0	-0,00323	0,3 %
<b>160</b>	-0,1136	-0,11118	2,1%
<b>140</b>	-0,2150	-0,2240	4,2 %
<b>100</b>	-0,4044	-0,4109	1,6 %
<b>80</b>	-0,5447	-0,4906	3, 4 %

**Tabel 6.1:** Afvigelse mellem implementeret og testet spænding inddelt efter en vinkel på  $180^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $100^\circ$  og  $80^\circ$ . Det fremgår at afvigelsen er mellem 0,3 til 4,2 %

Ud fra tabel 6.1 fremgår en afvigelse mellem 0,3 og 4,2 %. Dette kan skyldes, at linearitet målt i ?? kun har en lineær sammenhæng, hvilket kan få betydning for anvendelse af lineær interpolation til beregning af intervallet for de enkelte grader i afsnit 5.2.3. Derudover fremgår det at de vinkler, hvor der er et interval på  $40^\circ$  har en højere afvigelse end de vinkler, hvor intervallet er på  $20^\circ$ . Dette gør sig gældende for en vinkel  $140^\circ$  og  $80^\circ$ . Vinklen på  $80^\circ$  har

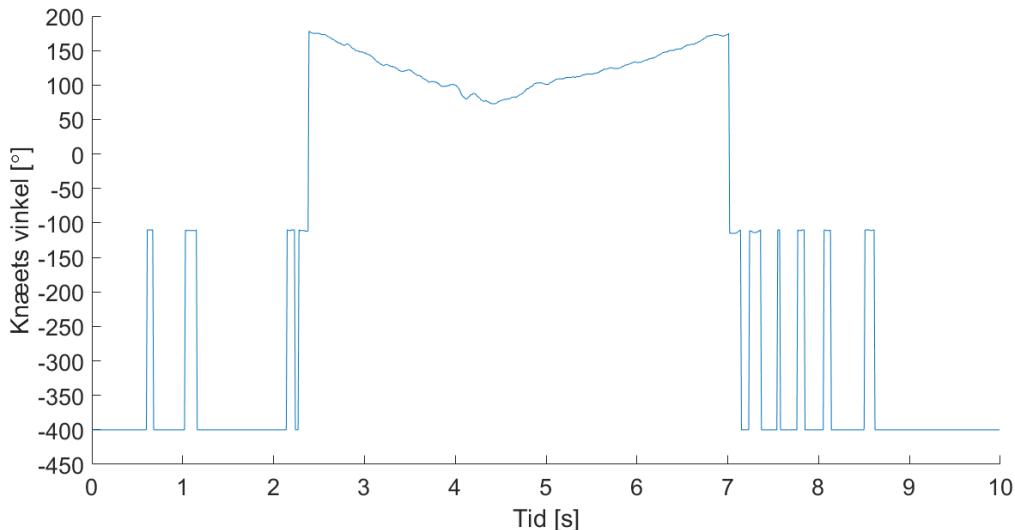
ikke en betydning, da systemet er designet til at fungere inden for  $90$  til  $180^{\circ}$ . Det vurderes, at afvigelsen ikke har den store betydning for det samlede system, da  $80^{\circ}$  ligger uden for intervallet på  $90$  til  $180^{\circ}$ . Derudover er systemets primære opgave at signalere når knæets vinkel overstiger  $90^{\circ}$  eller over  $180^{\circ}$  ved en rød LED, hvorfor  $140^{\circ}$  ikke vil have en betydning for dette, heraf godtages afvigelsen.

For at teste, hvorvidt LED'en på mikrokontrolleren signalerer en vinkel under  $90$  eller over  $180^{\circ}$ , indstilles vinkeltesten, hvilket ses af figur B.1 brugt i pilotforsøget til henholdsvis  $40^{\circ}$ ,  $100^{\circ}$  og  $200^{\circ}$ . Hertil ses LED'en lyse grøn ved de acceptable grader mellem  $90 - 180^{\circ}$ , og rød ved grader udenfor graderne  $90 - 180^{\circ}$ . Dette ses af figur 6.12.



**Figur 6.12:** Mikrokontrollerens LED ses lyse grøn ved  $100^{\circ}$  og lyse rød ved vinkler udenfor  $90 - 180^{\circ}$ .

Ved en overskridelse af grænsen for vinklen, skal det ligeledes visualiseres. Der er foretaget en test, hvorved accelerometerne er påsat en forsøgsperson som overstrækker i knæledder, hvorefter en squat udføres. En visualisering heraf ses af figur 6.13.



**Figur 6.13:** Grafen illustrerer vinklen over knæet under en squat-øvelse. Ved en vinkel under  $-100^\circ$  symboliseres en overskridelse af grænsen for vinklen.

Det ses af figur 6.13, at forsøgspersonen overstrækker knæleddet, således begge accelerometre overstiger grænsen på  $90^\circ$ , der til sammen udgør en samlet vinkel på  $180^\circ$ . Dette visualiseres ved en vinkel på  $-400^\circ$ . Efter 0,5 sekunder ses en vinkel på  $-110^\circ$ , hvilket er gældende, da det ene accelerometer har haft en spænding svarende til præcis  $90^\circ$  og derfor ikke overskredet grænsen derpå. Ved squat-øvelsen begyndelse ses vinklen falde fra  $180 - 73^\circ$ , hvorefter den ses stigende igen. Til slut af målingen ses igen et fald under  $-100^\circ$ .

En yderligere test er foretaget for at undersøge forsinkelsen af vinkelberegning. Denne test er udført ved at definere en debug-pin, hvor pinen ved funktionskaldet sættes høj og lav efterfølgende. For at illustrere disse målinger tilsluttes et oscilloskop pinen, hvorved der måles hvornår denne er høj. Resultatet af denne test gav en forsinkelse på  $3.6 \mu s$ . Dette betragtes ikke som værende af signifikant betydning, hvorfor denne forsinkelse accepteres.

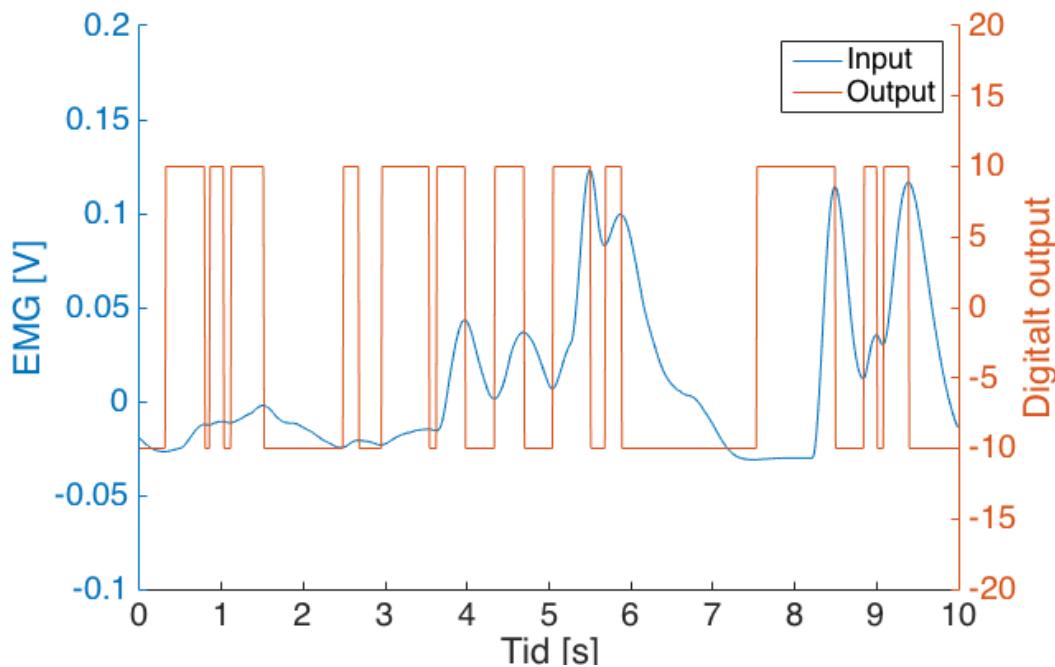
#### Opsummering af krav:

- ✓ Skal kunne udsende ét signal som repræsenterer en given vinkel
- ✓ Skal kunne måle knæets vinkel mellem  $180^\circ$  og  $90^\circ$ 
  - En grøn LED skal lyse, når knæets vinkel befinner sig inden for dette interval
- ✓ Skal indikere, hvornår knæets vinkel er over  $180^\circ$  og under  $90^\circ$ 
  - En rød LED skal lyse, hvis knæets vinkel er over  $180^\circ$  eller under  $90^\circ$
- ✓ Skal indikere, hvornår knæet overstrækkes, hvilket svarer til  $180^\circ$ 
  - Hvis vinklen for ét accelerometer overstiger  $90^\circ$ , indikeres dette som  $-200^\circ$ , hvortil det andet accelerometers vinkel ligges til de  $-200^\circ$
  - Hvis vinklen overstiger  $90^\circ$  for hvert accelerometer, skal dette indikeres som et output på  $-400^\circ$

#### 6.2.4 EMG-algoritme

For at undersøge, om kravene i afsnit 4.2.4 opfyldes, testes EMG-algoritmen ved et muskelsignal på 10 sekunder, der varierer i amplitude. Inputtet til algoritmen, det filtrerede

muskelsignal, og outputtet vælges til at være henholdsvis  $-10$  eller  $10$ , hvis muskelsignalet er faldende eller stigende. Dette illustreres ved hjælp af MATLAB på figur 6.14.



**Figur 6.14:** Den blå graf og tilhørende venstre y-akse illustrerer det filtrerede muskelsignal, der er EMG-algoritmens input, og den røde graf og tilhørende højre y-akse illustrerer, om muskelsignalet er henholdsvis faldende eller stigende ved enten at udsende et signal på  $-10$  eller  $10$ .

Ud fra de data, der fremgår af figur 6.14, findes EMG-inputtets lokale minima- og maksimapunkter. Tidspunkterne for disse lokale ekstrema sammenlignes med tidspunkterne, hvor outputtet skifter i spænding ved at udregne en forsinkelse i sekunder ud fra differensen på tidspunkterne for det lokale ekstrema og skift i output. Dette fremgår af tabel 6.2.

EMG-ekstrema [s]	Output-skift [s]	Forsinkelse [s]
0,32	0,32	0,00
0,80	0,80	0,01
0,86	0,86	0,01
1,02	1,03	0,01
1,11	1,12	0,01
1,51	1,52	0,01
2,48	2,49	0,01
2,67	2,68	0,01
2,95	2,96	0,01
3,53	3,54	0,01
3,62	3,63	0,01
3,97	3,98	0,01
4,33	4,34	0,01
4,69	4,70	0,01
5,04	5,05	0,01
5,50	5,51	0,01
5,68	5,69	0,01
5,88	5,89	0,01
7,53	7,54	0,01
8,49	8,50	0,01
8,84	8,85	0,01
9,00	9,01	0,01
9,08	9,09	0,01

**Tabel 6.2:** Tabel over ekstrema, outputskift og differensen mellem disse, der er noteret som forsinkelsen.

I tabel 6.2 fremgår det, at forsinkelsen fra inputtet af muskelsignalet, der registreres som en ændring i output-signalet, er mellem 0,00 og 0,01 s. Den gennemsnitlige forsinkelse er dermed på 9,57 ms. Målingen, der giver en forsinkelse på 0,00 s, kan dog ikke passe, da EMG-algoritmen bruger én sample på at skifte output fra 10 til -10 eller fra -10 til 10. Ingen forsinkelse vil derfor betyde, at EMG-algoritmens output begynder at ændre sig fra -10 til 10, før EMG-signalet er begyndt at stige.

Forsinkelsen på 9,57 ms kan forklares af, at testen er udført ved at sample EMG-algoritmens input og output ved 100 Hz. Af denne grund er der ikke mere end 100 samples per sekund, hvilket betyder, at der er 10 ms mellem hver sample. Forsinkelsen er derfor sandsynligvis mindre end 9,57 ms, men det kan ikke lade sig gøre at måle mindre tal med den nuværende samplerate.

### 6.2.5 Trådløs kommunikation

Den trådløse kommunikation testes for at undersøge, hvorvidt kravene opstillet i afsnit 4.2.5 opfyldes.

Kravet for, at USB-donglen skal forsynes via USB opfylles ved måden, hvorved den trådløse kommunikation er implementeret. Her er BLE-donglen erstattet med en alternativ

modtagerenhed som beskrevet i afsnit 5.2.5, og denne tilsluttes en computer via USB, hvorfra den forsynes.

Til test af afstand, programmeres mikrokontrolleren til at transmittere en værdi, der tæller op fra nul. Denne værdi transmitteres 10 gange i sekundet til en computer, hvorpå denne data visualiseres i programmet Realterm. Startpunktet for testen er med en afstand på 1 m mellem modtagerenheden på computeren og mikrokontrolleren. Hertil øges afstanden med 1 m indtil der opnås en afstand svarende til det opstillede krav på 2 m. Yderligere fortsættes forøgelsen af afstanden op til maks 4 m, eller til der ikke længere modtages data. Dette er for at undersøge om de 2 m markerer grænsen for den trådløse kommunikation, og dermed definere et flexområde i forhold til det opstillede krav. Testen udføres under forhold, hvor der er fri passage mellem mikrokontroller og modtager.

Afstand [m]	Gennemført transmission
1	Ja
2	Ja
3	Ja
4	Ja

**Tabel 6.3:** Data over afstandstest for den trådløse kommunikation. Venstre søjle oplyser afstand mellem mikrokontroller og modtagerenhed. Den højre oplyser, hvorvidt transmissionen har været succesfuld eller ej.

Ud fra tabel 6.3 kan der konkluderes et flexrum for den trådløse kommunikation, der er 100 % af det opstillede krav. Yderligere viste testen, at systemet lagrer data i en buffer i tilfælde af, at forbindelsen blev afbrudt. I det forbindelsen blev genetableret, blev den tabte data transmitteret, således ingen data gik tabt. Det kan derfor ligeledes konkluderes, at de opstillede krav for trådløs kommunikation opfyldes.

#### Opsummering af krav:

- ✓ Mikrokontrolleren skal kommunikere trådløst med en computer
- BLE-dongle skal forsynes via USB
  - ✓ En anden modtagerenhed er implementeret, hvilket forsynes via USB
- Skal have en maksimal forsinkelse på 100 ms <sup>1</sup>
- ✓ Skal have en kommunikationsrækkevidde på 2 m

<sup>1</sup>Fixme Note: skal denne forsinkelse være større eller mindre?? - HUSK at ændre i brødteksten også!

# Kapitel 7

## Systemtest

---

Dette kapitel indeholder beskrivelse, udførsel af test samt konklusion for test af systemet med kendt input og et bruger-input.

### 7.1 Systemtest med kendt input

I dette afsnit vil det samlede system testes, således det er muligt at undersøge, om systemet behandler dette input, som det forventes. På baggrund af disse målinger er det muligt at konkludere, hvorvidt systemet virker.

#### 7.1.1 Beskrivelse

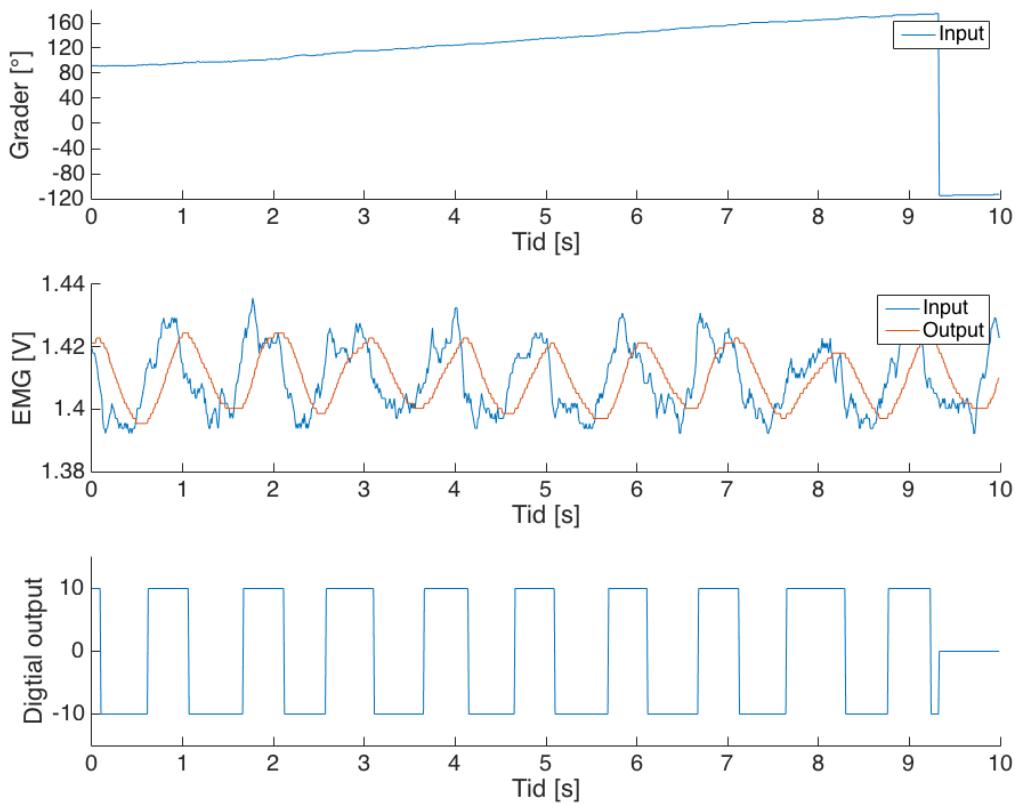
For at teste signalerne fra accelerometrene indsendes to spændinger svarende til hvert deres output. Denne varieres over tid, således spændingen svarer til samlet grader mellem  $90 - 180^\circ$ . Derudover testes det om vinklen vil falde til  $-200^\circ$  for hvert accelerometer, når spændingen svarende til  $180^\circ$  overskrides.

For at teste det samlede system med et kendt input benyttes en funktionsgenerator, således et  $500\text{ Hz}$  sinussignal med en peak-peak-amplitude på  $4\text{ mV}$  kan genereres. Sinussignalets frekvens og amplitude er nær ved, hvad der kan forventes af et filtreret EMG-signal. Outputtet fra sinussignalet er filtreret gennem det implementerede digitale lavpasfilter.

Testen foretages over 10 sekunders måling og optages via mikrokontrolleren. Ud fra disse målinger, er det muligt at teste effekten af systemets blokke, når de er sammensat ved at sammenligne input og output af det samplede sinussignal samt spændingerne for accelerometrene omregnet til en samlet vinkel. Resultaterne fra målingerne visualiseres i MATLAB.

#### 7.1.2 Resultater af test

Fra testen plottes og visualiseres systemets input af det samplede sinussignal, output fra det opsamlede digital filtrerede signal, samt spændingen fra de to accelerometre, der er omregnet til en samlet vinkel ved lineær interpolation. Derudover er det opsamlede digitale output, som er behandlet i EMG-algoritmen, plottet. Resultaterne fremgår af figur 7.1.



**Figur 7.1:** På den øverste figur illustreres den samlede vinkel over tid. Det fremgår af grafen, at vinklen er stigende fra  $90^\circ$  til  $175^\circ$ , hvorefter vinklen falder markant til  $-115^\circ$ . Dette skyldes en overskridelse af spændingen for accelerometeret svarende til  $180^\circ$ . På den midterste figur illustrerer den blå graf det opsamlede inputsignal, svarende til en sinus på  $500\text{ Hz}$  med en  $V_{pp}$  på  $4\text{ mV}$ . Den røde graf illustrerer det samplede sinussignal med et implementeret digitalt lavpasfilter, disse værdier er målt i spænding. På den nederste figur illustreres signalets digitale output. Signalet går fra  $+10$  ved stigende muskelaktivitet til  $-10$  ved en faldende muskelaktivitet. Grafen går i 0, når en overskridelse af en vinkel  $180^\circ$  opnås.

På baggrund af målingerne for den øverste figur på figur 7.1 fremgår det, at en indsendt stigende spænding svarende til  $90 - 175^\circ$ , får den samlede vinkel til at stige. Ved en vinkel på  $175^\circ$  overskrides det ene accelerometer dens maks spænding, hvorfor vinklen daler markant på  $1\text{ ms}$  til  $-115^\circ$ . Dette burde ifølge den implementerede kode gå ned til en vinkel på  $-200^\circ$  ved overskridelse af ét accelerometers grænse spændinger. Vinklen som ikke når  $-400^\circ$  er en indikator for, at det ene accelerometers spænding har været indenfor dens grænser, mens det andet accelerometer har overskredet dens grænser. Hertil kan det ses, at det ene accelerometer har haft indsendt en spænding svarende til  $85^\circ$ , mens det andet accelerometer har haft en spænding der har overskredet grænsen og derfor har en vinkel på  $-200^\circ$ . Det fremgår af den midterste samt nederste figur på figur 7.1, at der ses en sammenhæng mellem det opsamlede digital filtrerede sinussignal og det opsamlede outputsignal. Ved et stigende sinussignal vil outputsignalet indikerer 10, hvilket svarer til en stigning af sinussignalet. Ved fald af sinussignalet vil outputsignalet indikerer et fald og dermed ligge i  $-10$ .

På den nederste figur på figur 7.1 fremgår det, at efter outputsignalet har befundet sig i  $-10$  ved 9 sekunder, stiger outputsignalet efterfølgende til 0. Dette er grundet, at de samlede grader har overskredet én eller flere grænser, og derved fungerer EMG-algoritmen ikke, hvilket illustreres med at outputsignalet går i 0.

Der er yderligere foretaget en test af det samlede forsinkelse på systemet. Denne test blev udført på samme måde som i afsnit 6.2.2 afsnit 6.2.2. Resultaterne for forsinkelse blev målt til  $832 \mu s$  for det samlede system.

## 7.2 Systemtest med bruger-input

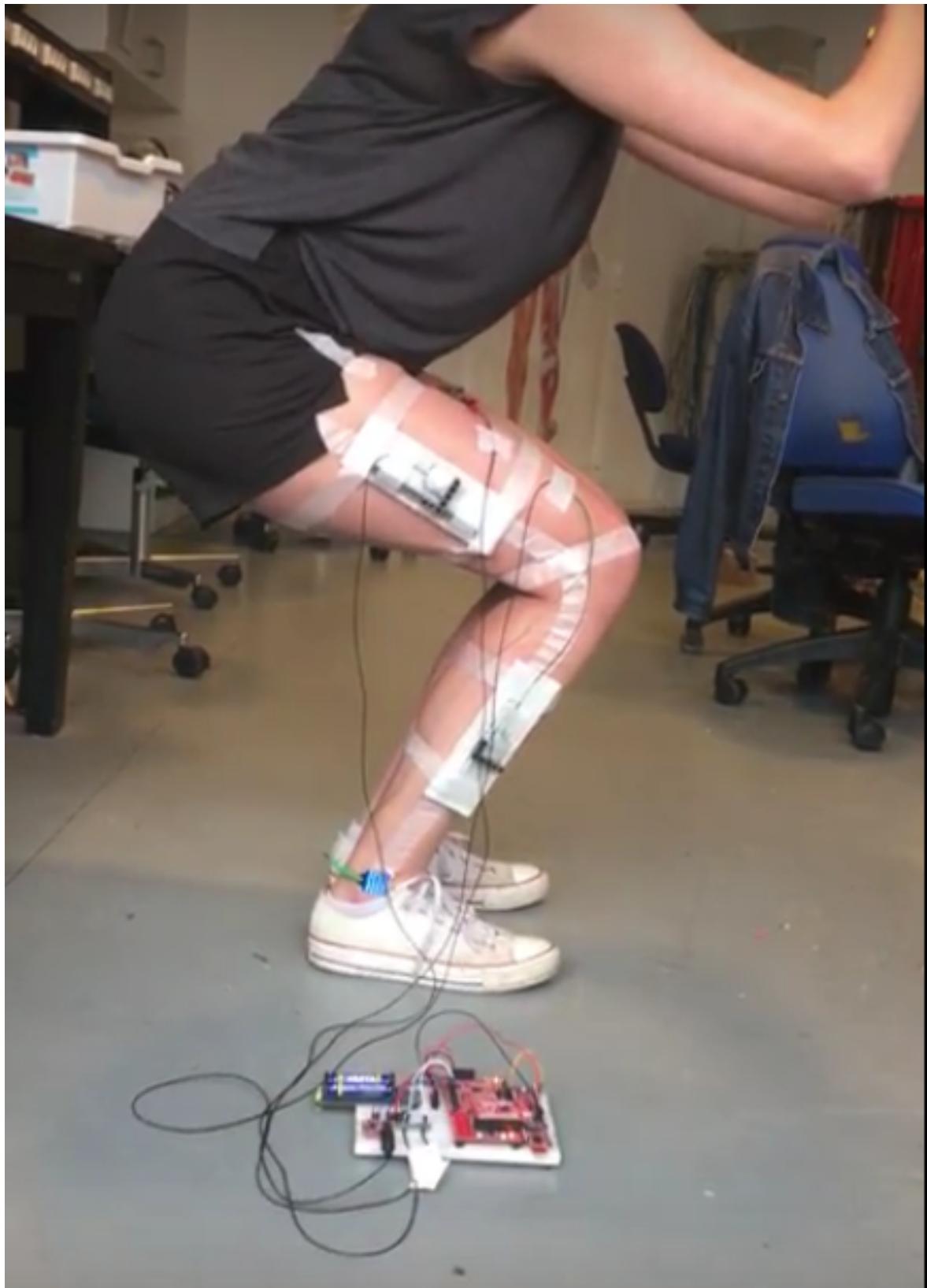
### 7.2.1 Beskrivelse

For at teste det samlede system med bruger-input påsættes den positive og negative elektrode på femur, og referenceelektroden påsættes anklen, som illustreret i afsnit A.1 på henholdsvis figur A.1 og figur A.2, ud fra SENIAMS anvisninger [54]. Huden præparereres forinden dette for således at fjerne hår og døde hudceller. De to accelerometre påsættes breadboards for at stabilisere deres placering, disse placeres henholdsvis parallelt med femur og parallelt med tibia, som illustreret på figur A.3.

Systemet testes over 10 sekunders måling og optages via mikrokontrolleren. Der skal hertil foretages to målinger, hvor forsøgspersonen starter med at stå opejst og overskride en vinkel på  $180^\circ$  af knæet ved at overtrække knæleddet. Herefter bevæger forsøgspersonen sig langt ned i en squat-øvelse, hvorved vinklen af knæet overskridt grænsen på  $90^\circ$ . Forsøgspersonen bevæger sig herefter tilbage til udgangsposition, hvor de  $180^\circ$  overskrides ved overstræk af knæleddet. På denne måde testes det, hvorvidt om det samlede system fungerer, da en overskridelse af  $90 - 180^\circ$  vil betyde, at data ikke vil gå videre ind i EMG-algoritmen. Dette illustreres ved at det digitale output vil gå i 0. Under testen opsamles det samplede digital filtrede EMG-signal, EMG-algoritmen samt vinklen over knæet.

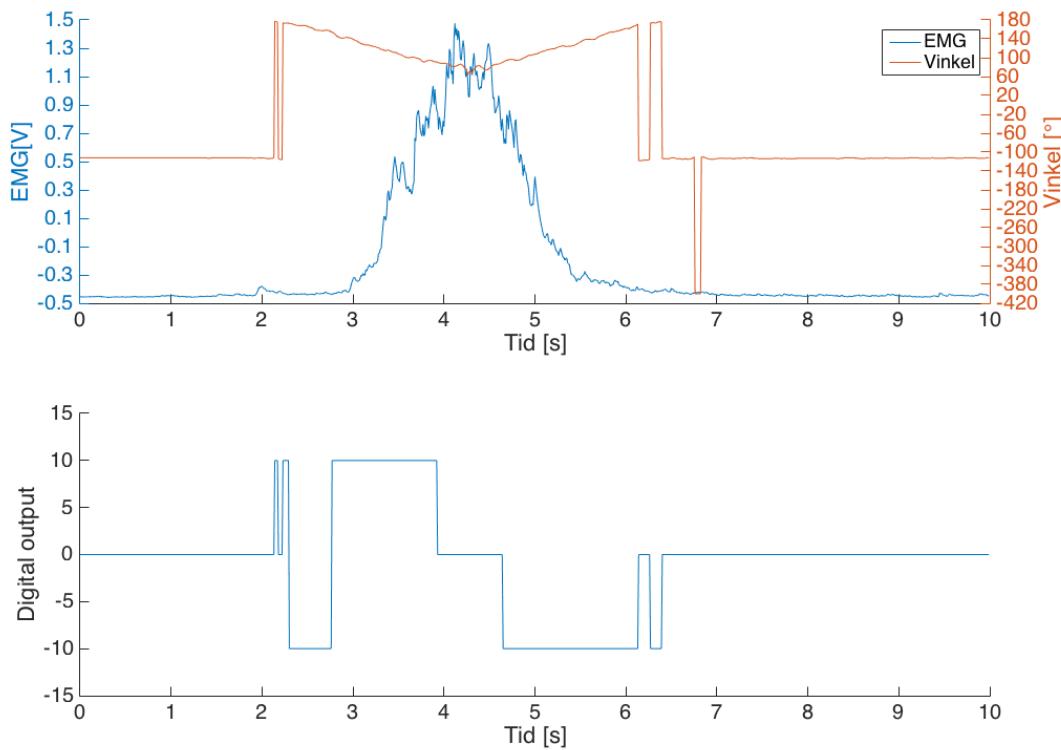
### 7.2.2 Resultater af forsøg

Af 7.2 ses en illustration af systemet påsat forsøgspersonen, hvortil mikrokontrolleren ses koblet til forsøgspersonen.



**Figur 7.2:** Forsøgsopstilling til udførelse af symestemtest med bruger-input.

På baggrund af testen er systemets input samt output plottet og visualiseret. Visualisering af de opsamlede signaler forekommer af figur 7.3.



**Figur 7.3:** På den øverste figur ses muskelaktivitet ved udførelse af en squat-øvelse samt vinklen over knæet under øvelsen. Den blå graf illustrerer det samplede digital filtrerede EMG og den røde graf illustrerer vinklen over knæet. Hertil ses der et fald til under  $-100^\circ$ , hvilket illustrerer en overskridelse af  $180^\circ$ . Den nederste figur illustrerer signalets digitale output i EMG-algoritmen. Denne visualiserer en stigning og et fald af det opsamlede EMG-signal, hvorved en stigning af muskelaktiviteten illustreres som værende +10 og et fald i muskelaktiviteten som værende -10. Ved grafen lig 0 illustreres en overskridelse af  $90 - 180^\circ$  af knæet.

Ud fra testen ses der en sammenhæng mellem muskelaktiviteten under en squat-øvelse og vinklen over knæet under øvelsen. Ved en stigning af muskelaktiviteten ses et fald i grader over knæet, hvilket ses mellem 2–4 s. Herved ses der ved fald af muskelaktiviteten en stigning af grader, hvilket ses mellem 4,5–6,5 s. Ved starten af testen overstrækker forsøgspersonen knæet, hvilket ses ved, at vinklen er  $-112^\circ$ . Grunden til denne er  $-112^\circ$  og ikke  $-400^\circ$  er, at det ene accelerometer har været indenfor græsene på  $180^\circ$  og den andet accelerometer har overskredet grænsen. Det ene accelerometer har derved haft en vinkel på  $88^\circ$ , mens det andet accelerometer har overskredet dens grænse og derfor er den samlet vinkel på  $-112^\circ$ . Det samme gør sig gældende ved slutningen af øvelsen. Ved overstrækning af knæet og dermed overskridelse af  $180^\circ$  ses EMG-algoritmen værende 0. Efter 2 s overstrækkes knæet ikke længere og graderne begynder derved at falde i takt med muskelaktiviteten stiger. Ved en stigning af muskelaktiviteten ses EMG-algoritmen ligeledes stigende. Ved 4 s er vinklen over knæet  $81^\circ$ , hvilket er en overskridelse af græsene på  $90^\circ$ . Dette illustreres ved EMG-algoritmen går i 0. Efter 4,5 s ses en stigning af grader i takt med et fald i muskelaktiviteten. Derved ses der ligeledes et fald i EMG-algoritmen. Efter 6 s overstrækkes knæene igen, hvorefter begge accelerometre overskridter deres grænser, hvorfor grafen illustrerer  $-400^\circ$ . Herefter

overstrækkes knæene fortsat, dog ligger det ene accelerometer indenfor dens grænse, hvilket forklarer vinklen på  $-112^\circ$ .

### 7.3 Konklusion af systemtest

Da det ikke er alle krav i afsnit 3.1.1, der er mulighed for at teste og dokumenterer ud fra de forsøg, der er foretaget, vurderes disse på baggrund af implementering, test og videreudvikling.

Det samlede system var batteridrevet under udførelsen af begge forsøg, hvorfor dette krav er overholdt. Derudover var det muligt at overføre de beregnede data i mikrokontroleren trådløst til en computer, hvor de efterfølgende blev visualiseret i MATLAB i realtime. På baggrund af dette vurderes det, at det er muligt at sende data trådløst fra en computer videre til et exoskelet, bygget i LEGO mindstorm NXT. Det vurderes yderligere, at systemet er sikkert i forhold til brugersikkerheden, da systemet under forsøget var batteridrevet, og derfor ikke var tilkoblet elnettet, hvormed dette mindskede muligheden for lækstrøm. På nuværende tidspunkt kan systemet opfattes som ikke værende optimalt for brugeren, da der ikke er udarbejdet en prototype. Herved er kravet om exoskelet ikke skal være til gene for brugeren ikke er opfyldt. Ved udvikling af en prototype vil der skulle tages højde dette. Et eksempel på dette fremgår senere i ???. På baggrund af målinger foretaget i afsnit 6.1.3 blev det påvist, at spændingsregulatoren indikerer, når systemet ikke leverer den optimale strøm til systemet, hvorved dette krav er opfyldt.

Ud fra de to forsøg med henholdsvis kendt input og bruger-input vurderes det, at systemet fungerer under kontrollerede forhold samt ved anvendelse af en bruger. Systemet kan opsamle signaler fra rectus femoris samt beregne vinklen af knæleddet, hvilket blev påvist i forsøget med brugerinput, hvor resultaterne fremgår af figur 7.3. Baseret på disse resultater vurderes det yderligere, at systemet kan følge kroppens naturlige bevægelse under udførelsen af en squat-øvelse.

Da systemet skal anvendes af ALS-patienter vurderes det, at forsinkelsen af det samlede system ikke har en betydning, grundet at squat-øvelsen er kontrolleret og der derfor ikke udføres bevægelser med en hastighed der er tilsvarende forsinkelsen. Dermed får dette ikke en betydning for de enkelte blok og efterfølgende, hvorfor denne forsinkelse accepteres.

På baggrund af dette vurderes det at systemet overholder de overordnede krav opstillet i afsnit 3.1.1.

#### Opsummering af krav:

- ✓ 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, så det vil kunne benyttes til en prototype af et exoskelet

# Kapitel 8

## Syntese

---

### 8.1 Diskussion

I dette afsnit vil systemet og projektet diskuteres, og relevante afvigelser fra systemkrav og blokkes krav vil derfor tages op. Diskussionen vil først tage udgangspunkt i tests af systemets enkelte blokke, og hvad de har betydet for det endelige system og dermed besvarelsen af projektets problemformulering, og derefter i de samlede systemtests.

Formålet med dette projekt er at udvikle et system, som kan opsamle signaler fra kroppen, hvor der er fokus på digital signalbehandling og datakommunikation [1]. På baggrund af dette er der udviklet et system, der kan måle muskelaktivitet fra rectus femoris ved hjælp af EMG og måle vinklen over knæet ved hjælp af accelerometre, og som har til formål at støtte knæets omkringliggende muskler, så ALS-patienter støttes i forbindelse med udførelsen af en squatøvelse. På baggrund af teori, implementering og test af systemets enkelte blokke fremgår det, at kravene til de enkelte blokke er overholdt. Der er dog nogle områder, hvor andre alternativer kan overvejes for mulige forbedringer af hele systemet.

#### 8.1.1 Test af blokke

Systemet er udviklet, så størstedelen af signalbehandlingen foregår digitalt, da dette er fokus i forhold til studieordningen. Hvis dette ikke havde været et krav for dette semester, kunne det have været en fordel, at nogle af blokkene var designet analogt, hvorved det kunne være nemmere at finde samt rette op på eventuelle fejl i systemet. Et eksempel herpå er i forhold til opsamling af signaler fra accelerometre.

For at give en bedre opløsning af accelerometrene kunne det være relevant at implementere en forstærker inden ADC'en, hvorved der opnås en bedre repræsentation af accelerometersignalene. Denne forstærker blev ikke implementeret, da det ville kræve en analog offsetjustering af signalet, så signalet ikke vil gå i mætning, da signalet med offset vil kunne overstige ADC'ens arbejsområde.

Systemet benytter herudover en udleveret komponent, EMG-forstærkeren, der ensretter, forstærker og envelopefiltrerer signalet. Denne blok kunne være fordelagtig at implementere som flere blokke, så det ville være muligt at teste og dokumentere disse hver for sig. På denne måde vil det være muligt at opstille krav til hver blok og justere og ændre disse blokke. Dette vil dog ikke påvirke systemet, som det er nu, da EMG-forstærkeren opfylder de opstillede krav.

Testen af systemets vinkelberegning viste afvigelser mellem 0,3 og 4,2 %. Selvom den største afvigelse ikke er nær hverken 90° eller 180°, kan resultere i, at systemet ikke fungerer som tiltankt, hvis 90 – 180°'s vinkel over knæet alligevel overskrides grundet afvigelser. Som nævnt i afsnit 2.3.2, kan sammenhængen mellem stigende og faldende muskelaktivitet og nedad og opadgående squat kun antages, når knæets vinkel befinder sig inden for 90 – 180°.

Af denne grund kan det ikke antages, at systemet vil fungere, hvis vinkelberegningen skulle afvige ved enten  $90^\circ$  eller  $180^\circ$ . For at forbedre dette, vil intervallerne mellem de grader, hvor accelerometrenes spænding er samplet, kunne indskrænkes. Dette vil kunne mindske afvigelserne på vinkelberegningen, da der ikke er en fuldstændig lineær sammenhæng mellem spændinger og vinkler - jo større intervallet derfor er, jo større er usikkerheden af vinkelberegningen også.

I projektet er der valgt at anvende trådløs kommunikation, så ledninger ikke vil være til gene for brugeren af systemet. Dog kan dette have konsekvenser i form af mulig forsinkelse, hvilket vil kunne medføre, at et muligt exoskelet ikke vil fungere i real-term. Dette kan løses ved at koble systemets dele med ledninger, så det ikke er trådløst, men det vil medføre, at rækkevidden af systemets enkelte dele er stærkt begrænset. Til implementering på et exoskelet vurderes dette dog ikke til at være et problem, da det da vil være hensigtsmæssigt at sætte systemet fast på exoskelettet, så det ikke er nødvendigt at bekymre sig om at være inden for rækkevidden af den trådløse kommunikation.

### 8.1.2 Samlet systemtest

De afvigelser, der blev anset som værende ikke-væsentlige i test af de enkelte blokke, viste sig heller ikke at have en afgørende inflydelse på den samlede systemtest. Dog viser det sig, at konfigurationen af accelerometrene, der medfører, at der sendes et signal svarende til en vinkel på  $-200^\circ$ , hvis ét af accelerometrene overskrider dens grænsespændinger, ikke er ideel.

Grundet denne konfiguration udelukkes vinkler ved eksempelvis  $175^\circ$ , hvis det ene accelerometer overskrider dets vinkel-arbejdsområde, der er defineret i koden til vinkelberegning. Det vil være mere brugbart, hvis det fornævnte signal først udsendes, når accelerometrenes samlede vinkel overskrider  $90 - 180^\circ$ . Dette vil både i testen med kendt input og bruger-input betyde, at systemet først vil overskride dets grænser, og dermed lyse rødt, når knæets vinkel reelt overskrider systemets vinkel-arbejdsområde.

Det udledes fra systemtesten og dennes konklusion, at systemet opfylder de opstillede krav på trods af, at der ikke er blevet uarbejdet en egentlig prototype af et exoskelet, der kan efterligne knæets bevægelse under en squat-øvelse. Signalerne output, i form af digitale output på 10 og -10 fra muskelsignalerne, og i form af egentlige vinkler fra accelerometrene, når knæets vinkel er mellem  $90$  og  $180^\circ$ , vil kunne videreføres til et exoskelet.

For at det kan lade sig gøre at udvikle et egentligt exoskelet, skal der tages højde for yderligere problemstillinger. Eksempelvis skal det testes, hvilken fart der vil være bedst egnet til at bevæge exoskelettet over knæet i, og hvor ofte dette exoskelet skal modtage data fra systemet. Dette skal gøres, så brugeren ikke oplever bevægelser som for hurtige, for langsomme eller som trinvise ryk, men derimod vil opleve bevægelsen som flydende, så den minder mest muligt om en rigtig squat-øvelse.

## 8.2 Konklusion

I dette afsnit konkluderes på det udarbejdede system og problemformuleringen, som begge diskuteres i afsnit 8.1.

I projektet er der udviklet et system, der kan optage EMG-signaler fra rectus femoris samt signaler fra accelerometre. EMG-signaler viser, hvorvidt muskelaktiviteten er stigende eller faldende samtidigt med, at signaler fra accelerometrene anvendes til beregning af knæets

vinkel under en squat-øvelse. Systemet er udviklet med henblik på at kunne hjælpe ALS-patienter til aflastning af muskulaturen omkring knæet. Dermed udarbejdes systemet ud fra projektets problemformulering.

Systemets blokke, der består af signalopsamling, spændingsforsyning, ADC, digital filtre-ring, vinkelberegnung, EMG-algoritme og trådløs kommunikation er designet, implementeret samt testet. Disse blokke evalueres ud fra testene for at vurdere, hvorvidt de opstillede kravspecifikationer for blokkene opfyldes. Ud fra dette ses det, at to af kravene til trådløs kom-munikation ikke opfyldes, da det ikke vælges at benytte BLE-donglen, og da det ikke lykkes at teste denne bloks forsinkelse, som gerne skulle være maksimalt  $100\text{ ms}$ . Dog er hele syste-mets forsinkelse under  $100\text{ ms}$ , hvorfor det er utænkeligt at denne bloks forsinkelse overstiger den samlede forsinkelse. Det kan ud fra evalueringen af testene konkluderes, at de resterende kravspecifikationer for de enkelte blokke er opfyldt.

Det samlede system er herefter testet med et kendt inputsignal samt et inputsignal fra en bruger. Denne test viser, at systemet fungerer som ønsket, selvom en anden konfiguration af vinkelberegningen havde været mere hensigtsmæssig for at holde systemets bruger inde for en knævinkel på  $90 - 180^\circ$ . Som systemet er nu, vil dets output kunne benyttes til et exoskelet inde for ovennævnte vinkelinterval over knæet ved at sætte EMG-algoritmens digitale output til at få et exoskelet over knæleddet til at flekse, når output er 10, og ekstendere, når output er -10. En prototype i form af dette exoskelet er dog ikke udviklet. Det vil derfor være muligt at anvende systemet som hjælpemiddel til ALS-patienter under et squat, hvis dette exoskelet udvikles.

For at kunne styre samt anvende et exoskelet under en squat-øvelse benyttes altså signaler fra accelerometrene samt muskelsignaler fra rectus femoris. Ud fra signaler fra accelerometrene beregnes den samlede vinkel over knæet. Når denne vinkel befinner sig mellem  $90^\circ$  og  $180^\circ$ , vurderes det ud fra muskelaktiviteten om brugeren bevæger sig i en opadgående eller nedadgående retning. Herved vil disse informationer kunne sendes trådløst til et exoskelet for således at kunne anvende dette system som bodyaugmentation til ALS-patienter.

På baggrund af ovenstående konkluderes det dermed, at problemformuleringen besvares.

### 8.3 Perspektivering

I dette afsnit perspektiveres projektet for at reflektere over de forskellige aspekter, der bør undersøges for at kunne skabe et færdigudviklet produkt, som kan anvendes af ALS-patienter.

Systemet er udviklet til at kunne hjælpe ALS-patienter ved at aflaste deres muskler omkring knæet under en squat-øvelse. Der er ikke udviklet en prototype af et exoskelet, der muliggør dette, hvorfor systemet skal videreudvikles, således det er anvendeligt uden at være til gene for brugeren. Et eksempel på dette fremgår af figur 8.1, hvor der ses et exoskelet påsat omkring knæet. Når muskelaktiviteten er enten stigende eller faldende, vil knæets vinkel kunne sænkes eller øges ved en motor, der skal kunne styre exoskelettet.

Herudover vil det være fordelagtigt, hvis der sendes en advarsel til brugeren af systemet inden grænserne på  $90^\circ$  og  $180^\circ$  overskrides. Dette kan gøres ved vibration eller lyd, så brugeren ikke skal kunne se exoskelettet for at se farven på en diode. På denne måde, vil brugen af exoskelettet ikke være tydelig for alle omkring brugeren, da det vil kunne bruges under tøj.

Brugeren skal på nuværende tidspunkt selv starte og stoppe systemet, hvilket ikke er ideelt til daglig brug af et exoskelet. Dette vil kunne videreudvikles til en funktion, som registrerer, når brugeren udfører en bevægelse. Dette vil kunne skabe det interrupt, der på nuværende

tidspunkt skabes af PSoC'ens user button og igangsætter systemet.



**Figur 8.1:** en illustration af et exoskelet omkring knæet for at støtte den omkringliggende muskulatur som hjælp til ALS-patienter [55].

Herudover kan sammenhængen mellem de forskellige muskler i benet undersøges, således det vil være muligt at bevæge sig under  $90^\circ$  og over  $180^\circ$ . Dette vil gøre systemet mere brugbart, da brugere af systemet på nuværende tidspunkt ikke kan få hjælp til at sætte sig ned i en vinkel på under  $90^\circ$ . På denne måde, vil det ikke være nødvendigt at benytte accelerometre til systemet, da EMG-målinger fra flere muskler i benet vil kunne benyttes til vurdere, om knæet flekser eller ekstenderer fra  $0 - 180^\circ$ .<sup>1</sup>

Ud over ovennævnte kan det undersøges, hvordan mikrokontrolleren kan anvendes til opsætning af BLE-kommunikation, som det fremgår af det oprindelige design, da der i det implementerede system anvendes gumsticks til BLE-kommunikation. Disse vil ikke være nødvendige, og systemet vil derfor fylde mindre, hvis det samme kan gøres på mikrokontrolleren.

### 8.3.1 Et ideelt system

Systemet vil kunne videreudvikles, således at ALS-patienter vil kunne anvende det under gang i sygdommens første stadier, og derved støtte deres muskulatur, da det på nuværende tidspunkt kun er muligt at udføre en squat-øvelse. Dette skaber ikke den mængde frihed for ALS-patienter, som det vil kunne ønskes, da det skaber begrænsninger for brugerens bevægelighed. I forhold til brugerens sikkerhed vil det kunne udvikles, så en alarm vil starte i tilfælde af, at brugeren mister balancen eller falder under gang.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FiXme Note: Skriver godt nok 180 grader her... Vil vi gerne have, at man skal kunne overstrække knæet???

<sup>2</sup>FiXme Note: kan godt skrive her, hvad der skal gøres ekstra - større vinkel range, flere g i accelerometre, men vil vi ikke hellere have det med til eksamen som videre udvikling af systemet? synes perspektivering'en er ret dækkende, som den er nu.

# Litteratur

---

- [1] Aalborg Universitet Studienævnet for Sundhed, Teknologi og Idræt. *Studieordning for bacheloruddannelsen i Sundhedsteknologi*, 2014. URL [http://www.smh.aau.dk/digitalAssets/69/69987\\_bsc-sundhedsteknologi\\_2012\\_ver2\\_2014.pdf](http://www.smh.aau.dk/digitalAssets/69/69987_bsc-sundhedsteknologi_2012_ver2_2014.pdf).
- [2] Københavns Universitet. *Ny viden om alvorlig muskelsygdom*. Københavns Universitet, 2015. URL <http://sund.ku.dk/nyheder/nyheder2013/ny-viden-om-alvorlig-muskelsygdom/>.
- [3] K. Arahata. Muscular dystrophy. *Neuropathology*, 2014. doi: 10.1046/j.1440-1789.2000.00321.x.
- [4] Muskelsvindsfonden. *Hvad er muskelsvind?* Muskelsvindsfonden, 2016. URL <http://muskelsvindfonden.dk/om-muskelsvind/hvad-er-muskelsvind/>.
- [5] 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.
- [6] M. B. Russell, J. S. Andersen, and et. al. N. Witting. *Amyotrofisk lateral sklerose*. Lægehåndbogen.
- [7] 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.
- [8] J. Morris. Amyotrophic lateral sclerosis (als) and related motor neuron diseases: An overview. *The Neurodiagnostic Journal*, 2015. doi: 10.1080/21646821.2015.1075181.
- [9] 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](nih.gov/disorders/amyotrophictlateralsclerosis/detail_ALS.htm).
- [10] 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.
- [11] M. E. Drake. *Amyotrophic lateral sclerosis - neurological disorder*. Biotechnology forums, 2015. URL <http://www.biotechnologyforums.com/thread-6946.html>.
- [12] 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>.
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] 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>.
- [16] 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.
- [17] Å. Brandt and L. Jensen. *Grundbog om hjælpemidler: til personer med funktionsnedsættelse*, volume 1. Gyldendal Akademisk, 2010. doi: 9788762808034.
- [18] 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.
- [19] 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>.
- [20] J. A. Erlen. Technology: possibilities and pitfalls. *Orthopedic nursing*, 2003.
- [21] 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.
- [22] 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>.
- [23] 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/>.
- [24] Institut for Muskelsvind. *Muskelsvind*, 2008. URL <http://www.aarhus.dk/~media/Subsites/HandiInfo/Docs/Leksikon/Muskelsvind.pdf>.
- [25] TIS Orthopedics II. *Typical Foot Function During Walking*, 2016 . URL <http://www.therapyedu.com/ortho2/ortho2-02.htm>.
- [26] F. H. Martini, J. L. Nath, and E. F. Bartholomew. *Fundamentals of Anatomy and Physiology*. Pearson, 2012. doi: 978-0-321-70933-2.
- [27] 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.
- [28] Workout Labs. *Chair Squat*, 2015. URL <http://workoutlabs.com/exercise-guide/chair-squat/>.

- [29] 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.
- [30] Cypress. *CY8CKIT-142 PSoC 4 BLE module*. Cypress Semiconductor Corporation, 2015. URL <http://www.cypress.com/file/140711/download>.
- [31] Cypress. *CY8CKIT-042-BLE Bluetooth Low Energy (BLE) Pioneer Kit Guide*. Cypress Semiconductor Corporation, 2014. URL <http://www.cypress.com/file/229211/download>.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] G. Zouridakis and J. Moore. *Biomedical Technology and Devices Handbook*. 2003. doi: 978-1-4398-7071-6.
- [35] E. Bernmark and C. Wiktorin. A triaxial accelerometer for measuring arm movements. *Applied Ergonomics*, 33, 2002. doi: 10.1016/S0003-6870(02)00072-8.
- [36] 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>.
- [37] J. G. Webster and J. W. Clark. *Medical Instrumentation Application and Design*, volume 3. John Wiles And Sons Ltd., 1998. doi: 0471153680.
- [38] S. Wolf and R. F. M. Smith. *Student Reference Manual for Electronic Instrumentation Laboratories*, volume 2. Prentice Hall, 2004. doi: 978-0130421821.
- [39] *Analog to Digital Converter*. Bildr, 2010. URL [http://wiki.bildr.org/index.php?title=Analog\\_to\\_Digital\\_Converter\\_\(ADC\)](http://wiki.bildr.org/index.php?title=Analog_to_Digital_Converter_(ADC)).
- [40] J. Parr and D. Blandford. *Introduction to Digital Signal Processing*. Pearson Education, 2012. doi: 9780131394063.
- [41] M. Francis. *Infinite Impulse Response Filter Structures in Xilinx FPGAs*. Xilinx, 2009. URL [http://www.xilinx.com/support/documentation/white\\_papers/wp330.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp330.pdf).
- [42] Wikipedia. *Filter signal processing*. Wikipedia, 2016. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Filter\\_\(signal\\_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Filter_(signal_processing)).
- [43] J. W. Nilsson and S. A. Riedel. *Electric Circuits*, volume 10. Pearson Education Limited, 2015. doi: 1-292-06054-9.
- [44] Atmel. *AVRR222: 8-point Moving Average Filter*. Atmel Coropration, 2002. URL <http://www.atmel.com/Images/doc0940.pdf>.
- [45] N. Gupta. *nside Bluetooth Low Energy*. Artech House, 2013. doi: 9781608075799.

- [46] J. M. Hausdorff, A. Lertratanakul, and M. E. Cudkowicz. *Dynamic markers of altered gait rhythm in amyotrophic lateral sclerosis*. the American Physiological Society, 2000. URL <http://jap.physiology.org/content/jap/88/6/2045.full.pdf>.
- [47] Analog Devices. *EVAL-ADXL335Z*. Analog Devices, 2009. URL <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/EVAL-ADXL335Z.pdf>.
- [48] Analog Devices. *ADXL335*, 2010. URL <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>.
- [49] M. Clifford and L. Gomez. *Measuring Tilt with Low-g Accelerometers*, 2005. URL [http://www.nxp.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3107.pdf](http://www.nxp.com/files/sensors/doc/app_note/AN3107.pdf).
- [50] Cypress. *PSoC 4 Sequencing Successive Approximation ADC*. Cypress Semiconductor Corporation, 2014. URL <http://www.cypress.com/file/135111/download>.
- [51] Cypress. *CY8CKIT-043 PSoC® 4 M-Series Prototyping Kit Guide*. Cypress Semiconductor Corporation, 2015. URL <http://www.cypress.com/file/193101/download>.
- [52] K. Townsend. *Introduction to Bluetooth Low Energy*, 2014. URL <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/introduction-to-bluetooth-low-energy.pdf>.
- [53] Cypress. *PSoC 4 Low-Power Modes and Power Reductions Techniques*. Cypress Semiconductor Corporation. URL <http://www.cypress.com/file/121271/download>.
- [54] 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.
- [55] *DonJoy*. DJO Global. URL [http://www.djoglobal.eu/en\\_UK/Donjoy.html](http://www.djoglobal.eu/en_UK/Donjoy.html).
- [56] PA Foot. *Ankle Fracture*, 2016. URL <http://pafootdoctors.com/ankle-fractures-stress-fractures-broken-ankle/>.

Bilag A

Bilag

---

# Bilag B

## Pilotforsøg

---

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

### B.0.2 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-signalens 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

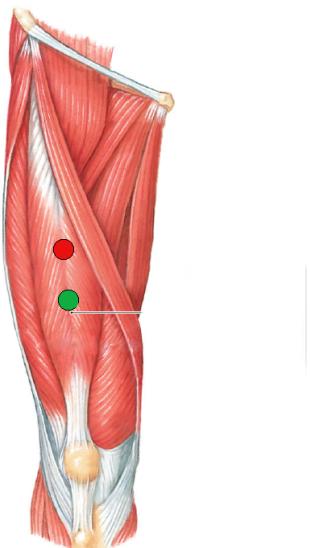
1. Identificering af støjsignaler
2. Identificering af knæleddets vinkel

### B.0.3 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

#### B.0.4 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 [54]. Elektroderne placeres midt for linjen mellem anterior spina iliaca superior og den superior del af patella [54]. Placeringen af elektroderne illustreres af figur A.1.



**Figur B.1:** Låret set anteriot. Placering af positiv (rød) samt negativ (grøn) elektrode ses på rectus femoris [26].

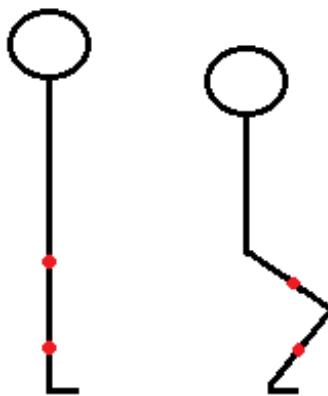
Referenceelektroden placeres, ligeledes efter SENIAM's anvisninger, omkring anklen [54]. Placeringen af reference elektroden ses af figur A.2.



**Figur B.2:** Placering af referenceelektrode omkring anklen [56].

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  $180^\circ$ , 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 bilag B.



**Figur B.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  $180^\circ$ . Personen til højre sidder i en squat-øvelse, hvilket svarer til knæets vinkel som maksimalt er  $90^\circ$ .

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. Høfte og knæ bøjes således kroppen sænkes kontrolleret. Dette fortsættes indtil en vinkel på maksimalt  $90^\circ$  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 givene måling er gennemført.

For at præcisere øvelsen således alle forsøgspersoner så vidt muligt rammer den samme vinkel på maks  $90^\circ$  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  $90^\circ$  udføres. Vinklen måles med en vinkelmåler, hvortil der påsættes tape på væggen, som udgør underbenet samt lårets position. Ved udførelsen af forsøget irettesætter 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.

### B.0.5 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

### B.0.6 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

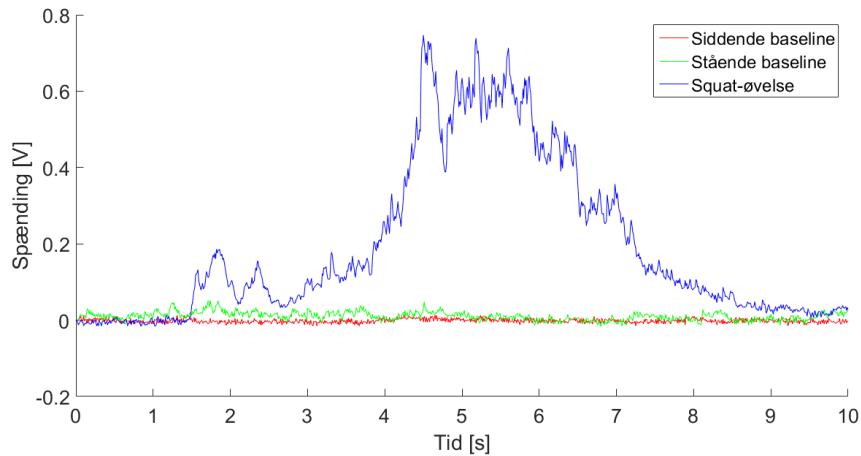
##### Squat-øvelse

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

### B.0.7 Databehandling

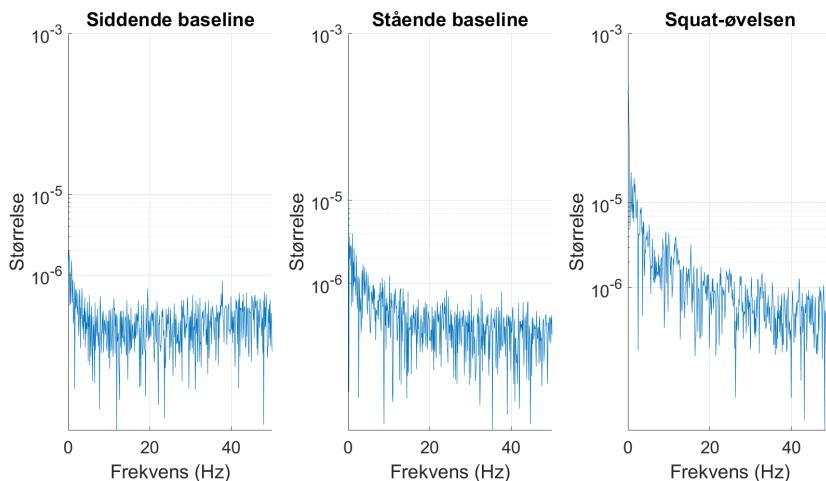
I det præsenterede data tages der udgangspunkt i forsøgsperson 1. Dette er som følge af, at der i EMG-målingerne for forsøgsperson 2 ses et udsving i EMG-signalet, der ligner rystelser, hvilket er grundet rystende ben. Til trods for disse muskelrystelser ses der ligheder mellem målingerne for forsøgspersonerne.

## Resultater for EMG-målinger



**Figur B.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  $90^\circ$  flektion af knæet under squat-øvelsen. Yderligere ses et fald i amplitude ved ca.  $6\text{ s}$ , der relateres til en opdagående bevægelse til øvelsens udgangsposition.

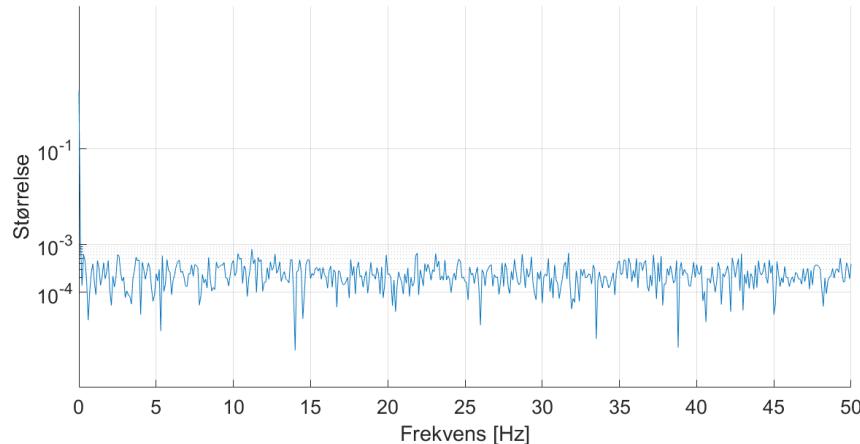


**Figur B.5:** Frekvensanalyse med semilogaritmisk skala på Y-aksen af EMG-måling for siddende baseline, stående baseline og ved squat-øvelse.

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  $0\text{ Hz}$ , hvilket svarer til det offset, der er på signalet. Det fremgår ikke af figuren, hvorvidt der er  $50\text{ Hz}$  støj på signalet, da der samples med  $100\text{ Hz}$ , hertil er Nyquist-frekvensen  $50\text{ Hz}$ . Herudover viser frekvensanalysen ikke amplituden af  $50\text{ Hz}$  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 ??.

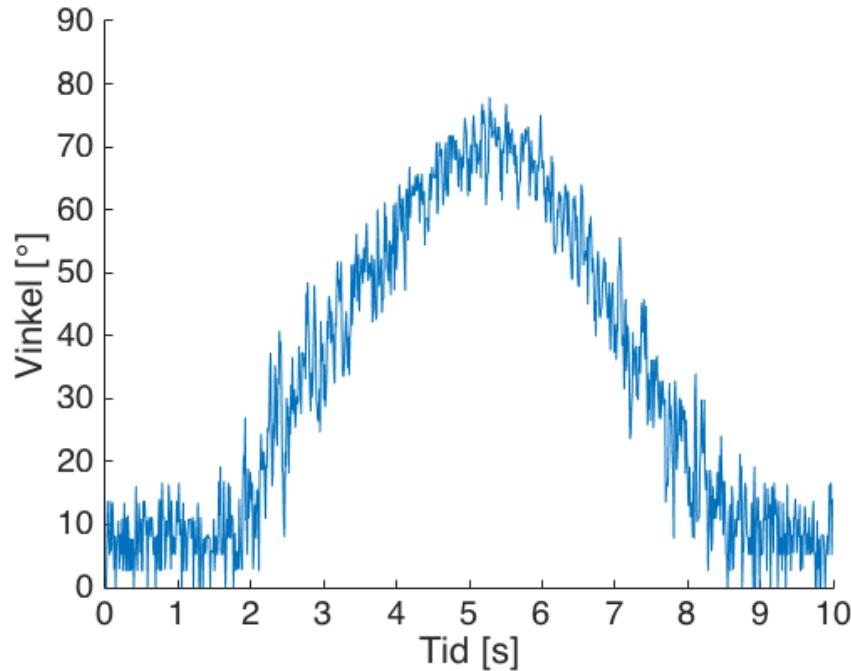
### Resultater for accelerometer målinger



**Figur B.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  $50 \text{ Hz}$  støj, hvor årsagen er beskrevet under frekvensanalysen for EMG-målingen.

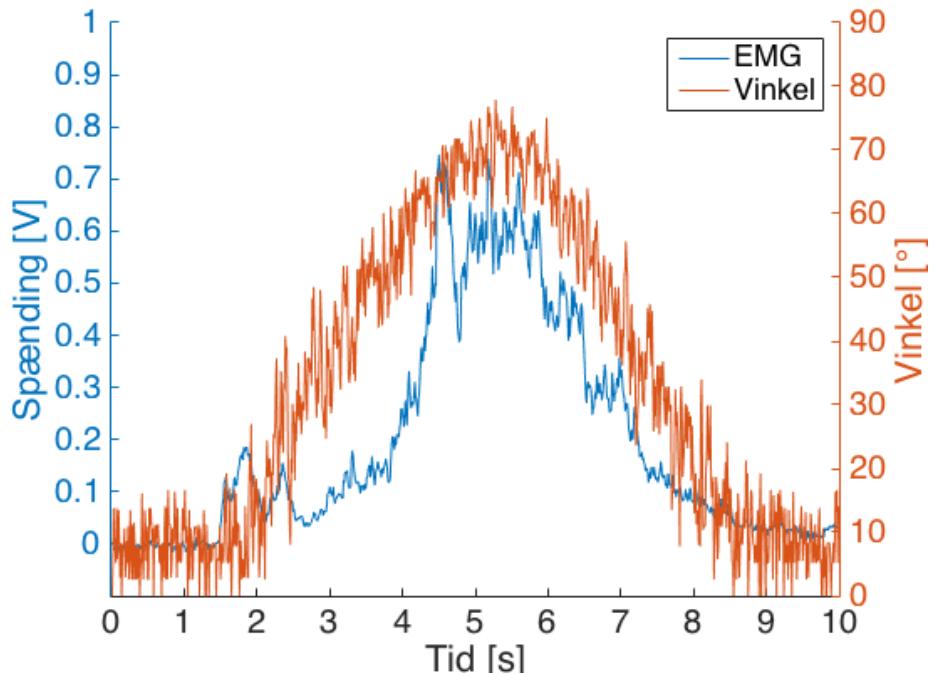
Spændingerne fra accelerometeret repræsenterer vinklerne for femur og tibia i Y-aksen. Denne spændingsværdi ønskes omregnet til grader, for således at undersøge vinklen af knæet. Til at omregne spændingen fra begge acceleromtere til grader anvendes målingerne anvendt i afsnit B.0.12. Disse resultater 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 B.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.  $78^\circ$ .

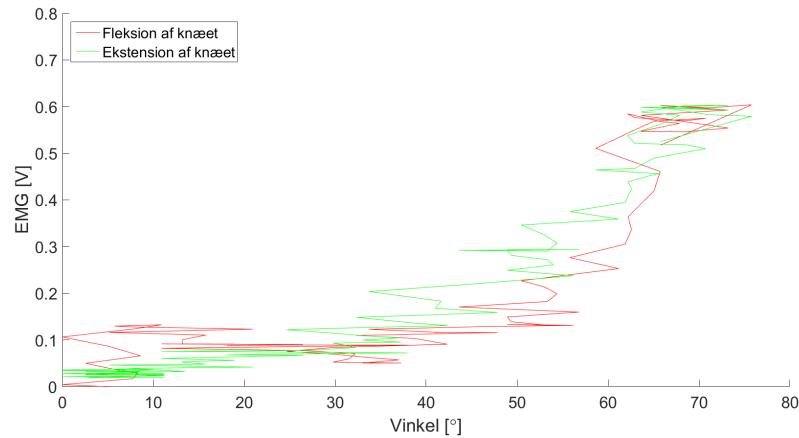
For at kunne se relationen mellem udslag i EMG samt for accelerometrene, plottes begge disse målinger på samme graf. Dette ses af figur A.8.



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

## Test af accelerometer

---

I dette projekt anvendes to accelerometere, som er beskrevet i ???. 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.

### C.0.8 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

### C.0.9 Materialer

- Accelerometre ADXL335
- Tape
- Vaterpas
- Breadboard
- Vinkeltester, fremgår af figur B.1
- Computer med Scopelogger og MATLAB
- Spændingsforsyning på 3,4 V
- NI USB-6009

### C.0.10 Metode

Der opstilles en metode til hvert formål i afsnit B.0.7. Formål 1 opfyldes ved deltest 1, og formål 2 og 3 opfyldes ved deltest 2. Der testes ligeledes for støj i afsnit A.1.6.

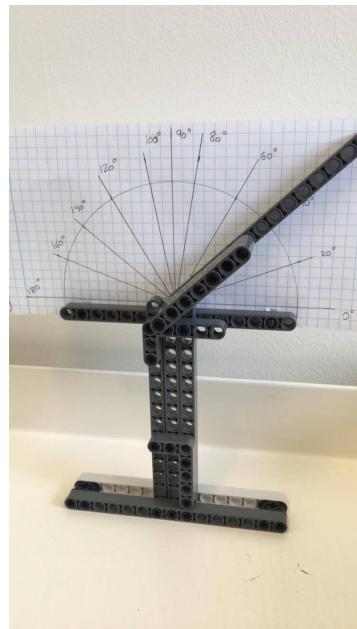
1. Der foretages målinger i accelerometerets tre akser i 11 positioner, hvorved der testes for linearitet
2. Der foretages målinger i accelerometerets tre akser i de seks positioner, hvorefter offset kan bestemmes ud fra målingerne. Offsettet bestemmes ud fra accelerometerets 0 g-påvirkning, der måles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

### C.0.11 Forsøgsopstilling

Hver forsøgsopstilling udføres for begge accelerometere.

### Forsøgsopstilling af deltest 1

- Accelerometeret påsættes vinkeltesteren på figur B.1
  - Accelerometeret indstilles efter fremgangsmåden for hver øvelse, som er illustreret i afsnit B.0.11
- Accelerometeret tilkobles NI USB-6009
- NI USB-6009 tilkobles en computer



**Figur C.1:** 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 B.0.11
- Accelerometeret tilkobles NI USB-6009
- NI USB-6009 tilkobles en computer

## C.0.12 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 [48]. Målingerne er udført for begge accelerometre i henholdsvis X-, Y- og Z-aksen, og vinklen ændres ved at justere vinkeltesteren på figur B.1, så følgende vinkler fremgår af modellen:

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

### Fremgangsmåde for deltest 2

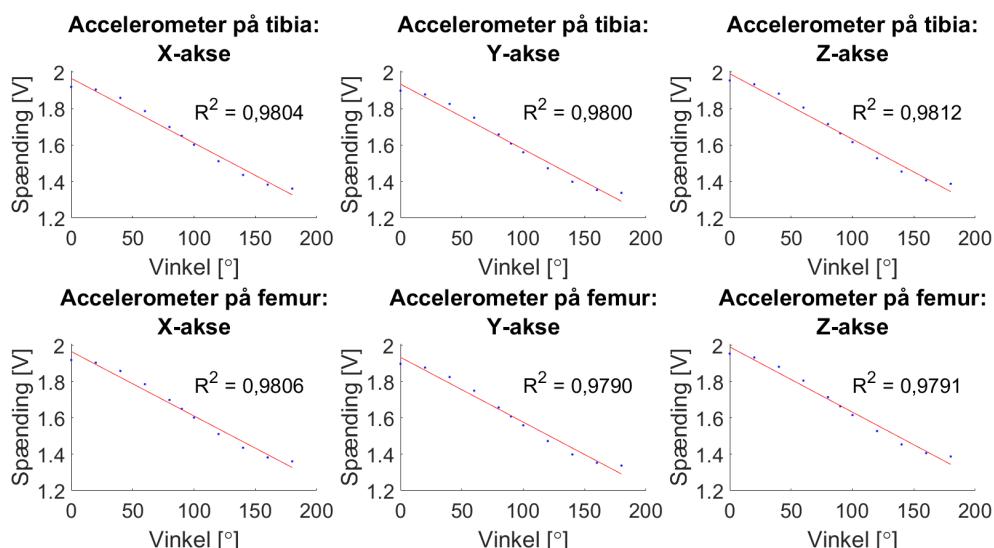
Der foretages målinger i seks forskellige positioner. Hver position måles tre gange og samles i 10 sekunder ved 100 Hz. De forskellige positioner er illustreret på figur 5.3, og er som følger:

- 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

### C.0.13 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 B.2.



**Figur C.2:** 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 B.2 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.

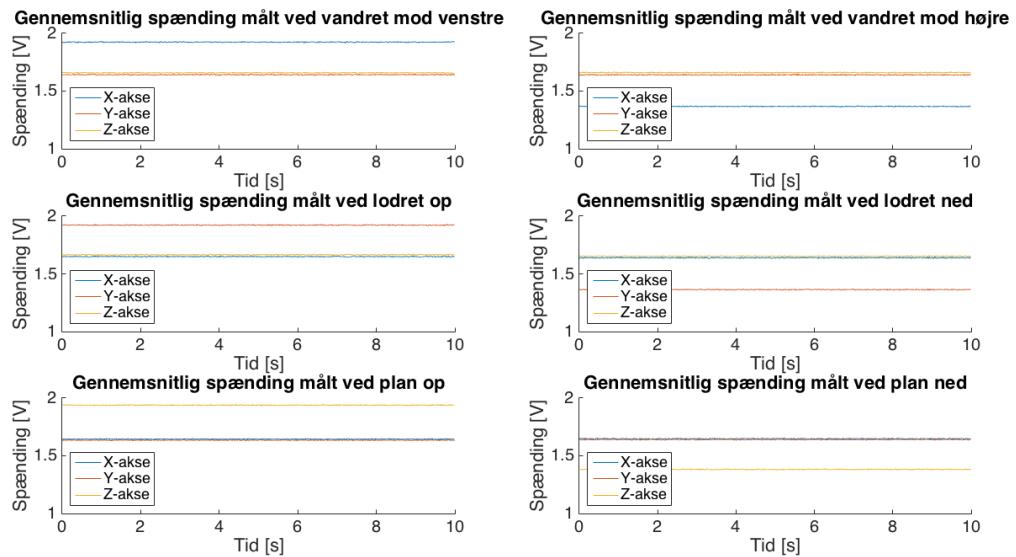
#### Resultater for deltest 2

De viste resultater heri er for det ene accelerometer<sup>1</sup>, da offsettet ændrer sig hver gang, der udføres et forsøg. Det vil derfor ikke være muligt at fastsætte konstante værdier for offset,

<sup>1</sup>FiXme Note: resultaterne er fra det røde accelerometer

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 B.3.



**Figur C.3:** Påvirkningen af accelerometerets 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 5.3. Resultaterne fra målingerne fremgår af tabel B.1.

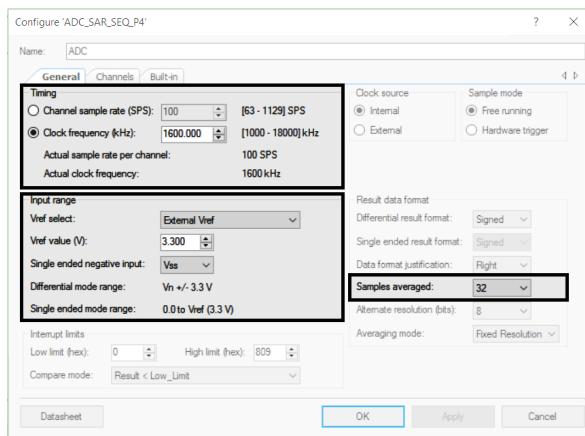
Målt retning	Målt offset	Målt afvigelse
Positiv	1,6362 V	3,75%
Negativ	1,6413 V	3,45%

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

## Forståelsesgrundlag

### D.1 Analog-to-digital converter

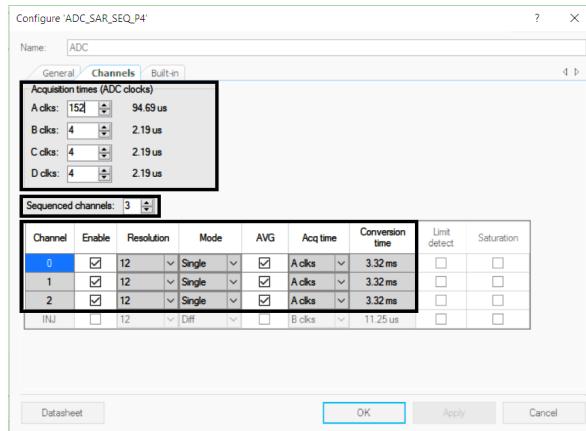
I dette afsnit beskrives hvordan ADC'en er opsat. Der fokuseres på de parametre der har været ændret og tilpasset i forhold til dette projekt.



**Figur D.1:** Heraf fremgår ADC's generelle indstillinger, hvor de fremhævede områder viser parametre relevant for dette projekt. Øverste blok til venstre viser instillingsmuligheder for samplingsfrekvens samt clock frekvens, samt de aktuelle frekvenser. Nederste blok til venstre viser instillinger for ADC'ens arbejdsmuligheder i forhold til single ended og differential måling. Blokken til højere viser mængden af samples fortaget til at give en gennemsnitlig sample.

**Bestemmelse af samplingsfrekvens:** Område 1 af figur C.1, viser indstillingerne for ADC'en samplingsfrekvens, samt clock frekvens. Ved indstilling af disse frekvenser udregnes en reel sampling- og clock frekvens der oplyses nedenfor. De reelle frekvenser kan variere grundet andre parametre som antal af kanaler, konverteringstid, mm. Yderligere parametre kan findes i databladet for ADC'en.

I dette projekt er en samplingsfrekvens på 100 Hz opnået ved at definere en clockfrekvens på 1600 kHz samt justering for konverteringstiden af kanalerne der ses i figur C.2. Hertil er der pålagt en forsinkelse således en konverteringstid på 3,32 ms per kanal opnås. Dette giver en konverteringstid på 9,96 ms for de 3 kanaler, hvilket ADC'en oplyser som en aktuel samplingsfrekvens på 100 Hz.



**Figur D.2:** Indstillinger for at input til ADC. Øverste blok viser indstillingsmuligheder for 4 ADC clocks, der definere konverteringstiden for kanalerne. Miderste blok viser antallet af kanaler der defineres. Nederste blok viser indstillingsmuligheder, samt konvertieringstid for de enkelte kanaler.

**Arbejdsområde for ADC:** Område nummer 2 af figur C.1, viser indstillingerne for ADC'ens arbejdsområde. Vref definere størrelsen af arbejdsområdet, hvortil en ekstern reference er valgt. Denne reference sættes identisk med mikrokontrollerens forsyning til accelerometerne på 3,3 V. Det negative input for single ended målinger sættes til Vss (jord). Dette giver et arbejdsområde for single ended målinger på 0,0 V – 3,3 V. Da det negative input tilsluttes jord, falder opløsningen 1 bit, da der ikke kan forekomme negative udslag i arbejdsområdet.

**Gennemsnits samples:** Område 3 af figur C.1 er indstillingen for hvor mange samples der anvendes for hver af kanalerne til at repræsentere én konverteret sample. Heraf benyttes 32 samples til at udregne en gennemsnits sample. Dette gøres kun gældende for kanaler hvor 'AVG' er tilvalgt, som det ses af nederste blok i figur C.2. Dette er implementeret da samplingsfrekvens på 100 Hz stadig opretholdes, samt at v