



NTNU 2005

---

# Innvevd maskinvare for kybernetisk håndledd

*Håkon Skjelten*  
*Trondheim, 22. august 2005*

---





## **HOVEDOPPGAVE**

Kandidatens navn: Håkon Skjelten

Fag: Teknisk kybernetikk

Oppgavens tittel (norsk): Innvevd maskinvare for kybernetisk håndledd

Oppgavens tittel (engelsk): Embedded controller system for a cybernetic wrist prosthesis

Oppgavens tekst:

Forskning har frembrakt ny teoretisk viten om hvordan en motorisert håndleddsprotese bør utformes for å tilby brukeren maksimal nytteverdi. En ønsker nå å lage en fysisk protese etter disse prinsippene for å evaluere den reelle nytten. Det foreligger en funksjonsspesifikasjon for en slik protese, og målet for denne oppgaven er å realisere maskinvaredelen av et mikrokontrollerbasert styresystem for protesen, fortrinnsvis basert på en av Atmels AVR mikrokontrollere.

1. Kartlegg grensesnitt for strømforsyning og kommunikasjon i eksisterende protesesystemer. Både kommersielle systemer og forskningsprotoser bør tas i betraktning. Definer på bakgrunn av dette konkrete spesifikasjoner for det foreliggende systemets elektriske grensesnitt.
2. Beskriv en maskinvarearkitektur tilpasset det foreliggende problemet. Løsningen baseres på resultatene fra punkt 1 samt foreliggende funksjonsspesifikasjon.
3. Konstruer og realiser systemet. Kretskortutlegg og/eller -montasje kan outsources etter avtale med veileder.
4. Så langt tiden strekker til, test og evaluer systemet opp mot spesifikasjonen ved hjelp av testprogrammer.

Oppgaven gitt: 15. januar 2005  
Besvarelsen leveres: 22. august 2005  
Besvarelsen levert:  
Veileder: Øyvind Stavdahl  
Utført ved Institutt for teknisk kybernetikk

Trondheim, den 15.01.2005

Geir Mathisen  
Faglærer



# Innvevd maskinvare for kybernetisk h ndledd



## Sammendrag

I denne oppgaven ser man nærmere på design og konstruksjon av styreelektro-nikk til en ny h ndleddsprotese. Protesen, betegnet som NRWD (NTNU Rotary Wrist Device), er basert på flere års teoretisk arbeid ved NTNU deriblant en doktoravhandling av Øyvind Stavdahl.

Under arbeidet er det utarbeidet et design for styresystemet og en eksperimentell prototyp for dette designet er fremstilt. Prototypen er ment som et utgangspunkt for å evaluere de forskjellige aspektene ved designet. Gjennom tester på proto-typen har det vist seg at designet stort sett fungerer bra. Testene har også avslørt enkelte områder der noen forbedringer må til.

Spesiell spenning var knyttet til om switchmode strømforsyningen ville fungere godt nok til å forsyne både den digitale og den analoge elektronikken. Den har vist seg å ha for stor rippel på den regulerte siden og sender noe støy tilbake på forsyningssiden. Dette antas å være grunnen til at de analoge kretsene yter dårligere enn ønsket.

En løsning er også foreslått for programvarestyrt velging av kommunikasjons-grensesnitt mot eksterne enheter ved hjelp av elektroniske brytere. Denne l s-ningen har vist seg å fungere bra, med unntak for I<sup>2</sup>C-kommunikasjon. Dette er imidlertid ikke kritisk da man med små endringer i kretsdesign kan løse dette problemet.

Videre er det i oppgaven designet og implementert en motorkontroller for å styre protesens motor. Motorkontrolern har vist seg å fungere optimalt og tilfredsstill-er alle krav som er satt til den.

Det foreslåtte designet har vist seg å være et godt utgangspunkt for videre ar-beid med h ndleddsprotesen. Med mindre justeringer skal den eksperimentelle prototypen kunne brukes med nærmest hvilken som helst arm- eller håndprotese. Etter verifisering i en mekanisk prototyp og mot et utvalg av tilgjengelige arm- og h ndproteser er designet et godt utgangspunkt for miniatyrisering og integrasjon i en ferdig mekanisk prototyp.





# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>3</b>
2.1	Dagens proteser . . . . .	3
2.1.1	Styresignaler . . . . .	3
2.1.2	Strømforsyning . . . . .	4
2.1.3	Kommunikasjon . . . . .	5
2.2	Retninger for fremtiden . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Kravsanalyse</b>	<b>7</b>
3.1	Krav til servofunksjon . . . . .	7
3.2	Krav til kommunikasjon . . . . .	7
3.3	Krav til kraftforsyning . . . . .	8
3.4	Prioritering av krav . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Systemdesign</b>	<b>9</b>
4.1	Inndeling i delsystemer . . . . .	9
4.2	Strømforsyning . . . . .	10
4.2.1	Grunnleggende designvalg . . . . .	10
4.2.2	Spenningsregulator . . . . .	11
4.2.3	Batterimåler . . . . .	12
4.3	Kommunikasjonsrelatert maskinvare . . . . .	13
4.3.1	Innlesning av analoge styresignaler . . . . .	13
4.3.2	Generering av analoge styresignaler . . . . .	15
4.3.3	CAN-buss . . . . .	15
4.3.4	I <sup>2</sup> C-buss . . . . .	16
4.3.5	Serielt grensesnitt for oppdatering og diagnostisering . . . . .	16
4.4	Ruting av kommunikasjonssignaler . . . . .	16
4.5	Motorkontroller . . . . .	17
4.5.1	Styring av børsteløse DC-motorer . . . . .	17
4.5.2	Motorstyringens inndeling . . . . .	19

4.5.3	Kommutering . . . . .	20
4.5.4	Kommunikasjon mellom kontrollerene . . . . .	21
4.5.5	Posisjonsmåling og regulering . . . . .	21
4.6	Motordriver . . . . .	21
4.6.1	Driverkrets . . . . .	21
4.6.2	Strømmåling . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Systemkonstruksjon</b>	<b>25</b>
5.1	Generelt . . . . .	25
5.1.1	Programvare for maskinvaredesign . . . . .	25
5.2	Strømforsyning . . . . .	25
5.2.1	Spenningsregulator . . . . .	25
5.2.2	Batterimåler . . . . .	26
5.3	Kommunikasjonsrelatert maskinvare . . . . .	26
5.3.1	Innlesning av analoge styresignaler . . . . .	27
5.3.2	Generering av analoge styresignaler . . . . .	28
5.3.3	CAN-buss . . . . .	29
5.3.4	I <sup>2</sup> C-buss . . . . .	30
5.3.5	Serielt grensesnitt for oppdatering og diagnostisering . . .	30
5.3.6	Programvare . . . . .	31
5.4	Ruting av kommunikasjonssignaler . . . . .	33
5.5	Motorkontroller . . . . .	34
5.5.1	Kontrollerkrets . . . . .	34
5.5.2	Kommunikasjon mellom kontrollerene . . . . .	35
5.5.3	Posisjonsmåling og regulering . . . . .	36
5.5.4	Programvare . . . . .	37
5.6	Motordriver . . . . .	38
5.6.1	Driverkrets . . . . .	38
5.6.2	Strømmåling . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Systemtester</b>	<b>41</b>
6.1	Spenningsregulator . . . . .	41

6.2	Innlesning av analoge styresignaler . . . . .	42
6.3	Generering av analoge styresignaler . . . . .	43
6.4	CAN buss . . . . .	44
6.5	I <sup>2</sup> C buss . . . . .	45
6.6	Posisjonsmåling av motor . . . . .	45
6.7	Kommutering . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>49</b>
7.1	Spenningsregulator . . . . .	49
7.2	Innlesning av analoge styresignaler . . . . .	49
7.3	Generering av analoge styresignaler . . . . .	50
7.4	CAN buss . . . . .	50
7.5	I <sup>2</sup> C buss . . . . .	50
7.6	Posisjonsmåling av motor . . . . .	51
7.7	Kommutering . . . . .	51
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>55</b>
	<b>Referanser</b>	<b>58</b>
<b>A</b>	<b>Kravsspesifikasjon</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Kretsdesign</b>	<b>71</b>
B.1	Hovedmodul . . . . .	71
B.2	Motorkontrollermodul . . . . .	72
<b>C</b>	<b>Kretsutlegg</b>	<b>73</b>
C.1	Hovedmodul . . . . .	73
C.2	Motorkontrollermodul . . . . .	73
<b>D</b>	<b>Programflytdiagram</b>	<b>75</b>
D.1	Programflyt for kommunikasjonskontrolleren . . . . .	75
D.2	Programflyt for motorkontrolleren . . . . .	76

<b>E</b>	<b>Måledata</b>	<b>77</b>
E.1	Generering av analoge styresignaler . . . . .	77
E.2	Kommuteringslogikk . . . . .	78

## Figurer

1	Skisse av det totale protesesystemet. . . . .	1
2	NRWD og de tilliggende protesesystemer. . . . .	9
3	De forskjellige delsystemer i NRWD. . . . .	10
4	Prinsippskisse switchmode buck spenningsregulator. . . . .	11
5	Prinsippskisse for batterimåler. . . . .	12
6	Kommunikasjonskontroller og omliggende grensesnitt. . . . .	13
7	Innlesning av analoge styresignaler. . . . .	14
8	3. ordens Butterworth lavpassfilter med forsterkning. . . . .	15
9	Prinsippskisse av børsteløs DC-motor av samme type som “Mini-motors 1628 T 012 B”. . . . .	18
10	Intern kobling av børsteløs DC-motor av stjernetype. . . . .	19
11	Skisse over motorrelatert maskinvare. . . . .	20
12	Kretsdesign av spenningsregulator. . . . .	26
13	Kretsdesign av batterimåler. . . . .	26
14	Kretsdesign for innlesning av analoge styresignaler. . . . .	28
15	Kretsdesign for generering av analoge styresignaler. . . . .	29
16	Kretsdesign for CAN-transceiver . . . . .	30
17	Kretsdesign for RS-232 kommunikasjon. . . . .	31
18	Bilde av NRWD’s RS-232 konsoll. . . . .	33
19	Kretsdesign av signalbrytere. . . . .	34
20	Det nye datterkortet til motorkontrolleren. . . . .	35
21	Kretsskjema for potensiometer til absolutt posisjonsmåling. . . . .	36
22	Kretsskjema for motordriveren. . . . .	39
23	Kretsdesign relatert til strømmålinger. . . . .	40
24	Plot av ADC målinger som er gitt i tabell 5. . . . .	43
25	Plot av måleresultatene for generering av analoge styresignaler. . . . .	44
26	Plot av motorhastighet vs. forsyningsspenning. . . . .	47
27	Kretsdesign for NRWD (hovedmodul). . . . .	71
28	Kretsdesign for NRWD (tilleggs kort for motorkontroller). . . . .	72
29	Kretsutlegg for NRWD (hovedmodul). . . . .	73

30	Kretsutlegg for NRWD (tilleggskort for motorkontroller). . . . .	73
31	Programflyt for AT90CAN128. . . . .	75
32	Programflyt for motorkontrolleren. . . . .	76

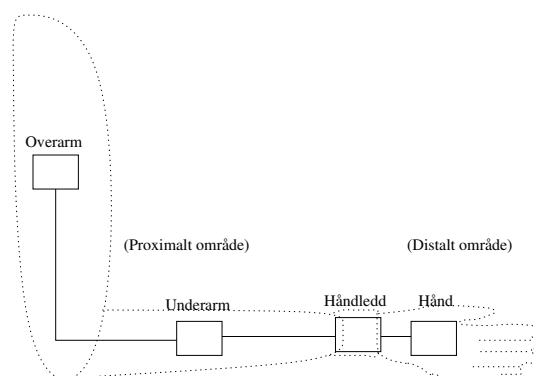
# 1 Innledning

Det å erstatte en mistet arm med en protese som har tilsvarende egenskaper er en oppgave mange ingeniører har prøvd å løse. Resultatene har vært av varierende kvaliteter og det hele har vist seg å være en umulig oppgave med dagens teknologi. Alle mennesker er forskjellige og har sine individuelle behov. Dette har medført at man i dag prøver å lage proteser som har optimaliserte forenklinger med hensyn til bestemte arbeidsoppgaver.

Menneskets händledd har tre rotasjonsakser. Skal man lage en händleddsprotese med tilsvarende frihetsgrader vil dette i dag gi flere ulemper enn fordeler. Mellom annet vil vekten av motorene, størrelsen og kompleksiteten i styringssystemet gjøre protesen upraktisk til daglig bruk. Tester gjennomført på protesebrukere [11] viser at nettopp ulemper som vekt, kosmetiske hensyn og kompleksitet i bruk er det som gjør at man heller velger statiske proteser. På grunn av dette konsentrerer stort sett alle proteseprodusenter seg om händleddsproteser med en frihetsgrad når det skal konstrueres motoriserte proteser.

I 2002 leverte Øyvind Stavdahl en doktoravhandling ved NTNU [28] hvor han så nærmere på optimalisering av rotasjonsaksen til händleddsproteser med en frihetsgrad. I forbindelse med dette arbeidet har det fulgt flere prosjekt- og masteroppgaver som har tatt for seg de forskjellige aspekter ved händleddsproteser. Basert på disse arbeidene man å konstruere en helt ny händleddsprotese. Protessen har fått navnet NRWD (NTNU Rotary Wrist Device), og denne rapporten tar for seg kontrollektronikken, med konstruksjon og evaluering av den første prototypen. Mekanisk konstruksjon og høynivå programvaredesign skal utvikles av henholdsvis Øyvind Stavdahl og Rainer Storheil [26].

Figur 1 viser en skisse over NRWD sammen med arm- og händproteser som er tilgjengelige i dag. Som en ser av figuren vil NRWD kommunisere både med underarmsprotesen (proximal maskinvare) og händprotesen (distal maskinvare).



**Figur 1:** Skisse av det totale protesesystemet.

NRWD er forøvrig et strengt akademisk forskningsprosjekt. Formålet med prototypen som skal bygges er å teste ut et nytt teoretisk h ndleddsdesign samt drive relatert forskning på proteser. På tross av dette er det likevel et langtidsmål at protesen en gang skal kunne gi kommersiell nytteverdi.

Rapporten begynner i neste kapittel med en kort gjennomgang av dagens protesystemer og hvilke elektriske grensesnitt som brukes. Deretter analyseres de krav man må sette til den nye protesen i kapittel 3 f r det så foreslås en fullstendig maskinvarearkitektur f r den nye protesen i kapittel 4. I kapittel 5 dokumenteres konstruksjonen systemet med påfølgende tester i kapittel 6. Rapporten avsluttes med en diskusjon i kapittel 7, konklusjon i kapittel 8 og forslag til videre arbeid i kapittel 9.



## 2 Bakgrunn

Siden NRWD skal fungere sammen med eksisterende hånd- og armproteser, både kommersielle og eksperimentelle, må man ha kjennskap til de eksisterende protesenes egenskaper og grensesnitt. I dette kapitlet vil de mest kjente protesene bli gjennomgått med hensyn på interoperabilitet med NRWD.

Informasjonen som er brukt i dette kapitlet er stort sett hentet fra kataloger og informasjon tilgjengelig på leverandørenes hjemmesider [4], [2], [3], [1]. Noe av informasjonen er også hentet fra Rainer Storheils prosjektoppgave fra 2004 der han studerte eksisterende protesesystemer, både kommersielle og eksperimentelle, med tanke på å utarbeide en kravspesifikasjon for NRWD (da kalt NW1) [25].

### 2.1 Dagens proteser

Det er i dag stort sett fire fabrikanter (øverst i tabell 1) til kommersielle mikrokontrollerbaserte proteseløsninger [7]. Produktene til disse produsentene vil sammen med forskningsprotesene (nederst i tabell 1) utgjøre et godt grunnlag til å sette kravspesifikasjoner for NRWD.

#### Kommersielt tilgjengelige protesesystemer:

Otto Bock	Sensor Hand
Motion Control	ProControl II
Liberating Technologies Inc.	Vari-Grip III
Animated Prosthetics System	ACS-1025

#### Forskningsrelaterte protesesystemer:

Oxford Orthopaedic Engineering Centre	The Leverhume	Oxford
	Southampton Hand	
TouchEms Ltd	TouchEMAS	
EU-prosjekt	TomPAW	

**Tabell 1:** Liste over mikrokontrollerbaserte protesesystemer.

#### 2.1.1 Styresignaler

Den største utfordringen med brukervennlighet på dagens motoriserte proteser er uthenting av styresignaler. Der er dessverre ingen enkel måte man i dag kan lese tankene eller nerveimpulsene til protesebrukeren, noe som har medført at man har utviklet andre måter å kontrollere protesene på. De vanligste styresystemene er:

**Brytere** Der er mange typer brytere. Noen er aktivert ved å drage i en snor mens andre er aktivert ved å vri på egne brytere. Et vanlig eksempel på dette er en bryter med “åpne”, “stopp” og “lås” posisjoner som styrer åpning og lukking av en protesehånd.

**Servosignaler** En servokontroller tolker forflytning og/eller kraft i for eksempel en hendel og oversetter dette til et proporsjonalt utgangssignal.

**Myoelektriske signaler** Sensorer som utnytter muskelkarakteristikker til å sende proporsjonale styresignaler. Sensorene kan brukes enkeltvis men vanligvis brukes de i par der de måler hver sin muskel. Dette gir den fordel at ene sensoren eksempelvis kan styre åpning av en håndprotese mens den andre kan styre en händleddsprotese eller albueprotese.

I tillegg gjøres det mye forskning på å hente ut styresignaler direkte fra nerveimpulser. Dette er imidlertid så tidlig i utviklingsfasen at det ikke vil vektlegges i denne oppgaven.

### 2.1.2 Strømforsyning

Der er i dag ikke noen standard for batterispenninger til proteser. Dette delvis fordi der er så mange forskjellige bruksområder for protesene. En håndprotese for et lite barn trenger for eksempel ikke den samme gripestyrken som en arbeidsprotese til en voksen mann. En gjennomgang av protesesystemene i tabell 1 viser likevell noen gjennomgående trender:

- De fleste kommersielle håndproteser for voksne benytter 6V eller 7,2V (oftest kan begge deler brukes om hverandre).
- De fleste kommersielle håndproteser for barn benytter 5V.
- Protesesystemer som inkluderer motoriserte albue- eller skulderproteser benytter vanligvis 12V (hvor 18V er høyeste observerte spenningsnivå som er brukt).
- Forskningsproteser er stort sett kompatible med de kommersielle protesene.

En ser av dette at en ny händleddsprotese i dag bør kunne fungere optimalt i et område mellom 6V og 7,2V. Videre kan man konkludere med at protesen bør klare, uten å ta skade av det, alle inngangsspenninger mellom 0V og 18V.

### 2.1.3 Kommunikasjon

Styresignaler fra servoer, brytere og myoelektriske signalkilder bruker alle analoge signaler innenfor et bestemt spenningsområde til å styre protesene. Blant de kommersielle protesene i tabell 1 styres samtlige direkte av de analoge signalene. Blandt forskningsprotesene brukes det derimot egne kontrollere som leser inn de analoge styresignalene og som så videresender styresignaler ved hjelp av serielle databusser. Dette gir en rekke fordeler som for eksempel at man kan oppdage brudd på linjene, kommunisere internt mellom protesene og endre styresignaler etter hvilke proteser som brukes. Noen standardisering av busstyper eller protokoller har imidlertid ikke blitt gjort og blant forskningsprotesene i tabell 1 brukes det mellom annet både LonWorks og CAN-buss.

## 2.2 Retninger for fremtiden

Alt tyder på at man i fremtiden vil gå over til å bruke serielle databusser som kommunikasjonsmedium mellom protesene i et protesesystem. Et stadig mer relevant spørsmål blir da hvilke databusser man skal bruke og hvordan kommunikasjonsprotokollen skal være. En del arbeid har allerede vært gjort på dette feltet, mellom annet her ved NTNU [10], men mye gjenstår. Det kan imidlertid se ut som at CAN-bussen blir stadig mer brukt.

Før eller senere vil man også få nye inputsensorer som kan måle brukerens ønskede bevegelse bedre enn hva som er mulig i dag. Dette vil imidlertid ikke få noen direkte konsekvens for hverken kommunikasjongs grensesnittet mellom protesene eller batterisystemet som brukes.



### 3 Kravsanalyse

Øyvind Stavdahl har utviklet en funksjonell kravspesifikasjon for NRWD som er gjengitt i sin helhet i appendix A. Kravspesifikasjonen er hovedsaklig basert på prosjektet til Rainer Storheil fra 2004 [25] samt andre arbeider ved instituttet. I tillegg til denne spesifikasjonen er det gitt at:

- Motoren som skal drive protesen er en børsteløs DC-motor fra MINIMOTOR SA. Motoren er av typen “Minimotors 1628 T 012 B” [22] og har tre innebygde hall-sensorer for sensing av rotorposisjon.
- Posisjonsmåleren for absolutt posisjonering til protesen er et potensiometer av ukjent type. Man må anta at man har en analog spenning som er proporsjonal med håndleddets vinkel.

Et utdrag av de deler av kravspesifikasjonen som er spesielt interessante for maskinvarekonstruksjonen er kort gjennomgått i påfølgende underkapitler.

#### 3.1 Krav til servofunksjon

Krav WSF-01-02-01 sier først at NRWD skal utstyres med en absolutt posisjons-sensor. Dette er som tidligere beskrevet et potensiometer. Videre sier kravet at sensoren skal tilby minimum ti bits oppløsning pr. omdreining. Når det i tillegg er gitt i krav WJF-03 at NRWD skal kunne rotere minst  $180^\circ$  medfører det at NRWD må utstyres med en AD-omformer med minst ni bits oppløsning. For rotasjoner over  $180^\circ$  er ti bits oppløsning på AD-omformeren påkrevd.

Krav SWF-01-03-01 spesifiserer at NRWD skal inkludere en hastighetssensor eller estimator. Siden det skal brukes en børsteløs DC-motor er det naturlig å bruke hall-sensorene til denne oppgaven.

Avslutningsvis spesifiserer krav WSF-02-04 at NRWD må inkludere en strømsensor til motorstrømmen. I ideelle DC-motorer er motorstrømmen proporsjonal med det genererte momentet, og at strømmålingen er tenkt brukt i reguleringssløyfen.

#### 3.2 Krav til kommunikasjon

Ut fra krav WCF-02 og WCF-03 ser man at NRWD må integrere både to AD-omformere og to DA-omformer. De analoge spenningene som skal måles og genereres varierer fra 0 til 7,2V. Siden det analoge signalet brukes som posisjonsreferanse må det ha samme presisjon som posisjonsmålingene. Dette betyr minst ni bit på rotasjonsvinkler med  $180^\circ$  og minst ti bit på rotasjoner over  $180^\circ$ . Det er ikke oppgitt minimumspresisjonen på det analoge utgangssignalet og det er da

naturlig å bruke åtte bits oppløsning siden dette gir enkel mikrokontrollerbasert implementasjon og tilstrekkelig god presisjon.

Videre spesifiserer krav WCF-05 og WCF-08 at CAN-buss grensesnitt og I<sup>2</sup>C grensesnitt henholdsvis skal og bør implementeres. NRWD bør kunne kjøre i et hybridmodus der for eksempel CAN-bussen brukes som inngang mens DA-omformerer brukes som utgang. I tillegg til det overnevnte spesifiserer krav WCF-10 at NRWD skal ha et serielt grensesnitt utad for feilsøking og diagnose samt mulighet for oppgradering av programvare.

### 3.3 Krav til kraftforsyning

Av kravene WPF-02 og WPF-03 framkommer det at NRWD skal kunne:

- Tolerere og kjøre normalt med en uregulert spenningsforsyning på mellom 6V og 12V
- NRWD skal kunne operere uten å ta skade ved uregulerte spenninger mellom 5V og 18V
- NRWD skal ikke utføre uforutsigbare handlinger eller ta skade av uregulerte spenningsforsyninger mellom 0V og 12V.

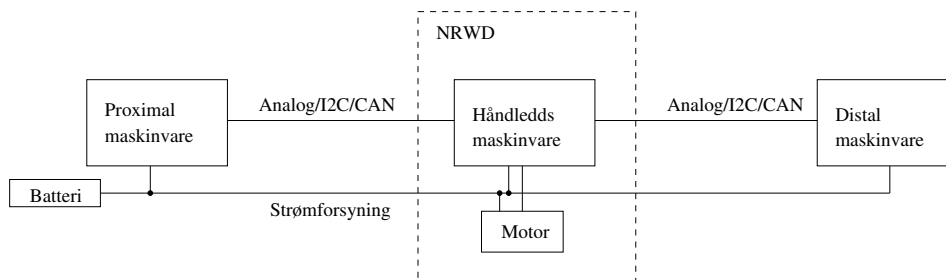
Videre spesifiserer krav WPF-04 at NRWD skal kunne automatisk begrense motorstrømmen slik at ikke spenningsforsyningen unødig dropper under minimums-spenningen. Av dette ser man at NRWD må inkludere en batterimåler slik at protesen alltid vet hvor mye spenning som leveres fra batteriet.

### 3.4 Prioritering av krav

Siden en i denne oppgaven skal konstruere den første prototypen av systemet, og dette med svært begrensede ressurser, er det naturlig å velge en prioritering av kravene. Det vil i denne oppgaven legges vekt på å møte alle funksjonelle krav med hovedvekt på å få prototypen til å fungere som tiltenkt. Krav som omhandler fysiske dimensjoner nedprioriteres men det legges vekt på å finne løsninger som kan lages små nok i et endelig utlegg.

## 4 Systemdesign

Figur 2 viser et overordnet bilde av protesesystemet og hvilke grensesnitt som benyttes. Håndleddet, NRWD, får strøm og styresignaler fra underarmen, den proximale maskinvaren, og må i sin tur sende styresignaler videre ut til hånden, den distale maskinvaren. I tillegg til å kunne kommunisere med omgivelsene må NRWD kunne styre en motor basert på data som mottas.



**Figur 2:** NRWD og de tiliggende protesesystemer.

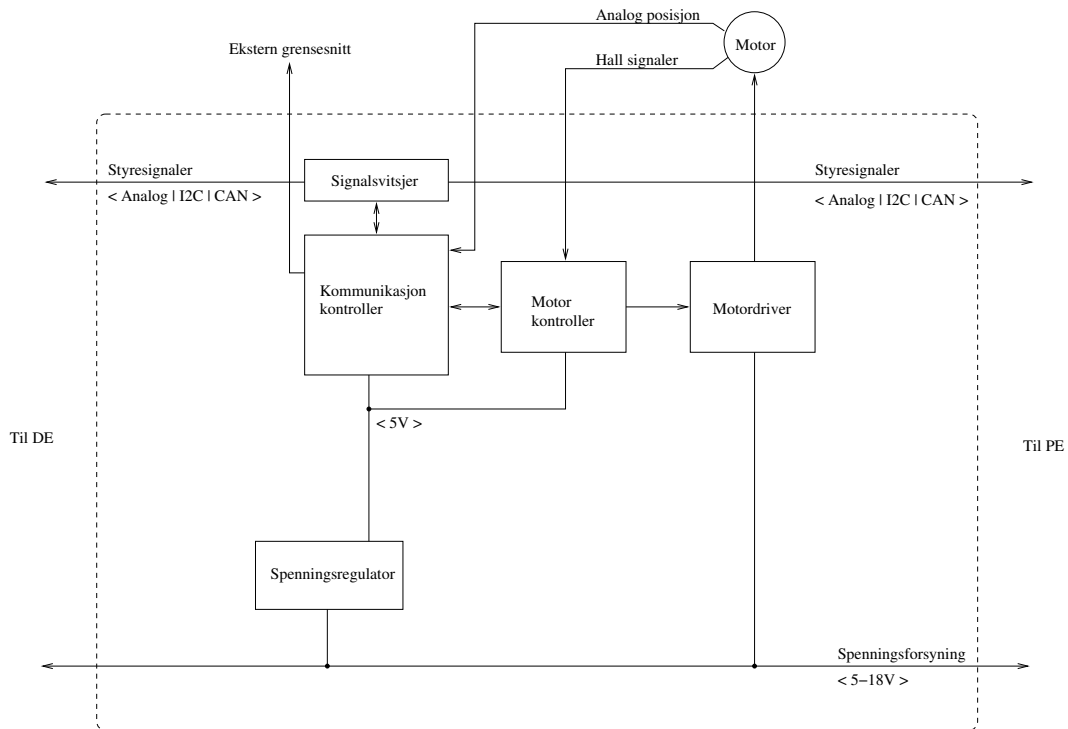
Ved design av maskinvaren til NRWD er det valgt å dele opp det totale systemet i mindre separate delsystemer. Disse delsystemene er lettere å konstruere og teste hver for seg enn totalsystemet samlet. Dette kapittelet tar for seg inndelingen, og de enkelte komponentene i egne underkapitler. Tilnærmet samme kapittelinndeling vil bli brukt i dokumentasjon av prototypkonstruksjonen i kapittel 5.

### 4.1 Inndeling i delsystemer

Totalsystemet har følgende oppgaver:

- Intern strømforsyning
- Ruting av signal
- Kommunikasjon med ekstern maskinvare
- Motordrift
- Motorstyring

Man ønsker å gjøre en inndeling i delsystemer i stor grad etter disse oppgavene. Flere av disse oppgavene kan gjøres helt eller delvis i programvare. Siden mest mulig av programvaren ønskes lagt på samme mikrokontroller blir inndelingen i delsystemer noe annerledes enn listen over. Figur 3 viser den tenkte inndelingen.



**Figur 3:** De forskjellige delsystemer i NRWD.

Spenningsregulatoren sørger for en stabil strømforsyning til resten av systemet. Kommunikasjonskontrolleren skal være en mikrokontroller som er ansvarlig for kommunikasjon med ekstern maskinvare. Mest mulig av programvaren ønskes lagt til denne mikrokontrolleren. Signalbryterne skal bestemme signalrutingen mellom kommunikasjonskontrolleren og proximal og distal maskinvare. Motorkontrolleren overvåker hall-sensorene til motoren og er i hovedsak ansvarlig for kommuteringene. En egen driverkrets for motoren forsyner motorfasene med strøm og styres fra motorkontrolleren.

## 4.2 Strømforsyning

### 4.2.1 Grunnleggende designvalg

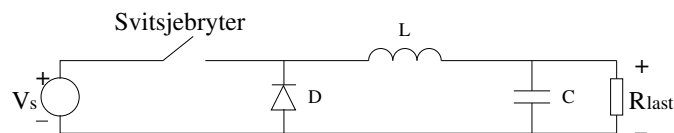
NRWD skal som kjent i følge kravsspesifikasjonen kunne kommunisere med omgivelsene samtidig som at den skal styre en børsteløs DC-motor fra Minimotor. Av kravsspesifikasjonen skal NRWD kunne operere fra og med 5V og oppover. I tillegg viser databladet for motoren at hall-sensorene trenger 5V spenning for å fungere. Basert på dette velger man å bruke 5V som forsyningsspenning til alle digitale kretser på NRWD.



### 4.2.2 Spenningsregulator

I følge kravsspesifikasjonen så skal NRWD kunne operere uten å ta skade av det i et spenningsområdet 0 til 18V samt kunne fungere tilfredsstillende mellom 5 og 12 V. Dette betyr at spenningsregulatoren må kunne regulere alle spenninger mellom 5 og 18V til TTL nivå, noe som en har bestemte i 4.2.1 at skal være 5V. Siden NRWD er batteridrevet er det ønskelig med høy effektivitet på spenningsregulatoren i tillegg til at det er ønskelig at regulatoren skal bruke minst mulig kretskortareal.

Et mye brukt alternativ er såkalte switchmode spenningsregulatorer. Figur 4 viser en forenklet skisse over konstruksjonen til en slik regulator. Disse regulatorene fungerer ved å svitsje en strøm inn i en spole av og på i stor hastighet. Lasten blir så forsynt med strøm fra denne spolen. Når strømforsyningen til spolen er svitsjet av drar spolen en strøm gjennom en diode. Regulatoren måler spenningen over lasten for å bestemme hvor lenge forsyningen til spolen må være koblet av og på. Svitsje-frekvensene ligger vanligvis mellom mellom 200 og 600kHz.



**Figur 4:** Prinsippskisse switchmode buck spenningsregulator.

Fordeler med switchmode spenningsregulatorer er mellom annet høy effektivitet (vanligvis over 90%), billig å produsere og liten fysisk størrelse. Det kan lages regulatorer som genererer spenninger som er både høyere (boost-regulatorer) og lavere (buck-regulatorer) enn den uregulerte innspenningen, samt negative spenninger. Det kan også konstrueres en mer kompleks variant som kan generere regulerte spenninger som er galvanisk skilt fra forsyningsspenningen, og som kan variere fra langt under 0V til langt over forsyningsspenningen. Switchmoderegulatorer er således svært fleksible spenningsregulatorer, og er brukte i svært mange sammenhenger.

En ulempe er at regulatoren ofte gir en høyfrekvent støy på grunn av svitsjingen. Ved digital elektronikk er dette oftest uten betydning men ved bruk av analog elektronikk kan dette få en betydelig innvirkning. Det er derfor en nødvendighet med godt tilpassede kondensatorer og spoler. Mye god dokumentasjon er tilgjengelig på teori og praktisk design av switchmode spenningsregulatorer; se for eksempel [23] og [12].

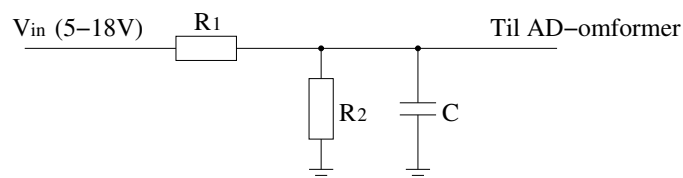
Til analog elektronikk er vanligvis lineære spenningsregulatorer å foretrekke. Lineære regulatorer fungerer som en spenningsdeler der den regulerte spenningen hviler over lasten, mens resten av innspenningen hviler over en styrt transistor

i regulatoren. Den regulerte spenningen blir kontinuerlig målt for å styre “motstanden” i transistoren. Lineære spenningsregulatorer har derfor normalt en veldig liten rippel. Ulempen er at en stor del av effekten blir forbrent i regulatoren, og effektiviteten blir dermed lav, særlig ved store spenningsforskjeller mellom regulert og uregulert spenning.

Siden den analoge elektronikken i NRWD vil ha et beskjedent strømforbruk vil en ideell løsning kunne være å bruke både en switchmode spenningsregulator for den digitale elektronikken og en lineærregulator for den analoge elektronikken. På den måten vil man få en stabil 5V som analog referanseverdi samtidig som at en får dekket majoriteten av strømforbruket med en effektiv switchmode regulator. Men på grunn av den økte plassbruken og kompleksiteten det medfører å ha to separate spenningsregulatorer velger en her å bruke kun en switchmode spenningsregulator. Tester på NRWD vil avdekke om en slik regulator vil ha tilstrekkelig gode egenskaper til denne anvendelsen. Uansett resultat så vil dette gi verdifulle erfaringer om hvordan kretsen videre bør utvikles.

#### 4.2.3 Batterimåler

Krav WPF-04 fra kravsspesifikasjonen sier at NRWD skal kunne endre motorbruken ved lav batterispenning. For å realisere dette velger en å bruke en spenningsdeler, en kondensator for å lage et enkelt 1. ordens filter og en AD-omformer. En enkel skisse over denne kretsen er vist i figur 5.

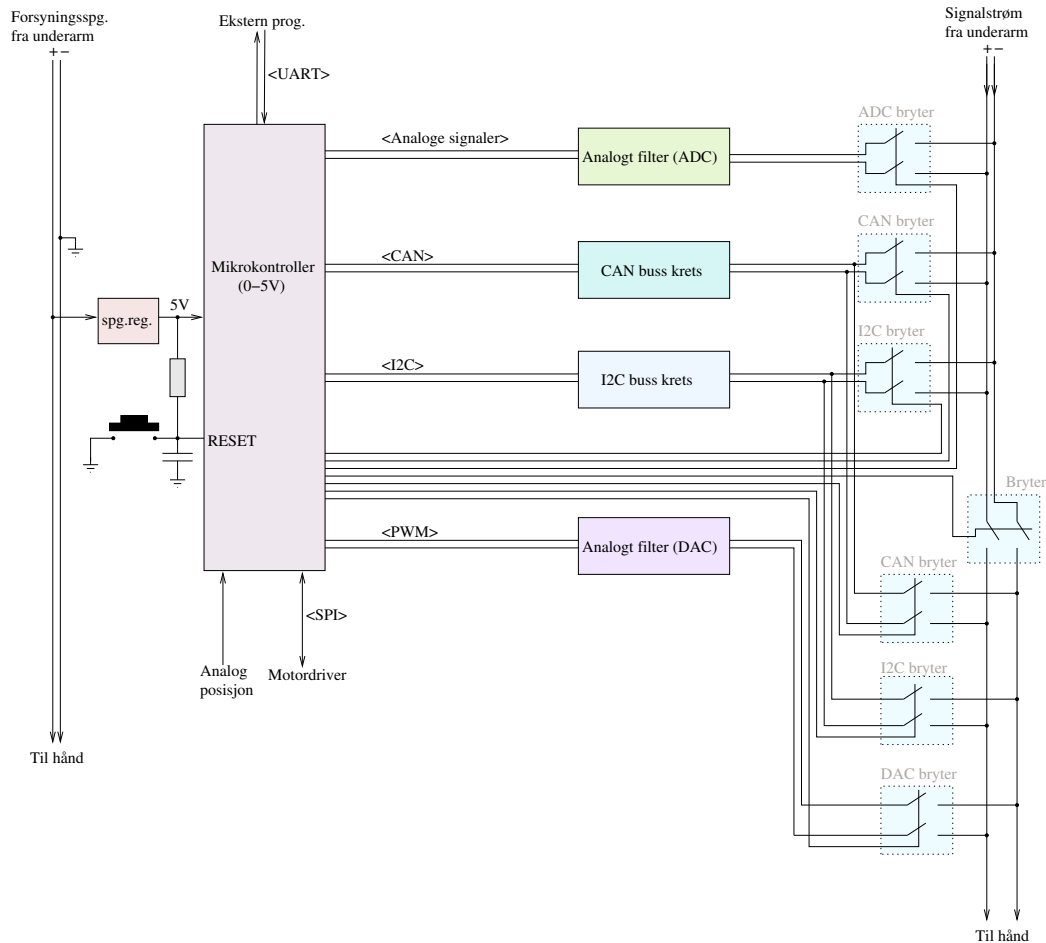


**Figur 5:** Prinsippskisse for batterimåler.

Størrelsesforholdet mellom  $R_1$  og  $R_2$  må settes slik at det ved  $V_{in} = 18V$  ikke vil skade AD-omformerens. Men siden det i spenningsdeleren alltid vil være en lekkasjestrøm til jord bør størrelsene på motstand  $R_2$  være så stor som mulig. Samtidig må spenningen over motstand  $R_1$  være stor nok til at AD-omformerens får en tilstrekkelig nøyaktig måling av batterinivået. I tillegg må den totale impedansen ikke bli for høy for AD-omformerens. Valg av komponenter til denne kretsen er altså avhengig av hvilke egenskaper AD-omformerens har.

### 4.3 Kommunikasjonsrelatert maskinvare

For å kommunisere med andre proteser og sensorer har man bestemt å ha en kommunikasjonskontroller som kan kommunisere med alle signaltyper som er spesifisert. Et signalrutingskretsløp styrer signalene frem til de rette komponentene. I figur 6 er komponentene til de forskjellige grensesnittene tatt med.



**Figur 6:** Kommunikasjonskontroller og omliggende grensesnitt.

#### 4.3.1 Innlesning av analoge styresignaler

Majoriteten av de eksisterende myoelektrisk styrte proteser bruker, som beskrevet i kapittel 2.1.3, analoge spenninger til å styre protesen. Siden kravsspesifikasjonen spesifiserer at NRWD skal optimaliseres for analoge signaler opp til 7,2V, må man finne en løsning som med minst mulig fysisk størrelse og kompleksitet gir de tilstrekkelige egenskaper.

Digitale signaler har en maksimal presisjon tilsvarende  $\pm 0.5$  LSB. Ved AD-omforming av analoge signaler må støyen være mindre enn dette for at den digitale oppløsningen skal være optimalt utnyttet. Et minstekrav til innlesningen av analoge signaler er at ved et konstant signal varierer den innleste verdien med mindre enn en LSB. Hvis ikke vil protesen skjelve mellom forskjellige posisjoner og i tillegg til å være ubehagelig å bruke vil den også forbruke unødvendig mye effekt.

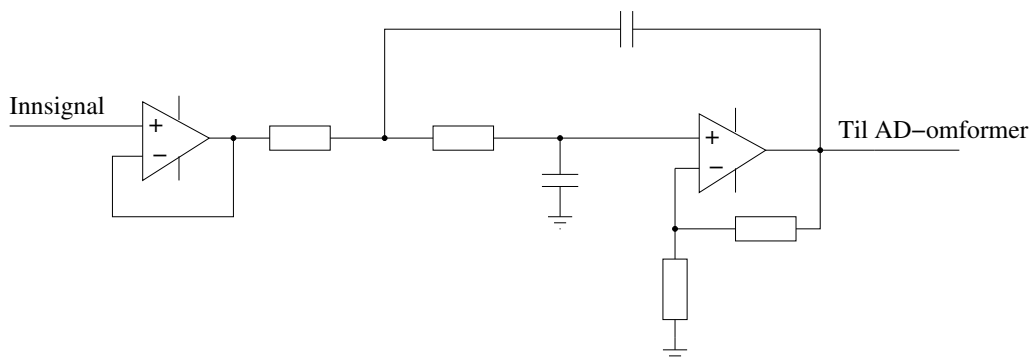
NRWD er tiltenkt å brukes sammen med det meste som finnes av eksisterende og fremtidige posisjonssensorer og håndproteser. Egenskapene til posisjonsreferanse-signalet er derfor ikke godt kjente. Uten annen informasjon må det forventes at signalene i utgangspunktet kan være høyimpedante. I krav WCF-02-01 i kravsspesifikasjonen er det spesifisert at innlesing av posisjonsreferanse (EMG-signaler) har en båndredde på minst 500 Hz. Det må derfor antas at posisjonssignalet er stabilt for frekvenser under 500 Hz, mens frekvenskomponenter betydelig over dette må antas å i all vesentlighet være støy.

En velger derfor å bruke et 2. ordens Butterworth lavpassfilter (Sallen-Key) som skal dempe den høyfrekvente støyen tilstrekkelig til å gi stabile målinger.

Nyquists samplingsteorem dikterer at AD-omformerens må sample minst dobbelt så raskt som den høyeste frekvenskomponenten i signalet som måles. Dersom signalet har høyere frekvenskomponenter (større amplitude enn 0.5 LSB) så vil disse bli innlest som lavere frekvenser.

Ved ni bits oppløsning tillates en støy med amplitude på  $1/1024$ -del av maksimal signalstyrke. Med et 2. ordens lavpassfilter betyr dette at samplingsfrekvensen må være ca. 5 oktaver (omtrent 32 ganger) over knekkfrekvensen til filteret for å unngå at høyfrekvent støy skal bli tolket som signaler med lavere frekvenser.

Kretsen slik den er tenkt for hver av de analoge linjene er skissert i figur 7.

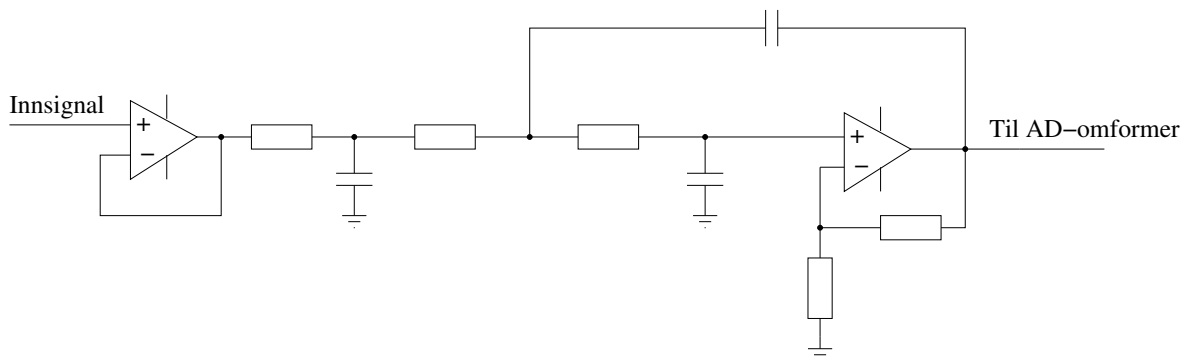


**Figur 7:** Innlesning av analoge styresignaler.

### 4.3.2 Generering av analoge styresignaler

I kravsspesifikasjonen (WCF-03) står det spesifisert at NRDW skal kunne produsere to separate analoge signaler mellom 0 og 7,2V. For å gjøre dette velger en å bruke pulsbreddemodulerte (PWM) signaler. De pulsbreddemodulerte signalene skal enkelt kunne styres fra kommunikasjonskontrolleren. I tillegg må man ha et godt lavpassfilter for å glatte signalene tilstrekkelig. Til filter velger en her å bruke et tilsvarende filter som brukt til innlesningen av analoge verdier i forrige kapittel. Men siden en kjenner impedansen fra kommunikasjonskontrolleren kan man legge på et 1. ordens lavpassfilter framfor 2. ordens filteret slik man ender opp med et 3. ordens Butterworth filter. Avslutningsvis må signalet forsterkes med en faktor slik at maksimal spenning blir lik 7,2V.

Figur 8 viser en krets som beskrevet over.



**Figur 8:** 3. ordens Butterworth lavpassfilter med forsterkning.

### 4.3.3 CAN-buss

For å kommunisere med en CAN-buss må en i tillegg til kommunikasjonskontrolleren ha en CAN-kontroller og en CAN-transceiver. CAN-kontrolleren er den enheten som leser meldingene som går på bussen mens CAN-transceiveren fungerer som et signalbuffer og mellom annet beskytter de indre kretser mot overspenninger. Den første CAN-standard er spesifisert i ISO-11519 [13] men ble i 2003 foreldet av ISO-11898 [14] .

I tillegg til å kommunisere på CAN-bussen må NRWD også kunne terminere bussen. CAN-buss terminering kan for eksempel i følge standarden gjøres ved å sette en  $120\Omega$  motstand mellom busslederne. På grunn av dette må det være mulig å sette en slik motstand mellom de to bussledningene når NRWD er en endenode på CAN-bussen.

#### 4.3.4 I<sup>2</sup>C-buss

For å kunne kommunisere via en I<sup>2</sup>C-buss må man i utgangspunktet ha en I<sup>2</sup>C-kontroller. I<sup>2</sup>C-kontrolleren fås i eksterne mikrobrikker, integrert i mikrokontrollere samt at man kan implementere den i programvare på de noe kraftigere mikrokontrollerene. Busspesifikasjonen [24] er utviklet og distribuert av Philips Semiconductors<sup>1</sup>. Siden I<sup>2</sup>C-bussen er så mye brukt er der en betydelig mengde dokumentasjon tilgjengelig, som for eksempel [27] og [8].

På samme måte som med CAN-bussen så må man også kunne terminere I<sup>2</sup>C-bussen om man er en endenode. I<sup>2</sup>C-bussen termineres i følge standarden ved å bruke tilpassede pullup-motstander på hver av linjene.

#### 4.3.5 Serielt grensesnitt for oppdatering og diagnostisering

Det er gitt i krav WCF-10 at NRWD skal implementere et serielt grensesnitt for eksterne datamaskiner slik at de kan oppdatere og diagnostisere kommunikasjonskontrollerens programvare. Siden det er ønskelig å bruke minst mulig kretskortareal samtidig som at strømforbruket må holdes så lavt som mulig er det to standarder som er mest aktuelle: USB og RS-232. Begge standardene er godt støttet i dagens datamaskiner og har de riktige egenskaper for jobben. Valget mellom USB og RS-232 kommunikasjon må tas ved konstruksjon da man ser hvilke maskinvare som er tilgjengelig.

### 4.4 Ruting av kommunikasjonssignaler

Et viktig moment ved maskinvaren til NRWD er signalruting mellom de forskjellige kommunikasjonsnssystemene. Når de samme lederne skal kunne transportere to forskjellige databusser samt analoge signaler må der være en robust måte å sette opp riktige signalbaner. I tillegg skal også NRWD kunne bryte innsignalene fra utsignalene i tilfelle man for eksempel ønsker å oversette serielle databussignaler til analoge signaler.

En løsning på problemet med å styre signalrutingen er å legge lederne lett tilgjengelig på kretskortet slik at man kan mekanisk bryte de baner som man ikke ønsker å bruke. Dette kan for eksempel gjøres ved å kutte kretsbaner med en kniv eller lignende. Denne løsningen har mellom annet den fordelen at den ikke innfører noen nevneverdig impedans eller kapasitans på de gjenværende signalene. I tillegg er dette den metoden som bruker det minste kretskortarealet. Ulempen er at det er vanskelig å endre innstillinger etter at de har blitt gjort.

En annen løsning på signalrutingen er å bruke mekaniske brytere som for eksem-

---

<sup>1</sup>Hjemmeside til Philips Semiconductors: <http://www.semiconductors.philips.com/>

pel DIP-brytere og jumpere. Disse bryterne vil på samme måte som over ikke innføre forstyrrelser på signalene som brukes, men en kan nå også enkelt endre signalruting ettersom man ønsker. På den andre side vil det ta mer kretskortareal å bruke slike brytere.

En tredje løsning er å bruke elektroniske (transistorbaserte) brytere. Dette gir store fordeler i konfigurasjon av protesen da programvaren selv kan konfigurere protesen. Dette muliggjør for eksempel autodeteksjon av serielle databusser. En ulempe med elektroniske bryterne er at de innfører en viss impedans og kapasitans på signalene som passerer. Det er derfor viktig å verifisere at bryterne ikke påfører betydelige endringer i karakteristikken til signalene. Plassmessig vil elektroniske bryterne oppta omtrentlig samme areal som svært små DIP-brytere.

Siden en her skal lage en prototyp og primært gjøre tester på systemet velger en å bruke både mekaniske og elektroniske brytere. Basert på tester av systemet kan man senere velge hvilket brytersystem en ønsker å beholde. I gjennomføringen av tester på kommunikasjonssystemet vil alle tester tas med begge typer brytere slik at man ser eventuelle forskjeller. I figur 6 er de elektroniske signalbryterne inntegnet. De mekaniske signalbryterne er ikke inntegnet men vil kobles parallellt med de elektroniske bryterne.

## 4.5 Motorkontroller

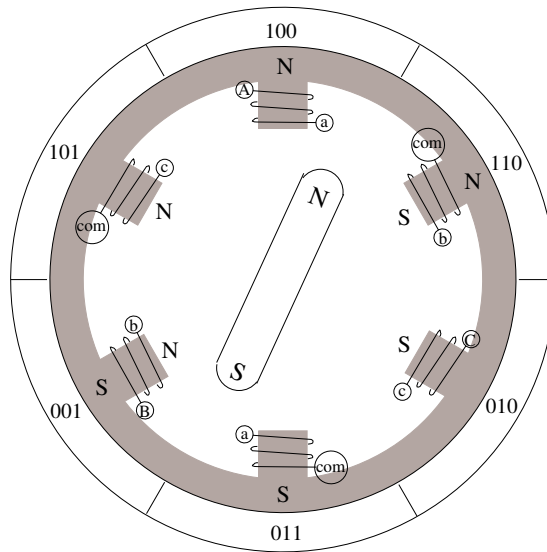
### 4.5.1 Styling av børsteløse DC-motorer

Vanlige DC-motorer har vanligvis fastmagneter i stator og kommuterte elektromagneter i rotor. Et system av slepekontakter sørger for at det til en hver tid er de spolene i rotor som gir størst mulig moment som får strøm. Slitasje og tap i kommutator, samt krav om at de kommuterte viklingene må være i rotor gjør den tradisjonelle DC-motoren lite attraktiv i mange sammenhenger.

I børsteløse DC-motorer har rotor og stator byttet plass, ved at fastmagnetene er i rotor og de kommuterte viklingene er i stator. Den mekaniske kommuteringsanordningen er erstattet med hall-sensorer som angir posisjonen til rotor. På bakgrunn av denne vinkelangivningen må en dedikert krets sørge for at det settes opp strømmen i statorviklingene for optimalt moment i ønsket retning.

“Minimotors 1628 T 012 B” er en trefaset børsteløs DC-motor av stjernetype. Figur 9 viser en prinsippskisse av en stjernemotor, og figur 10 viser hvordan en slik motor er koblet opp. Av figur 10 ser man at de seks spolene i stator er koblet sammen parvis og gir en trefasemotor.

Hall-sensorene som måler posisjonen i en børsteløs DC-motor finnes først og fremst for å gjøre riktig kommutering mulig. En trefaset børstemotor har derfor tre hall-sensorer montert uniformt rundt rotor. I figur 9 er det tegnet inn en



**Figur 9:** Prinsippskisse av børsteløs DC-motor av samme type som “Minimotors 1628 T 012 B”.

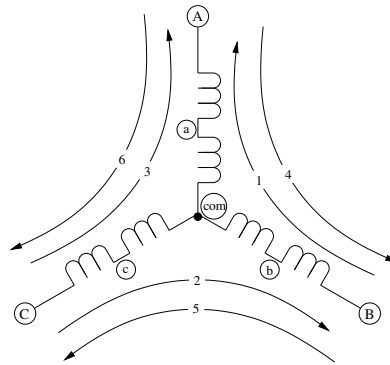
ring med seks segmenter rundt stator. Segmentene inneholder et binært tall. Dette tallet indikerer måleverdien for de tre hall-sensorene når nordpolen til stator er innenfor det aktuelle segmentet.

Hver gang polene i rotor går fra ett segment til et annet må strømmen i spolene endres for å opprettholde optimalt moment. Det er dette som kalles kommutering. Dersom det ikke kommuteres raskt nok vil det i perioder genereres moment som går i motsatt retning av den ønskede rotasjonsretningen, noe som går ut over både generert moment og effektivitet.

Figur 9 indikerer også hvordan en slik motor normalt bør kommuteres. Ved 4 av statorpolene er det tegnet inn en N eller en S. Disse indikerer hvilke spoler det skal gå strøm igjennom og retningen strømmen bør ha når rotor er posisjonert som indikert i figuren og skal rotere mot høyre. Man ser at det resulterende magnetfeltet fra disse polene står så godt som vinkelrett på rotor-feltet. Dette gir optimalt moment. Når rotor roterer slik at hall-sensorenes verdier skifter fra 100 til 101 skrus strømmen i spole B av og det settes opp en strøm i spole A slik at man får en nordpol øverst og en sørpol nederst. Nå står nok en gang feltene fra rotor og stator så godt som vinkelrett på hverandre. Dette gjentas hele veien rundt.

Man kan også stoppe kommuteringen for å holde motoren fast i en bestemt posisjon. Da kan det være hensiktsmessig å sende strøm gjennom samtlige spoler i en gang for å oppnå bedre holdekraft eller bedre vinkeloppløsning. Dette har den ulempen at det må gå høye strømmen gjennom motorspolene hele tiden når motoren skal holdes i ro for å unngå at den rykkes ut av posisjon. I NRWD er





**Figur 10:** Intern kobling av børsteløs DC-motor av stjernetype.

holde-problemet tenkt løst med en turtallsstyrt motor regulert med tilbakekobling fra posisjonsmåling. Denne måten å kommutere på blir derfor ikke gjennomgått her.

#### 4.5.2 Motorstyringens inndeling

Motorstyringen består i prinsippet av to komponenter, kommuteringslogikken og driverkretsen. Kommutteringslogikken har til oppgave å overvåke signalene fra hall-sensorene og til en hver tid sette ut styresignaler til drivertransistorene, som forsyner motorspolene med en riktig strøm.

Kommuteringslogikken kan i prinsippet implementeres med kombinatorikk, eller den kan utføres av kommunikasjonskontrolleren. Ingen av disse løsningene tilfredsstiller imidlertid behovene til NRWD.

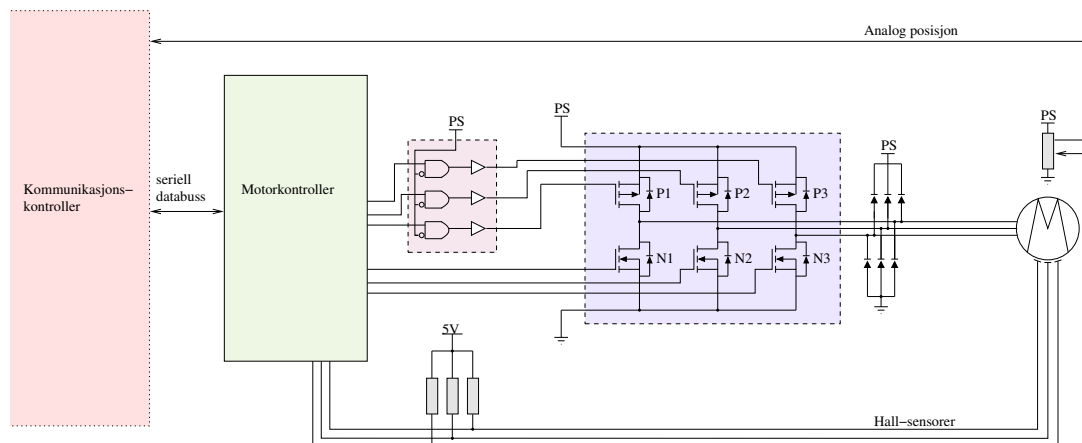
Det mest tiltalende ville være å la kommunikasjonskontrolleren ta seg av å overvåke hall-sensorene og sette ut de nødvendige signalene til drivertransistorene. Hver av hall-sensorene vil da få drive hvert sitt interrupt i kommunikasjonskontrolleren. Men det høye turtallet motoren opererer på og den tilsvarende høye interruptraten så vil rett og slett ikke kommunikasjonskontrolleren klare å henge med. Den må som kjent til enhver tid ha tilstrekkelig med ressurser ledig til å ta seg av kommunikasjon med andre system.

En løsning med kombinatorikk er en løsning som gir et lite transistortall, men dersom man ikke skal få gjort dette i ASICs så vil mange komponenter gjøre kretskortutlegget stort. En slik løsning overlater dessuten mange tidskrisiske oppgaver til kommunikasjonskontrolleren som allerede har nok å gjøre, noe som kan føre til feil eller redusert ytelse både i motorstyringen og i kommunikasjonen.

Den valgte løsningen er derfor å bruke en egen mikrokontroller som tar seg av kommuteringen og styrer drivertransistorene. Denne motorkontrolleren bruk-

er pulsbreddemodulering for å styre turtallet på motoren. Kommunikasjonskontrolleren sender kommandoer til motorkontrolleren med retnings- og hastighetsinformasjon. På denne måten blir kommunikasjonskontrolleren godt avlastet, samtidig som man har stor fleksibilitet i valg av kommuteringslogikk og styring av motoren. Dette er også en av de mest plassbesparende løsningene, siden hele kommuteringslogikken får plass i en eneste integrert krets.

Figur 11 viser en skisse av denne inndelingen.



**Figur 11:** Skisse over motorrelatert maskinvare.

### 4.5.3 Kommutering

Som tidligere nevnt vil det brukes en egen mikrokontroller til kommuteringen. Dette gir fleksibilitet i implementasjon av kommuterings- og styringsalgoritmer, samtidig med at dette gir en lite plasskrevende konstruksjon.

Hall-sensorene kobles til hver sin digitale inngang på mikrokontrolleren. Disse inngangene settes til å generere interrupt ved nivåendring. Interruptprosedyren setter så ut nye, oppdaterte signaler til hver av de seks transistorene gjennom egne digitale utganger.

Det er imidlertid viktig at motorkontrolleren har nok kapasitet til å kunne kommutere tidsnok. Ved hver motoromdreining får motorkontrolleren tilsammen seks eksterne interrupt. Ved en hastighet på 10000 omdreininger i minuttet og seks interrupt pr. omdreining får 1000 interrupt pr. sekund. 10000 omdreininger er ikke unaturlig raskt for denne applikasjonen. Det er derfor viktig at programkoden i interruptrutinene er optimalisert for minimal kjøretid, og at mikrokontrolleren er rask nok til å få utført interruptrutinene.

For å styre hastigheten velger man å bruke pulsbreddemodulasjon, der motorstrøm-

men switches på og av. Dette bakes inn i kommuteringslogikken, slik at transistorene stenges uavhengig av hall-sensorposisjoner i perioder. Motorkontrolleren bruker timerinterrupt for å skru av og på strømmen til motoren.

Videre vet motorkontrolleren, på grunn av sin kjennskap til hall-elementenes endringer, meget nøyaktig relativ posisjon. Dette gjør motorkontrolleren godt egnet til å implementere en hastighetsregulator.

#### 4.5.4 Kommunikasjon mellom kontrollerene

Kommunikasjonskontrolleren, som mottar beskjeder om hvordan brukeren ønsker å styre protesen, må kunne kommunisere kontinuerlig til motorkontrolleren. I dag er den mest elegante løsningen til slik interkommunikasjon bruk av serielle databusser. De fleste databusser oppfyller de krav som settes til tid og effektivitet.

Valg av seriell databuss er imidlertid avhengig av hvilken maskinvare man velger å bruke og det vil være prematurløst å bestemme dette nå. Det som er viktig er at bussen er rask og belaster motorkontrolleren minimalt.

#### 4.5.5 Posisjonsmåling og regulering

Det er som forklart i kapittel 3 gitt i oppgaven at man skal bruke et potensiometer til å bestemme protesens absolutte posisjon. For å lese dette potensiometeret må man ha en AD-omformer, noe kommunikasjonskontrolleren må ha. På grunn av dette sammen med det faktum at kommunikasjonskontrolleren sitter med informasjonen om hvor brukeren ønsker å styre protesen velger man å bruke kommunikasjonskontrolleren til å lese inn posisjonen. Dette medfører at kommunikasjonskontrolleren tar seg av posisjonsregulering mens motorkontrolleren tar seg av hastighetsregulering. Da stilles det heller ikke krav til at motorkontrolleren skal inkludere en AD-omformer, noe som gjør det lettere å velge en egnet motorkontroller.

## 4.6 Motordriver

### 4.6.1 Driverkrets

For å drive motoren må man som kunne styre strømmene gjennom motorspolene. Dette gjøres ved hjelp av egne drivertransistorer oppsatt i spesielle topologier kalt broer. Siden man har en tre-faset børsteløs DC-motor trenger man tre halve H-broer (også kalt halvbroer) som vist i det blå feltet i figur 11. Utgangen fra hver av de tre halvbroene blir koblet til hver sin fase i motoren; punkt A, B og C i figur 10.

De tre halvbroene kan lages av enten felt-effekt transistorer (MOSFET) eller av bipolare transistorer (IGBT). En velger her å bruke MOSFET transistorer da dette gir det enkleste kretsdesignet og forøvrig er den mest brukte løsningen i tilsvarende system.

Videre må man bestemme hvilke typer MOSFET transistorer man ønsker å bruke. En mye brukt løsning er seks like N-kanals transistorer. Dette er den enkleste konstruksjonen og er mye brukt på CD-spillere og annen motorisert elektronikk beregnet til bruk i datamaskiner. Det er også den beste løsningen når man skal ha svært høye spenninger da P-kanals transistorer ikke har like gode egenskaper under slike forutsetninger. Dette har imidlertid ingen relevans for NRWD som ikke har høyre spenninger enn 18V. Ulempen med seks N-kanals transistorer er at man alltid trenger en styrespenning til transistorene som er noe høyere enn forsyningsspenningen for å kunne garantere åpning og lukking av transistorene.

Alternativt kan man bruke en løsning med tre P-kanals og tre N-kanals transistorer. Dette har den fordel at man trygt kan styre alle transistorene med spenninger som ligger mellom forsyningsspenningene til transistorene. I NRWD ønsker en å bruke den uregulerte batterispenningen som forsyningsspenning til transistorene, og har ikke tilgjengelig høyere spenninger enn dette. På grunn av dette velger man å bruke løsningen med tre P-kanals og tre N-kanals MOSFET transistorer.

Videre er det et vanlig problem i slike driverekretser at man kan få kortslutningsstrømmer når man snur magnetfeltet. Dette fordi transistorene bruker lengre tid på å lukke seg enn på å åpne. En måte å løse dette problemet på er å vente en kort tid mellom lukking og åpning av transistorer. Denne løsningen kan enkelt implementeres i software på motorkontrolleren. Alternativt kan man velge en kommuteringsalgoritme der magnetfeltet i motorspolene aldri skal vendes instantant, men gå fra **N** til **av** til **S** (og omvendt). Man vil unngå situasjoner der transistoren til positiv spenningsforsyning skrus av samtidig med at korresponderende transistor til jord skrus på (og omvendt), og unngår dermed problemet med kortslutning fra forsyningsspenningen til jord gjennom kommuteringstransistorene helt. Kommutteringsalgoritmen antydnet i kapittel 4.5.1.

Avslutningsvis må man ha noen raske flyback-dioder på alle tre fasene rett etter transistorbroene. Dette for å beskytte kretsen for induserte spenninger fra motoren.

#### 4.6.2 Strømmåling

Motorstrømmen kan variere ganske mye, og kan endatil være negativ rundt switchetidspunktet. For å gjøre en mest mulig representativ motorstrømmåling bør det derfor gjøres en integrering av motorstrømmen over en tid vesentlig lenger enn tiden det tar før strømmene gjennom motorspolene stabiliserer seg etter

switching, og gjerne av en varighet tilsvarende noen hele rotasjoner ved høyere hastigheter.

Strømmen måles i tilførselsledningene til driverkretsen. Motoren vil vanlig vis ikke fungere som generator, og for de tilfeller der den gjør det er regulering normalt ikke av interesse. En diode plasseres derfor mellom strømsensoren og driverkretsen, med en kondensator mot jord etter dioden for å ta opp motinduserte strømmer.

Til selve strømsensingen velges det å benytte en ferdig integrert krets. Strømmålingen fra denne blir så integrert opp i en akkumulator-kondensator over en bestemt tid. Når denne tiden er omme blir spenningen over kondensatoren lest ut med AD-omformeren til kommunikasjonskontrolleren før akkumulatorkondensatoren tømmes gjennom en tristate-port på kommunikasjonskontrolleren.

Kommunikasjonskontrolleren velges til dette fremfor motorkontrolleren, som i mange henseender ville være et mer naturlig valg, fordi kommunikasjonskontrolleren likevel trenger AD-omformere og tristate-porter, mens motorkontrolleren søkes å gjøres så liten og enkel som mulig. Motorkontrolleren vil også normalt være tungt lastet med kommuteringsinterrupt, og langt større unøyaktighet i integrasjonsintervallet må forventes.



## 5 Systemkonstruksjon

### 5.1 Generelt

#### 5.1.1 Programvare for maskinvaredesign

Som et av de første oppgavene i maskinvaredesign må det velges hvilken programvare man skal benytte til jobben. Det må her vurderes hvilke egenskaper som trengs, hvilke lisenser man har tilgang til og hvilke plattformer som er støttet. Etter en gjennomgang av de tilgjengelige programvarepakker velger man å bruke “EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor)” fra CadSoft<sup>2</sup>. Denne programvaren er godt kjent og mye brukt blant studenter og ansatte ved NTNU og har mellom annet en egen “akademisk lisens” som tillater fri bruk av programmet for ikke-kommersielt arbeid.

I påfølgende delkapitler gjennomgås deler av den totale kretsen hver for seg. Det totale kretsdesignet samt utskrift av selve kretskortutlegget er for helhetens skyld lagt til i appendix B. Filer fra Eagle ligger sammen med datablader vedlagt i CDROM-en som følger rapporten.

### 5.2 Strømforsyning

#### 5.2.1 Spenningsregulator

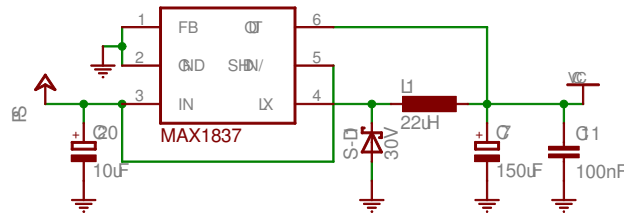
Der er mange forskjellige svitsjebaserte spenningsregulatorer tilgjengelig på markedet. De fleste større produsentene av mikrobrikker for spenningsstyring har egne produktserier med slike regulatorer.

Basert på de krav som ble satt i kapittel 4.2.2 velger en å bruke en spenningsregulator med navn MAX1837 [15] fra MAXIM. Denne regulatoren dekker krav til inn- og utgangsspenninger, rimelig i pris og er lett tilgjengelig. Switchmode regulatorer skal være relativt små i forhold til den effekt de kan levere og ha lite tap. Likevel opptar den valgt regulatoren med tilhørende komponenter et betydelig kretskortareal. Det er derfor av stor interesse å se hvor gode resultater spenningsregulatoren gir og hvilke muligheter man har til å optimalisere og kompaktisere kretsen.

Kretsskjemaet (figur 12) og komponentverdiene er valgt etter anbefalinger som er gitt i eksempelkretsen i databladet. Det er ikke gjort noe forsøk på optimalisering av komponentverdier, da dette mellom annet krever detaljert kjennskap til strømforbruket til systemet.

---

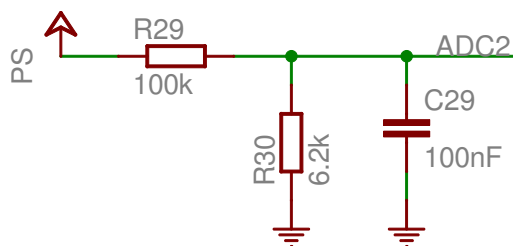
<sup>2</sup>Hjemmeside til CadSoft: <http://www.cadsoft.de>



**Figur 12:** Kretsdesign av spenningsregulator.

### 5.2.2 Batterimåler

For å overvåke batterinivået bestemte man i kapittel 4.2.3 å lage en enkel spenningsdeler til batteriet koblet til en AD-omformer på kommunikasjonskontrolleren. Denne implementeres som vist i figur 13.



**Figur 13:** Kretsdesign av batterimåler.

Motstanden til jord på  $6.2\text{k}\Omega$  skal gi lav nok impedans til å drive AD-omformerens, samtidig med at  $100\text{k}\Omega$  motstanden til strømforsyningen gir en akseptabel lav strøm gjennom spenningsdeleren. Antar man 8 bits oppløsning på AD-omformerens og 5V referansespenning har AD-omformerens en oppløsning på ca  $0.02\text{V}$ . Med delingsforholdet fra figuren skal dette gi mulighet for å detektere spenningsvariasjoner på ca  $0.34\text{V}$  på forsyningsspenningen.

## 5.3 Kommunikasjonsrelatert maskinvare

Etter en helhetsvurdering av de krav som er satt til kommunikasjonskontrolleren velger en å bruke en AT90CAN128 [5] mikrokontroller fra Atmel. Denne kontrolleren har mellom annet følgende egenskaper:

- Internt 8MHz RC-oscillator
- Støtte for bootloader



- Innebygd to USART kontrollere for RS-232 kommunikasjon
- Innebygd åtte kanals 10 bits AD-omformer
- Innebygd I<sup>2</sup>C-kompatibel kontroller (TWI)
- Innebygd CAN-kontroller
- Innebygd SPI-kontroller
- Innebygd to åtte bits og to 16 bits timere med maskinvarestøtte for puls-breddemodulasjon (PWM)
- Relativt liten fysisk størrelse (MLF64: 9mm x 9mm)

Kontrolleren er helt ny (tilgjengelig fra 4. kvartal 2004) og er den eneste mikrokontrolleren fra Atmel med innebygget CAN-kontroller.

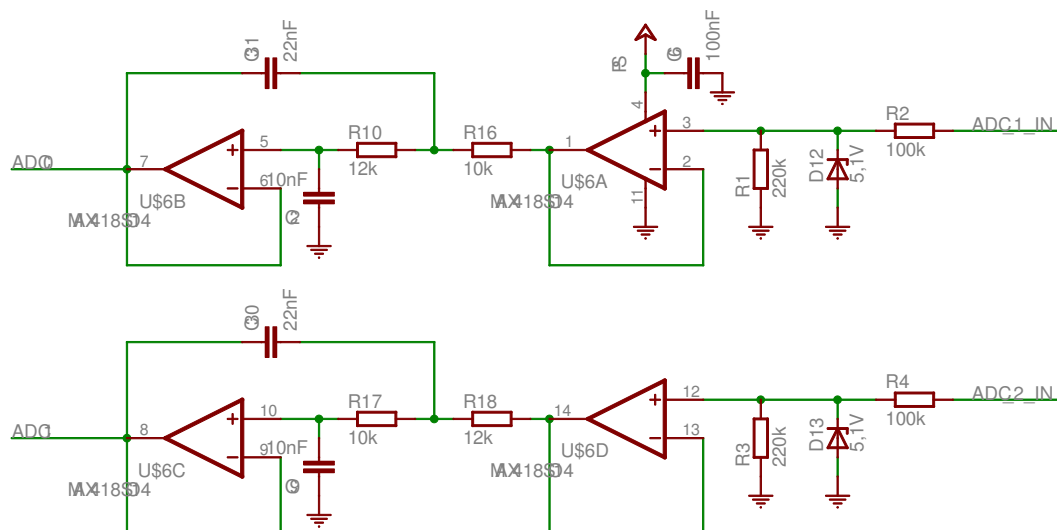
### 5.3.1 Innlesning av analoge styresignaler

Kommunikasjonskontrolleren tar seg av all kommunikasjon med proximal og distal maskinvare. Dette inkluderer også innlesning og utsending av analoge signaler. Den valgte mikrokontrolleren har en innebygget 10-bits ad-omformer med støtte for opptil 15000 målinger i sekundet til formålet.

AD-omformeren på kommunikasjonskontrolleren har av hensyn til støy ved digital elektronikk en egen strømforsyning. Dette slik at man kan ha separate spenningsregulatorer for analog og digital elektronikk. I tillegg har kontrolleren en egen inngang som bestemmer den øvre analoge referanseverdien. Siden vi har valgt å kun bruke en spenningsregulator for hele kretsen kobler vi både analog og digital spenningsforsyning til denne kontakten. I tillegg velger man å koble den analoge forsyningsspenningen til analog referanse. Med denne konfigurasjonen skal man ha en AD-omformer som gir ti bits oppløsning på måleverdier mellom 0V og 5V.

Før man kan bruke AD-omformeren på inngangssignalene må man lavpassfiltrere signalet og tilpasse spenningsnivået. Basert på de betraktninger som ble gjort i kapittel 4.3.1 velger man å først dele ned spenningen med en spenningsdeler sammen med en 5,1V zenerdiode. Zenerdioden beskytter da kretsen for overspenninger. Deretter bruker man et 2. ordens lavpass butterworth filter før signalet rutes inn til AD-omformeren. Som operasjonsforsterker velger man å bruke en mikrobrikke fra MAXIM med navn MAX418 [16]. Denne brikken kommer i SO14 pakning og har fire operasjonsforsterkere der utgangene svinger rail-to-rail. Dette er særlig viktig da man i denne kretsen ikke har tilgang til negativ spenning, og fordi vi trenger utgangsspenninger helt opp til forsyningsspenningen.

Figur 14 viser kretsdesignet som er gjort i tilknytning til innlesning av analoge styresignaler. Linjene merket ADC\_1\_IN og ADC\_2\_IN har de analoge styresignalerne som skal måles mens linjene merket ADC0 og ADC1 er tilkoblet kommunikasjonsskottrollerens pinner med samme navn. Tester relatert til innlesning av analoge verdier sammen med dette lavpassfilteret er gjennomført i kapittel 6.2.



**Figur 14:** Kretsdesign for innlesning av analoge styresignaler.

Komponentene i spenningsdeleren er valgt til å gi høy inngangsimpedans og for å bringe spenningsnivået ved høyest tillatte innspenning ned til 5V, som er referansespenningen til AD-omformeren. Forholdene mellom komponentene i filterkretsen er beregnet ved hjelp av et filterdesignprogram fra Analog Devices hjemmeside<sup>3</sup>. Knekkfrekvensen er satt til 1000 Hz og verdiene er valgt for at alminnelige komponentverdier skal kunne benyttes.

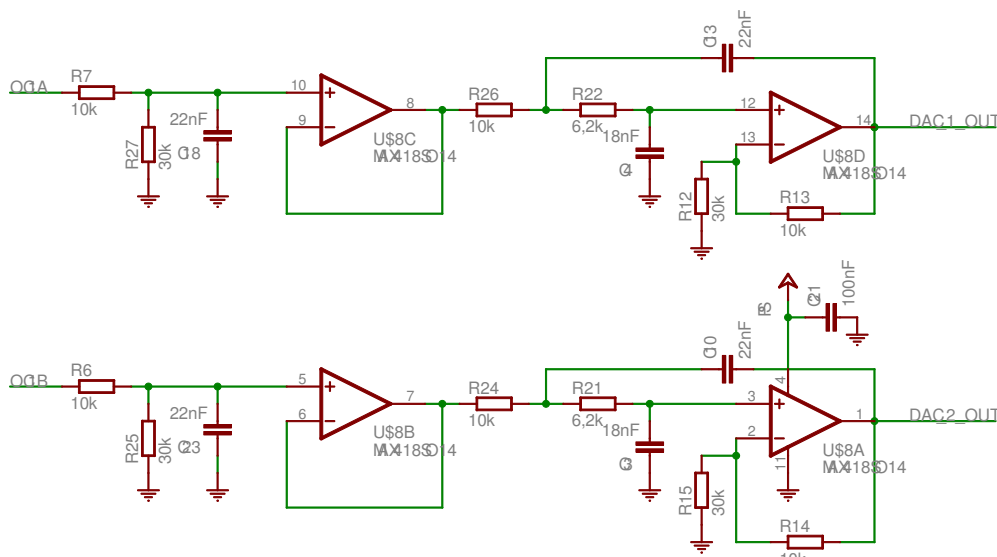
### 5.3.2 Generering av analoge styresignaler

Kommunikasjonsskottrolleren har som nevnt i kapittel 5.3 integrert to åtte bits og to 16 bits timere med støtte for pulsbreddemodulerte (PWM) signaler. En velger her å implementere en DA-omformer som beskrevet i kapittel 4.3.2 der en bruker to av tre utganger til den ene av kommunikasjonsskottrollerens to 16 bits timere. For enkelhets skyld velger man å bruke samme operasjonsforsterker i dette lavpassfilteret som man brukte i forrige delkapittel. Men på grunn av at databladet

<sup>3</sup>URL: [http://www.analog.com/Analog\\_Root/static/techSupport/designTools/interactiveTools/filter/filter.html](http://www.analog.com/Analog_Root/static/techSupport/designTools/interactiveTools/filter/filter.html)

til MAX418 operasjonsforsterkeren spesifiserer at common-mode inngangsspenningne kun kan variere mellom negativ forsyning (0V) og positiv forsyning (5V eller høyere) minus 1,2V må signalet fra kommunikasjonskontrolleren reduseres til å ikke overstige 3,8V. Dette gjøres ved hjelp av en spenningsdeler som så benyttes som et ledd i 1. ordens lavpassfilteret. Videre følger et 2. ordens lavpassfilter med en forsterkning som så forsterker signalet opp til maksimalt 7,2V.

Figur 15 viser kretsdesignet som er relatert til DA-omformerene. Lederne DAC\_1\_OUT og DAC\_2\_OUT er koblet til utgangen for styresignalene mens OC1A og OC1B er koblet til kommunikasjonskontrollerens timer-utganger med samme navn.



**Figur 15:** Kretsdesign for generering av analoge styresignaler.

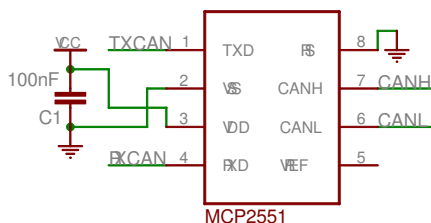
Filterkomponentene er beregnet med samme verktøy som for innlesning av analoge signal. Knekkfrekvensen er satt til 1000 Hz og valgt komponentstørelsene er valgt slik at lett tilgjengelige komponenter kan benyttes.

Tester relatert til denne delkretsen er gjort i kapittel 6.3.

### 5.3.3 CAN-buss

Ettersom kommunikasjonskontrolleren har innebygget CAN-kontroller så behøves det kun en ekstern CAN-transceiver for å kommunisere med en CAN-buss. På grunn av tidligere kjennskap og gode erfaringer med Microchips MCP2551 [21] CAN-transceiver velger man å bruke denne. Brikken fås forøvrig i SOIC8 utførelse og opptar lite kretskortareal. Figur 16 viser koblingen mellom kommunikasjonskontrolleren og inn-/utgående styringssignaler. TXCAN og RXCAN er tilkoblet kom-

munikasjonskontrolleren mens **CANL** og **CANH** er CAN-bussledere.



**Figur 16:** Kretsdesign for CAN-transceiver

I de tilfeller NRWD skal være endenode i en CAN-buss så benyttes en  $120\Omega$  motstand som terminering. Motstanden legges i serie med en egen bryter i bryterkretsen slik den dynamisk kan legges til og fjernes etter ønske (se kapittel 5.4).

#### 5.3.4 I<sup>2</sup>C-buss

Siden Philips Semiconductor eier I<sup>2</sup>C-varemerket og krever vederlag for bruk av dette navnet har flere produsenter valgt å lage kompatible busser med andre navn. Eksempel på dette er Atmel's TWI (Two-Wire-Interface) buss. En TWI-kontroller er som nevnt i kapittel 5.3 integrert i kommunikasjonskontrolleren og en velger å bruke denne for å implementere I<sup>2</sup>C-bussen. Styresignaler blir for enkelhets skyld koblet direkte til kommunikasjonskontrolleren. Dette er ikke noe sikkert design med tanke på overspenningsvern og beskyttelse av kommunikasjonskontrolleren men en velger likevel for enkelhets skyld å gjøre det slik på denne prototypen. Skulle man i fremtiden ønske å fortsette med I<sup>2</sup>C-bussen må man vurdere om man skal innføre en løsning som gir bedre beskyttelse.

For å terminere bussen velger man å bruke de interne pullup-motstandene til kommunikasjonskontrolleren, siden dette gir den minst plasskrevende løsningen. Disse pull-up motstandene er i følge databladet et sted mellom  $30k\Omega$  og  $60k\Omega$ . Dette er betydelig høyere enn hva som er anbefalt i standarden, men tidligere erfaringer viser at løsningen i de aller fleste tilfeller er god nok. Eksterne pull-up motstander bør vurderes ved eventuell videreutvikling av I<sup>2</sup>C-kretsen på NRWD.

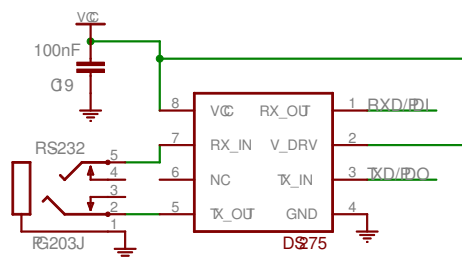
#### 5.3.5 Serielt grensesnitt for oppdatering og diagnostisering

Som spesifisert i kapittel 3.2 skal NRWD tilby et eksternt serielt grensesnitt. Dette for å lette feilsøking og konfigurering av protesens oppførsel.

Siden kommunikasjonskontrolleren har innebygget USART-kontroller velger man å bruke RS-232 kommunikasjon. Sammen med USART-kontrolleren bruker man

en RS-232 transceiver fra MAXIM. Transceiveren heter DS275 [18] og skiller seg fra de fleste andre RS-232 transceivere med at den bruker strøm fra mottagerens datalinje (RX) til å drive sine egen datalinje (TX). Dette gjør at den krever ekstraordinært lite strøm fra protesen og samtidig ikke trenger eksterne laddningspumpekondensatorer som ellers er vanlig. Etter en gjennomgang av mulige busskonfigurasjoner velger man å bruke asynkron overføring (UART) med en BAUD-rate på 38400bps. Dette er mer enn raskt nok samtidig som at det ved 8MHz gir et ubetydelig lite avvik (0,2%) fra ideell bitlengde [5].

Til ekstern tilkobling har man valgt å bruke en standard 3,5mm mini-jack plugg på NRWD. Dette er en mye brukt løsning på små enheter og sparer betydelig med plass i forhold til en ni-pins DSUB-plugg som ellers er vanlig i RS-232 grensesnitt. I fremtiden når man ønsker å lage en protese i virkelig størrelse må det vurderes å bruke en enda mindre plugg. Figur 17 viser kretsdesignet som er gjort relatert til NRWD's RS-232 grensesnitt. RXD/PDI og TXD/PDO er koblet til kommunikasjonskontrollerens innganger ved samme navn.



**Figur 17:** Kretsdesign for RS-232 kommunikasjon.

### 5.3.6 Programvare

Selv om det ikke er primærmålet med denne oppgaven å lage programvare for kommunikasjonskontrolleren så ble det tidlig klart at det var mest hensiktsmessig at den som lagde maskinvaren også skrev lavnivå drivere som programvareutvikleren [26] kunne bygge sin programvare på. Siden man her programmerer mikrokontrollere med svært begrensede ressurser blir det lagt stor vekt på å abstrahere all maskinspesifikk kode med minst mulig overhead. I tillegg er det lagt betydelig vekt på å finne programvaregrensesnitt som gir god og intuitiv kode i neste lag.

Som kompilator velger man å bruke GCC's (GNU Compiler Collection)<sup>4</sup> C-kompilator for AVR-kontrollere så langt dette er mulig. Dette fordi en har stort sett gode erfaringer med denne kompilatoren fra tidligere prosjekter, den er fri

---

<sup>4</sup>Hjemmeside til GCC: <http://gcc.gnu.org>

til å brukes av alle og er stort sett tilgjengelig for alle kjente operativsystemer. I tillegg er der mye god dokumentasjon tilgjengelig.

I tillegg til kode som aksesserer maskinvaren er det også laget et testprogram som bruker dette grensesnittet. Programmet bruker RS-232 grensesnittet til å vise beskjeder og motta kommandoer. På denne måten kan man koble seg til NRWD med eksterne datamaskiner og få tilgang til et interaktivt grensesnitt (skall). Dette grensesnittet tilbyr funksjoner for diagnostisering og for å endre innstillinger på NRWD. Mellom annet tilbys følgende kommandoer til brukeren:

**help** - Viser en liste over alle tilgjengelige kommandoer med kort forklaring til hver

**get adc [channel]** - Returnerer verdien til spesifisert ADC-kanal

**get dac [channel]** - Returnerer verdien til spesifisert DAC-kanal

**set dac [channel] <value>** - Setter verdien på den spesifiserte DAC-kanalen

**monitor adc** - Viser kontinuerlig verdien på alle ADC-kanalene

**reset** - Kjører en programvarereset på AT90CAN128

**bootloader** - Starter bootloaderen

**enable | disable**

-> **analog [in|out]** - Skrur av/på analog inn eller utgang (elektroniske brytere)

-> **i2c [in|out|term]** - Skrur av/på I<sup>2</sup>C-buss inngang, utgang eller terminering (elektroniske brytere)

-> **can [in|out|term]** - Skrur av/på CAN-buss inngang, utgang eller terminering (elektroniske brytere)

-> **passthrough** - Skrur av/på signalflyt mellom inngangene og utgangene (elektroniske brytere)

**switch states** - Viser alle bryterposisjoner (elektroniske brytere)

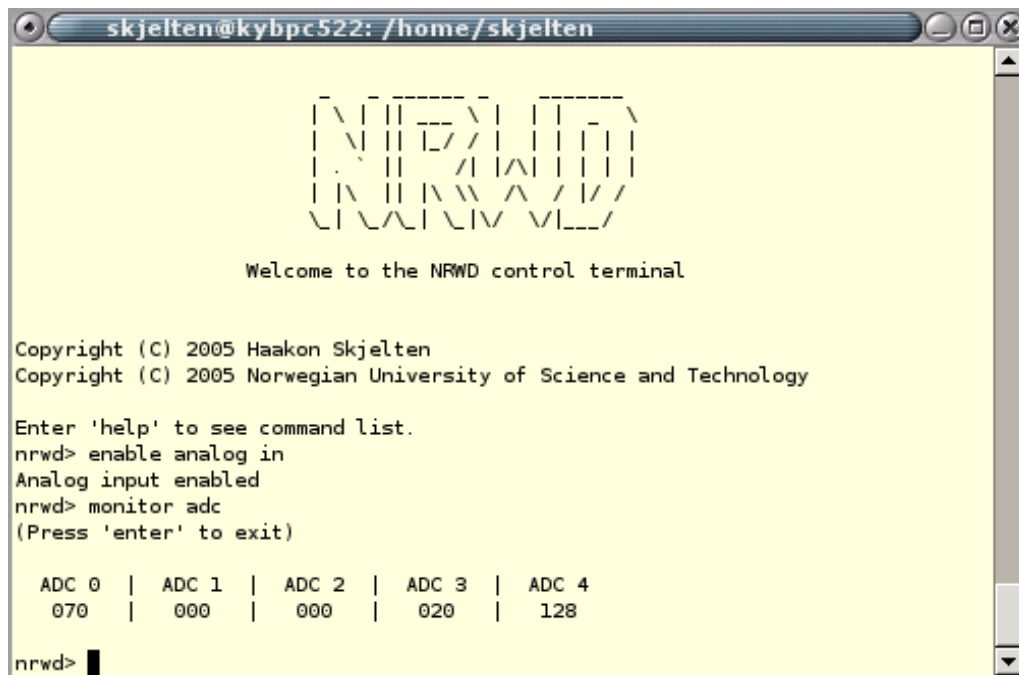
**send [can|i2c|spi] <addr> <mesg>** - Sender data (<mesg>) til adresse (<addr>) på den spesifiserte busstypen

**set addr [can|i2c] <addr>** - Setter NRWD's (slave) adresse på bussen

**set speed [l|r] <speed>** - Sender retning og hastighet til motorkontroller

**about** - Viser informasjon om NRWD

En fordel med denne løsningen til å aksessere NRWD er at alle morderne operativsystem har tilgjengelig programvare for å koble seg til. I Microsoft Windows kan man bruke *Hyperterminal* mens på GNU/Linux, MacOS og de fleste unixer så kan man bruke *kermi*t eller *minicom*. Et skjermbilde av testprogrammet er vis i figur 18.



**Figur 18:** Bilde av NRWD's RS-232 konsoll.

Et forenklet diagram over programflyten til testprogrammet er vist i appendix D.1. Det er benyttet Doxygen<sup>5</sup> for å dokumentere både testprogrammet og alle programmeringsgrensesnitt. Doxygen er et verktøy som gjør bruk av spesielt formaterte kommentarfelt i kildekoden for å generere dokumentasjon. All kildekode samt HTML-dokumentasjon generert av Doxygen er å finne på CDROM-en som følger besvarelsen.

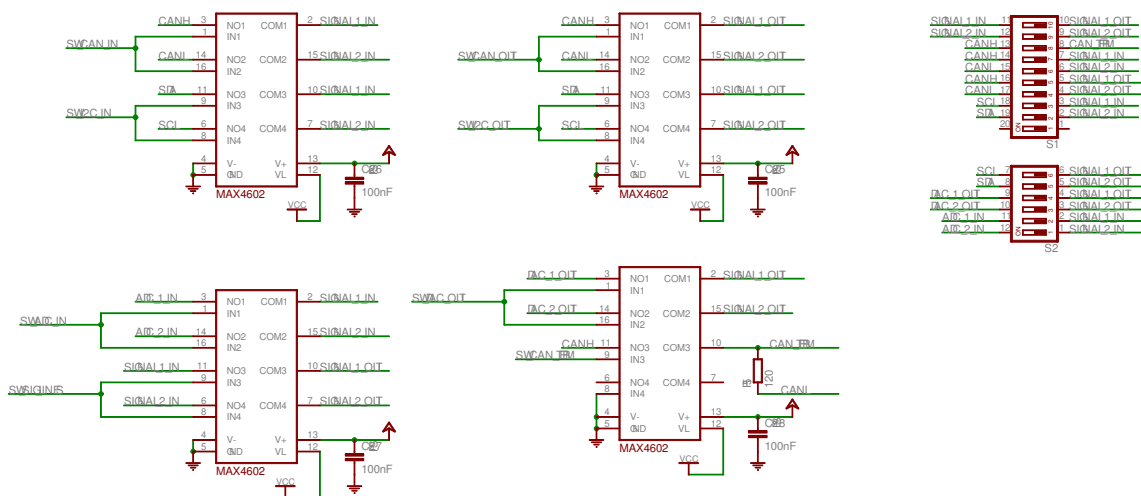
## 5.4 Ruting av kommunikasjonssignaler

Noe som det ble vektlagt i kapittel 4.4 var at NRWD skulle være så dynamisk og konfigurerbar som mulig. Det har derfor blitt lagt til kretsen både mekaniske DIP-brytere og elektronisk styrte brytere. Ved valg av elektronisk styrte brytere så falt valget på MAX4662 [19] fra MAXIM. Bryterne har den minste motstanden

<sup>5</sup>Hjemmeside: <http://www.doxygen.org/>

av tilsvarende brytere på markedet ( $4,7\Omega$  -  $8,2\Omega$  ved 5V) og vil trolig ikke innføre nevneverdig forstyrrelser på signalene som passerer. Dette må imidlertid testes og alle styresignaltester inkluderer forsøk med begge brytertypene.

Kretsskjemaet for signalruting er vist i figur 19. Elektroniske brytere er vist til venstre i figuren mens DIP-bryterne ligger til høyre. De elektroniske bryterne blir styrt ved hjelp av digitale linjer fra kommunikasjonskontrolleren. Merk også hvordan CAN-termineringen er tatt med.



Figur 19: Kretsdesign av signalbrytere.

## 5.5 Motorkontroller

### 5.5.1 Kontrollerkrets

Siden styrelogikken til en børsteløs DC motor er relativt kompleks og tidskritisk er det vanlig å bruke ferdige mikrobrikker som inneholder all styrelogikk. Dessverre har det ikke vært mulig å finne noen mikrobrikke som dekker alle kravene som er satt i kravspesifikasjonen. Man velger derfor å implementere hele motorstyringen selv.

Basert på de oppgaver motorkontrolleren må gjøre (jfr. kapittel 4.5) velger en å bruke en egen mikrokontroller med navn ATtiny2313 [6] fra Atmel. Denne mikrokontrolleren har mellom annet følgende egenskaper:

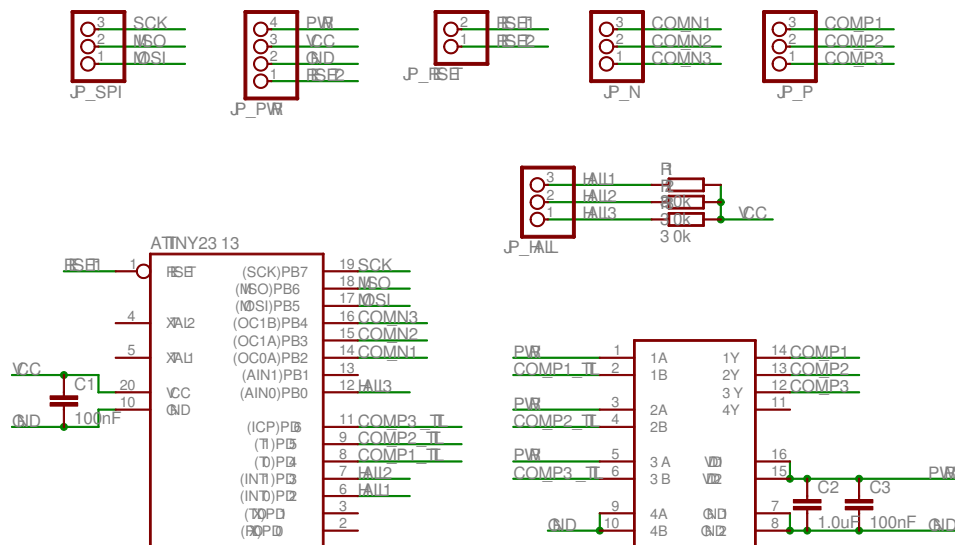
- Internt 8MHz RC-oscillator
- Innebygd USI (Universal serial bus) som støtter SPI og TWI (I<sup>2</sup>C)



- Støtte for tre eller flere eksterne interrupt
- Liten fysisk størrelse (MLF20: 4mm x 4mm)
- Relativt rimelig

Tre av motorkontrollerens eksterne interruptlinjer benyttes til å overvåke hall-elementene. Til å styre motordriveren brukes seks andre IO-pinner fra motorkontrolleren. De tre som styrer N-kanals transistorene er tilkoblet IO-pinner med maskinarestøtte for pulsbreddemodulasjon. Ved å benytte seg av denne pulsbreddemodulasjonen kan man enkelt styre hastigheten til motoren. Mikrokontrolleren har interne dioder til 5V forsyningen på tristate-utgangene sine. Derfor må det benyttes et eget CMOS-buffer på utgangene som skal drive P-kanals transistorene, slik at disse signalene kan drives opp til positiv forsyningsspenning. Kretsskjema for motorkontrolleren er vist i figur 20.

Man hadde opprinnelig tenkt å bruke en GAL til motorkontroller, men man gikk etter hvert bort fra denne løsningen. Den mikrokontrollerbaserte motorkontrolleren ble derfor implementert på et eget datterkort, som ble plassert i posisjonen tiltenkt GAL-kretsen. Mikrokontrollerløsningen har samme elektriske grensesnitt mot motordriveren som GAL-løsningen.



Figur 20: Det nye datterkortet til motorkontrolleren.

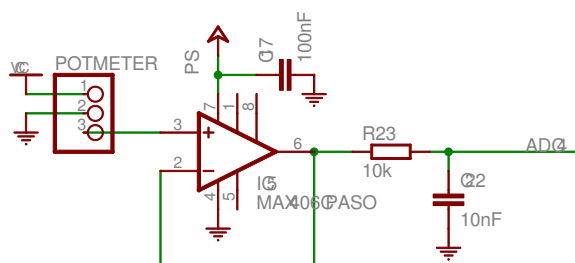
### 5.5.2 Kommunikasjon mellom kontrollerene

Den valgte motorkontrolleren har en USI-kontroller som kan kommunisere ved hjelp av både SPI og TWI (I<sup>2</sup>C) og det er naturlig å velge en av disse bussene.

Kommunikasjonskontrolleren på sin side har støtte for begge busstypene, men bruker allerede TWI-kontrolleren for å kommunisere med andre proteser. SPI-bussen blir derfor valgt for kommunikasjon mellom kontrollerne. Dette er også den enkleste og raskeste bussen av de to, noe som er en fordel ved bruk på motorkontrolleren, som ventes å være tungt lastet. Bussen fungerer ved at den bruker et ringbuffer der mesterenheten skifter åtte bit i gangen. På denne måten både sender og mottar begge nodene meldinger ved hver transmisjon. En ulempe med denne bussen er imidlertid at slaveenheten ikke kan starte en dataoverføring. Skulle dette senere vise seg å være en nødvendighet kan man bruke en ekstra leder til en av kommunikasjonskontrollerens eksterne interruptlinjer. Ved hjelp av denne kan motorkontrolleren informere kommunikasjonskontrolleren om at den har data å overføre.

### 5.5.3 Posisjonsmåling og regulering

Absolutte posisjonsmålinger av vinkelen til håndleddet gjøres som kjent ved å bruke et potensiometer. Siden kommunikasjonskontrolleren er den eneste med AD-omformer bruker man denne omformer sammen med et 1. ordens lavpassfilter. Kretsdesignet relatert til posisjonsmålingen er vist i figur 21.



**Figur 21:** Kretsskjema for potensiometer til absolutt posisjonsmåling.

All regulering gjøres i programvaren til kontrollerene, der kommunikasjonskontrolleren og motorkontrolleren implementerer henholdsvis posisjonsregulering og hastighetsregulering. Kommunikasjonskontrolleren sender hastighetsreferanser til motorkontrolleren gjennom SPI-bussen, og motorkontrolleren sørger for å bringe motoren til den ønskede hastigheten. Om reguleringsalgoritmen skulle trenge det kan kommunikasjonskontrolleren også hente ut informasjon om hastighet (relativ posisjon) og pulsbredde til pulsbreddemoduleringen fra motorkontrolleren gjennom SPI-grensesnittet.

### 5.5.4 Programvare

Programvaren til motorkontrolleren har hovedsaklig følgende oppgaver:

- Lese hall-sensorverdier
- Utføre kommuteringer
- Kommunisere ved hjelp av SPI
- Implementere hastighetsregulator

Hall-sensorene leses ved å bruke eksterne interrupt som settes på å trigge ved både stigende og fallende flanke. Kommutteringer blir utført i henhold til tabell 2 eller 3 avhengig av rotasjonsretning, sammen med bruk av pulsbreddemodulasjon fra timer 0 og 1.

Hall-sensorer	Utganger til transistorer					
	P3	P2	P1	N3	N2	N1
001	1	0	0	0	0	1
010	0	0	1	0	1	0
011	1	0	0	0	1	0
100	0	1	0	1	0	0
101	0	1	0	0	0	1
110	0	0	1	1	0	0

**Tabell 2:** Kommutteringstabell med rotasjonsretning til høyre.

Hall-sensorer	Utganger til transistorer					
	P3	P2	P1	N3	N2	N1
001	0	0	1	1	0	0
010	0	1	0	0	0	1
011	0	1	0	1	0	0
100	1	0	0	0	1	0
101	0	0	1	0	1	0
110	1	0	0	0	0	1

**Tabell 3:** Kommutteringstabell med rotasjonsretning til venstre.

En begrensning med SPI-bussen er at den ikke har noen støtte for meldinger på mer enn åtte bit i standarden. For å få sendt beskjeder på mer enn åtte bit må man implementere dette selv i programvare. For enkelhets skyld har man

i den implementerte programvaren valgt at alle meldinger til motorkontrolleren skal tolkes som setpunkt for motorpådrag. Meldingen består av et åtte bits tall der første bit indikerer retning til motoren. Dette gir syv bits oppløsning på hastigheten noe som tilsvarer 127 distinkte hastigheter.

Regulatoralgoritmene kan implementeres skikkelig først når gir på motoren er valgt og en mekanisk protese foreligger. Kommunikasjonsprotokollen mellom kontrollerene må da tilpasses behovet til regulatoralgoritmene. Som allerede nevnt kan det være interessant å overføre informasjon som hastighetsreferanse, målt hastighet/relativ posisjon og pulsbredde i pulsbreddemoduleringen som uttrykk for generert moment.

På samme måte som for kommunikasjonskontrolleren ønsket man å bruke GCC's C-kompilator for motorkontrolleren. Dette viste seg dessverre å være vanskelig da den versjonen av kompilatoren man hadde tilgjengelig viste seg å ikke generere lovlig maskinkode. I følge GCC's endringslogg skal denne feilen være ordnet i versjon 4,0<sup>6</sup>. På grunn av de ekstra problemene kompilatoren gav valgte man å bruke IAR's AVR kompilator i stedet. Koden er ordnet slik at både nyere versjoner av GCC og IAR kan compilere koden like godt.

Et forenklede flytdiagram over programvaren til motorkontrolleren er vist i appendix D.2. Doxygen er også her brukt til å dokumentere all kildekode. Kildekoden og den genererte HTML-dokumentasjonen er å finne på CDROM-en som følger med besvarelsen.

## 5.6 Motordriver

### 5.6.1 Driverkrets

For å bygge driverkretsen trenger man i første omgang, som forklart i kapittel 4.6.1 seks MOSFET transistorer. Etter et utførlig søk etter tilgjengelige løsninger velger man å bruke mikrobrikken NDM3000 [9] fra Fairchild Semiconductor<sup>7</sup>. Denne brikken inneholder tre P-kanals og tre N-kanals MOSFET transistorer i halvbro-konfigurasjon.

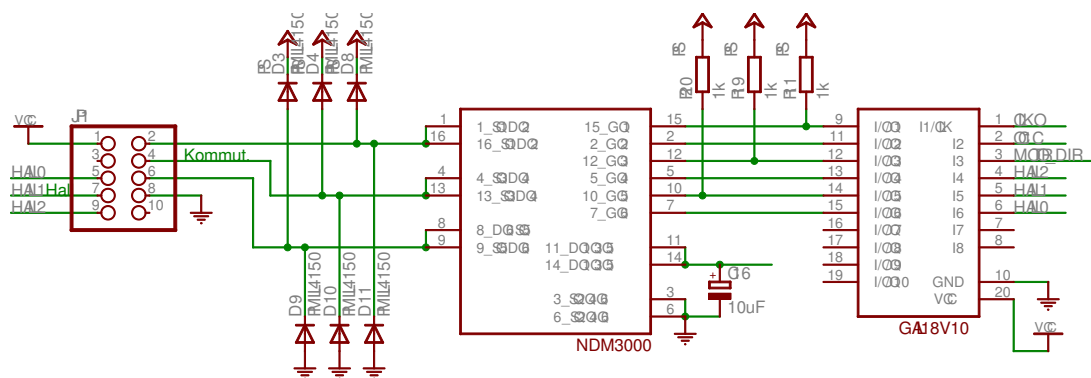
Siden motordriveren ikke har innebygde flybackdioder må man legge dette til på utsiden av motordriveren. Dette gjøres ved å plassere to raske flybackdioder, en til plussforsyningen og en til jord, på hver av de tre fasene. Som forklart i kapittel 5.5.1 trengs det et CMOS-buffer for å drive P-kanals-transistorene i motordriveren. En mikrobrikke som ser ut til å fungere bra sammen med NDM3000 er TC4469 [20] fra Microchip, og man velger å bruke denne.

---

<sup>6</sup>Mer informasjon vedrørende GCC's feil ved kodegenerering for ATtiny13 og ATtiny2313 mikrokontrollere er å finne på: [http://gcc.gnu.org/bugzilla/show\\_bug.cgi?id=19059](http://gcc.gnu.org/bugzilla/show_bug.cgi?id=19059)

<sup>7</sup>Hjemmeside til Fairchild Semiconductor: <http://www.fairchild.com>

Figur 22 viser kretsskjemaet for motordriveren. Opprinnelig tenkte man å bruke en GAL som motorkontroller, men denne løsningen ble forkastet til fordel for en mikrokontrollerbasert motorkontroller. Dette har imidlertid ingen konsekvens for motordriveren, siden den nye kontrollerløsningen har samme elektriske grensesnitt som den opprinnelig tiltenkte GAL-løsningen.



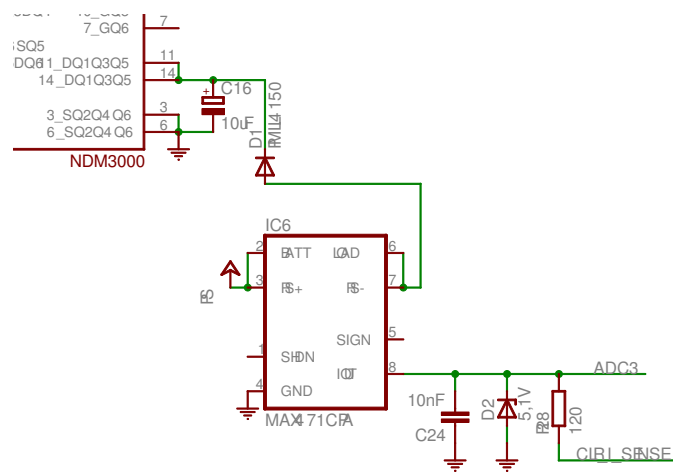
**Figur 22:** Kretsskjema for motordriveren.

### 5.6.2 Strømmåling

Basert på de betraktninger man gjorde i kapittel 4.6.2 har man designet en motorstrømmåler som vist i figur 23. Mikrobrikken som brukes til selve strømsensingen er en brikke med navn MAX471[17] fra MAXIM. Brikken fås i SO8 forpakning og tilfredsstiller alle de krav som må settes. Linjen ADC3 og CLR\_I\_SENSE kobles til kommunikasjonskontrolleren i henholdsvis AD-omformerer og en ledig IO-pinne. IO-pinnen brukes for å lade ut akkumulatorkondensatoren.

Siden motorstrømmen i en likestrømsmotor er proporsjonal med det genererte momentet er det vanlig å bruke strømmålinger i reguleringssløyfen, spesielt i kontinuerlige regulatorer. Den implementerte strømmåleren vil imidlertid ikke kunne måle strømmen kontinuerlig. For å spare plass er det ikke brukt egne komponenter for utladning av akkumulatorkondensatoren. Dette medfører at utladningstiden for akkumulatoren vil være betydelig, og strømmålingene vil således kanskje ikke være spesielt velegnede til bruk i reguleringssløyfen. Antakelig vil utlesing av pulsbredden fra motorkontrolleren gi et bedre uttrykk for momentet generert av motoren, og dermed være bedre egnet til bruk i reguleringssløyfen.

Siden bruk av strømmåleren ikke har vært nødvendig for å kjøre prototypen er det heller ikke laget noe programvare for å lese ut strømmen. Dersom strømmålinger blir nødvendige for å få til en god regulering må programvare for bruk av strømmåleren skrives ved utvikling av regulatoralgoritmen.



**Figur 23:** Kretsdesign relatert til strømmålinger.

## 6 Systemtester

I de følgende underkapitler gjennomgås de tester som tiden har tillatt å utføre. Testene er valgt slik at de viktigste delsystemene til NRWD skal kunne verifiseres.

### 6.1 Spenningsregulator

Spenningsregulatoren er alene den viktigste delen av kretsen. Dårlig spenningsregulering vil gi dårlige analoge målinger og kan i verste fall ødelegge komponenter. For å måle regulatorens egenskaper måler man den regulerte utspenningen og rippelen ved forskjellige inngangsspenninger. I tillegg til å måle spenningsregulatoren slik den er konstruert ønsker man også å gjøre en måleserie der man legger til en  $220\mu\text{F}$  aluminium elektrolyttkondensator til utgangen av spenningsregulatoren. Dette for å se hvilke innvirkning en betydelig økt kapasitans har på den regulerte utspenningen. Resultatet av målingene er gjengitt i tabell 4.

Uregulert innspenning [V]	Regulert utspenning [V]	Rippel uten ekstra kondensator [V]	Rippel med ekstra kondensator [V]
5,00	4,95	< 0,01	< 0,01
6,00	5,13	0,35	0,09
7,00	5,14	0,60	0,15
8,00	5,14	0,95	0,12
9,00	5,13	0,80	0,12
10,00	5,13	0,70	0,12
11,00	5,13	0,70	0,12
12,00	5,12	0,70	0,12
13,00	5,12	0,70	0,12
14,00	5,12	0,70	0,15
15,00	5,12	0,70	0,20
16,00	5,12	0,70	0,25
17,00	5,12	0,70	0,25
18,00	5,12	0,70	0,25

**Tabell 4:** Testresultat av spenningsregulator.

Målinger av utspenning ved bruk av en ekstra elektrolyttkondensator er ikke tatt med i tabellen, da utspenningen med og uten en ekstra kondensator var identiske.

Rippelen ble forsøkt målt med oscilloscope. Den hadde ikke noen fast frekvens, men besto av pulser med noe varierende mellomrom, i størrelsesorden noen titalls mikrosekunder. Pulsene hadde en noe utdratt form og pulsbredde som også varierte.

## 6.2 Innlesning av analoge styresignaler

For å teste kvaliteten på innlesningen av analoge styresignaler ble det gjennomført en serie målinger hvor et DC inngangssignal gradvis ble øket. Måleverdiene varierte betydelig fra måling til måling. For hver innspenning ble det derfor gjort 10 målinger der de oppgitte verdiene er en midling av disse 10 målingene. Allerede tidlig i testingen så man at målingene på ingen måte var lineære. Det ble derfor gjort endringer i spenningsdeleren for å se om dette kunne bedre lineariteten. En prøvde med å fjerne zenerdioden og en prøvde å redusere komponentverdiene til 1/10 av opprinnelig verdi, mens delingsforholdet var uendret.

Resultatene er gjengitt i tabell 5 og grafisk plottet i figur 24. I tabellen er variansen oppgitt i parentes. Ved utføring av målingene var AD-omformerer innstilt på åtte bits oppløsning for et spenningssving på 0 til 5V.

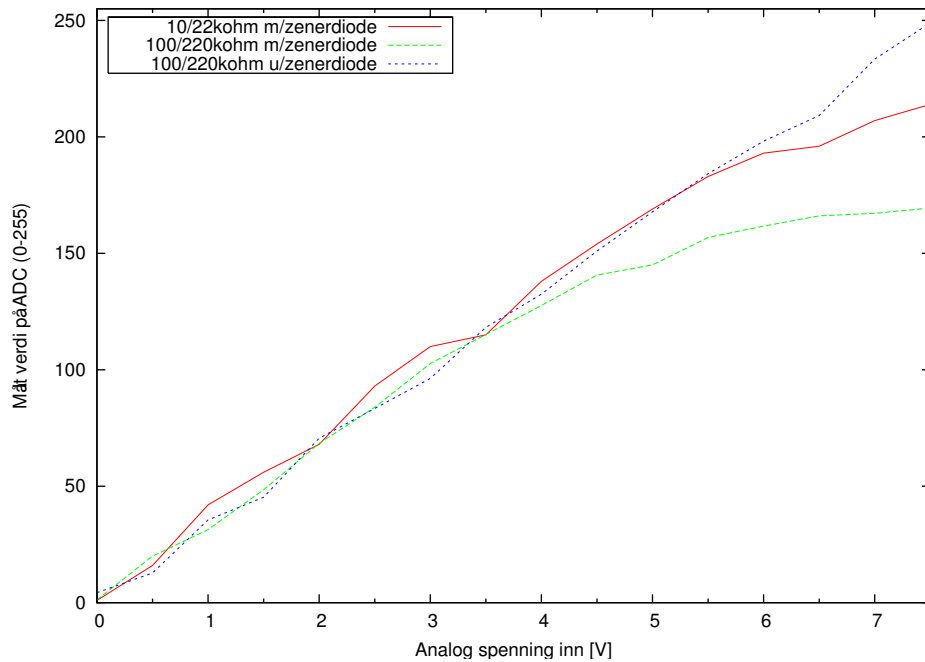
Støyfri innspenning	10/22k $\Omega$ m/zener	100/220k $\Omega$ m/zener	100/220k $\Omega$ u/zener
0,00V	1 (3)	1,2 (3)	4,3 (16)
0,50V	16 (32)	20,0 (22)	12,8 (20)
1,00V	42 (17)	31,4 (36)	35,5 (22)
1,50V	56 (29)	48,5 (38)	45,3 (31)
2,00V	68 (36)	68,4 (16)	70,6 (14)
2,50V	93 (20)	83,9 (26)	83,4 (29)
3,00V	110 (38)	102,7 (12)	96,3 (31)
3,50V	115 (49)	115,1 (28)	118,2 (25)
4,00V	138 (35)	127,6 (35)	132,5 (23)
4,50V	154 (54)	140,7 (10)	151,0 (36)
5,00V	169 (47)	145,0 (26)	167,8 (20)
5,50V	183 (34)	156,8 (39)	184,2 (22)
6,00V	193 (25)	161,7 (13)	198,2 (19)
6,50V	196 (14)	166,1 (15)	209,2 (31)
7,00V	207 (30)	167,2 (34)	233,4 (22)
7,50V	214 (27)	169,5 (16)	249,0 (26)

**Tabell 5:** Analoge målinger gjort av likerettet innsignal. De oppgitte verdiene er gjennomsnittet av 10 målinger. Variansen på målingene er gitt i parentes.

Forsterkningen i filteret ble også målt med signalgenerator og oscilloscope. Det ble observert at filteret betydelig reduserte de innkommende signalene fra knekkfrekvensen (1000Hz) og opp til 1500Hz. Ved frekvenser over 1500Hz bryter imidlertid filteret sammen og støy slipper tilnærmet uhindret gjennom.

Ved målinger med oscilloscope viste det seg også at det kom en betydelig støy ut fra filterkretsen selv om inngangssignalet ble satt til en stabil verdi. Støyen hadde





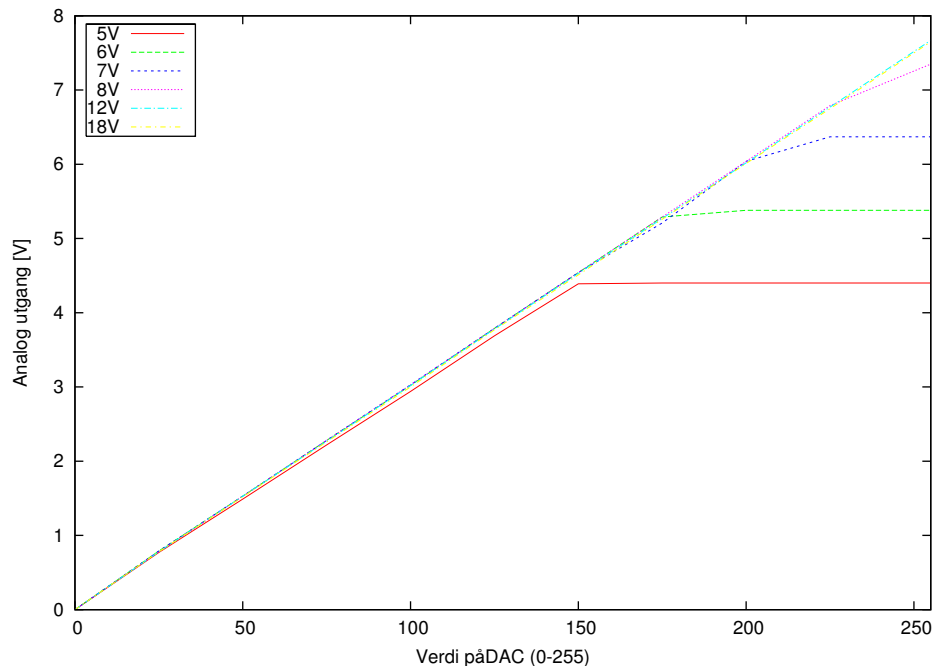
**Figur 24:** Plot av ADC målinger som er gitt i tabell 5.

en kompleks og stadig skiftende form. Det ble ikke observert lignende kurveformer noe annet sted i kretsen og det virker derfor som at lavpassfilteret genererte denne støyen selv.

### 6.3 Generering av analoge styresignaler

Kommunikasjonskontrolleren skal som kjent kunne generere analoge styresignaler fra 0V til 7,2V. Tester for å avdekke signalgeneratorens egenskaper gjøres ved å måle utgangssignalene mot en rekke inngangssignaler. Hver måling gjøres med en rekke forskjellige batterispenninger for å avdekke hvilke innvirkning dette har. Måleresultatene er gjengitt i tabell 8 i appendix E.1. Verdien 0 på DAC-en tilsvarer 0V utspenning mens 255 tilsvarer maksimal utspenning. Målingene er plottet grafisk i figur 25.

Et annet moment som må være med i evalueringen av den analoge signalgeneratoren er hvorvidt det er høyfrekvent støy på utgangssignalene. Ved å gjennomføre tester av utgangssignalet med oscilloscope finner man at signalet har en høyfrekvent støy (tilsynelatende samme frekvens som pulsbreddemodulatoren) på mellom 0,1V og 0,2V. Ved å sette en  $220\mu\text{F}$  aluminium elektrolyttkondensator på utgangen til lavpassfilteret så forsvinner imidlertid tilnærmet all høyfrekvent støy (amplituden mindre enn 0,01V). På utgangssignalet var det også overlagret



**Figur 25:** Plot av måleresultatene for generering av analoge styresignaler.

en sinus med en frekvens på omtrent en 1000Hz. Amplituden variert noe, med den høyest observerte verdi på 0,1V.

Bruk av elektrisk styrte brytere mot DIP-brytere hadde ingen målbar påvirkning på signalet.

## 6.4 CAN buss

For å teste om kommunikasjonskontrollerens CAN-buss implementasjon fungerer tilfredsstillende prøver man de fire grunnleggende meldingstypene som CAN-bussen implementerer:

- Send melding
- Send RTR (Request-To-Receive) melding
- Motta data
- Motta RTR melding

Som ekstern CAN-node bruker man “CAN-USB-Mini”; en CAN-enhet fra ESD Electronics<sup>8</sup>. Testresultatene er gjengitt i tabell 6.

<sup>8</sup>Hjemmeside til ESD Electronics: <http://www.esd-electronics.com/>

Test	Resultat (DIP-bryter)	Resultat (elektrisk bryter)
Send data melding	ACK-error	ACK-error
Send RTR melding	ACK-error	ACK-error
Motta melding	OK	OK
Motta RTR melding	OK	OK

**Tabell 6:** Testresultat av kommunikasjon på CAN-buss.

I tillegg til de tester som gjort over har man også analysert CAN-meldingene som sendes fra kommunikasjonskontrolleren med en logikkanalysator. Resultatene fra logikkanalysatoren kan summeres opp i to punkter:

- Utgangssignalene ser tilsynelatende helt riktige ut og der er ingen åpenbar årsak til hvorfor man får ACK-error ved sending av meldinger til den eksterne CAN-noden.
- Meldinger som sendes via elektriske brytere har noe redusert amplitude på signalene.

## 6.5 I<sup>2</sup>C buss

For å teste om kommunikasjonskontrollerens I<sup>2</sup>C-buss implementasjon fungerer i henhold til standarden prøver man, på samme måte som ved CAN-bussen, de fire grunnleggende kommandoene som I<sup>2</sup>C bussen implementerer:

- Mester: Send melding
- Mester: Send RTR (Request-To-Receive) melding
- Slave: Motta data
- Slave: Motta RTR melding

Ekstern node på I<sup>2</sup>C-bussen under testene er en ATmega128 mikrokontroller fra Atmel der programkoden er kopiert tilnærmet uendret fra kommunikasjonskontrolleren. Resultat av testene er vist i tabell 7.

## 6.6 Posisjonsmåling av motor

Siden man ikke har fått i hende det potensiometert som man ønsker å bruke til protesen har man gjort tester med et vanlig 50k $\Omega$  potensiometer. Testene

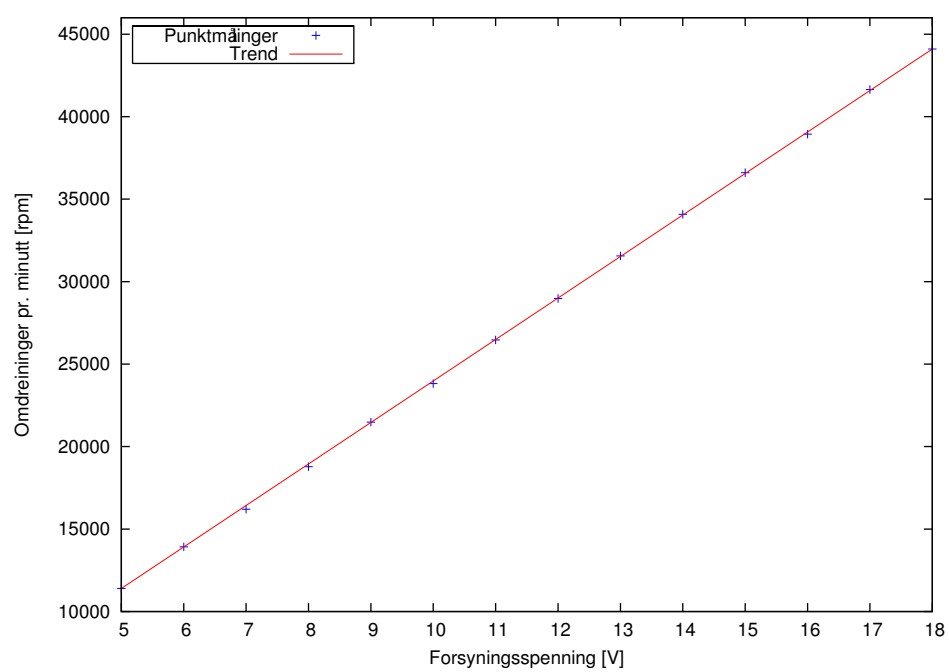
Test	Resultat (DIP-bryter)	Resultat (elektrisk bryter)
Send data (mester)	OK	Bus-error
Send RTR (mester)	OK	Bus-error
Motta data (slave)	OK	Bus-error
Motta RTR (slave)	OK	Bus-error

**Tabell 7:** Testresultat av kommunikasjon på I<sup>2</sup>C-buss.

viser at innlesning av posisjon fra potensiometeret fungerer som det skal, og det er ikke mulig å detektere avvik fra ideell oppførsel. Resultatene forutsetter stabil spenningsforsyning. Rippel på forsyningsspenningen gir selvsagt støy og unøyaktighet i posisjonsmålingene også.

## 6.7 Kommutering

For å teste yteevnen til den endelige kommuteringslogikken ble motorkontrolleren satt til å kjøre motoren i maksimal hastighet mens forsyningsspenningen ble variert. Totalt strømforbruk og antall rotasjoner pr. sekund ble målt for forskjellige forsyningsspenninger. Disse målingene er gjengitt i tabell 9 i appendix E.2 mens et plot over motorhastighet vs. forsyningsspenning er vist i figur 26.



**Figur 26:** Plot av motorhastighet vs. forsyningsspenning.



## 7 Diskusjon

### 7.1 Spenningsregulator

Man ser av tredje kolonne i tabell 4 at der dessverre er en beydelig rippel på den regulerte utspenningen. Som forventet er der ingen rippel ved 5V forsyningsspenning da regulatoren slipper all strømmen gjennom (switchen er konstant åpen). Ved høyere spenninger blir derimot switchestøyen så stor at det vil få betydelig innvirkning på analog elektronikk. Den digitale elektronikken bør imidlertid fungere som den skal med denne rippelen, noe som den også gjør.

Som en ser av fjerde kolonne i tabell 4 hjelper det betydelig å legge på en ekstra  $220\mu\text{F}$  aluminium elektrolyttkondensator. Dette er fortsatt ikke godt nok for bruk til analog elektronikk.

Antakelig har spolen for lav induktans til denne applikasjonen, noe som gir opphav til den forholdsvis store rippelen. En bedre løsning vil antakelig være å velge en regulator med høyere svitsjefrekvens, slik at spolen og kondensatoren trenger å lagre mindre energi. Det vil da være lettere å finne små nok komponenter med tilstrekkelig høy induktans og kapasitans til å gi en rippel med akseptabel størrelse. Kan induktansen senkes vil det også være mulig å finne en spole med mindre magnetisk tap og med samme geometriske utstrekning.

### 7.2 Innlesning av analoge styresignaler

Fra tabell 5 ser man at der er en betydelig unøyaktighet i målingene. Varianser på opp til 54 tilsvarende et spenningssving på ca 1V mellom høyeste og laveste måling. Dette er meget unøyaktig.

Til tross for den betydelige støyen ser man av figur 24 at målingene i middelverdi er tilnærmet lineære når zenerdioden er fjernet. Når zenerdioden er tatt med ser man at det går en betydelig lekkasjestrøm gjennom zenerdioden for spenninger over 3,5V. Dette gir som ventet størst utslag ved større komponentverdier siden strømmen i motstandene da er minst.

Når det gjelder bakgrunnen for den store støyen kan man ikke si noe konklusivt, men man antar at den skyldes en kombinasjon av flere faktorer. Først og fremst antar man at den store rippelen på forsyningsspenningen har stor betydning. Når rippelen ble redusert fikk man også redusert støyen noe. Dette kan ikke forklare støyen alene da det samme støymønsteret ikke var å finne i filteret for DA-omformer. Antageligvis er også filterkonstruksjonen lite robust når man må bruke forsyningsspenninger som ikke er betydelig videre enn signalspenningen, og intern ustabilitet kan nok lett oppstå.

### 7.3 Generering av analoge styresignaler

Ut fra måledataene i figur 25 så ser man at kretsen yter relativt bra etter de krav som er satt. Ved lave forsyningsspenninger er utgangssignalet begrenset til 0,5V - 0,6V under forsyningsspenningen. Ved høye forsyningsspenninger kan utgangssignalet komme opp mot 7,7V som er 0,5V over ønsket verdi. I normal operasjon kan dette, om det viser seg å være nødvendig, korrigeres for i programvare. Skulle NRWD bryte sammen og sende ut denne spenningen vedvarende skal den likevel ikke være høy nok til å skade den tilkoblede håndprotesen. Ellers viser målingene at DA-omformoren oppfører seg meget lineært.

Angående den høyfrekvente støyen på 0,1V - 0,2V på utgangssignalet så er dette ikke optimalt da det kan gi skjelvninger og påfølgende økt effektforbruk på håndprotesen. Problemet antas å kunne løses med en kondensator på utgangen til lavpassfilteret.

Når det gjelder den overlagrede sinusen på utgangssignalet på omtrent 1000Hz så antar man at den skyldes intern oscillasjon i filteret. Dette fordi denne frekvensen ikke dukker opp andre steder i kretsen enn som knekkfrekvens for filteret. En mer velegnet operasjonsforsterker og nøyaktigere komponentverdier på filteret vil antageligvis fjerne denne støyen.

### 7.4 CAN buss

Man ser av tabell 6 at CAN-buss implementasjonen fungerer som den skal ved mottak av meldinger, og dette uavhengig av brytertype. Derimot fungerer ikke sending av meldinger da man aldri mottar ACK-melding fra den andre noden.

Siden analysen av CAN-meldingene i logikkanalysatoren viser at meldingene fra kommunikasjonskontrolleren tilsynelatende sendes helt korrekt er det mulig at problemet ligger ved den andre CAN-enheten. Feilkilder her kan for eksempel være feilkonfigurasjon av enheten. En fremtidig test mot en annen CAN-node vil raskt kunne bekrefte eller avkrefte dette.

Avslutningsvis bør man også merke seg at selv om CAN-buss signalene kommer gjennom de elektriske bryterene så blir amplituden på signalene noe redusert. Dette vil i fremtiden kunne skape problemer om det blir flere CAN-noder på protesesystemet som tilfører den samme reduksjonen. Ellers skal CAN-bussen være spesielt robust over signaltap.

### 7.5 I<sup>2</sup>C buss

Av resultatene fra kapittel 6.5 ser man at I<sup>2</sup>C bussen fungerer som den skal når man bruker mekaniske DIP-brytere. Ved bruk av elektroniske brytere feiler de-



rimot all kommunikasjon. Bruk av eksterne pullup-motstander kan kanskje løse problemet, men antageligvis må man bruke elektroniske brytere som er spesialtilpasset I<sup>2</sup>C.

## 7.6 Posisjonsmåling av motor

Posisjonsmålingene ser ut til å fungere som de skal. Bedre tester kan ikke utføres før gir til motoren og et endelig potensiometer er tilgjengelig.

## 7.7 Kommutering

Av figur 26 ser man at turtallet på motoren øker. Dette viser at kommuteringslogikken fungerer som den skal og gir optimal kommutering selv under ekstraordinært store hastigheter.

I tabell 9 i appendix E.2 ser man at den totale strømmen holdes liten selv ved høye motorhastigheter. Dette viser at der ikke er noen kortslutninger i transistorhalvbroene under kommuteringen.

Kommuteringslogikken og motordriveren må sies å fungere meget godt.



## 8 Konklusjon

Arbeidet med NRWD har ført frem til en i stor grad fungerende prototyp for et styresystem til en håndleddsprotese. På enkelte felter har den realiserede prototypen vist seg å ikke fungere tilfredsstillende, men det foreslåtte designet bør kunne møte de funksjonelle krav som er fremsatt i kravsspesifikasjonen uten store endringer. Med kun små tilpasninger bør den realiserede prototypen fungere med stort sett alle eksisterende kommersielle eller eksperimentelle arm- og håndprotese.

Mye av de analoge kretsene har vist seg å yte dårligere enn ønsket. Lavpassfilteret for innlesing av styresignal genererer sågar så mye støy selv at innlesningene får redusert nytteverdi. Dette antas primært å skyldes stor rippel på forsyningsspenningen, noe som analog elektronikk er spesielt følsom for.

Løsningen med elektroniske brytere har vist seg å stort sett være vellykket. Unntaket er I<sup>2</sup>C-kommunikasjon, som ble vesentlig forstyrret av disse bryterne og ikke fungerte. De elektroniske bryterne har gjort kretsen betydelig mer dynamisk. For I<sup>2</sup>C-bussen er alternativet å bruke egne spesialbygte brytere. Dette er mellom annet tilgjengelig hos Philips Semiconductors. Med mulig noen små programvareendringer fungerer også CAN-bussen som den skal.

Det serielle grensesnittet utad mot eksterne datamaskiner har vist seg å være svært nyttig, både for omprogrammering og ved testing og diagnostisering. Det kommandolinjebaserte grensesnittet foreslås å ta med videre når den endelige programvaren for protesen skal skrives.

Hva motorstyringen angår så overgår den alle forventninger. Tester viser at motorkontrolleren ikke har noen problemer med å kommutere motoren i hastigheter over 44000 omdreininger i minuttet. Dette er meget bra og tilfredsstillende alle krav som er satt. Måling av motorens absoluttposisjon ser også ut til å fungere tilfredsstillende så langt tester uten en mekanisk prototyp kan avdekke.

Arbeidet har i henhold til intensjonen ført frem til en prototyp som med mindre endringer bør fungere med en vilkårlig kommersiell eller eksperimentell protese. Med forslagene i kapittel 9 vil det kunne konstrueres en ferdig mekanisk prototyp som tilfredsstillende alle de krav som er gitt.



## 9 Videre arbeid

Arbeidet med styringselektronikken har gitt nyttige erfaringer og ført frem til et design som skal fungere godt med små endringer. Designet har også potensiale i seg til å møte plasskravene med et nytt utlegg optimalisert for maskinell montasje. Noen justeringer bør imidlertid gjøres, og arbeidet så langt har avdekket noen punkter man bør se nærmere på.

**Forbedre spenningsreguleringen** Spenningsregulatoren fungerer ikke tilfredsstillende, og en bedre regulator må implementeres. Man må også revurdere valget om ikke å bruke en egen lineær regulator til den analoge elektronikken. Dette vil stille mindre krav til switchmode-regulatoren, og kan kanskje totalt sett føre til plassreduksjon.

**Analogt grensesnitt** Det bør utarbeides en bedre spesifisering av det analoge grensesnittet slik at kravet til signalkondisjonering kan lettes på. Kan ordenen på filterene reduseres vil man få redusert antallet komponenter, noe som er ønskelig med tanke på plassbruk. Et bedre spesifisert elektrisk grensesnitt vil også gi mulighet for mer nøyaktig innlesing/sending av analoge verdier. Det bør derfor gjøres bedre studier av og testing med kommersielle og eksperimentelle arm- og håndproteser slik at man får et riktigere bilde av hvilke krav som må stilles i praksis.

**Gjennomgå filterdesignet til det analoge styresignalet** 2.ordens-filteret for innlesing av analoge styresignaler fungerer ikke som tiltenkt, og må gjennomgås. Kilden til den interne ustabiliteten må finnes og fjernes. Filteret tilknyttet DA-omformerer for sending av styresignaler må også gjennomgås for å finne opphavet til 1kHz sinussignalet som var overlagret utgangssignalet. Rippelen fra pulsbreddemodulatoren må også dempes skikkelig. Det må vurderes om en løsning basert på operasjonsforsterkere med utganger som svinger rail-to-rail kan brukes eller om man må ta i bruk høyere og eventuelt negative forsyningsspenninger.

**Forbedre I<sup>2</sup>C-bussens beskyttelse og signalruting** I<sup>2</sup>C-bussen er ikke laget for å være like robust som CAN-bussen. Ønsker man å fortsatt ha støtte for I<sup>2</sup>C er det derfor nødvendig med nye spesialtilpassede kretser for signalruting og overspenningsvern.

**Bekreft at CAN-bussen virker som den skal** Som nevnt i diskusjonen så har man ikke fått eksterne enheter til å bekrefte mottak av CAN-meldinger. Dette må gjøres før man kan si seg tilfreds med denne delen av kretsen.

**Motorregulering** Skrive gode reguleringsalgoritmer for motoren og implementere disse på mikrokontrollerne. Dette inkluderer utarbeiding av en hensiktsmessig kommunikasjonsprotokoll mellom kommunikasjonskontrolleren og

motorkontrolleren. En forutsetning er at gir og posisjonssensor er tilgjengelige. En ferdig mekanisk prototyp bør helst foreligge slik at man har tilgang til en komplett systemmodell.

**Nytt kretskortutlegg for å redusere areal** Ved utlegg av kretskort i denne oppgaven har det ikke vært prioritert å minimalisere det brukte kretskort-arealet. En naturlig del av den videre utviklingen vil være å få krympet utlegget så det får plass i det virkelige handleddet. Her må man vurdere flere løsninger som for eksempel oppsplitting i flere kretskort og bruk av flexprint.

## Referanser

- [1] Animated Prosthetics System. <http://www.animatedprosthetics.com/>.
- [2] Liberting Technologies Inc. <http://www.liberatingtech.com/>.
- [3] Motion Control. <http://www.utaharm.com/>.
- [4] Otto Bock. <http://www.ottobock.com/>.
- [5] Atmel Corporation. AT90CAN128(1) Datasheet. Finnes på WWW som url [http://atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2503.pdf](http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf), 2004.
- [6] Atmel Corporation. ATtiny2313(1) Datasheet. Finnes på WWW som url [http://atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2503.pdf](http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf), 2004.
- [7] Christopher Lake og John M. Miguelez. Evolution of microprocessor based control systems in upper extremity prosthetics. *Technology and Disability*, 2003.
- [8] Dominique Paret og Carl Fenger. *The I2C bus : from theory to practice*. Wiley, 1997.
- [9] Fairchild Semiconductor. NDM3000 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://www.fairchildsemi.com/ds/ND/NDM3000.pdf>, 1996.
- [10] Harald Eilertsen. Utvikling av ASIC for grensesnittet mot en seriell bus. Master's thesis, NTNU, 1998.
- [11] Harold H. Sears og Julie Shaperman. Electric Wrist Rotation in Proportional-Controlled Systems. *Journal of Orosthetics & Orthotics*, 1998.
- [12] Brian W. Flynn og D. Ewen Macpherson Herbert William Whittington. *Switched Mode Power Supplies: Design and Construction*. Research Studies Press, 2003.
- [13] ISO-11519. Can standard. Technical report, ISO - International Organization for Standardization, 1994.
- [14] ISO-11898. Can standard. Technical report, ISO - International Organization for Standardization, 2003.
- [15] MAXIM. MAX1837 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX1836-MAX1837.pdf>, 1993.
- [16] MAXIM. MAX418 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX406-MAX419.pdf>, 1993.

- [17] MAXIM. MAX471 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX471-MAX472.pdf>, 1996.
- [18] MAXIM. DS275 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS275.pdf>, 1999.
- [19] MAXIM. MAX4662 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX4661-MAX4663.pdf>, 1999.
- [20] Microchip Technology Inc. TC4469 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21425b.pdf>, 2002.
- [21] Microchip Technology Inc. MCP2551 Datasheet. Finnes på WWW som url <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667d.pdf>, 2003.
- [22] MINIMOTOR SA. 1628 T 012 B Datasheet. Finnes på WWW som url <http://www.minimotor.ch/minicatalog/pdf/Brushless/eBLM1628.pdf>.
- [23] Otmar Kilgenstein. *Switched-mode power supplies in practice*. Wiley, 1989.
- [24] Philips Semiconductors. The I<sup>2</sup>C-bus specification version 2.1. Finnes på WWW som url <http://www.semiconductors.philips.com/acrobat/literature/9398/39340011.pdf>, 2000.
- [25] Rainer Storheil. Optimal elektrisk håndleddsprotese med en frihetsgrad. Technical report, 2004.
- [26] Rainer Storheil. Innvevd programvare for kybernetisk håndleddsprotese. Master's thesis, NTNU, 2005.
- [27] Leonard Seymour. *The I2C Bus: Chips and Circuits*. Elektor Electronics, 1997.
- [28] Øyvind Stavadahl. *Optimal wrist prosthesis kinematics: Three-dimensional rotation statistics and parameter estimation*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2002.



## A Kravsspesifikasjon

I de påfølgende sider er versjon 0.1 av kravsspesifikasjonen for NRWD gjengitt i sin helhet.


**NTNU**

 Norwegian University of  
Science and Technology

 Faculty of Information Technology,  
Mathematics and Electrical Engineering  
Department of Engineering Cybernetics

**REPORT**

Report number

Classification

ISBN

 Address: **NTNU**  
Department of Engineering Cybernetics  
O.S. Bragstads plass 2D  
NO-7491 TRONDHEIM, NORWAY

 Switchboard: +47 73 59 40 00  
Telephone: +47 73 59 43 76  
Fax: +47 73 59 43 99

Report title  Functional Requirements Specification for the NTNU Revolute Wrist Device (NRWD) v0.1	Date
	Number of pages 10
	Project supervisor Øyvind Stavdahl
Author (s) Øyvind Stavdahl	Project no. TBC; Spør Tove
Sponsoring Organization NTNU	Client's reference
Abstract  This document specifies the functional requirements for the initial version of the NTNU Revolute Wrist Device (NRWD). The specification is intended to provide the necessary basis for developing a technical requirements specifications with respect to mechanical, electrical and algorithmic properties.  TBC	

Keywords

TBC		
-----	--	--

## Contents

<b>1. BACKGROUND .....</b>	<b>3</b>
<b>2. CONVENTIONS.....</b>	<b>3</b>
2.1 ABBREVIATIONS ETC.....	3
2.2 DOCUMENT STRUCTURE .....	3
<b>3. SYSTEM DESCRIPTION.....</b>	<b>3</b>
3.1 CONTEXT AND PURPOSE .....	3
3.2 CONFIGURATIONS .....	4
<b>4. FUNCTIONAL REQUIREMENTS .....</b>	<b>5</b>
4.1 GENERAL REQUIREMENTS .....	5
4.2 WRIST JOINT FUNCTION, WJF .....	7
4.3 WRIST MOTOR FUNCTION, WMF .....	7
4.4 WRIST SERVO FUNCTION, WSF .....	7
4.5 WRIST COMMUNICATION FUNCTION, WCF .....	8
4.6 WRIST POWER FUNCTION, WPF .....	9
4.7 PROXIMAL ATTACHMENT FUNCTION, PAF.....	9
4.8 DISTAL ATTACHMENT FUNCTION, DAF .....	10
4.9 WRIST GEOMETRY FUNCTION, WGF.....	10
<b>5. BIBLIOGRAPHY .....</b>	<b>10</b>

## List of figures

<b>Figure 1 System context.....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 2 The four different equipment configurations .....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 3 Functional block diagram .....</b>	<b>6</b>

## 1. Background

The functionally optimal 1-DOF wrist prosthesis kinematics was theoretically derived in [1]. Now one aims at implementing a physical device based on these principles.

The current document constitutes a functional specification for this device, which covers not only the kinematics but even mechanical, electrical, electronic and algorithmic aspects. Several of the numerical data are found in/derived from

## 2. Conventions

### 2.1 Abbreviations etc

The following conventions apply to this document:

NA	Not Applicable; irrelevant
HW	Hardware
SW	Software
TBC	To Be Completed; an aspect that has to be filled in.
TBD	To Be Defined; an aspect that is still not completely defined.

Use of the word *shall* denotes requirements that must be met by the system, while the word *should* denotes requirements that are desirable and must be met unless justification is provided for an alternative.

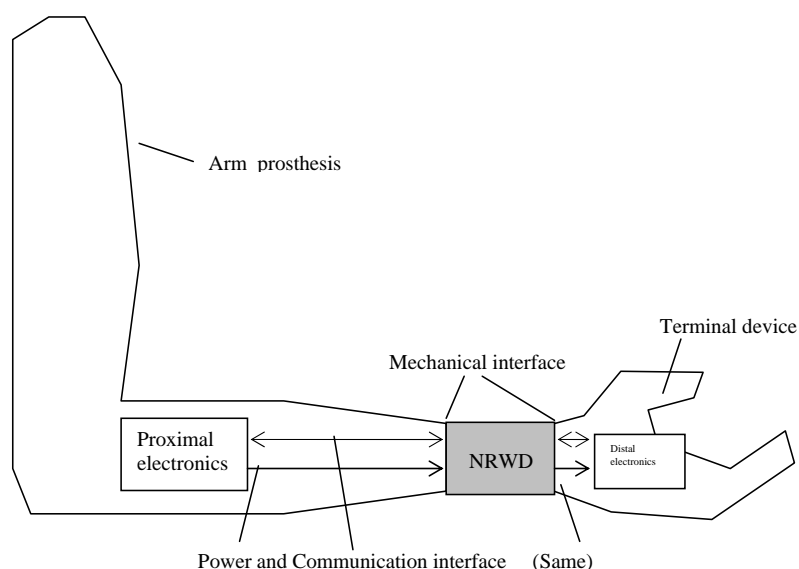
### 2.2 Document Structure

TBC.

## 3. System Description

### 3.1 Context and Purpose

The “system” referred to here is the entire wrist prosthesis, including both mechanical, electrical/electronic and software components. The primary purpose of the system is to rotate/orient the terminal device with respect to the forearm according to user input. Figure 1 gives an overview of the system and its context.



**Figure 1 System context**

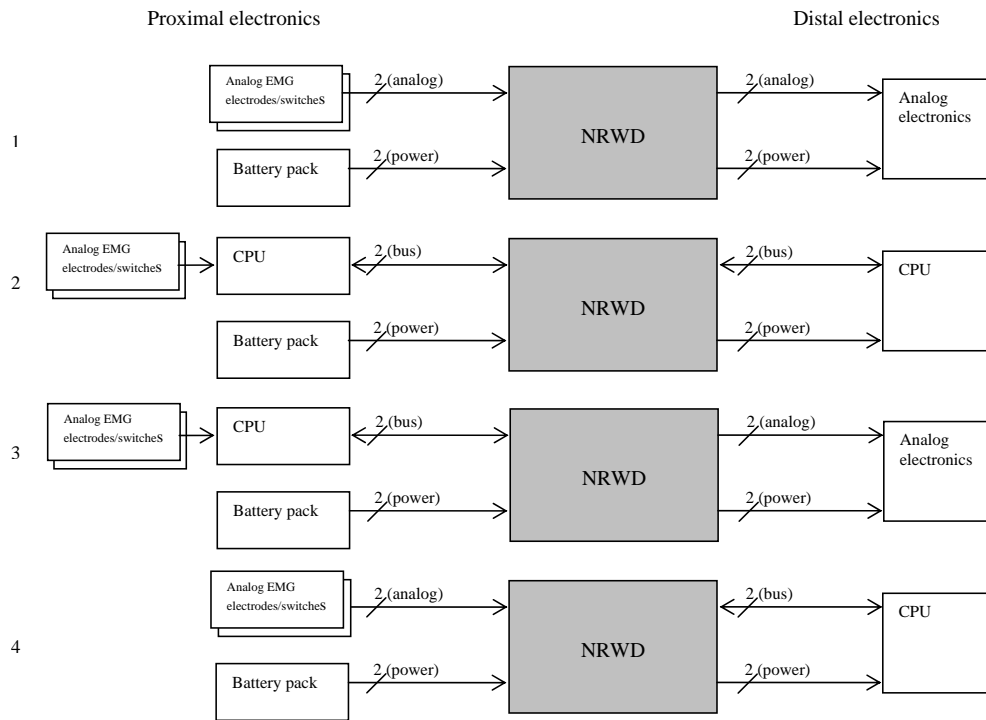
The proximal electronics includes a battery pack or another electric power source, as well as digital and/or analog circuits with sensors for reading the user's motor intent (typically EMG electrodes, switches, "pressure pads" or the like) and communication of this intent to the joint controllers in the prosthesis.

While the figure suggests that the proximal electronics is situated in the forearm, this needs not be the case; in the case of a total arm replacement the prosthesis may comprise motorized shoulder, elbow, wrist and/or finger functions, and the arm electronics may correspondingly be distributed in the different parts of the arm. The "Proximal electronics" box in Figure 1 thus represents all the electronics proximal to the wrist, while the "Distal electronics" represents any or all electronic components distal to the wrist, such as a motor controller responsible for opening and closing of the hand.

### 3.2 Configurations

The system is applicable to several different equipment configurations, as indicated in Figure 2. These configurations include the following, listed in the order of relevance and only the first two being absolutely necessary to implement:

1. A completely analog mode where all intercomponent communication is based on dedicated analog lines. This mode complies with standard Otto Bock and comparable components.
2. A completely digital mode where all intercomponent communication is based on a data bus. This mode is for use with other novel systems that support the same communication protocol.
3. A hybrid mode where the proximal communication (i.e. between the wrist and proximal electronics) is digital while the distal communication is analog, intended for use with a Bock-like hand and novel proximal controllers.
4. A second hybrid mode where the proximal communication (i.e. between the wrist and proximal electronics) is analog while the distal communication is digital. This is for using a novel hand in systems based on analog electrodes and the like.



**Figure 2 The four different equipment configurations**

## 4. Functional Requirements

### 4.1 General requirements

The NRWD system shall implement the following functions and satisfy the following requirements.

Req. no.	Description	Comments
GEN-01	A joint which implements the optimal kinematics described in [1] – Wrist Joint Function, WJF.	
GEN-02	An electric motor which drives the movement of the joint via a gear train – Wrist Motor Function, WMF	
GEN-03	A motor control interface and regulation process to control the movements of the WJF – Wrist Servo Function, WSF.	
GEN-04	A communication function that interfaces with WSF and other connected systems – Wrist Communication Function, WCF.	“Other connected systems” typically include proximal and distal joint controllers, as well as units for system diagnosis and configuration.
GEN-05	A power adaptation function that enables the system to run from a variety of voltage levels – Wrist Power Function, WPF.	Compliance with commercial and research systems.

GEN-06	A mechanism for attachment of the wrist to the forearm socket – Proximal Attachment Function, PAF.	
GEN-06-01	The PAF <b>shall</b> be disconnectable and, when disconnected, allow entry to the space proximal to the wrist.	For maintenance and replacement of forearm electronics.
GEN-07	A mechanism for attachment of the wrist to the terminal device – Distal Attachment Function, DAF.	
GEN-08	An outer geometry that crudely resembles that of an adult wrist – Wrist Geometry Function, WGF.	No component shall exceed the “hull” of a normal wrist, which has an elliptic cross-sectional area of approx. 5 cm x 4 cm. All parts and connectors must be kept small.
GEN-08-01	The “longitudinal” dimension (along the forearm) of the entire NRWD <b>should</b> be as short as possible, and <b>shall</b> not exceed 65 mm.	Allows longer residual limbs to use it, i.e. “larger market”. 65 mm is Bock spec.
GEN-09	The system <b>should</b> consume a minimum of energy, and the current consumption <b>shall</b> be kept below 2 A at all times.	When motor is active, its output dictates a lower bound for the power consumption. This requirement just implies that unnecessary circuits should be turned off, and active use should be made of the controller’s various sleep modes.
GEN-10	The system shall be modular with respect to both HW and SW.	
GEN-11	The weight of the entire NRWD <b>should</b> not exceed 100 g.	Otto Bock: 96 g, VASI: 100 g.

Figure 3 depicts the functions and their dependencies.

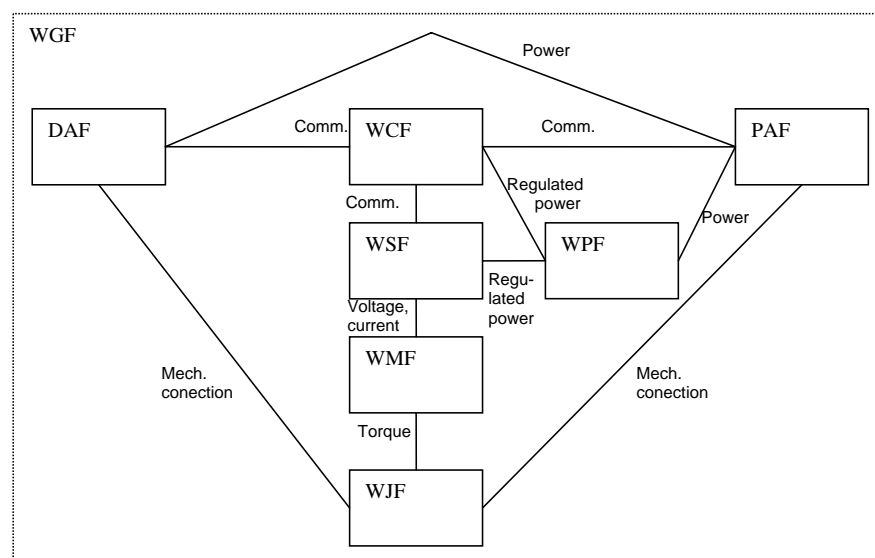


Figure 3 Functional block diagram

#### 4.2 Wrist Joint Function, WJF

The following requirements are derived from GEN-01.

Req. no.	Description	Comments
WJF-01	The NRWD joint <b>shall</b> be a single, simple revolute joint which axis of rotation can be placed at an attitude with respect to the forearm and terminal device as specified in [1], Equations (7.4) and (7.5).	Derived from (specific version of) GEN-01.  Note a typographic error in Eqn. (7.5); last element of vector should read “-0.23” instead of “0.23”.
WJF-02	The joint axis <b>should</b> be adjustable to other attitudes than that specified in WJF-01 by manual adjustment.	In order to test other axis alignments. Note that adjustability wrt. Forearm AND hand requires TWO adjustable functions!
WJF-03	The joint <b>shall</b> enable an angular excursion of at least 180 degrees. The excursion <b>should</b> be unlimited.	180 deg is crudely tat of a healthy limb.

#### 4.3 Wrist Motor Function, WMF

The following requirements are derived from GEN-02.

Req. no.	Description	Comments
WMF-01	The wrist joint (output of the gear train) <b>shall</b> have a maximum angular velocity of at least 1.4 rad/s (81 deg/s). The maximum velocity <b>should</b> be as high as possible.	Otto Bock spec. No-load speed
WMF-02	The wrist joint <b>should</b> have a maximum torque of at least 34,3 mNm.	VASI spec. Stall torque.
WMF-03	The motor <b>shall</b> have a maximum mechanical output power of at least TBC W.	

#### 4.4 Wrist Servo Function, WSF

The following requirements are derived from GEN-03.

Req. no.	Description	Comments
WSF-01	The movements of the wrist joint <b>shall</b> be controllable according to the following modes: 1. On/Off-mode 2. Position mode. 3. Velocity mode	
WSF-01-01	In <u>On/Off-mode</u> the motor shall be at rest or run at maximum speed (open-loop) in one direction according to a given setpoint.	Requires only transistor bridge.
WSF-01-02	In <u>position mode</u> the joint angle <b>shall</b> be proportional to a given angular setpoint.	
WSF-01-02-01	The WSF <b>shall</b> include an absolute position sensor. This sensor <b>shall</b> provide no less than 10 bits resolution per revolution.	
WSF-01-03	In <u>velocity mode</u> the joint angular velocity <b>shall</b> be crudely proportional to a given velocity setpoint.	
WSF-01-03-01	The WSF <b>shall</b> include a velocity sensor or estimator.	If brushless motor: use Hall elements for speed estimates.
WSF-02	The movements of the wrist joint <b>should</b> be	



	controllable according to the following modes: 4. Torque mode 5. Impedance mode	
WSF-02-04	In <u>torque mode</u> the motor torque <b>shall</b> be proportional to a given torque setpoint.	Torque crudely proportional with motor current, so current can be used for feedback.
WSF-02-04-01	The WSF <b>should</b> include means for monitoring motor current.	Also follows from GEN-09.
WSF-02-05	In <u>impedance mode</u> the mechanical impedance of the joint <b>shall</b> be determined by a given impedance setpoint	Mech. Impedance = torque/velocity. May require strain gauge measurements etc. to "bypass" friction.
WSF-03	WSF <b>shall</b> provide an interface to WCF through which the modes (described in WFS-01 to WSF-02) can be selected and relevant parameters can be set, and through which WSF can report relevant state variables TBD.	Typically: Setpoints in, process values out.

#### 4.5 Wrist Communication Function, WCF

The following requirements are derived from GEN-04.

Req. no.	Description	Comments
WCF-01	The NRWD <b>shall</b> have a two-wire Proximal Communication Interface (PCI) and a two-wire Distal Communication Interface (DCI).	
WCF-02	The PCI <b>shall</b> be configurable so that it implements two (0 V, 7.2 V) analog input lines or a bidirectional two-wire CAN interface with a protocol TBD.	
WCF-02-01	The analog input lines <b>shall</b> be able to sample both lines at a rate of 1 kHz. The sampling rate <b>should</b> be as high as 2 kHz.	EMG signals have a bandwidth of approx. 500 Hz.
WCF-03	The DCI <b>shall</b> be configurable so that it implements two (0 V, 7.2 V) analog output lines or a bidirectional two-wire CAN interface with a protocol TBD.	
WCF-04	The WCF <b>shall</b> be configurable to an all-Analog mode, with the PCI as an analog input interface and the DCI as an analog output interface.	
WCF-04-01	The DCI <b>shall</b> be able to reflect the analog signals present at the PCI lines.	This can be done by connecting the PCI lines to the DCI lines, or by reading the PCI signals into a CPU via an A/D conversion and outputting them to the DCI lines with D/A conversion.
WCF-04-02	The delay of the analog DCI signals with respect to the analog PCI signals <b>should</b> be as short as possible, and <b>shall</b> not exceed 10 ms.	A delay of 100 ms is perceived by the prosthesis user and thus unacceptable.
WCF-05	The WCF <b>shall</b> be configurable to an all-digital mode, with the PCI and the DCI acting as bidirectional CAN bus interfaces.	Only a single CAN interface is necessary, as both PCI and DCI can be internally connected to this single interface (at software level).
WCF-06	The WCF <b>should</b> be configurable to a hybrid mode in which the PCI acts as a bidirectional CAN interface while DCI acts as two analog output lines (cf. WCF-02)	Not strictly necessary, but improves interoperability with older systems.
WCF-07	The WCF <b>should</b> be configurable to a hybrid mode in which the PCI acts as two analog input lines while DCI acts as a bidirectional	Not strictly necessary, but improves interoperability with older systems.

	CAN interface (cf. WCF-01)	
WCF-08	The WCF <b>should</b> include an I2C interface, with a protocol TBD, that can be connected to the PCI and DCI in the same way as the CAN interface described in the previous requirements.	Not a prioritized requirement!
WCF-09	The protocols developed for CAN (and possibly I2C) communication <b>should</b> comply with the outlines given in [3].	Protocol to be developed iteratively in cooperation with P. Kyberd, UNB.
WCF-10	The WCF <b>shall</b> include a serial interface for downloading software and for debugging/diagnostic purposes.	Same fashion as AVR Butterfly serial programming. This requires a bootloader.
WCF-11	WCF <b>shall</b> implement an interface to WSF according to WSF-03.	

#### 4.6 Wrist Power Function, WPF

The following requirements are derived from GEN-05.

Req. no.	Description	Comments
WPF-01	The WPF shall accept external power in the form of an unregulated two-wire DC supply.	Implies on-board voltage regulation.
WPF-02	The NRWD shall tolerate and run normally when powered with a voltage in the range (6 V, 12 V). The range of usable voltages should be as wide as (5 V, 18 V).	This corresponds to Otto Bock, Motion Control and other systems.
WPF-03	The NRWD shall tolerate supply voltage in the range (0 V, 12 V) without exhibiting unpredictable behaviour and without getting damaged.	E.g. shutting down the controller before the voltage gets dangerously low, may otherwise damage Flash and EEPROM content etc.
WPF-04	The NRWD should automatically limit its motor current to a level that does not reduce the supply voltage below the interval given in WPF-01.	Low batteries => careful motor control to avoid power-down.

#### 4.7 Proximal Attachment Function, PAF

The following requirements are derived from GEN-06 and more.

Req. no.	Description	Comments
PAF-01	The PAF <b>shall</b> comprise two parts, the proximal of which is adapted to be permanently attached to the forearm socket and the distal permanently attached to the wrist unit. The parts must "mate" to form a mechanically stable connection while also being detachable.	A commercially available "quick disconnect" unit may be used, but the entire mechanism must be kept as short as possible.
PAF-01-01	The proximal part of the PAF <b>shall</b> be hollow to allow access to the space within the socket proximally to the wrist.	Batteries and electrodes etc. is mounted here, so an opening must be present to allow maintenance and replacement of these units.
PAF-02	PAF disconnection <b>should</b> be possible with hand or a simple tool, e.g. a screwdriver.	
PAF-03	The PAF <b>shall</b> include a four-wire electric coupling, preferably mechanically integrated with the PAF itself.	GEN-04 and GEN-05. Preferably a "quick disconnect" type, optionally loose wires and a manually detachable coupling/plug.
PAF-03-01	The PAF electrical coupling <b>shall</b> include at	This is the current for the wrist AND the

	least two power supply wires/contacts capable of transferring a constant current of 4 A per wire.	terminal device.
PAF-03-02	The PAF electrical coupling <b>should</b> be rotatable without twisting the wires.	Brush rings etc. This requirement and DAF-02-02 are mutually exclusive; both are not needed!

#### 4.8 Distal Attachment Function, DAF

The following requirements are derived from GEN-07 and more.

Req. no.	Description	Comments
DAF-01	The DAF <b>should</b> comprise two parts, the proximal of which is permanently attached to the wrist and the distal permanently attached to the terminal device. The parts must “mate” to form a mechanically stable connection while also being detachable.	The distal part may be a function of the terminal device, e.g. a Bock hand. No “quick disconnect” required here!
DAF-02	The DAF <b>shall</b> include a four-wire electric coupling, preferably mechanically integrated with the DAF itself.	GEN-04 and GEN-05. Preferably a “quick disconnect” type, optionally loose wires and a manually detachable coupling/plug.
DAF-02-01	The DAF electrical coupling <b>shall</b> include at least two wires/contacts capable of transferring a constant current of 2 A per wire, and these wires <b>shall</b> be connected to the power supply wires from PAF.	This is the current that drives the terminal device. Check with Otto Bock (=1 A?); higher currents needed for more advanced/multifunction hands.
DAF-02-02	The DAF electrical coupling <b>should</b> be rotatable without twisting the wires.	Brush rings etc. This requirement and PAF-03-02 are mutually exclusive; both are not needed!

#### 4.9 Wrist Geometry Function, WGF

See GEN-08.

Req. no.	Description	Comments

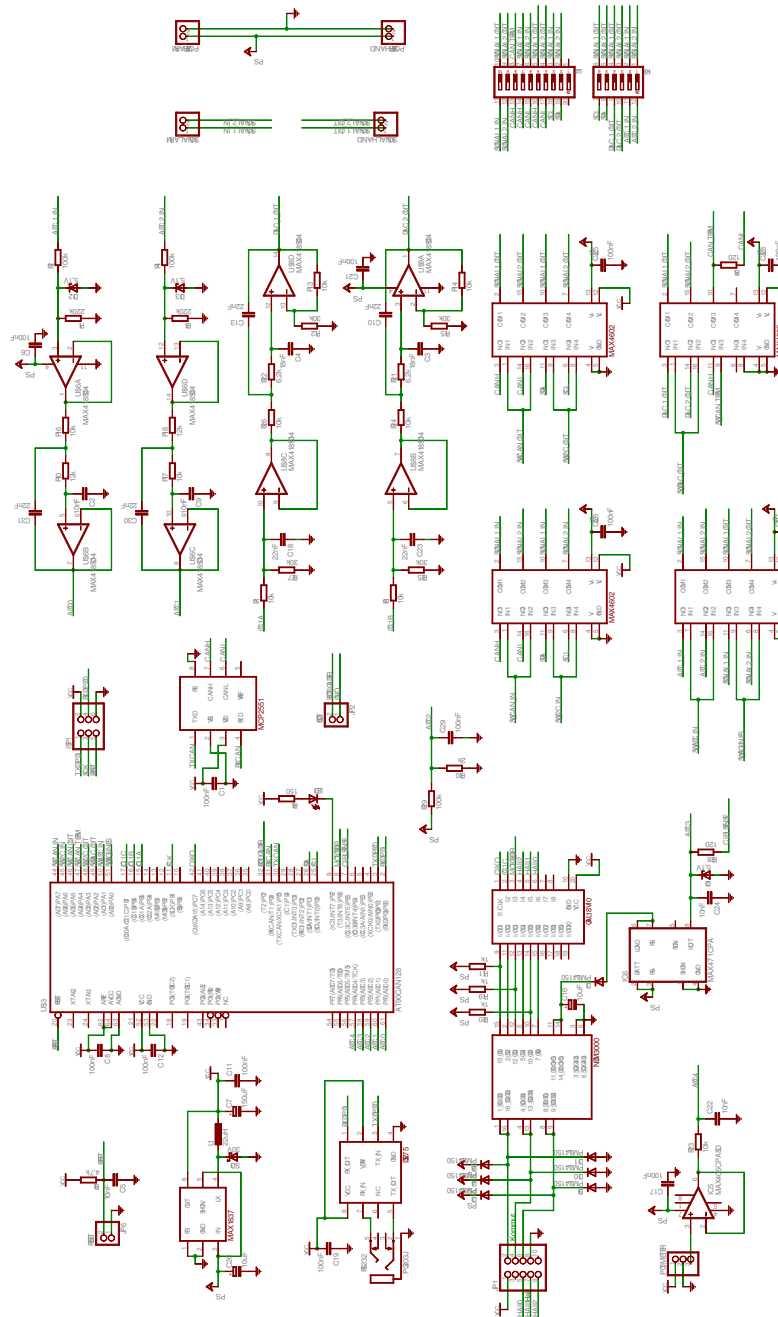
### 5. Bibliography

- [1] Stavdahl, O., Optimal wrist prosthesis kinematics: Three-dimensional rotation statistics and parameter estimation. PhD Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2002.
- [2] Storheil, R., Optimal Wrist Prosthesis with One Degree-of-Freedom. Term Project Report, TTK4720, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2004. (In Norwegian.)
- [3] ToMPAW document (TBC)



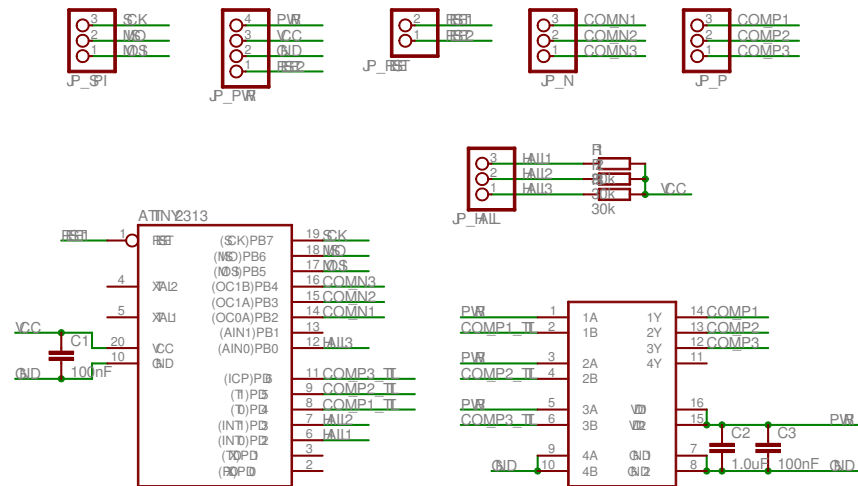
## B Kretsdesign

## B.1 Hovedmodul



**Figur 27:** Kretsdesign for NRWD (hovedmodul).

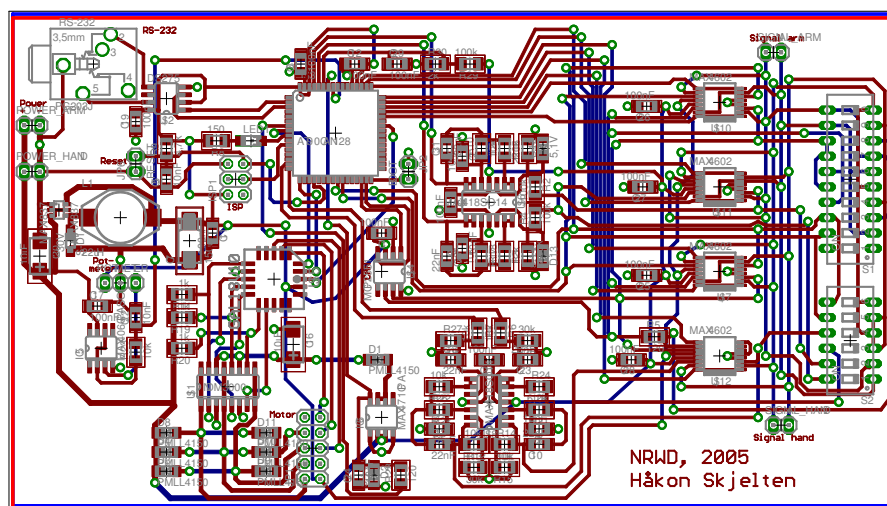
## B.2 Motorkontrollermodul



**Figur 28:** Kretsdesign for NRWD (tilleggskort for motorkontroller).

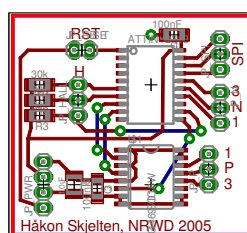
## C Kretsutlegg

### C.1 Hovedmodul



**Figur 29:** Kretsutlegg for NRWD (hovedmodul).

### C.2 Motorkontrollermodul



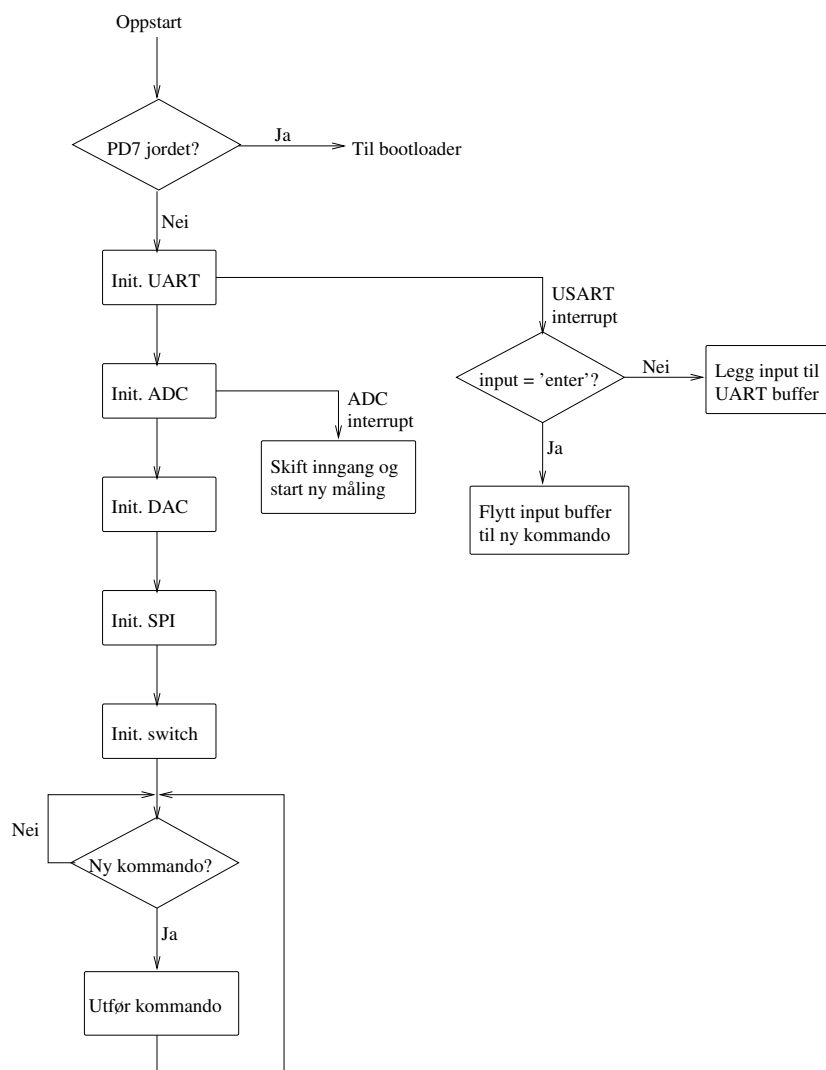
**Figur 30:** Kretsutlegg for NRWD (tilleggskort for motorkontroller).





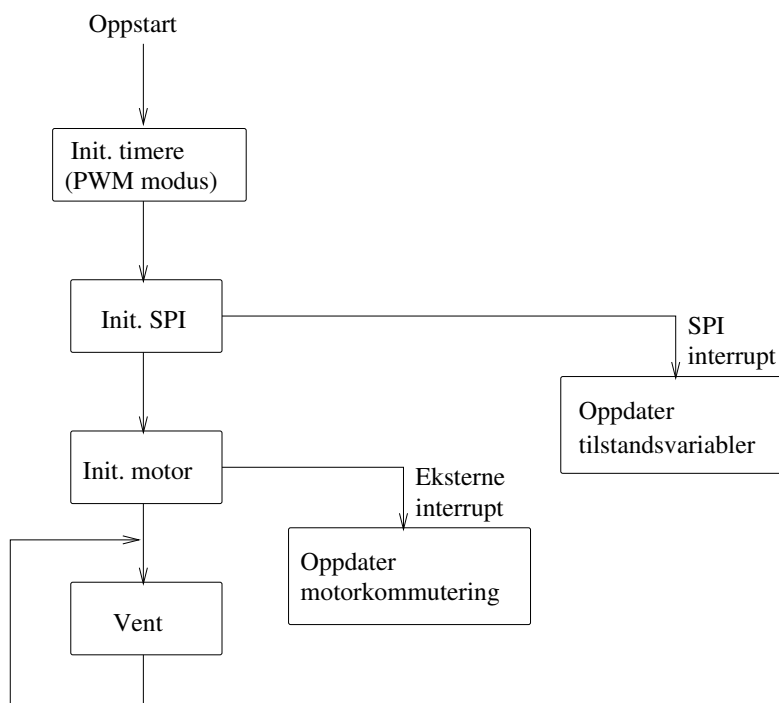
## D Programflytdiagram

### D.1 Programflyt for kommunikasjonskontrolleren



**Figur 31:** Programflyt for AT90CAN128.

## D.2 Programflyt for motorkontrolleren



**Figur 32:** Programflyt for motorkontrolleren.

## E Måledata

### E.1 Generering av analoge styresignaler

DAC verdi	5V [V]	6V [V]	7V [V]	8V [V]	12V [V]	18V [V]
000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
025	0,77	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78
050	1,49	1,53	1,53	1,53	1,53	1,52
075	2,22	2,28	2,28	2,28	2,27	2,26
100	2,94	3,02	3,03	3,03	3,02	3,00
125	3,69	3,79	3,79	3,79	3,78	3,77
150	4,39	4,54	4,54	4,54	4,53	4,51
175	4,40	5,29	5,21	5,29	5,27	5,26
200	4,40	5,38	6,04	6,04	6,02	6,01
225	4,40	5,38	6,37	6,79	6,77	6,75
255	4,40	5,38	6,37	7,35	7,67	7,65

**Tabell 8:** Måleresultat fra kommunikasjonkontrollerens genererte analoge styresignaler.

## E.2 Kommuteringslogikk

Spenning inn [V]	Totalt strømfor- bruk [A]	Komuterings- frekvens [Hz]	Omdr. i min. [rpm]
5,00	0,120	190	11400
6,00	0,123	232	13920
7,00	0,125	270	16200
8,00	0,122	313	18780
9,00	0,120	358	21480
10,00	0,120	397	23820
11,00	0,120	441	26460
12,00	0,120	483	28980
13,00	0,123	526	31560
14,00	0,124	568	34080
15,00	0,126	610	36600
16,00	0,128	649	38940
17,00	0,131	694	41640
18,00	0,134	735	44100

**Tabell 9:** Testresultat for kommuteringslogikken.