

Framdriftssystem til Eco marathon kjøretøy

Anders Gellein

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juni 2009
Hovedveileder: Lars Einar Norum, ELKRAFT

Oppgavetekst

NTNU skal delta i Shell Eco Marathon våren 2009. Det elektriske framdriftssystemet på en eksisterende bybil, bygd på NTNU i 2008, skal byttes ut og optimaliseres. Styresystemet for framdriften er hovedfokuset i oppgaven. Kandidaten har også hovedansvaret for det elektriske systemet på bilen. Arbeidet blir utført i tett samarbeid med Rolv Marius Faleide fra Elkraft, Hanne Flåten Andersen fra Kjemi og Jon Martin Harstad Bakken fra Kybernetikk.

Oppgaven gitt: 28. januar 2009

Hovedveileder: Lars Einar Norum, ELKRAFT

Innhold

Sammendrag.....	3
1 Innledning	4
1.1 Bilen, DNV Fuel Fighter	4
1.2 Strategi.....	5
1.3 Arbeidsprosess.....	5
2 Motorstyring for 9-fasemaskin	6
2.1 Styringsstrategi	6
2.2 Planlegging av omformer	8
3 Brenselcellesystem.....	10
3.1 Dimensjonering og valg av brenselcellestack	12
3.2 Styrestrategi og krav til styresystem.....	16
3.2.1 Regulering av hydrogentrykk.....	17
3.2.2 Purging av stack	19
3.2.3 Kjøle- og luftforsyningsvifte.....	19
3.2.4 Datalogging	19
3.2.5 Sikkerhetssystem.....	19
3.3 System for labtest av brenselcellestack	22
3.3.1 Flaskeregulator	23
3.3.2 Trykksensorer.....	23
3.3.3 Solenoideventiler.....	24
3.3.4 Flowmeter.....	25
3.3.5 Rørsystem.....	25
3.3.6 Kjøle- og luftforsyningsvifte.....	26
3.3.7 Datalogger	27
3.3.8 Programmerbar last	28

3.3.9	Styremodul	28
3.3.10	Brukergrensesnitt	30
3.3.11	Oppkobling av det elektriske systemet.....	30
3.3.12	Programmering av systemet.....	32
3.4	Implementering av brenselcellesystemet i bilen.....	35
3.4.1	Måling av interne spenninger	36
3.4.2	Måling av spenning over brenselcellestacken.....	38
3.4.3	Måling av strøm gjennom brenselcellestack	39
3.4.4	Måling av hydrogentrykk og styring av ventiler.....	41
3.4.5	Måling av temperatur	41
3.4.6	Sikkerhetssystem.....	42
3.4.7	Viftestyring.....	44
3.4.8	Kontrollpanel.....	44
3.4.9	Grensesnitt mot styrekort	46
3.4.10	Programmering av styrekortet i bilen.....	54
4	Resultater.....	56
4.1	9-fase motorstyring.....	56
4.2	Labtesting av brenselcellestack	56
4.3	Brenselcellesystemet i bilen	57
4.4	Resultat i Shell Eco-marathon	57
5	Diskusjon.....	58
6	Konklusjon	59
7	Referanser.....	60

Sammendrag

I denne masteroppgaven har det blitt arbeidet med NTNUs deltagelse i Shell Eco-marathon våren 2009. Med utgangspunkt i bilen fra 2008 og simuleringer og analyser fra forprosjektet høsten 2008, har arbeidet vært fokusert på å bygge opp et elektrisk framdriftssystem med hovedfokus på effektivitet.

9-fase motordrift

Det ble først utredet og startet som smått på arbeidet med å bygge en veldig eksperimentell motorstyring for å teste ut et nytt motorkonsept. Etter en stund måtte dette arbeidet avbrytes på grunn av at det trengtes resurser til å bygge opp et styresystem til en ny brenselcellestack, som hadde et mye større potensial til å bedre energieffektiviteten i systemet.

Brenselcellestyring

En brenselcellestack som hadde potensial til å bli en del av et ekstremt effektivt brenselcellesystem, var utgangspunktet for dette arbeidet. Det ble bygd opp hydrogenforsyning, viftesystem og elektronisk styring for brenselcellestacken. Systemet ble først testet grundig på lab med blant annet lastsimuleringer, slik at hydrogenforsyning og viftestyring kunne optimeres for bilen. Deretter ble systemet implementert i bilen. Resultatet var et brenselcellesystem med en virkningsgrad på rundt 60%. Med dette som utgangspunkt for resten av framdriftssystemet, ble Shell Eco-marathon 2009 en stor suksess for NTNU.

1 Innledning

Shell Eco-marathon Europe er en årlig energieffektivitetskonkurranse mellom høyskoler og universiteter i Europa. Konkurransen går ut på å bygge et energieffektivt kjøretøy og kjøre det et bestemt antall runder på en bane, uten å overstige en fastsatt maksimumstid. Det finnes en hel rekke ulike drivstoff som kan benyttes av studentene, og energiforbruket til hver enkelt bil blir regnet om til antall kilometer kjørt på en liter 95 oktan bensin. Konkurransen er delt inn i to kjøretøysklasser; *Prototype*, der er det veldig få begrensninger når det gjelder design av kjøretøyet, og *UrbanConcept*, der deltagende kjøretøy må ha et design som minner om en vanlig bybil. NTNU debuterte i konkurransen i 2008 med et tverrfaglig team av studenter. Det endte opp med en meget sterk andreplass og et energiforbruk tilsvarende 729 km/l bensin. I 2009 ble Shell Eco-marathon Europe arrangert for 25. gang,

1.1 Bilen, DNV Fuel Fighter

Bilen fra 2008 var bygd i karbonfiber, dette gav svært lav vekt. Den ble drevet av en elektromotor som ble matet med elektrisk energi fra en brenselcelle som går på hydrogen. Det ble fokusert veldig mye på å holde vekten ekstremt lav da bilen opprinnelig ble designet og bygd.

Da det nye laget tok over bilen høsten 2008, fulgte det med en utfordring om å klare 1000 km/l, denne utfordringen ble mottatt med glede, og det ble målsetningen for Shell Eco-marathon 2009. Det ble startet et grundig analysearbeid og bygd opp en detaljert simuleringsmodell av bilen utover høsten 2008, dette arbeidet ble presentert i rapporten, *Framdriftssystem for Shell Eco-marathon bil, våren 2009* (1). Samtidig ble det lagt mye ressurser i å skaffe sponsorer. Dette arbeidet ble belønnet ved at gruppen fikk solide sponsorer som bidro med både penger, komponenter, teknologi og know-how. Det Norske Veritas ble gruppens hovedsponsor og bidro sammen med Kongsberg Gruppen til å sikre teamets økonomi. SmartMotor ble samarbeidspartner for ny motordrift, og danske H2 Logic og SINTEF ble samarbeidspartnere for nytt brenselcellesystem. Med dette som utgangspunkt ble DNV Fuel Fighter skapt.

1.2 Strategi

En grundig gjennomgang av analyseresultatene fra høsten 2008 (1) resulterte i at man endret fokuset fra lav vekt til høy effektivitet. Dette inkluderte alt på bilen, men spesielt virkningsgrad i framdriftsystemet og bedre aerodynamikk.

1.3 Arbeidsprosess

Arbeidet startet med utredning av muligheten for å bygge en veldig spesiell motorstyring for et eksperimentelt motorkonsept, dette er beskrevet i *Kapittel 2*. Etter en stund innså man at det var veldig knapt med arbeidsressurser til å lage styresystem til brenselcellesystemet. Analyser viste at gevinsten ved å bygge et nytt brenselcellesystem var betydelig større enn den marginale gevinsten som lå i det eksperimentelle motorkonseptet.

Dermed tok undertegnede, som også var ansvarlig for det elektriske systemet, ansvar for at det nye brenselcellesystemet ble realisert. Dette arbeidet er beskrevet i *Kapittel 3*. Det var meget knapp tid å få ferdig dette systemet, derfor ble det i tider arbeidet i døgnskift med styresystem og testing av brenselcellestak.

2 Motorstyring for 9-fasemaskin

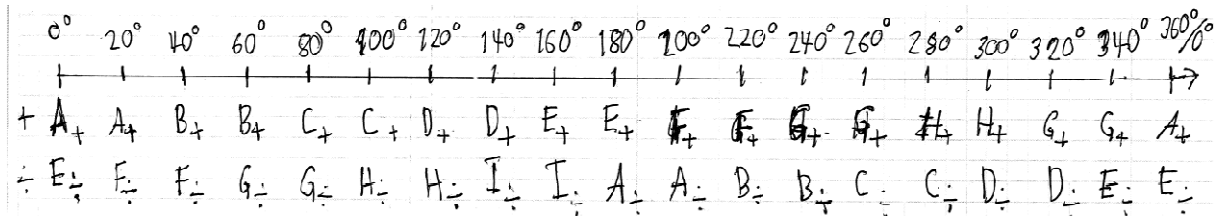
Bilens motor ble bygd med utgangspunkt i *SP300* fra *SmartMotor*. Denne maskinen ble utviklet for *Hugin*, et autonomt undervannsfartøy som brukes kommersielt til logging av sjøbunn. I *Hugin* har maskinen vist hva den duger til ved å sette verdensrekord i operasjonstid uten kontakt med moderfartøy. *SP300* har en stator som er bygd opp av en konsentrert vikling. Denne har 18 sett med spoler som var plassert med 20° mellomrom rundt statorperiferien, hver spole danner et magnetisk par med den spolen som er på andre siden av statoren, det vil si 180° forskjøvet. Spolene blir koblet i serie i grupper på 3 etterfølgende spoler. Det gir 6 spolegrupper, der hver gruppe danner et magnetisk par med gruppen på motsatt side av stator. Disse magnetiske parene kobles i parallell slik at man får 3 faser. Dersom man har $\cos(\theta) = 1$ for alle tre parene i en fase, operer to av parene med en vinkel på 20° mellom strøm og induert spenning. Ved å dele opp stator viklingen i 9-faser, kan man styre strømmen i hvert enkelt spolepar, slik at ikke får denne vinkelen mellom strøm og induert spenning. Dette fører til at man kan oppnå den samme magnetiske flux i maskinen med mindre strøm, og dermed redusere kobbertapet. Detaljer og beregninger rundt dette temaet er beskrevet i Rolv Marius Faleide sin masteroppgave, *Shell Eco Marathon 2009 Electric Drive for World's Most Fuel Efficient Car (2)*

Arbeidet med å vikle maskinen i 9-faseoppsett, og implementere motorstyring til den, ble aldri startet på grunn av at arbeidet med å vikle maskinen i 3-faseoppsett tok lengre tid enn først antatt, og undertegnede måtte omprioritere ressursene sine til å implementere styresystem for brenselcellestack isteden.

2.1 Styringsstrategi

Det ble utviklet en styringsstrategi for maskin av denne typen med 9 faser. I utgangspunktet ble det valgt å ha en veldig enkel styrestrategi. Ved å sende strøm i de to fasene som til enhver tid gir et magnetfelt fra statoren som står så nært 90° grader på rotorfeltet som mulig, kan man få mest dreiemoment for strømmen man sender inn i stator. Dette gir samme styringsmønster som en BLDC-maskin (børsteløs DC-maskin). Man har en konstant strøm som man sender gjennom to faser valgt etter rotorposisjon. Etter hvert som rotoren beveger seg rundt blir denne DC-strømmen kommutert slik at den ene fasen av de to den går imellom, blir byttet ut til neste fase. Kommuteringssekvensen i *Figur 2.1*:

Kommuteringssekvens for 9-fase BLDC motor ble skissert opp for 9-fasemaskinen, der fasene går fra A til I.



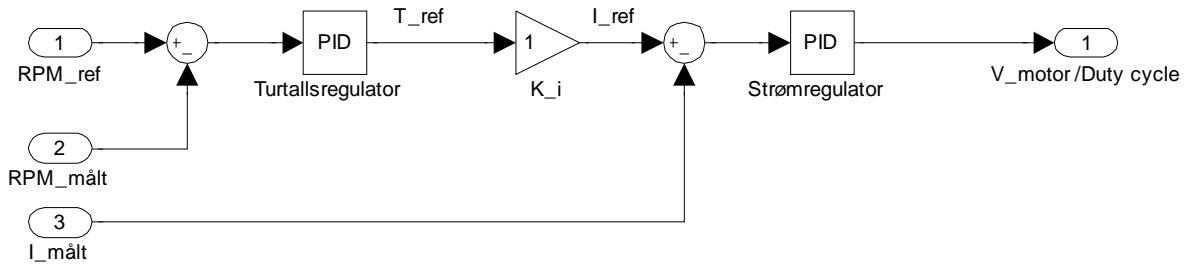
Figur 2.1: Kommuteringssekvens for 9-fase BLDC motor

For å kommutere i henhold til kommuteringsskjemaet måtte man ha en form for tilbakemelding om rotorposisjon fra motoren. Noen aktuelle løsninger for dette var:

- Måling av tilbakeindusert spenning: Krever ingen ekstra deler i motoren, rotorposisjon blir estimert ut fra måling av indusert spenning på terminalene. Rotoren må være i bevegelse for å gi måling.
- Måling av nullgjennomgang av indusert spenning med nullgjennomgangssensor montert over enkeltspoler: Ganske lik forrige løsning, men man måler på enkeltspoler i stator istedenfor på fase-terminalene. Denne metoden krever også rotor i bevegelse for å gi måling.
- Plassering av hallsensorer i stator: Plassere hallsensorer på egnede steder i stator for måling av magnetfelt. Hallsensorene gir måling fra stillestående rotor, fordi de måler felt og ikke indusert spenning.
- Puls-encoder på rotoraksling: Det finnes mange typer encodere i ulike prisnivå og nøyaktighet, for måling av absolutt vinkel og vinkel relativ til startposisjon. Gir litt ekstra rullemotstand til rotor, og masse jobb med å kalibrere encoder i forhold til magnetposisjon på rotor.

De tre første løsningene skulle utredes og analyseres videre.

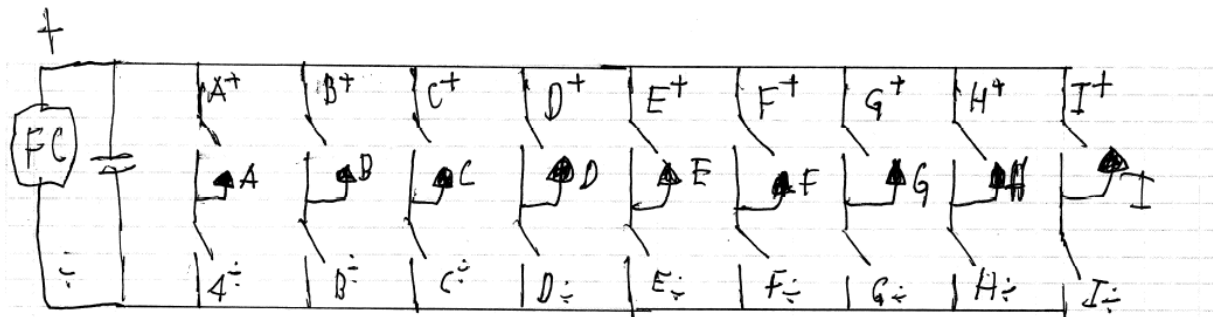
Da kommuteringen var i boks, stod regulering av moment og hastighet igjen. Dette ble det planlagt å gjøre på klassisk DC-vis, med måling av strøm på DC-linken før omformer. Denne målingen skulle brukes til en momentregulator som fikk styringsreferanse fra en turtallsregulator. Turtallet skulle måles ved hjelp av kommuteringssignalene, og turtallsreferansen til regulatoren skulle genereres i bilens styresystem.



Figur 2.2: Reguleringsløyfe for BLDC-motordrift.

2.2 Planlegging av omformer

For å få til å styre denne maskinen måtte man ha en niarmet mosfetbro med uavhengig kontroll av hver mosfet. Den ville se omtrent slik ut:



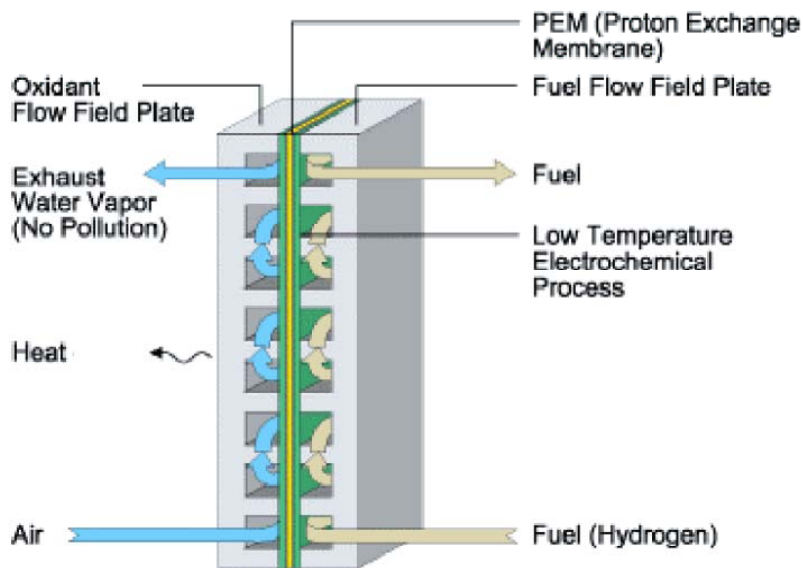
Figur 2.3: 9-armet mosfetbro.

Denne topologien var det planlagt å bygge opp av tre IPM-moduler, *IRAM 135* fra *International Rectifier* (3). En IPM-modul er en brikke med integrert trearms mosfet- eller IGBTbro og gatedriverlogikk. Dette forenkler hardwareutviklingen veldig mye, da det bare er å koble til strømforsyning, DC-skinne, tre faser ut og 5V logikk til transistorene, så har man effektdelen av omformeren ferdig. Styredelen av omformeren viste seg å være en liten nøtt. Man hadde 18 mosfets som trengte PWM-signaler fra en kontroller. De mest vanlige kontrollerne, deriblant *Texas Instruments* sin veldig populære *2812-serie*, hadde bare 12 pulsviddemodulerte utganger for styring av omformere. Dette er nok til å drive en omformer med aktiv likeretting, som de fleste produsentene har sett for seg er nok for en kontroller. Derfor ble planen å bruke et *sbRIO-9642* fra *National Instruments*. Dette styrekortet har en

fpga som kan programmeres til å gi 18pulsviddemodulerte signaler og grunnleggende kontroll. Denne fpga-en styres igjen av en real-time-datamaskin som ligger på samme kretskort. Dette styrekortet ble også brukt til å styre brenselcellesystemet, fullstendig beskrivelse av det finner man i *Kapittel 3.3.9*

3 Brenselcellesystem

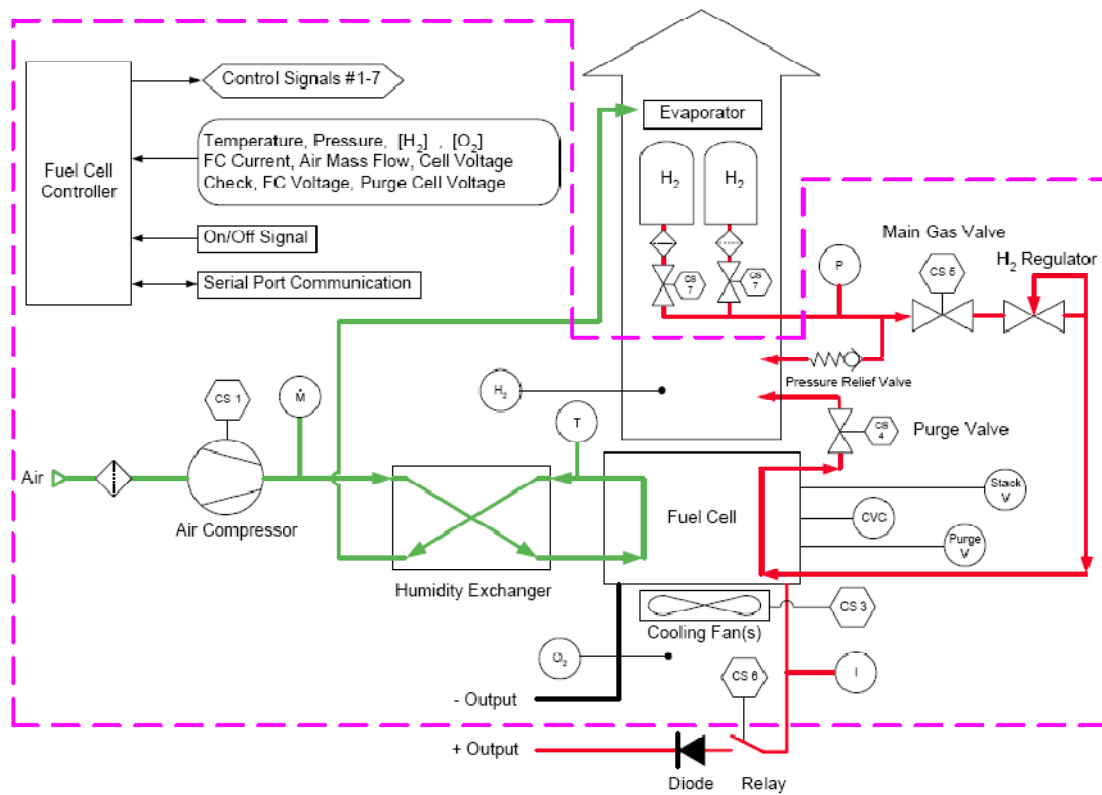
Brenselcellesystemet omdanner hydrogen og oksygen til vann og elektrisk energi. Systemet er bygd opp rundt mange brenselceller stablet sammen i en stack. Det har blitt valgt å bruke brenselceller av typen *proton exchange membrane*, PEM. Egenskaper som lite volum og lav operasjonstemperatur, gjør denne typer brenselceller godt egnet til bruk i biler.



Figur 3.1: Illustrasjon av brenselcelleoppbygning (4).

Hver celle er bygd opp av en elektrolytisk membran som leder protoner. På hver side av membranen er det en elektrode med spor mot membranen, se figur 3.1. De to sidene av membranen utgjør henholdsvis anoden og katoden i et elektorkjemisk system. På anoden blir hydrogen ført inn i elektrodens spor, gassen blir splittet opp i elektroner og protoner av et katalytisk materiale på anoden. Protonene blir transportert gjennom membranen til katoden og man får et overskudd av elektroner på anoden og protoner på katoden. Dette skaper et spenningspotensial mellom elektrodene, som kan utnyttes til å gjøre et arbeid i en elektrisk krets, der elektronene transporteres fra anoden til katoden. På katoden blir det pumpet luft gjennom sporene i elektroden. Oksygenet i luften reagerer med hydrogenprotonene og elektronene, som kommer fra anoden gjennom den elektriske kretsen, og blir til vann. Spenningspotensialet over en celle varierer normalt mellom 0,6 og 1 volt etter hvor mye strøm den fører. Når flere celler blir satt sammen til en stack, seriekobles elektrodene på cellene slik at man får høyere spenning ut fra stacken. For at en brenselcellestack skal fungere tilfredsstillende som en energikilde, trenger den som oftest en del støttekomponenter.

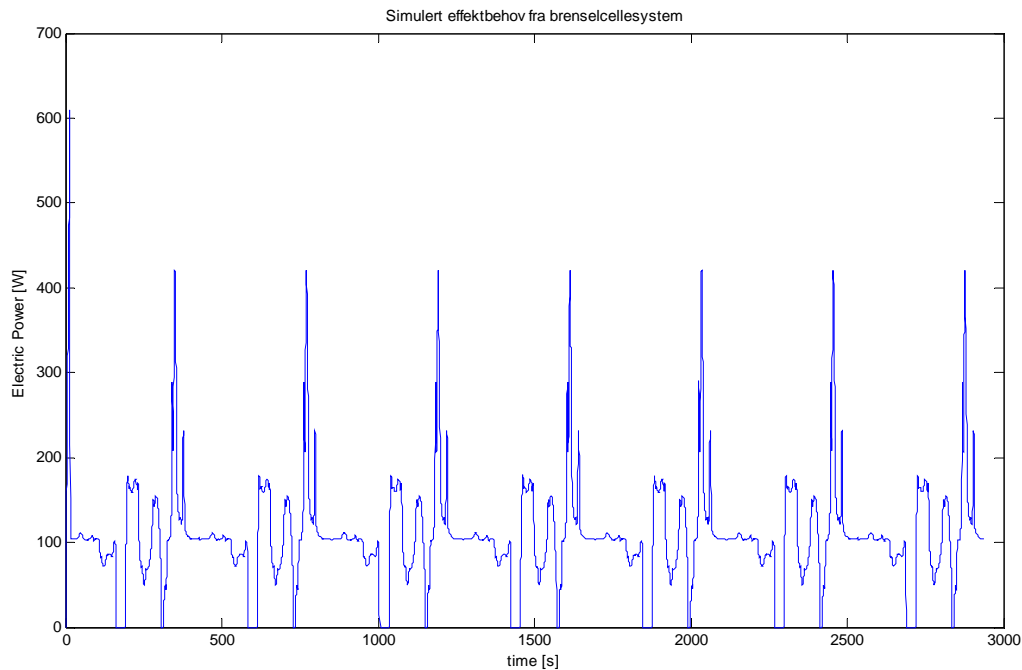
Lufttilførselen til katodene må drives av en kompressor, man trenger også en luftfukter for tilførselsluften, et kjølesystem og et kontrollsystem.



Figur 3.2: Eksempel på et komplett brenselcellesystem (4)

3.1 Dimensjonering og valg av brenselcellestack

Effektbehovet til bilen ble simulert og beregnet av undertegnende høsten 2008, detaljer rundt dette er beskrevet i rapporten, *Framdriftsystem for Shell-Eco marathon bil (1)*.



Figur 3.3: Simulert effektkurve for brenselcellesystem.

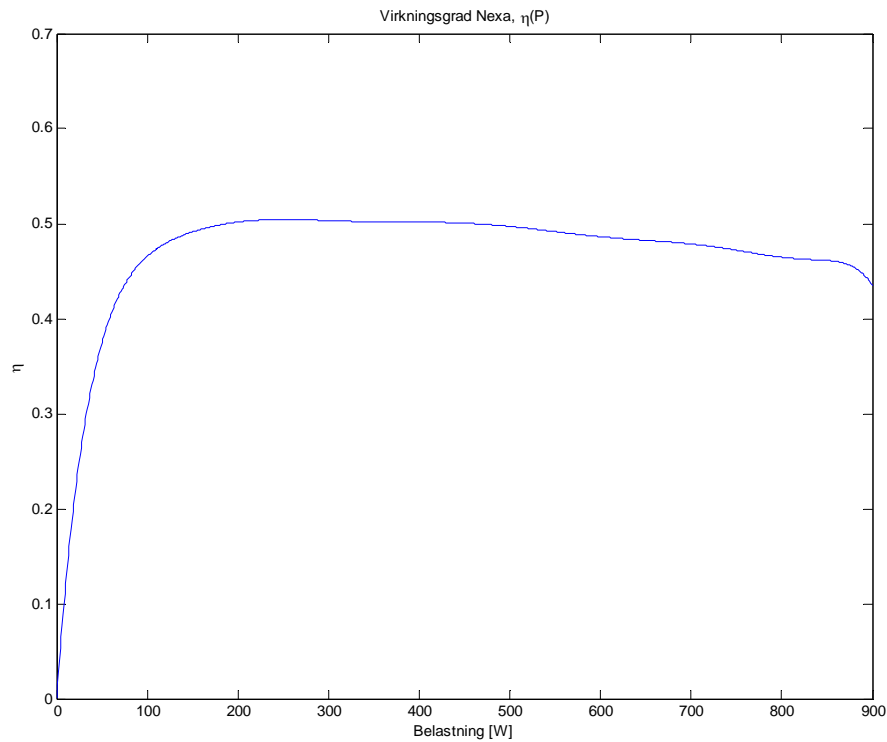
Ut ifra simuleringen og det man vet om spenningskrav fra motordrift ble følgende to effektkrav satt til brenselcellesystemet:

- Kontinuerlig effekt på 180W
- Toppeffekt på 500W
- Spenning over 30 V, ved 500W

Med dette som utgangspunkt startet dimensjoneringen av en brenselcellestack.

For å oppnå høy virkningsgrad er det ønskelig å dimensjonere systemet til å ha så lav strømtetthet som mulig i hver enkelt brenselcelle (5). Dette taler for å bruke en kraftig overdimensjonert brenselcellestack. Kommersielt ferdig integrerte systemer er helt uaktuelle å bruke, da de er dimensjonert for høy pålitelighet, lang levetid, og høy last. Dette gir en høy parasittisk last i forhold til belastningen systemet har. De er blant annet utstyrt med kjølevifte

og kompressor som går kontinuerlig. Den parasittiske lasten virker veldig negativt på virkningsgradskurven til brenselcellemodulen ved lav last. Man ser et veldig godt eksempel på dette i virkningsgradskurven til Nexa Power Module fra Ballard, som er den mest brukte brenselcellemodulen blant deltakere i Shell Eco-marathon. I manualen til Nexa er det oppgitt en parasittisk last på minst 35W til kjølevifte, kompressor, reguleringsventiler og styring (4).



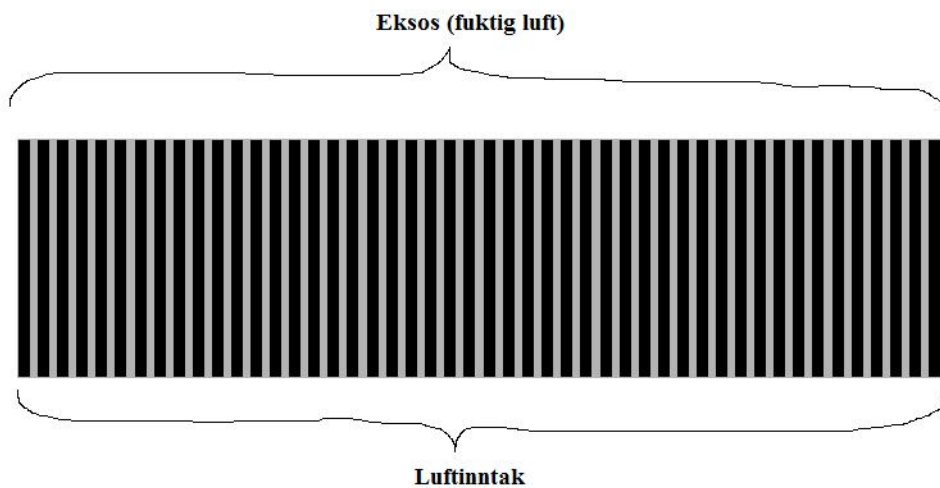
Figur 3.4: Virkningsgradskurve for Ballard Nexa Power Module (7)

Det ble satt et mål om å finne en stack som kunne fungere effektivt i det spesifiserte effektområdet med et minimum av støttekomponenter som, kjølevifte, luftfukting, luftkomprimering. I samarbeid med SINTEF og H2-Logic kom man fram til at det bare var en type stack som det var mulig å nå dette målet med, Ballard Mark1020.



Figur 3.5: Ballard Mark 1020, PEM brenselcelle stack. (6).

Denne stacken har en selvfuktende membran, som gjør at tilførselsluften ikke trenger å gå presses gjennom en fuktighetsutveksler med eksosen. Lufttilførselen trenger heller ikke å være trykksatt av en kompressor (6). Dette gjør at tilførselsluften ikke trenger et lukket system. Cellene i stacken er veldig flate og lange, med lufttilførselskanaler som går parallelt i høyderetningen, slik som illustrert i *Figur 3.6*.

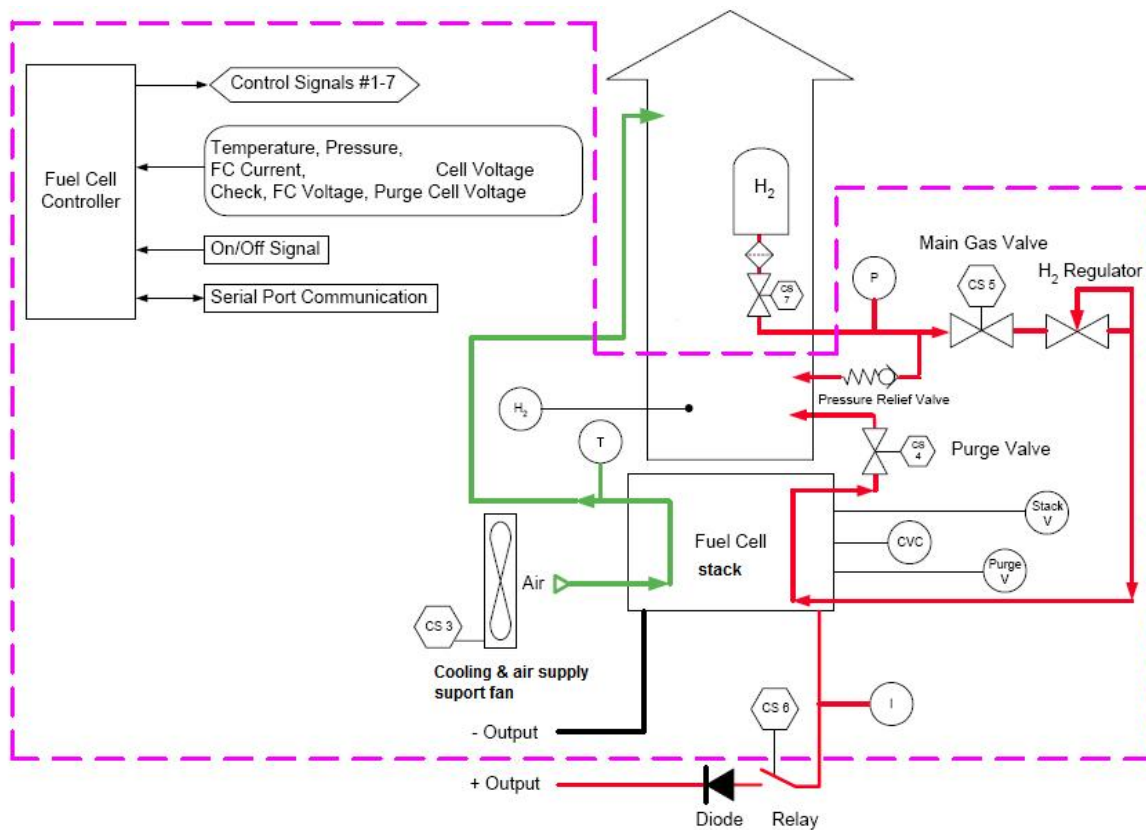


Figur 3.6: Illustrasjon av luftkanalene på cellene i Ballard Mark 1020.

Dette gir korte luftkanaler, med veldig lavt trykktap. Stacken får også et stort areal for kjøling og inntak av luft. Dersom denne stacken dimensjoneres med mange nok celler, vil kombinasjonen av det store overflatearealet og lavt trykktap i luftkanalene gjøre at

luftstrømmen som oppstår på grunn av varmeutvikling er nok til kjøling og tilførsel av frisk luft til prosessen. Dermed kan man få satt sammen et system nesten helt uten parasittisk last, og unngå knekken i virkningsgradskurven i som man har i *Figur 3.4: Virkningsgradskurve for Ballard Nexa Power Module* .

Mark1020 blir levert med en cellestørrelse, 103 x 351 mm (6), denne er gitt, men antall celler i serie kan fritt spesifisere selv. En enkelt celle har en nominell effekt på 42W (6), dette gir at man må ha minst 12 celler i stacken. Dersom man velger en stack som er så liten må man klare seg med ned mot 8V (6), spenning fra den. Både virkningsgrad, ønsket om passiv kjøling, og spenningskravet taler for å ha mange flere celler i stacken. Disse faktorene taler for å ha så mange celler som over hodet mulig, innenfor reglene for konkurransen som sier at spenningen ikke skal være over 48V noen steder i det elektriske systemet. En enkelt celle kan i teorien gi en spenning så vidt over 1V, det ble derfor bestemt å gå for 46 celler i stacken slik at man til en hver tid er under 48V på klemmene. En stack på denne størrelsen har en nominell effekt i overkant av 1900W. En stack på denne størrelsen burde klare seg uten aktiv kjøling eller lufttilførsel i de fleste lastområdene til bilen, men det fantes ingen konkrete data på at dette var mulig og det måtte derfor testes. Systemet i *Figur 3.2: Eksempel på et komplett brenselcellesystem* krymper da ned til dette:



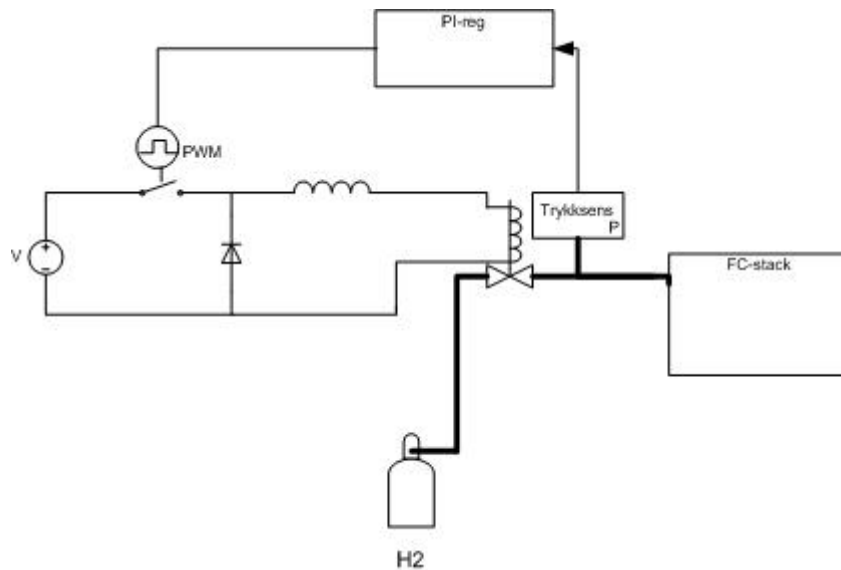
Figur 3.7: Prosessskisse for mulig system basert på Ballard Mark1020

3.2 Styrestrategi og krav til styresystem

Tidsperspektivet i dette prosjektet gjorde at alle løsninger måtte være så enkle som mulig. Den valgte brønselcellerstacken åpner muligheten for en veldig enkel styrestrategi. Ved normale belastninger trenger man bare å forsyne den med hydrogen i riktig trykk, så går resten av seg selv. I første omgang ble derfor det viktigste kravet til styresystemet, at det skulle holde hydrogentrykket i stacken i rett område. Det var ønskelig at trykket også kunne reguleres av styresystemet, slik at det kunne endres etter driftstilstand. En enkel styring for kjøle- og luftforsyningsvifte ble også planlagt.

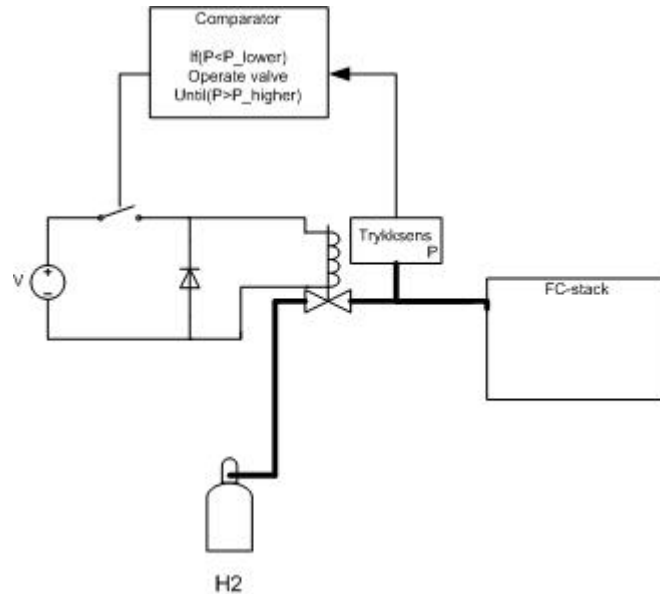
3.2.1 Regulering av hydrogentrykk

Hydrogenet kommer fra en flaske som har et trykk mellom 20 og 200 bar, dette trykket må reguleres ned til et passende nivå med en mekanisk trykkregulator. Videre finregulering av trykket bør gjøres med ventiler styrt gjennom styresystemet. Den mest vanlige måten å gjøre dette på er å bruke en analog proporsjonalventil. Denne åpner seg proporsjonalt med strømmen man forsyner den med. Et system med proporsjonalventil krever da en trykkmåling, og en regulator som gir strøm til ventilen.



Figur 3.8: Eksempel på styring av proporsjonalventil.

Dette gir veldig nøyaktig styring av trykket i stacken, dersom man klarer å stille inn regulatoren riktig. En enklere måte å styre trykket på, er å bruke en vanlig solenoideventil som man åpner helt når trykket i stacken går under en gitt nedre grense. Da holdes den åpen til trykket stiger over en gitt øvre grense. Dette blir en slags hysteresestyring, der man lar trykket variere mellom den øvre og nedre grensen



Figur 3.9: Eksempel på trykkregulering med vanlig solenoideventil

Denne reguleringsmetoden er ikke like nøyaktig som metoden med proporsjonalventil, men den er mye enklere å implementere og den er mindre følsom for støy i trykkmålingen. Sikkerhetsreglene for Shell Eco-marathon (7), pålegger alle å ha en solenoideventil rett etter flaskeregulatoren. Denne skal være av type normalt lukket og strømsløyfen til denne skal brytes av sikkerhetssystemet. Dersom man hadde valgt å bruke en proporsjonalventil, måtte denne ventilen kobles i serie med sikkerhetsventilen. Da må man ha to ventiler som må fungere stabilt sammen. Med hysteresestyring kan man bruke sikkerhetsventilen som reguleringsventil. Dette er det både enklere å implementere, det er mer robust, og det bruker mye mindre energi. Derfor ble solenoideventil med hysteresekontroll valgt.

3.2.2 Purgning av stack

Under vanlig drift av stacken diffunderer urenheter gjennom membranene til cellene, fra luftsiden til hydrogensiden. Disse urenheterne består for det meste av nitrogen og vann. Urenhetene gjør at spenningen og virkningsgraden på stacken går ned. Man kan skylle ut urenheterne med hydrogen. Dette gjøres ved at man har en ventil i enden av hydrogensystemet på stacken. Dersom man åpner denne sammen med inntaksventilen skylles det hydrogen gjennom stacken. Dette kalles å purge stacken. Akkumuleringen av urenheter er under vanlig drift avhengig av ladningen som stacken har generert, altså integralet av strømmen. For å være uavhengig av avlesning av målere, ble det valgt å se på hvordan spenningen utviklet seg dersom man kjørte simulert last på stacken, og finne etter hvor lang tid det var nødvendig å purge stacken. For så å programmere inn purge med fast tidsintervall i styringen.

3.2.3 Kjøle- og luftforsyningsvifte

Det var usikkert hvor vidt det var nødvendig med en vifte på stacken, og om det var kjølebehov eller behov for bedre luftstrømning som kom til å definere behovet. Planen her ble å lage en manifoil med vifte, og kjøre tester på lab for å kartlegge behov og eventuelle grenseverdier for drift av viften. Dersom behov for mer luft ble dimensjonerende, kom det trolig til å vises som et kraftig spenningsfall, så styrestrategien ble å starte viften ved lav spenning og høy temperatur.

3.2.4 Datalogging

For optimeringsformål ble det klart at det var behov for å logge ulike driftsparametre som, spenningsfordeling mellom cellene i stacken, systemspenning, strøm, hydrogentrykk og temperatur.

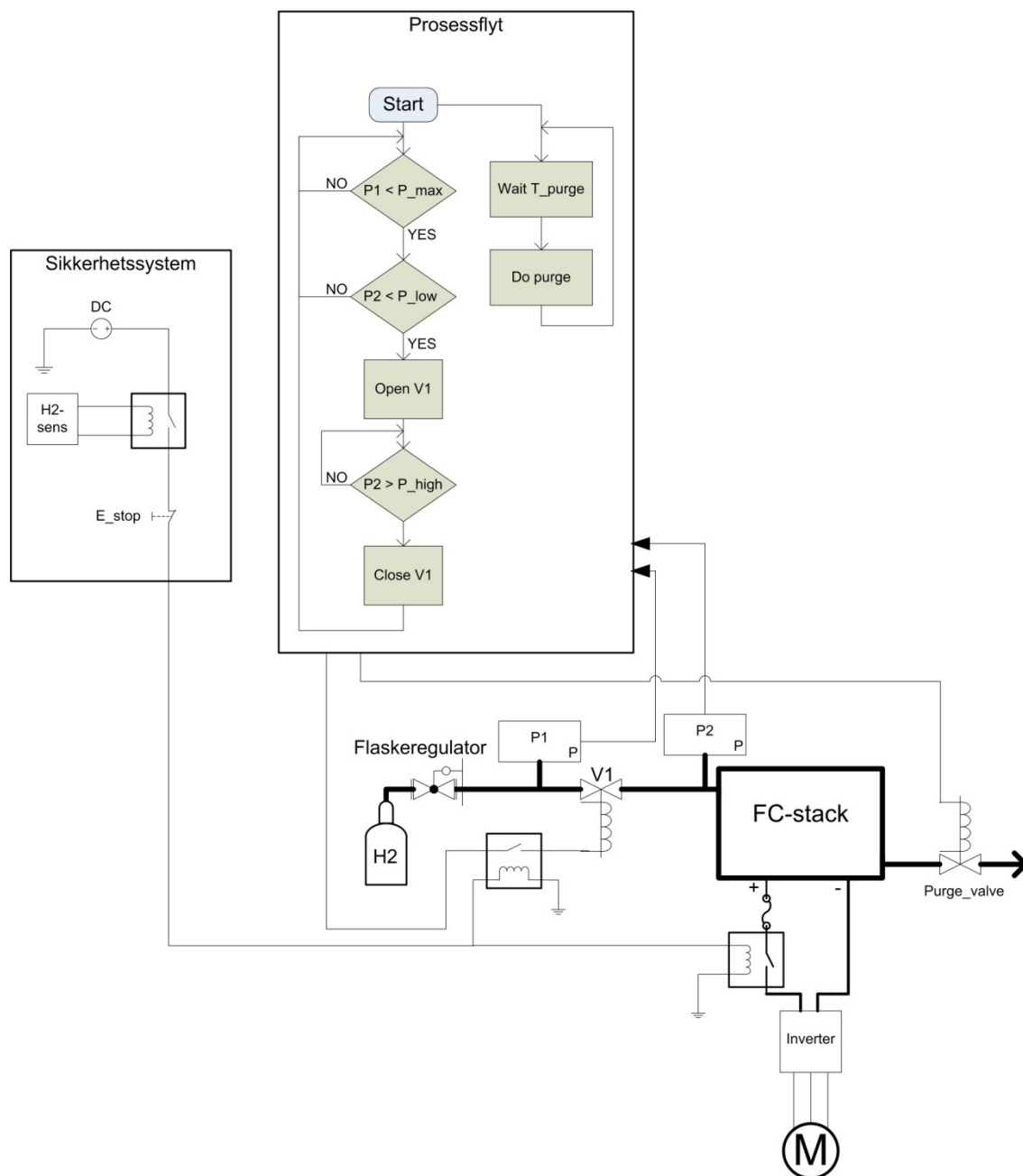
3.2.5 Sikkerhetssystem

Reglene for Shell Eco-marathon (7) setter følgende krav for sikkerhetssystemet til brenselcellesystemet:

- En nød-nedstengningsventil, normalt lukket solenoideventil, montert rett etter flaskeregulator. Stopper hydrogentilførsel ved nødstop.

- Et lastrelé, koblet mellom brenselcellestacken og motorsystem, type normalt åpen. Bryter strømmen til motor ved nødstop.
- En manuelt operert bryter og en sikring, koblet mellom motorsystem. For å manuelt skru av motor, og kortslutningsvern.
- En hydrogensensor som aktiverer nødstop ved en hydrogenkonsentrasjon lavere enn 25% av LEL (Lower Explosive Limit), dette tilsvarer en konsentrasjon på 10 000 ppm.
- En nødstop-knapp i cockpit.
- En utvendig nødstop-knapp, som også bryter kretsen til bilens batteri.
- Hydrogensensoren og bilens horn må forsynes av strøm fra bilens batteri, det er også lov å forsyne nød-nedstengningsventilen og lastrelé fra batteriet.
- Dersom man bruker plastslanger, må trykket i dem ikke overstige 0,5 bar

Disse reglene gir en grei retningslinje for hvordan brenselcellesystemet må implementeres i bilen, sett fra et sikkerhetsperspektiv. Det har også blitt vanlig å tøyne reglene litt og definere selve styreelektronikken som en del av sikkerhetssystemet, og derfor forsyne den også fra bilens batteri. Da får man holdt energiforbruket til hele styresystemet utenfor hydrogenregnskapet til bilen, unntatt kjølevifter og kompressorer, som må ta energien fra brenselcellestacken. Dette åpner for et system der man har kjøleviften som eneste parasittiske last på stacken.

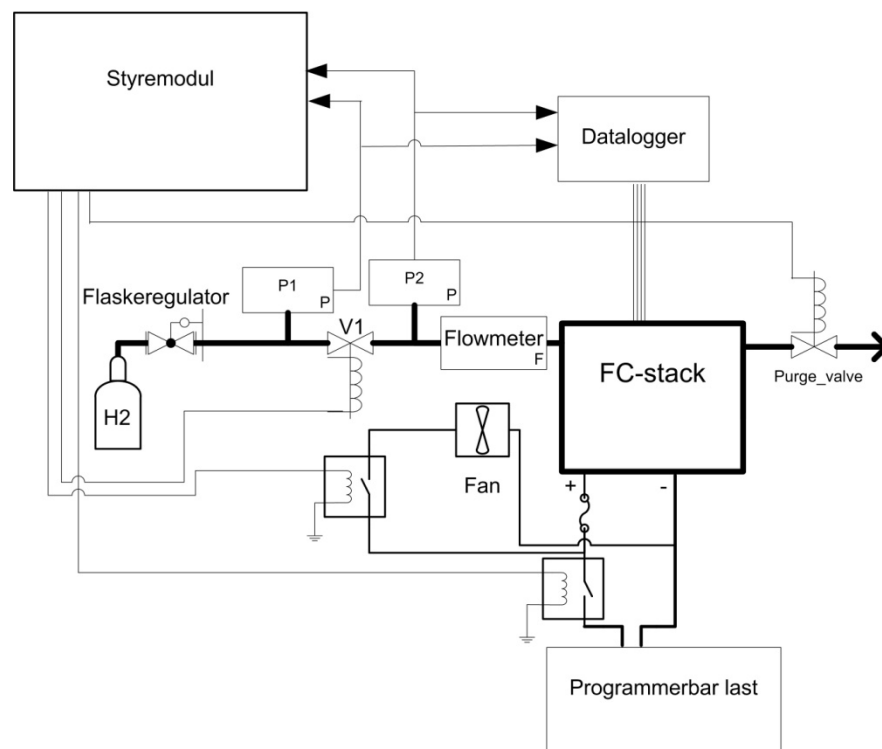


Figur 3.10: Skisse av systemet, uten luftforsyning og datalogging.

På figuren over er hele systemet, uten datalogging og kjøle- og luftforsyningsvifte skissert. Det er lagt til en trykkmåler, $P1$, mellom flaskeregulatoren og inntaksventilen, $V1$, for å overvåke trykket flaskeregulatoren gir, slik at det er mulig å beskytte stacken mot overtrykk. Sikkerhetssystemet er en egen enhet som er helt uavhengig av resten av prosessen, ved nødstop eller hydrogenlekkasje bryter det en krets som åpner lastreleet og et relé i kretsen til inntaksventilen, $V1$. Dette fører til at ved en nødstilstand, er det ikke mulig å sende inn mer hydrogen i systemet, eller trekke strøm til motoren.

3.3 System for labtest av brenselcellestack

Da brenselcellestacken ble levert, var testing på lab første prioritet. Det ble satt sammen et styre- og dataloggesystem, der loggesystemet var hovedsakelig basert på tilgjengelig labutstyr. Det ble også satt inn en programmerbar last i dette systemet, slik at lastprofilen til bilen kunne simuleres. Dette gjorde det mulig å få i gang labforsøk på stacken uten for mye tidsbruk på systemutvikling.



Figur 3.11: Skisse av labsystem

Figuren over viser hele systemoppsettet på laboratoriet. En gjennomgang av komponentene i dette systemet følger under.

3.3.1 Flaskeregulator



Figur 3.12: Flaskeregulator fra AGA

Det ble prøvd ut flere flaskeregulatorer, alle fra hydrogenlaben til SINTEF. Det endte til slutt opp med en regulator fra AGA, lik den på bildet. Detaljerte spesifikasjoner om den har det ikke vært mulig å oppdrive, da dette bare var en regulator som de bare ”hadde liggende”. Tester viste at den hadde veldig lite lekkasje og at den klarte å levere gassen på ønsket trykk, 0,5 bar, uten å drifte noe særlig over tid. De andre regulatorenne som ble testet hadde en tendens til å øke trykket over tid og noe lekkasje.

3.3.2 Trykksensorer

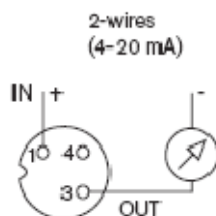


Figur 3.13: Bürkert Type 8314, trykksensor (9)

På grunn av størrelse, vekt og enkel implementering, ble Type 8314 fra Bürkert, valgt som trykksensorer, $P1$ og $P2$. De måler fra 0 til 4 bar, og er basert på en standard 4-20mA strømsløyfe, slik som mye annet industrielt prosessutstyr. Dette fungerer slik at man har 4mA som nullpunkt for målingen, og 20mA for høyeste målbare trykk. Strømmen fra sensoren er lineært avhengig av trykket i dette området. Man får da følgende uttrykk for det målte trykket:

$$P = (i - 4mA) * \frac{4bar}{16mA} \quad (1)$$

Trykksensorene bruker samme krets til både spenningsforsyning og strømsløyfe. Man setter spenning på en terminal, 8-33V, og jorder den andre, så måler man strømmen hvor som helst i kretsen.



Figur 3.14: Koblingskjerma for trykksensor (9)

3.3.3 Solenoideventiler



Figur 3.15: Bürkert Type 6011, solenoideventil

Solenoideventilene var det ønskelig å ha så små, raske, lette og energigjerrige som mulig, med standard ¼" rørtilkobling. Type 6011 fra Bürkert oppfylte disse kravene. Med en åpne-/lukketid på omtrent 10ms, vekt på bare 130gram og energiforbruk på 4W (8), var denne ideell for både inntaksventil og purgeventil. Ventilene ble levert med 24V DC-spole.

3.3.4 Flowmeter

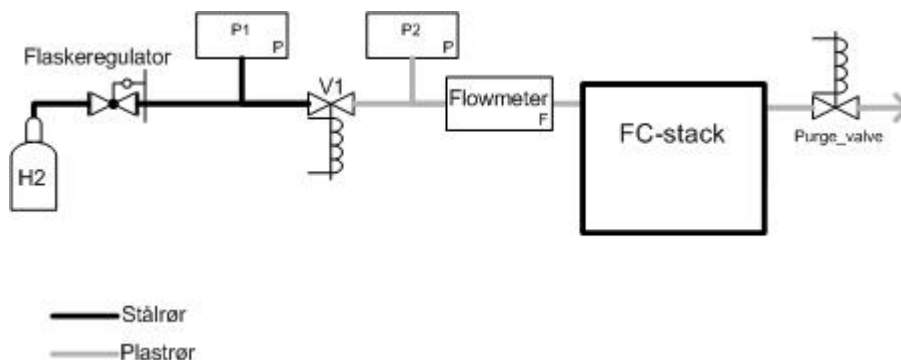


Figur 3.16: Vögtlin compact, flowmeter

Shell har pålagt alle å bruke et bestemt flowmeter under konkurransen, av typen *Vögtlin compact*. Dette ble også brukt på laben, sammen med måleutstyret til SINTEF som er fastmontert på hydrogenforsyningen på hydrogenlaben.

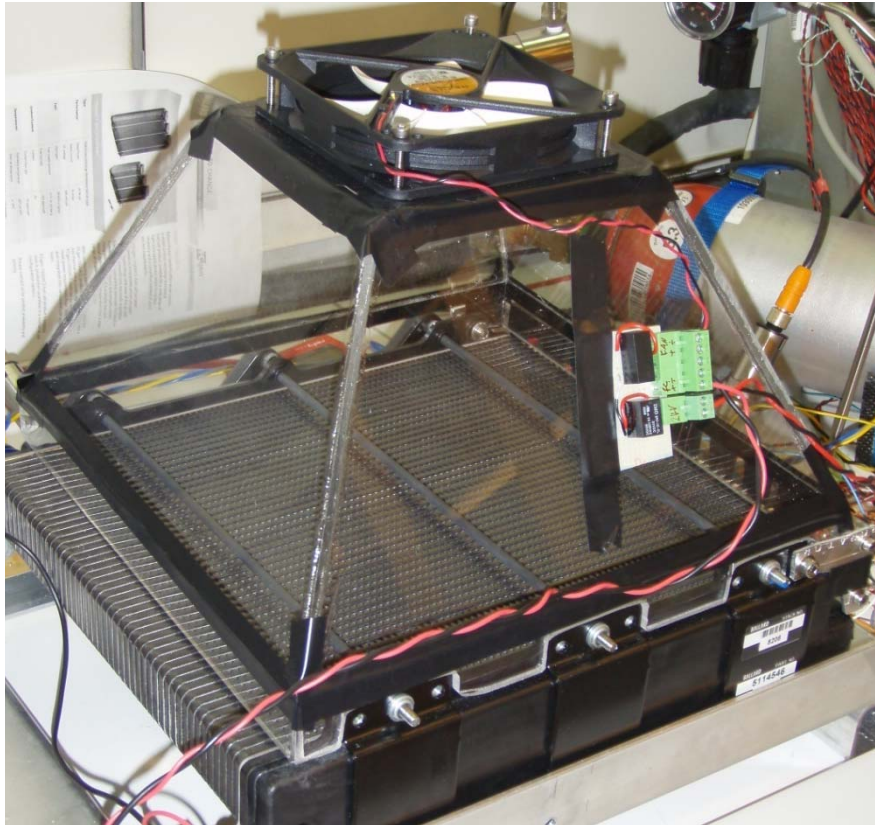
3.3.5 Rørsystem

Det ble brukt 1/4" stålrør mellom flaskeregulatoren og inntaksventilen. Trykksensor *P1*, ble koblet til på dette rørstrekket, rett før inntaksventilen, med en T-kobling. Brenselcellestacken var utstyrt med trykk-inn-koblinger for 8mm plastrør. Utgangen på inntaksventilen, en T-kobling for trykksensor *P2*, og koblingene på purgeventilen og flowmeteret ble også utstyrt med trykk-inn-koblinger, slik at man kunne bruke 8mm plastrør i resten av systemet. Dette viste seg å bli en veldig fleksibel og pålitelig løsning.



Figur 3.17: Skisse av rørsystem

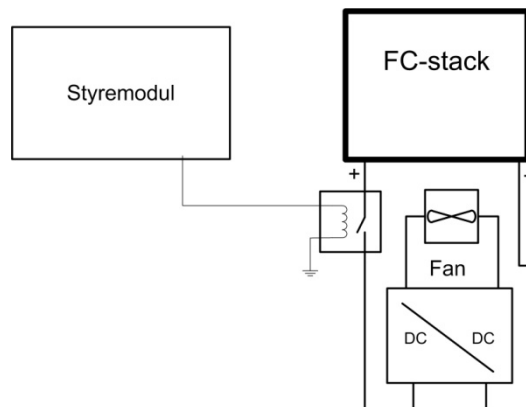
3.3.6 Kjøle- og luftforsyningsvifte



Figur 3.18: Bilde av manifoil med vifte, og enkel viftestyring

Det var usikkert i hvor stor grad man trengte aktiv kjøling og luftforsyning på stacken. Dette kunne man bare finne ut eksperimentelt. For å teste ut effekten av en vifte, ble det laget en manifoil av plexiglass til å sette over stacken. I toppen av denne ble det satt en 120mm børsteløs vifte på 1,8W. Denne ble koblet til strømterminalene på stacken, fordi reglene i Shell Eco-Marathon krever at kjølevifter drives av den. Viften var laget for 12V DC, en DC/DC omformer mellom stacken og viften sørget for å levere dette. Valg av DC/DC omformer til viften ble ganske vanskelig, da spenningen fra brenselcellestaken varierer over et område som ligger midt i mellom inngangsspenningen for omformere med nominell inngangsspenning på 24V og 48V. 24V-omformerne er laget for en inngangsspenning mellom 18V og 36V, og 48V-omformerne er laget for inngangsspenning fra 36V til 72V. Spenningen på brenselcellestaken varierer mellom 46V og 25V etter hvor tungt den er belastet. Spenningsfallet fra 46V til under 36V skjer ved relativt lav belastning, derfor ble det ansett som lite sannsynlig at det var behov for ekstra luft eller kjøling til stacken i dette området. En omformer med 24V nominell inngangsspenning, *XP POWER – IZ2412SA* ble derfor valgt.

Denne omformeren har en maksimalbelastning på 3W, og leverer 12V, med en inngangsspenning fra 18V til 36V (9). Omformeren har mulighet for å bli skrudd av ved å sende 5V på en av inngangspinnene. På grunn av at viften skulle være koblet direkte på strømterminalene til brenselcellestacken, ble det valgt å la omformeren kun være koblet til denne delen av systemet. Derfor ble det brukt et 24V relé, *IMO SRF-1C-SL* (10), til å slå av og på viften. Dette releet ble koblet opp til å være normalt åpent.



Figur 3.19: Skisse av viftestyring

3.3.7 Datalogger



Figur 3.20: Agilent 34970A, datalogger (13)

En *Agilent 34970* ble satt opp for å overvåke og logge spenningen over- og internt i stacken, kontrollmåle strømsløyferne til trykkmålerene, og lese av stackens temperatursensor. Denne var satt opp med to standard *34901A 20-Channel General-Purpose Multiplexer IO*-kort. Dette gav totalt 40 kanaler til spennings- og temperaturmålinger, og 4 kanaler til måling av strømsløyfer. 23 kanaler ble brukt til å måle spenningen over annenhver celle i stacken, 1

målte spenning over hele stacken, 1 kanal ble koblet til en termistor for tempepraturmåling av stack, og 2 strømkanaler ble brukt til å måle strømsløyvene til trykksensorene. Dataloggeren var utstyrt med RS232 og GPIB interface for styring fra PC.

3.3.8 Programmerbar last



Figur 3.21: TDI RBL488 Dynaload, programmerbar last.

En programmerbar last, *TDI RBL488 Dynaload*, ble satt opp for å belaste brenselcellene med ønsket belastning. Denne lasten kan settes opp til å holde konstant spenning, strøm eller effekt. Dynaload har GPIB interface for styring gjennom PC, gjennom denne kan man samle inn målinger, som spenning, strøm og effekt. PC-styring av lasten gjør at man kan belaste stacken med lastprofil for simulert løp.

3.3.9 Styremodul

For og ikke å bruke for mange ulike systemer til styringen, var det ønskelig at styremodulen kunne settes opp til å fungere uten resten av labutstyret. Målet var jo å lage et brenselcellesystem for en bil til slutt. Derfor måtte man finne en styremodul med nok innganger, slik at det var mulig å ha en viss overvåking av stacken i bilen også. For labtestene var det nok å ha to analoge innganger til trykkmålerne, og noen 24V utganger til å operere ventilene, lastrelé og viftestyringsrelé.



Figur 3.22: NI sbRIO-9642, styrekort

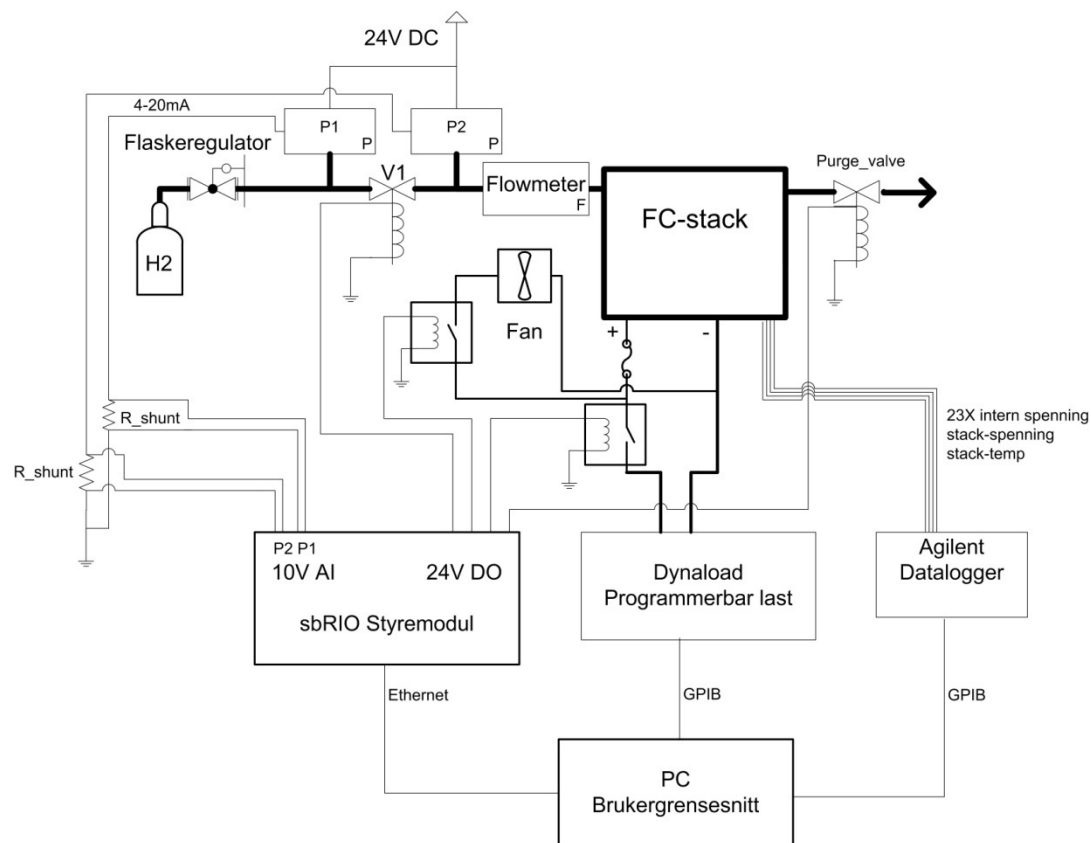
På grunn av tidligere erfaring med programmering i LabView, ble det naturlig å bruke en styremodul som var laget spesifikt for dette programmeringsspråket. National Instruments, som lager LabView, har et stort utvalg i hardware for dette formålet. Både utstyr for tilkobling til PC og moduler med integrerte kontrollere. Etter en del betraktninger om IO-porter, vekt og pris, ble *NI sbRIO-9642* valgt. Dette er et enkelt kretskort med 32 analoge innganger, 4 analoge utganger, 32 24V digitale inn- og utganger, og en hel bråte med 3,3V digitale inn- og utganger. De analoge inngangene kan settes opp til å gjøre 16 differensielle målinger, dette gjør det enklere å koble opp målinger med tanke på jording. De 24V digitale utgangene kan levere 250mA hver og kobles i parallell, dersom det er behov for mer strøm. Dermed kan ventiler og releer styres direkte fra kortet. IO-en på kortet blir styrt av en Xilinx Spartan-3 fpga, som også har kapasitet til å drive med en del databehandling, som digital filtrering, og styring og regulering. Det er også mulig å koble til C-series IO-kort fra National Instruments på fpga-en. For mer omfattende databehandling og logging, kan FPGA'en legge data i et delt minneområde til en integrert real-time datamaskin. Denne er basert på en 400 MHz Freescale real-time prosessor, som kjører VxWorks operativsystem. VHDL-kode til fpga-en blir compilert med utgangspunkt i LabView-kode, og real-time-maskinen har en egen programmodul som gjør det mulig å kjøre LabView-programmer direkte. Dermed kan hele styringen relativt enkelt og greit programmeres i LabView, uten at man trenger for mye detaljkunnskap om hvordan ting egentlig fungerer. Real-time-maskinen har både ethernet- og

RS232-tilkobling for generell kommunikasjon med andre enheter, opplasting av programmer og nedlasting av data.

3.3.10 Brukergrensesnitt

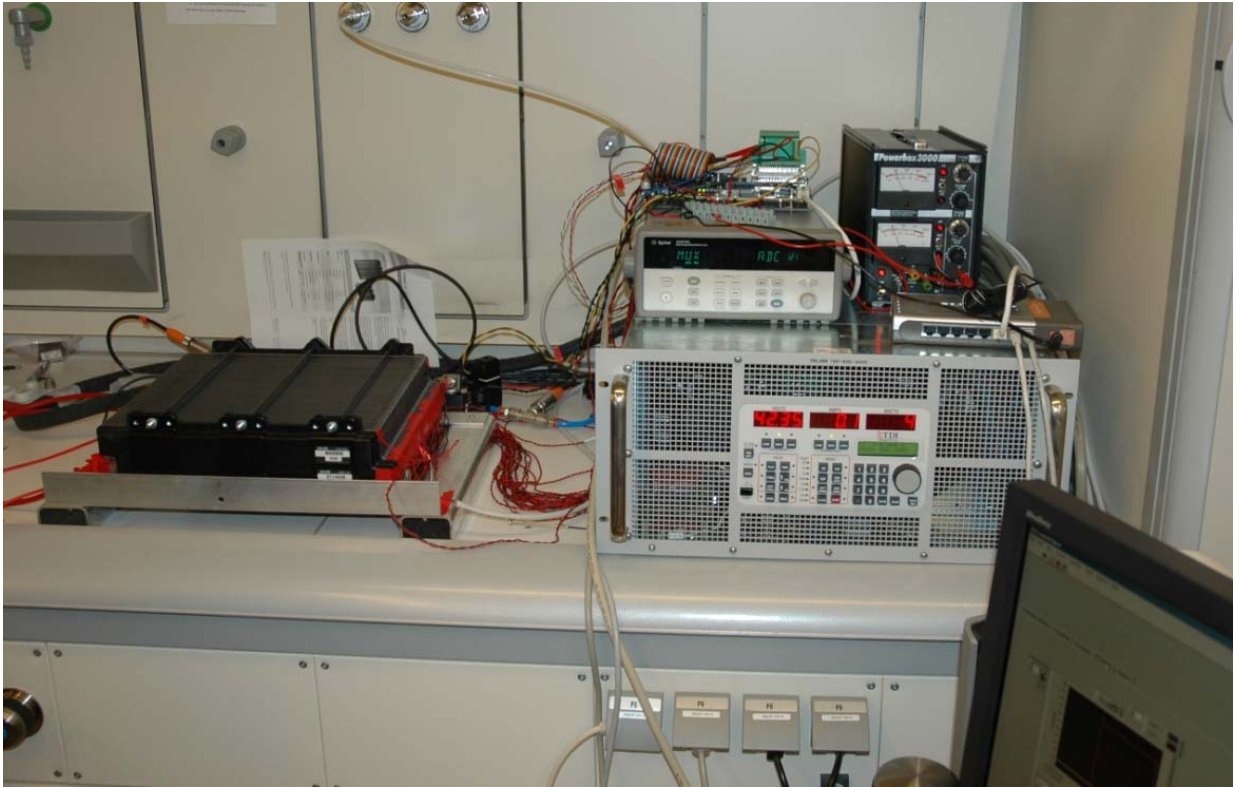
Det var ønskelig med et felles brukergrensesnitt for hele dette systemet, dette ble løst ved å koble sammen styremodul, datalogger og programmerbar last til en pc. I et LabView-program på PC ble det satt opp grensesnitt for styring og konfigurering av brenselcellestacken, dataloggeren og lasten. Dette programmet samlet også inn data fra, styrekort, datalogger og lasten, og lagret dette i et exceldokument.

3.3.11 Oppkobling av det elektriske systemet



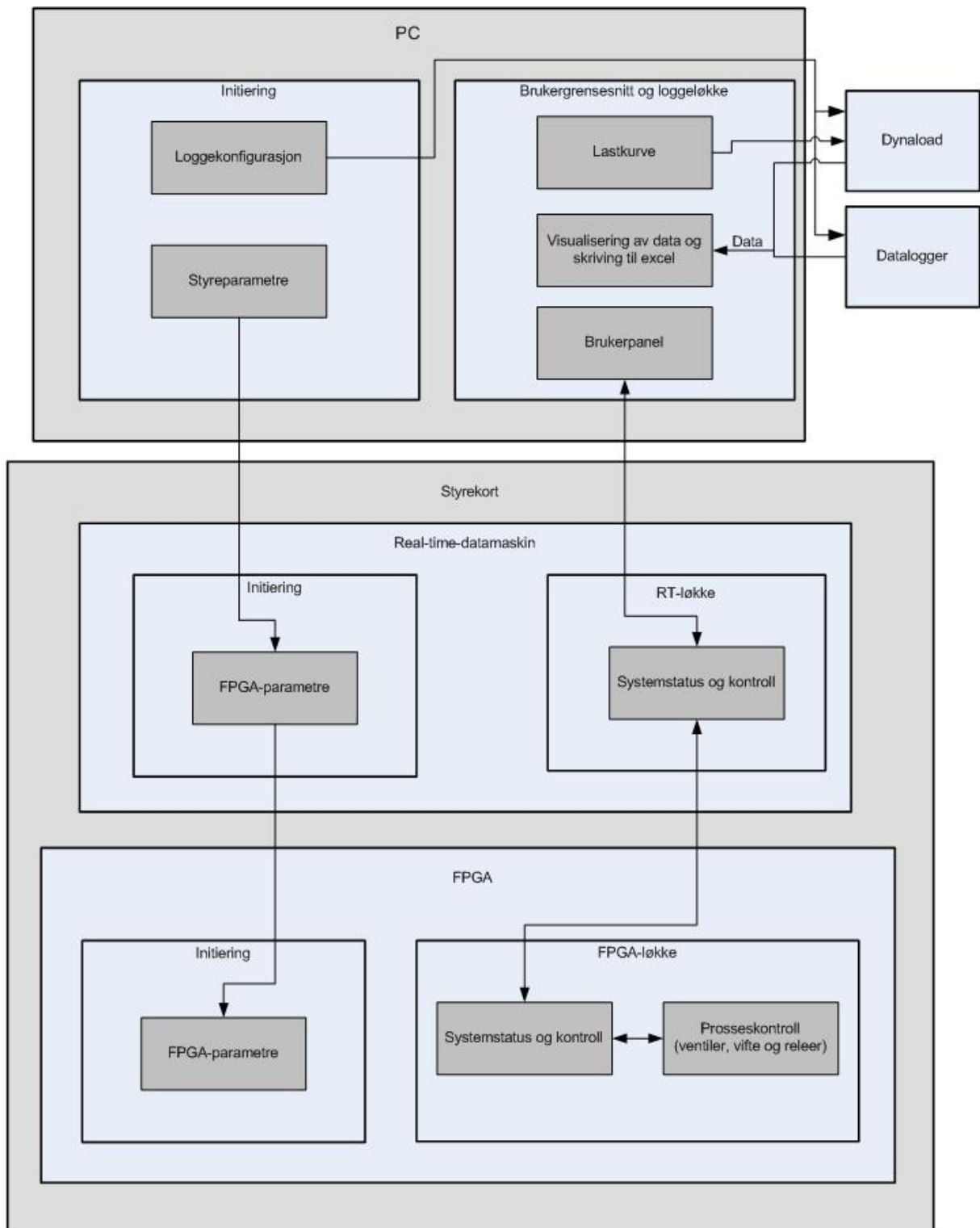
Figur 3.23: Skisse av labsystem, med alle deler.

Systemet ble koblet opp som vist på figuren over. Det ble brukt to shunt-motstander til å måle strømmen i strømsløyfene til trykkmålerne.



Figur 3.24: Bilde av laboppsett uten kjølevifte.

3.3.12 Programmering av systemet



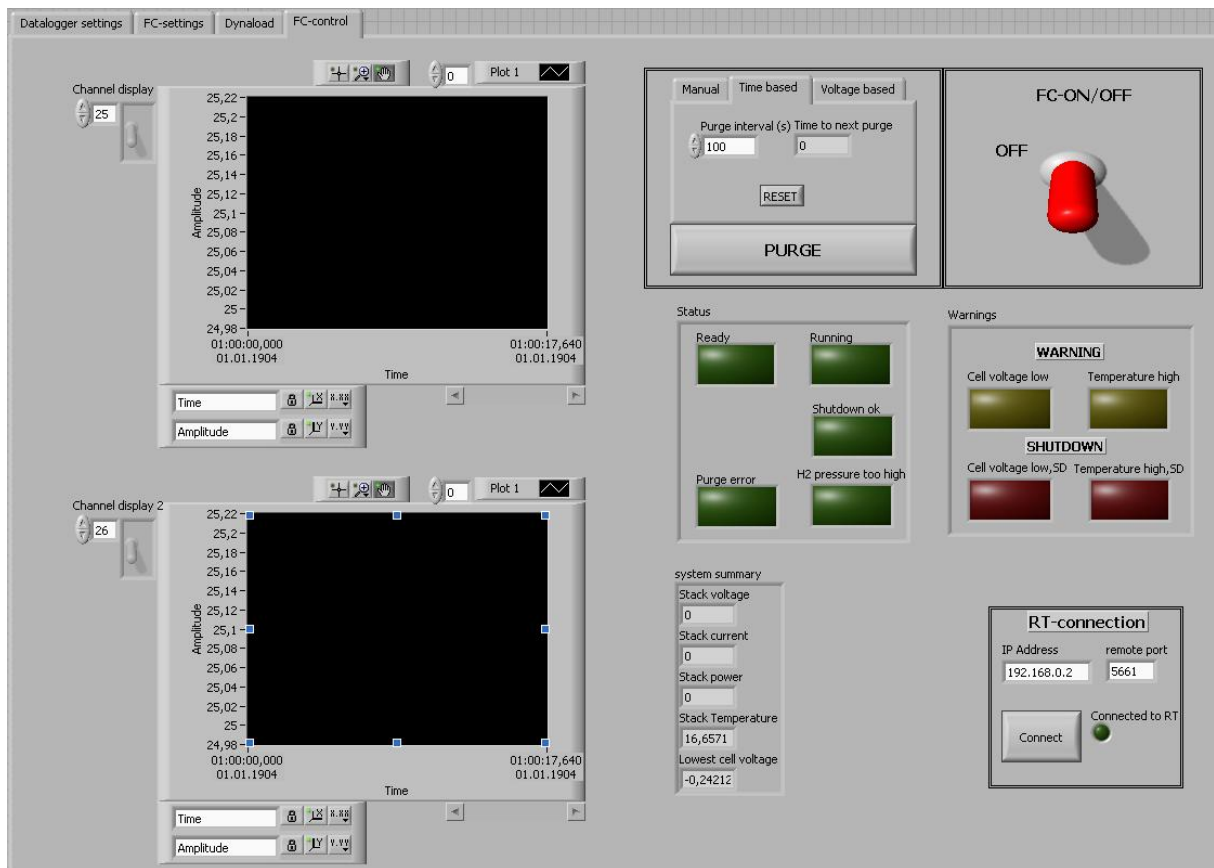
Figur 3.25: Softwarearkitektur for labtesting av stack

Figur 3.24 viser hvordan softwaren i systemet ble strukturert. Arbeidet ble strukturert slik at hver del ble programmert for seg, først FPGA, etterfulgt av real-time-datamaskin, og til slutt PC.

På FPGA-en ble flytdiagrammet i *Figur 3.10*: Skisse av systemet, uten luftforsyning og datalogging, implementert. Det ble så lagt til kontroll-logikk og en meget enkel viftestyring. Viftestyningen ble satt opp slik at viften starter dersom spenningen dropper under en satt grenseverdi, eller temperaturen kommer over en satt grenseverdi. Viften stopper igjen når spenningen stiger over grenseverdien, eller temperaturen synker under sin grenseverdi. Konfigurasjonsparametre og kontroll-logikken ble gjort tilgjengelig for real-time-datamaskinen, slik at konfigurasjonen kunne settes fra den og den kunne styre prosessen.

Real-time-datamaskinen ble programmert til å videreforme konfigurasjonsparametre fra PC til FPGA, starte FPGA-programmet, og sende kontrollsignaler mellom PC og FPGA. Kommunikasjonen mellom Real-time-maskinen og PC ble satt opp over ethernet, som TCP-tekststrenger. Når styrekortet ble slått på, startet programmet automatisk og ventet på oppkobling fra PC. Etter oppkoblingen var ok, stod real-time-maskinen standby til konfigurasjon og startsignal kom fra PC. Da ble konfigurasjonen videreført til FPGA, og FPGA-programmet startet.

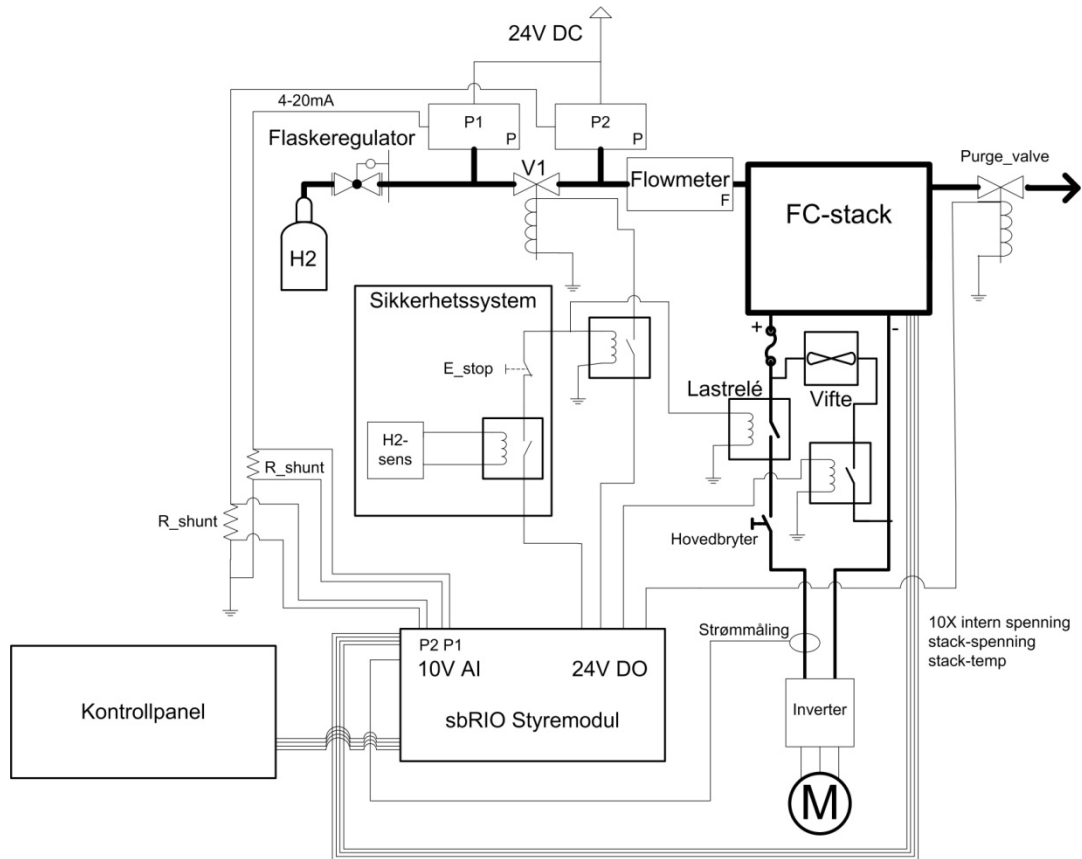
LabView-programmet på PC'en styrte hele systemet, der ble først konfigurasjon til datalogger og Dynaload satt, og datalogging startet. Stackspenning, 23 interne spenninger i stacken, og stacktemperatur ble hentet fra dataloggeren, samtidig som strøm og effekt ble lest ut av Dynaload-boksen. Programmet leste av disse verdiene med et forhåndsinnstilt tidsintervall, og skrev dem inn i et excel-dokument. Det ble også laget to grafvinduer i brukergrensesnittet, til å tegne opp valgte verdier i sanntid. Etter dataloggingen var startet, ble det opprettet kontakt med styrekortet over ethernet. Konfigurasjon til FPGA ble sendt etter kontakten var opprettet. Så ble statussignal mottatt fra FPGA, og systemet var klart til å bli startet. Alle kommandoer som for eksempel, start, stopp, purge, ble sendt over ethernet til real-time-datamaskinen, som igjen videreførte de til FPGA'en. På brukerpanelet ble det plassert et sammendrag av de viktigste måleparametre, advarselsindikatorer, statusindikatorer, purgekontroll og av/på knapp for brenselcellesystemet. Det ble også laget et eget panel for styring av Dynaload, slik at man kunne sette belastning i form av konstant strøm, konstant effekt eller effektdata fra en simuleringsmodell av bilen. LabView-prosjektet er lagt ved på CD i mappen *Labtest-software*.



Figur 3.26: Skjerm bilde av brukerpanelet til brenselcellesystemet

3.4 Implementering av brenselcellesystemet i bilen

Imens labtester ble gjennomført på brenselcellestaken, startet arbeidet med å implementere systemet i bilen. Planen for systemet i bilen, var å få kjørt brenselcellestaken med datalogging og brukergrensesnitt direkte på styrekortet. Til dette måtte det lages et grensesnitt mellom målingene og de analoge inngangene på styrekortet, og et kontrollpanel.

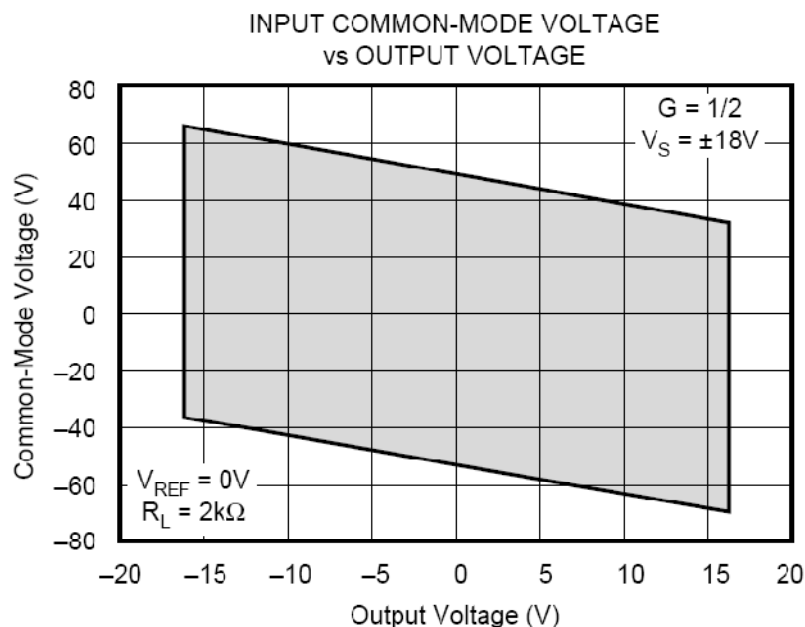


Figur 3.27: Kretstegning av brenselcellesystemet for bilen.

På figuren over er en komplett tegning over hvordan man så for seg at systemet ble. Det ble planlagt å legge mest mulig av tilkoblinger, deler for grensesnitt, og tilkobling til brukerpanel på ett kretskort. Dette kortet skulle så bli på avstandstykker over styrekortet.

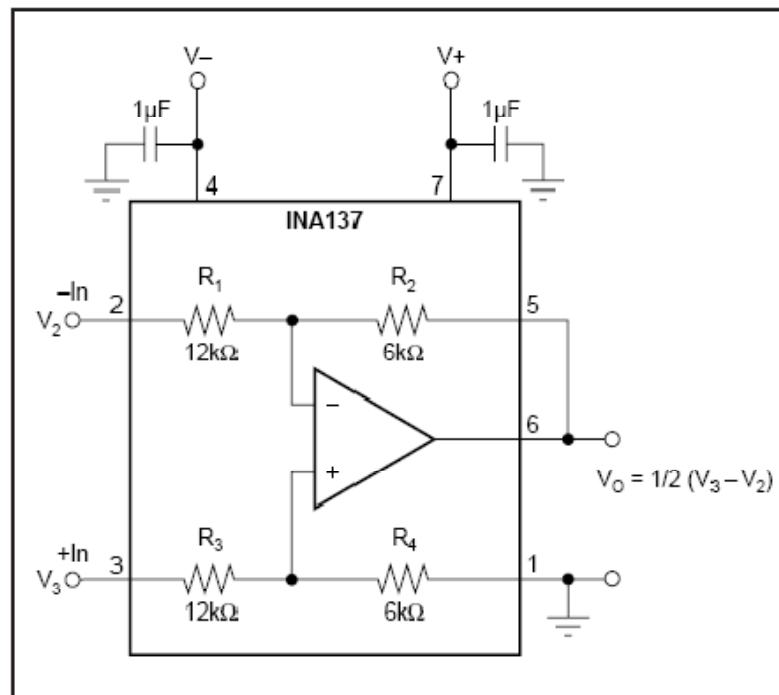
3.4.1 Måling av interne spenninger

De interne spenningene som skulle måles, var over grupper med 4 til 5 brenselceller i stacken. Dette førte til at man fikk målepunkter som fløyt opp mot 40V over jord. Dette er langt over det de analoge inngangene på styrekortet klarer å måle. De måler maks 10V over jord. Det betyr at selv om man bruker differensiell målemodus til å måle et signal på 5V som flyter 40V over jord, kommer målingen til å gå i metning. I tillegg er inngangene bare isolert til 24V. Spenningen man har mellom målingene og jord må isoleres fra styrekortet. Dette kan man gjøre med isolasjonsforsterkere med galvanisk skille, eller differensialforsterkere som kan motstå så høyt spenningspotensial. I dette systemet ble det valgt å bruke differensialforsterkere, på grunn av at det ikke er noen fare for store overspenninger som kan forplante seg til styrekortet, og at de er enklere å implementere. Isolasjonsforsterkere krever blant annet spenningsforsyninger på begge sider av sitt galvaniske skille. Det ble bestemt at differensialforsterkeren som ble valgt måtte tåle 60V flytende spenning på terminalene, slik at man hadde en viss sikkerhetsmargin. Utvalget av forsterkere som tåler dette er ganske begrenset, og de er relativt dyre. Etter en nøye analyse kom man fram til en relativt rimelig forsterker, som burde fungere tilfredsstillende, *Burr-Brown INA137*. Denne forsterkeren tåler 80V på inngangspinnene (11), og har følgende sammenheng mellom commonmode-spenning (hvor høyt over jord målepunktene ligger) og maksimal utgangsspenning.



Figur 3.28: INA137, sammenheng mellom common-mode-spenning og maksimal utgangsspenning (11)

Man ser av figuren at med 40V common-mode-spenning, kan man regne med å få maksimalt 5V ut fra forsterkeren. Dette betyr at forsterkeren må kobles slik at man har et inngangssignal som normalt ikke ville gitt mer enn 5V på utgangen. Stacken har 46 celler som skal fordeles over 9 målinger, dette gir at man får 8 målinger over 5 celler og en måling over 6 celler. Dersom man har målingen med 6 celler over den delen som kan få opp mot 40V i common-mode, betyr dette at man i teorien kan få 6V på inngangen til forsterkeren på denne målingen. I databladet til *INA137* (11), er det to grunnleggende måter å koble forsterkeren opp på. Den ene måten gir en forsterkning på 2 og den andre gir en forsterkning på 0,5. Oppkobling med en forsterkning på 0,5 gir en situasjon der man kan forvente maksimalt 3V på utgangen på 6-cellers-målingen, dette er innenfor grensene i *Figur 3.28: INA137*, sammenheng mellom common-mode-spenning og maksimal utgangsspenning . Derfor ble det valgt å koble forsterkerne slik.



Figur 3.29: INA137, koblet for en forsterkning på 0,5 (11)

INA137 trenger spenningsforsyning fra $\pm 4V$ til $\pm 18V$ (11). Dette betyr en negativ og en positiv spenningsforsyning med samme verdi innenfor grensen. Alle komponentene som var valgt så langt i styresystemet, var laget for strømforsyning på 24V. Det var derfor naturlig å finne en DC/DC omformer med 24 inngang og positiv og negativ utgang helst i nærheten av øvre grense for inngangsspenning til *INA137*. Forsterkerne skulle ikke drive noen last, så det

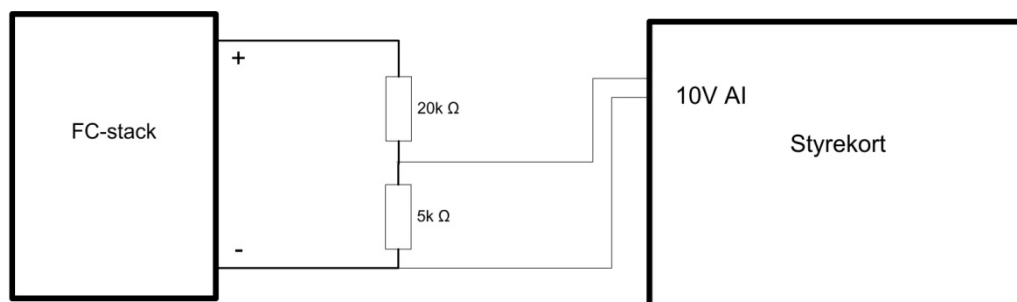
var forventet at de brukte veldig lite energi, men siden det var 9 av dem, ble det satt et krav til at spenningsforsyningen skulle klare å levere minst 10W. *TRACO POWER TEL 15-2423*, passet ideelt inn i denne spesifikasjonen. Den takler en inngangsspenning mellom 18V og 36V, har en negativ og en positiv utgang på 15V, og kan levere opp til 15W. Omformerer har alle induktanser og kapasitanser integrert, og kan derfor bare kobles rett til strømforsyningen om bord i bilen (12).



Figur 3.30: Bilde av TRACO POWER TEL15 serie DC/DC-omformer

3.4.2 Måling av spenning over brenselcellestacken

Spenningen over stacken kan komme opp mot 46V og er referert til jord. Denne kunne man enkelt og greit måle med en spenningsdeler med 1:5 spenningsdeling, slik:



Figur 3.31: Spenningsdeler for måling av spenning over brenselcellestack

Dette gir følgende sammenheng mellom spenningen over stack og spenningen på inngangen på styrekortet:

$$V_{\text{stack}} = \frac{25\text{k}\Omega}{5\text{k}\Omega} V_{\text{ai}} = 5V_{\text{ai}} \quad (2)$$

3.4.3 Måling av strøm gjennom brenselcellestack

Det var veldig viktig å ha eliminere enhver parasittisk last på brenselcellestacken, derfor var det helt uaktuelt å bruke en shuntmotstand til å måle strøm. Derfor ble det valgt å bruke en halleffektbasert strømtransducer. Disse finnes i to hovedvarianter med, utgangssignal i form av strøm, eller utgangssignal i form av spenning. Det har til felles at strømmen gjennom transducere er proporsjonalt med utgangssignalet. På grunn av at man allerede hadde mulighet til å måle spenning med inngangene på styrekortet ble det valgt å bruke en transducer som gav et spenningssignal. Disse kommer igjen i to varianter der nullpunktet er referert til, 0V utgangssignal, eller en spenning midt mellom 0V og maksimal utgangsspenning. Den varianten som er referert til 0V må forsynes med både positiv og negativ spenning, som forsterkerne tidligere beskrevet, den gir et negativt utgangssignal når strømmen er negativ. Dett gjør at man må ha mulighet til å måle negativ spenning. Varianten som referer nullpunktet til en positiv spenning mellom 0V og maksimal utgangsspenning, klarer seg med en vanlig positiv spenningsforsyning, og den har et utgangssignal under referansen når strømmen er negativ. Den siste varianten ble foretrukket, da denne klarte seg med enklere spenningsforsyning og måling. Strømmen som skulle måles var opp imot 35A, men den transducere med spenningssignal som var nærmest dette, *LEM HAIS 50-P*, hadde et måleområde på $\pm 150A$ (13).



Figur 3.32: Bilde av en strømtransducer i LEM HAIS-serien (13).

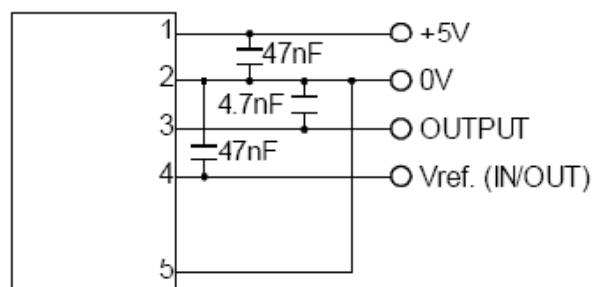
Det kan sees på bildet over at åpningen for ledere man vil måle strømmen i, er ganske bred. Dette gjør det mulig å putte ledningen gjennom, i en løkke rundt og gjennom ennå en gang. Da blir målingene som om strømmen var dobbelt så høy, slik at 35A blir målt som 70A. Sammenhengen mellom strøm gjennom transducer og utgangssignal er oppgitt til (13):

$$I = \frac{V_{out} - 2,5V}{0,0125} \quad (3)$$

Dette gjelder når lederen går en runde gjennom transduceren, dersom den går to runder slik som det var planlagt blir det:

$$2I = \frac{(V_{out} - 2,5V)}{0,0125} \xrightarrow{gir} I = \frac{V_{out} - 2,5V}{0,025} \quad (4)$$

Dette betyr at 1A gir 25mV spenningsforskjell på utgangen til transduceren. Det var mulig å stille inn oppløsningen på styrekortets innganger høy nok til at det var mulig å måle så små spenningsforskjeller. Likevel, på grunn av det trolig ble litt støy fra motorstyringen i bilen, var det ikke noe særlig håp om at denne transduceren kom til å fungere som et presisjonsinstrument.



Figur 3.33: Koblingsskjema for LEM HAIS strømtransducer (13)

På figuren over ser man at strømtransduceren bør ha noen dekoblingskondensatorer på spenningsforsyning og utganger. Den har også en egen pinne som gir ut spenningsreferansen til utgangen. Dette gjør at man ved å ta en differensiell måling mellom utgangs- og referansepinne, kan måle utgangen referert til referansen. Transducerens strømforbruk er relativt lavt, 22mA (13), det ble derfor valgt å bruke en LM 7805 lineær spenningsregulator til å omforme 24V fra bilens hovedstrømsystem til 5V.

3.4.4 Måling av hydrogentrykk og styring av ventiler

Disse var allerede koblet til styrekortet under labtosten. Det ble valgt å fortsatt bruke det samme oppsettet, med ventiler styrt direkte fra 24V IO på styrekort, og shuntmotstander for å måle strømmen i 4-20mA loopene fra trykksensorene. Disse motstandene var på 56,4 Ω , som gav en spenning mellom 0,2V og 1,1V til inngangene på styrekortet. På *Figur 3.27*: Kretstegning av brenselcellesystemet for bilen. ser man at strømkretsen til inntaksventilen, *VI*, går gjennom et relé. Dette releet er normalt åpent og det forsynes av strøm fra sikkerhetskretsen, slik at kretsen til *VI* brytes, og *VI* ikke kan åpnes, dersom nødstopp blir aktivert eller hydrogensensoren tripper. Releet som brukes til dette er av samme type som brukes på viftestylingen, *IMO SRF-1C-SL* (10).

3.4.5 Måling av temperatur

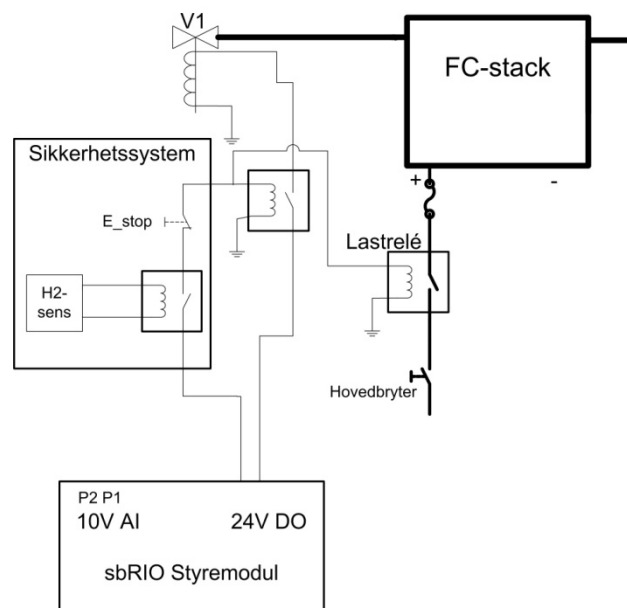
Det ble montert 4 termoelementer for å måle temperaturer i ulike soner av stacken. Disse elementene skulle brukes istedenfor termistoren som var montert på stacken da den ble levert. Termoelementene var helt vanlige elementer av *type k*. Et IO-kort for termoelementer ble brukt til å lese av disse, *NI 9211* (14).



Figur 3.34: Bilde av NI 9211 IO-kort.

3.4.6 Sikkerhetssystem

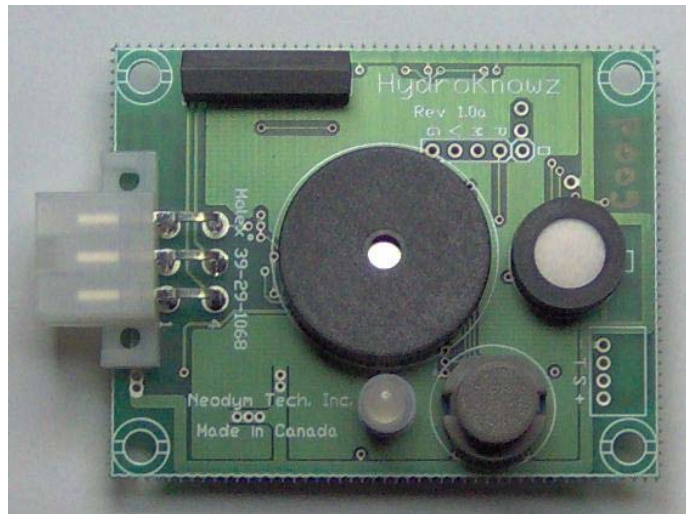
Ryggmargen i sikkerhetssystemet er en krets som leder strøm til lastreleet og releet til hydrogeninntaksventilen, *V1*. Dersom denne kretsen blir brutt, åpnes lastreleet og releet i kretsen til *V1*, slik at lasten blir koblet fra stacken og det ikke blir mulig å slippe inn mer hydrogen i rørsystemet. Sikkerhetskretsen ble forsynt fra en 24V utgang på styrekortet, og den kunne brytes av, nødstopp hos operatør, hydrogensensoren ved for høy hydrogenkonsentrasjon i motorrom, eller software i styrekort ved å slå av utgangen som forsyner sikkerhetskretsen med strøm.



Figur 3.35: Skisse av sikkerhetssystemet

Hydrogensensor

Hydrogensensoren må være plassert på det høyeste punktet i motorrommet. Den må trippe før 25% av laveste eksplosjonsgrense for hydrogen, dette tilsvarer 10 000 ppm. Når sensoren tripper, skal den stoppe hydrogentilførselen til stacken, og åpne lastreleet. Dette ble gjort ved å velge en hydrogensensor med et innebygget relé som var normalt åpent. Dette releet ble holdt lukket av sensoren når den var slått på og hydrogenkonsentrasjonen var under grensen for trip. Sikkerhetskretsen ble koblet gjennom dette releet, slik at trip for høy hydrogenkonsentrasjon kobler ut kretsen på samme måte som aktivering av nødstopp. *HydroKnowz* fra *Neodym Technologies* (15) ble brukt til dette. Den ble bestilt med et tripnivå på 8000 ppm, og med relékonfigurasjonen beskrevet ovenfor.



Figur 3.36: Bilde av HydroKnowz hydrogensensor.

Lastrelé

Lastreleet var av samme type som ble brukt i fjor (16).

Sikring

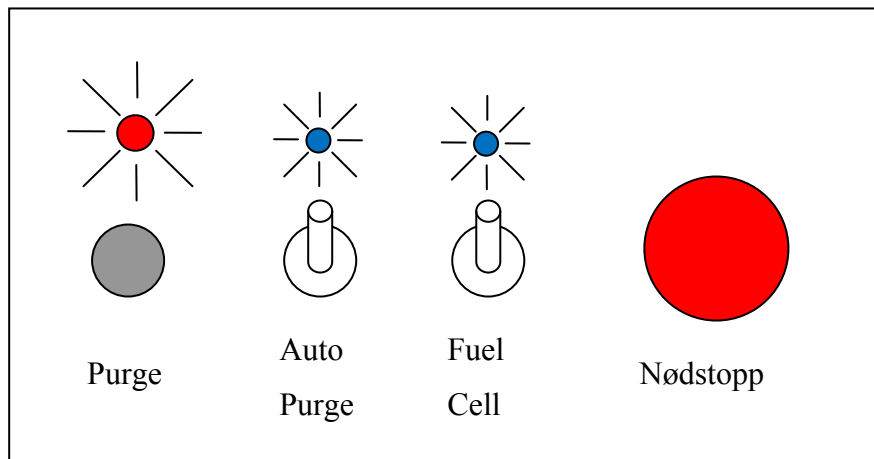
Brenselcellestacken er konstruert for å levere opp imot 87A. Under vanlig operasjon i bilen ble det beregnet at strømmen aldri kom til å komme over 30A. Det ble derfor konkludert med at en 60A smeltesikring var tilstrekkelig som hovedvern. Da var man garantert at sikringen holdt under selv de høyeste belastningene man kunne få i bilen, og at den gikk ved kortslutning.

3.4.7 Viftestyring

Den samme viftestyringen som ble laget til testing på lab ble brukt i bilen. Full beskrivelse av denne finner man i *kapittel 3.3.6.3.3.6*

3.4.8 Kontrollpanel

Det var nødvendig med et enkelt kontrollpanel for å skru av og på stacken, velge purgemodus og purge stacken manuelt. Statusindikatorer ble også lagt til slik at fører fikk beskjed om stacken opererte normalt, eller om man hadde en feiltilstand. Nødstoppen til stacken ble også lagt på dette kontrollpanelet.



Figur 3.37: Tegning av kontrollpanelet til brenselcellesystemet

På figuren over ser man layouten på kontrollpanelet. To vippebrytere ble brukt til å slå av og på stacken og autopurge, og en trykk-knapp for å manuelt purge stacken. Disse knappene ble forsynt med 24V, og var koblet til hver sin 24V digital inngang på styrekortet. Det ble brukt vanlige lysdioder til indikatorer, to blå og en rød. Disse ble plassert rett over hver sin bryter, som vist på tegningen over. Indikatorerne viser driftstilstand og systemstatus. Indikatoren over av/på-bryteren viser om systemet er i drift eller ikke, den over autopurge viser om autopurge er aktivert, og indikatoren over knappen for manuell purge blinker dersom det er nødvendig å purge stacken. Det ble også laget ulike blinkesekvenser for å indikere feiltilstander. Indikatorlysdiodene ble koblet til hver sin 24V digitalutgang på styrekortet med en motstand i serie. Verdiene på seriemotstandene til lysdiodene ble regnet ut slik:

$$R = \frac{V_{kilde} - V_{diode}}{I_{diode}} \quad (5)$$

Der V_{kilde} er spenningen fra kilden som forsyner lysdioden, V_{diode} er spenningsfallet over dioden, og I_{diode} er merkestrømmen til dioden. Effektforbruket, og dermed varmeproduksjonen i seriemotstanden kan uttrykkes slik:

$$P_{motstand} = (V_{kilde} - V_{diode}) * I_{diode} \quad (6)$$

V_{diode} og I_{diode} er faste parametre, for de to blå lysdiodene er disse omtrent 3V og 20mA. Dette gir følgende energitap i seriemotstanden:

$$P_{motstand} = (V_{kilde} - 3V) * 20mA \quad (7)$$

Med 24V kilde, som man har i dette tilfellet får man en effekt i overkant av 0,4W i motstanden. Dette i seg selv er ikke et ekstremt stort energitap, men denne varmeproduksjonen gjør at motstanden må dimensjoneres for 1W for å ikke bli alt for varm. Hvis man hadde brukt en kilde på 5V ville effekten i motstaden blitt 0,04W, 10% av tilfellet med 24V kilde.

Det er mulig å få ned gjennomsnittspenningen fra digitalutgangene ved å pulsviddemodulere dem. Dermed kunne seriemotstandene dimensjoneres som om man hadde en 5V forsyning. Uttrykket for gjennomsnittsspenningen som en funksjon av pulsviddemoduleringens duty cycle er som følgende:

$$\bar{V}_{ut} = 24V * d \quad (8)$$

Dette gir en duty cycle på rundt 20% for en gjennomsnittsspenning på 5V.

Knappene og indikatorene ble koblet sammen til en 9-pinnere D-sub kontakt for tilkobling til styrekortet i motorrommet.

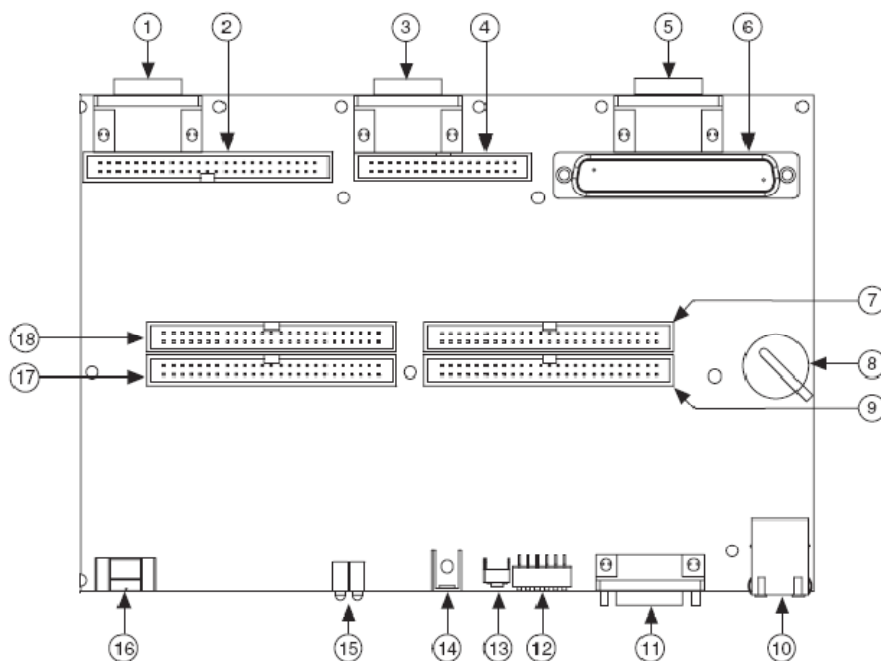
Nødstopknappen ble også plassert på kontrollpanelet i cockpiten, denne ble koblet til sikkerhetskretsen i en ledning separert fra resten av kontrollsignalene.



Figur 3.38: Bilde av kontrollpanel

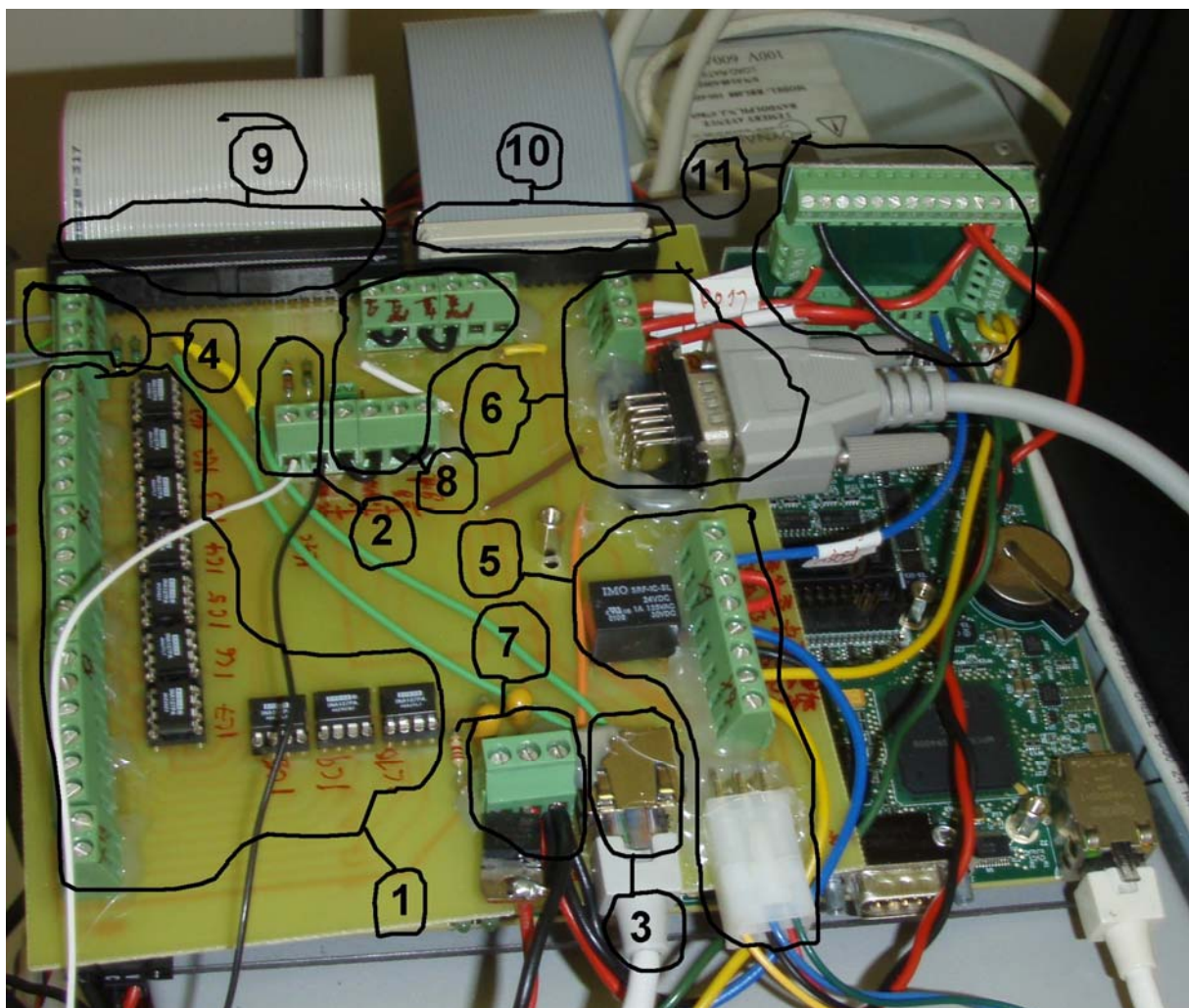
3.4.9 Grensesnitt mot styrekort

Det måtte lages et kretskort for å koble målinger og styresignaler til styrekortet. De analoge inngangene og 24V digitale inngangene på styrekortet bruker henholdsvis 50- og 34-pins flatkabelkontakt, og de 24V digitale utgangene kobles til med 37-pins D-sub kontakt.



Figur 3.39: Tilkoblingene på styrekortet, kontakt 2,4 og 6 er henholdsvis, analog inngang, 24V digital inngang, og 24V digital utgang. (19)

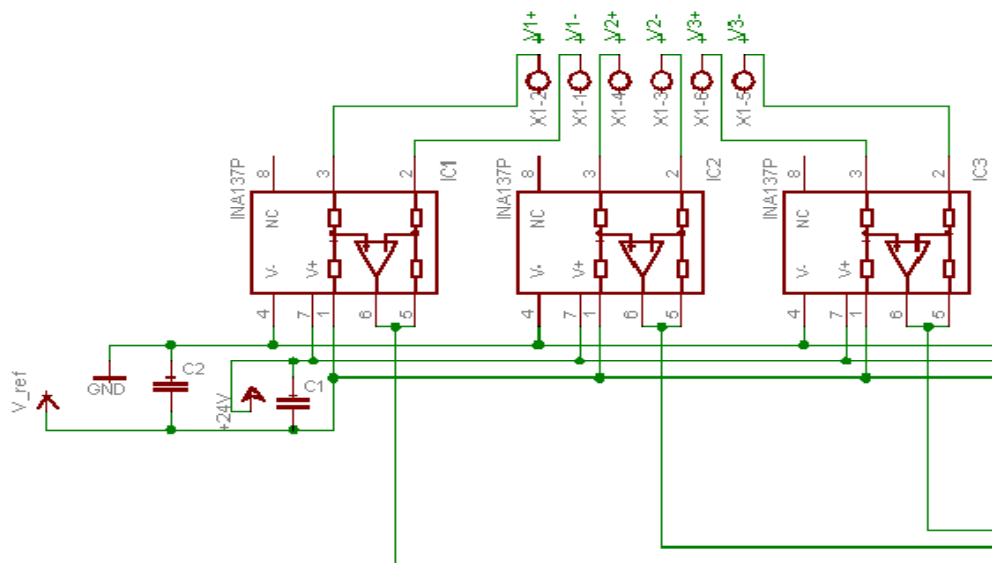
Arbeidet med kretskortet for grensesnittet til styrekort, ble startet med tilkobling av analoge målinger. Dette inkluderer shunt-resistorer for trykkmåling, differensialforsterkere til interne spenningsmålinger på stacken, og spenningsdeler for måling av spenning over hele stacken. Strømforsyning og inngang til strømtransducer ble ordnet. Deretter ble sikkerhetskretsen lagt på, inkludert tilkobling og strømforsyning til hydrogensensor, og tilkobling til nødstopppknapp. Til slutt ble tilkoblingen til kontrollpanelet designet. Alt ble designet på samme kretskort i *CadSoft EAGLE*, der ble først kretsskjema tegnet. Så ble utlegg på kretskort designet og skrevet ut på folie. Kretskort ble etset og borret, og til slutt ble komponenter loddet på. Det resulterende kretskortet ser man på bildet under, fullstendig kretsskjema og utlegg finner man i mappen *grensesnittskort* på vedlagte CD.



Figur 3.40: Bilde av grensesnittskort.

På *figur 3.40* er enkeltmodulene på grensesnittkortet markert og nummerert i den rekkefølgen de har blitt presentert tidligere i *kapittel 3.4*. Her følger en presentasjon av hvordan de ble implementert på kretskortet.

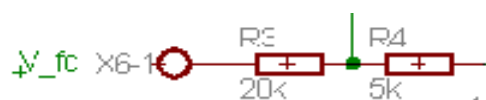
1. Måling av interne spenninger



Figur 3.41: EAGLE-kretsskjema for 3 av 9 interne spenningsmålinger

De interne spenningsmålingene ble implementert som beskrevet i *kapittel 3.4.1*. Det ble først forsøkt å forsyne forsterkerne med en spenningsdeler som tok inn 24V, midtpunktet i deleren ble da brukt som referanse, slik at man fikk -12V til jord og +12V til 24V. Analoginngangene på styrekortet taklet dette veldig dårlig, derfor ble dette gjort om etter kortet var ferdig, slik at forsterkerne kunne få -15V og +15V fra i forhold til jord isteden.

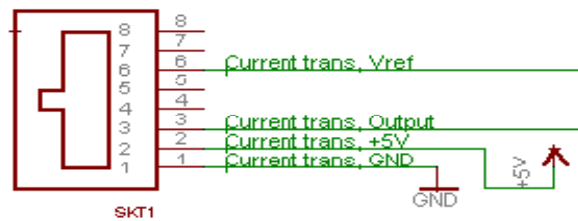
2. Måling av spenning over brenselcellestack



Figur 3.42: EAGLE-kretsskjema av spenningsdeler

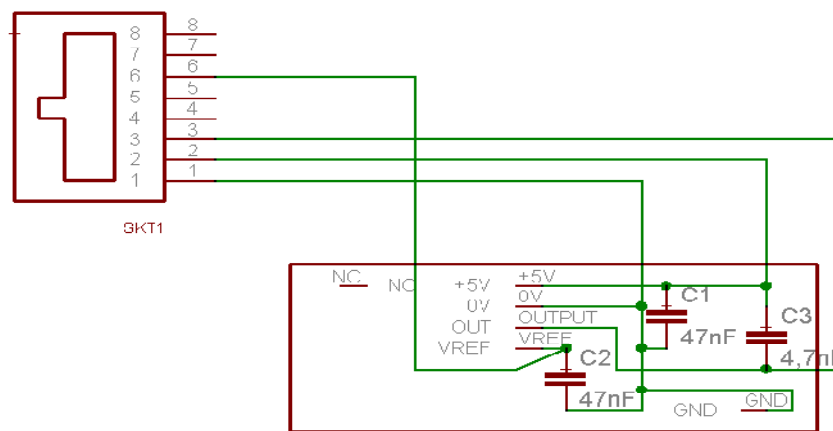
Spenningsdeleren ble implementert som beskrevet i *kapittel 3.4.2*.

3. Måling av brenselcellestrom



Figur 3.43: EAGLE-kretsskjema for tilkobling av strømtransducer

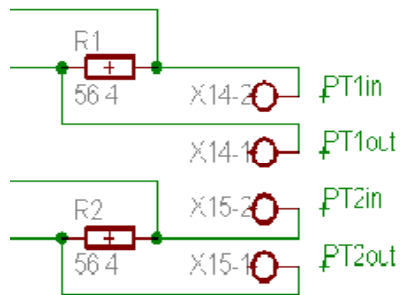
Strømtransducere ble koblet til grensesnittskretskortet med en RJ45-plugg. Dette ble valgt fordi strømtransducere måtte plasseres på kabelen mellom stacken og motorstyring, et lite stykke unna styrekortet. Ved å bruke en skjermet twisted pair nettverkscabel til å koble transducere sammen med grensesnittkortet, håpet man at det skulle bli mindre støy på målesignalet. Et av parene i kabelen ble brukt til å forsyne transducere med 5V og et annet par ble brukt til målesignal fra transducere. Det ble laget et kretskort til transducere, med tilsvarende tilkobling for nettverkscabel.



Figur 3.44: EAGLE-kretsskjema for strømtransducer

Kretskortet til strømtransducere ble designet i henhold til *Figur 3.33*: Koblingskjema for LEM HAIS strømtransducer, med RJ45-plugg på terminalene. Utlegget for kretskortet finner man i på vedlagte CD i mappen *current trasducer*.

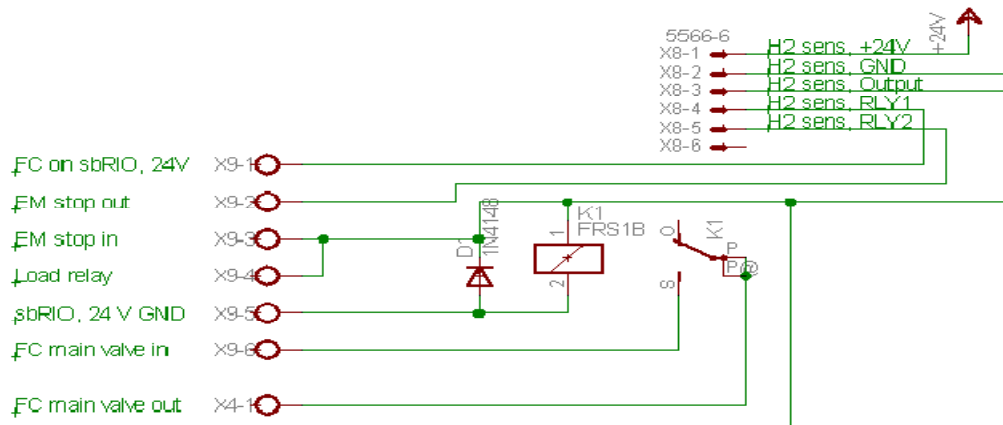
4. Måling av hydrogentrykk



Figur 3.45: EAGLE-kretsskjema av tilkoblingen for trykkmåling

Målingen av 4-20mA-signalet fra trykkmålerne ble implementert med shuntresistanser som beskrevet i *kapittel 3.4.4*.

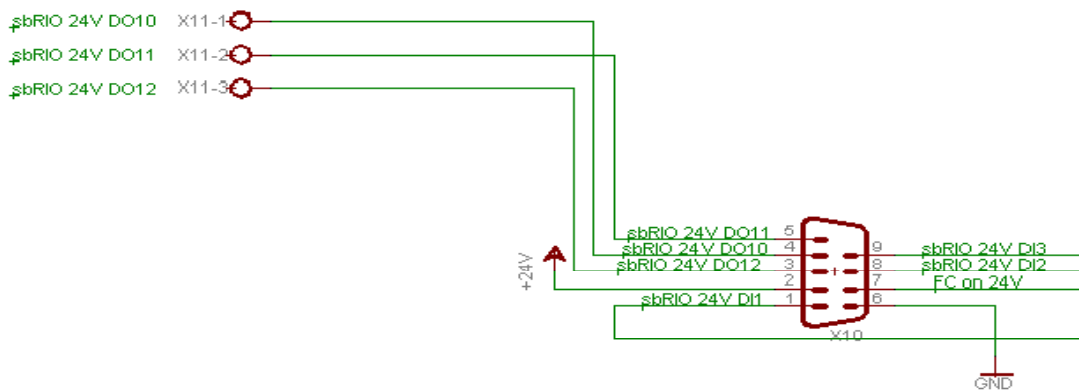
5. Sikkerhetssystem



Figur 3.46: EAGLE-kretsskjema av tilkobling til sikkerhetssystem

Sikkerhetssystemet ble implementert i henhold til *Figur 3.35*: Skisse av sikkerhetssystemet. På figuren over har man tilkoblingene *X8* som er kontakten til hydrogensensoren, og *X9* som er skrueterminaler til enkeltledninger. Sikkerhetskretsen starter på *X9-1*, går ut gjennom *X8-4* til releet på hydrogensensoren, tilbake fra sensoren på *X8-5*, ut *X9-2* til nødstoppknapp, og tilbake på terminal *X9-3* som er koblet til lastrelé og releet i kretsen til inntaksventilen på stacken. Kretsen til ventilen går inn på *X9-6* gjennom releet og ut på *X4-1*.

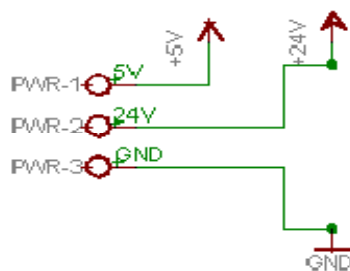
6. Tilkobling av kontrollpanel



Figur 3.47: EAGLE-kretsskjema for tilkoblingen til kontrollpanel

Tilkoblingen til kontrollpanelet ble gjennomført med en 9-pins D-sub på grensesnittkortet, som på kontrollpanelet. Koblingen *X11* er skruterminaler for ledninger fra digitalutgangene på styrekortet, disse ble brukt til lysdiodene på kontrollpanelet. 24V ble koblet til brytere og knapper på kontrollpanelet, som igjen ble koblet til hver sin 24V digital inngang, pinne 1, 8 og 9 på D-suben. Pinne 7 ble ikke koblet til noe på kontrollpanelsiden.

7. Tilkobling av strømforsyning



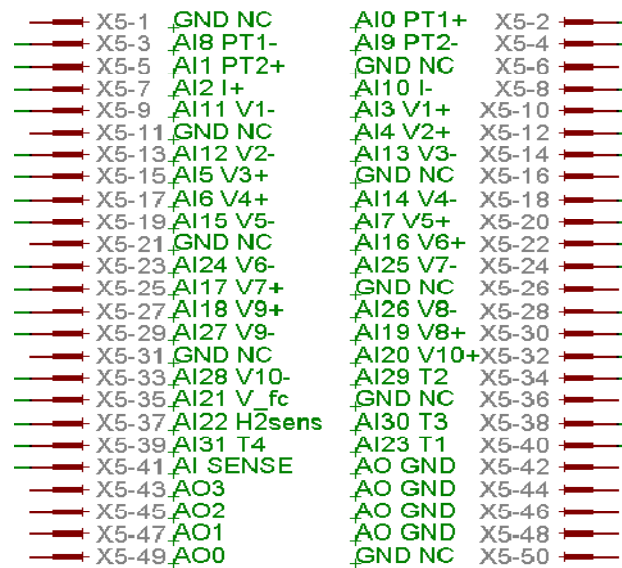
Figur 3.48: EAGLE-kretsskjema for strømtilkobling

24V, 5V og jord er de spenningspotensialene som opprinnelig var tilgjengelig for komponentene som var koblet til grensesnittkortet.

8. Innganger for tempertursignal

Det var lagt opp til mulighet for å koble til temperaturer fra en egen målekrets, men det ble isteden brukt et IO-kort direkte tilkoblet styrekortet. Beskrivelse av dette finner man i *kapittel 413.4.5.*

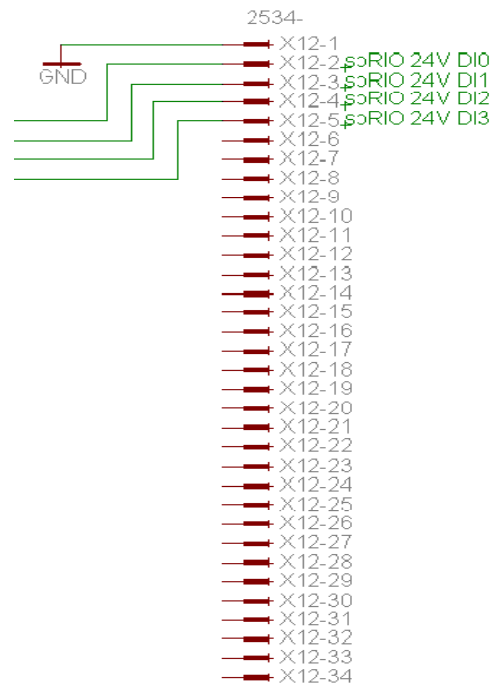
9. Flatkabel til analoginngang



Figur 3.49: EAGLE-krestsskjema for flatkablekontakt til analoginngang på styrekort

På figuren over ser man hvilke signaler som ble koblet til flatkabelkontakten, og videre gjennom flatkabel til styrekortets analoginngang.

10. Flatkabelkontakt for 24V digital innganger



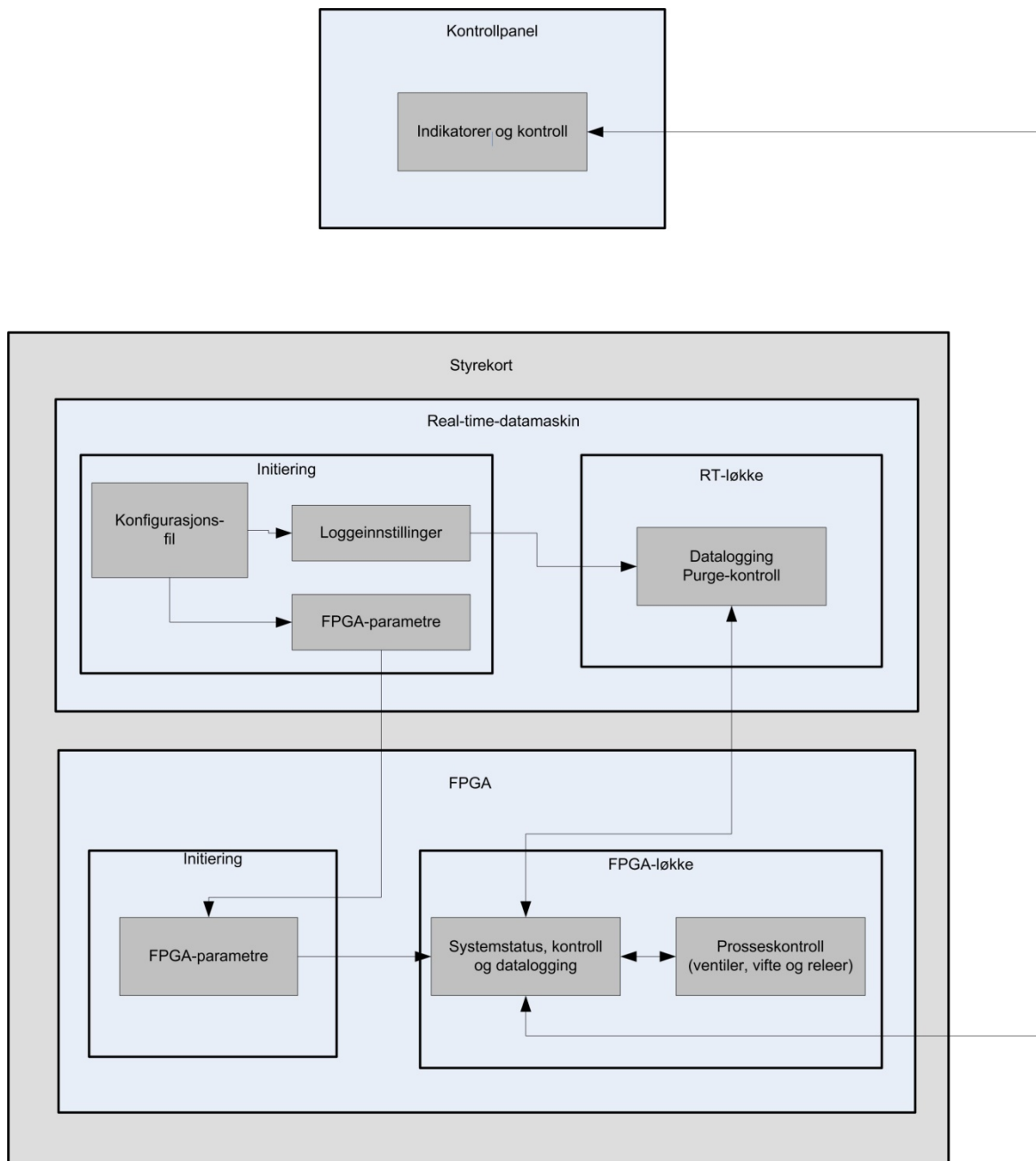
Figur 3.50: EAGLE-kretskjema av flatkabelkontakt for tilkobling av 24V digitale innganger

24V-signalene fra kontrollpanelets knapper og brytere, og 24V signal fra sikkerhetskretsen ble koblet til styrekortet gjennom denne flatkabelkontakten. Signalet fra sikkerhetskretsen gav styringen mulighet til å detektere nødstop.

11. Skruterminaltilkobling 24V digital utganger

Det ble plassert et kort med skruterminaler for 37-pins D-sub slik at man kunne koble 24V-digitalutgangene til med ledninger.

3.4.10 Programmering av styrekortet i bilen

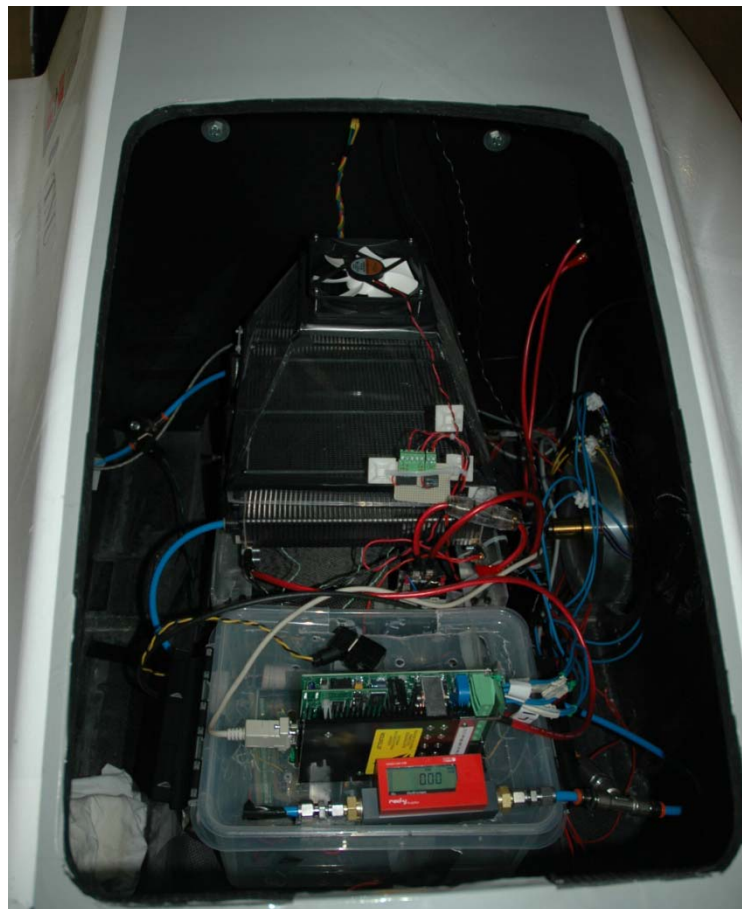


Figur 3.51: Softwarearkitektur for bilimplementering av stack

Figur 3.51: Softwarearkitektur for bilimplementering av stackviser softwarestrukturen på styrekortet og kobling til kontrollpanelet. Systemet ble programmert med utgangspunkt i programmet fra labtestingen.

FPGA-programmet ble modifisert til å ha kontroll-logikk gjennom de 24V digitale inn- og utgangene som var koblet til kontrollpanelet. Dette inkluderte en egen programmodul for driving av lysdiodene med pulsviddemodulering. Videre ble det lagt til en modul som samlet data til datalogging, som ble lagt tilgjengelig i minnet for real-time-datamaskinen.

PC-kommunikasjonen i programmet på real-time-datamaskinen ble fjernet. Konfigurasjonsparametre ble lagt i en fil på maskinens flash-minne, slik at konfigurasjonen automatisk ble lastet inn når man skrudde på styrekortet. Konfigurasjonsfilen ble generert av et LabView-program på PC, for så å bli lastet opp til styrekortet gjennom en innebygd ftp-server. En programmodul, som logger data fra fpga-en til en tekstfil, ble lagt til i real-time-programmet. Denne tekstfilen ble automatisk generert og lagret i flash-minnet til real-time-maskinen. Det ble laget en ny fil hver gang styrekortet ble slått på. Dataloggen kunne hentes ut ved å koble seg opp mot styrekortets innbygde ftp-server. LabView-prosjektet for dette systemet kan man finne på vedlagt på CD i mappen, *FC-final-software*..



Figur 3.52: Bilde av bilens motorrom, med brenselcellstack innerst, og styresystem i den hvite boksen forran.

4 Resultater

Resultatene av arbeidet som ble gjort, kom hovedsakelig fram gjennom lab-tester, og på sluttresultatet i Shell Eco-marathon.

4.1 9-fase motorstyring

Motorstyringen ble aldri implementert på grunn av at det manglet noen til å lage styresystem til brenselcellestacken. I ettertid har det blitt finregnet på hvor mye en oppdeling av viklingen til 9 faser kunne ha gitt i virkningsgrad. Disse beregningene antyder en reduksjon i tapet med 8%. For et utgangspunkt med 92% virkningsgrad, kunne denne blitt økt til 92, 58% ved oppdeling til 9 faser (2).

4.2 Labtesting av brenselcellestack

Brenselcellesystemet, dataloggingen og lastsimuleringen fungerte veldig bra. Alle tester ble foretatt av Hanne Flåten Andersen og er presentert i hennes masteroppgave, *Optimizing fuel cell for Shell Eco-marathon 2009* (17). De viktigste resultatene fra labforsøkene er gjengitt her:

- Virkningsgrad for systemet lå rundt 60 – 63% for lave strømmer.
- Viftstyringsbehovet, ble gitt av behov for oksygen til prosessen framfor behov for kjøling. Virkningsgraden på stacken var best når stacken ikke ble kjølt ned for mye.
- Startpunktet for viften ble satt til en stackspenning på 33V, dette gjorde at stacken fikk nok luft ved høy belastning, uten at den ble kjølt ned for mye. Viften ble slått av igjen når spenningen gikk over 33V
- Målingene fra det offisielle flowmetret til Shell Eco-marathon, *Vögtlin compact*, viste over 40% for lite forbruk ved bruk av hysteresestyling av trykket. Det viste seg at flowmetret ikke klart e å måle den pulserende strømmingen som denne styringen førte til at man fikk.

4.3 Brenselcellesystemet i bilen

Implementeringen av brenselcellesystemet i bilen fungerte veldig bra. De viktigste delene for drift av stacken, trykkregulering, sikkerhetssystem og viftestyring, gikk helt knirkefritt etter litt innkjøring. Det ble blant annet nødvendig å lavpassfiltrere signalet fra trykksensorene i softwaren på fpga, på grunn av støy fra motorstyringen.

På grunn av oppdagelsene av trykkreguleringens påvirkning av flowmetrets målinger, ble trykket fra flaskeregulatoren satt til optimalt operasjonstrykk. Deretter ble inntaksventilen satt til å fungere som en sikkerhetsventil som var åpen under normal drift. Dette førte til at man fikk en jevn hydrogenstrømning, som flowmetret klarte å måle nøyaktig.

Strømforsyningen til differensialforsterkerne kom ikke i tide til konkurransen i tyskland, derfor ble det ikke logget interne spenninger på stacken etter den ble satt i bilen.

Strømtransduceren sendte kun ut referansesignal, den ble testet grundig for seg selv uten at man fant noe annet enn at den ikke fungerte. Det ble ikke tid til å installere ny. Dette påvirket ikke kontrollsystemet, men det gjorde at strømmen i stacken ikke ble logget.

4.4 Resultat i Shell Eco-marathon

I konkurransen bidro det nye brenselcellesystemet sterkt, sammen med ny motordrift, til å sette en meget overlegen seier, ny verdensrekord i klassen, og en ny standard for hydrogenbiler i Urban Concept. Sluttresultatet ble som følgende:

Lag	Resultat	Divstoff
DNV Fuel Fighter, NTNU	1246 km/l	Hydrogen
Haagse Hoge School, Nederland	808 km/l	Hydrogen
DTU roadrunners, Danmark	589 km/l	LPG

Tabell 4.1: Topp 3 i Urban Concept klassen i Shell Eco-marathon 2009 (18)

Alle resultatene i tabellen over er regnet om til km/l 95-oktan bensin. Her ser man hvor overlegen seieren var. DNV Fuel Fighter var hele 54% mer effektiv enn bilen som kom på andre plass. Den gamle verdensrekorden på 848 km/l (18) ble slått med 47%.

5 Diskusjon

Brenselcellestacken ble grundig testet på lab før den ble satt i bilen. Dette gjorde at man fikk utviklet en veldig effektiv styrestrategi av den. Simuleringene av konkurranse gav nyttig informasjon om behov for purging, kjøling og luftforsyning.

Resultatet i konkurransen gir en viss pekepinn på at alle systemene på bilen fungerte veldig effektivt. Først og fremst sparte man ekstremt mye energi ved å ha driften av brenselcellestacken så passiv som mulig. Dette førte til en parasittlast på bare 1,8W, ved høy belastning av systemet. Til sammenligning har *Nexa* som konkurrentene brukte, enten modifisert eller original, en grunnlast på 35W som øker med belastningen. Dette tilsvarer 26% av lasten dersom man har 100W belastning, som er typisk ved vanlig kjøring. Analyse av spenningsloggen fra konkurransen viser blant annet at bilen ruller 15-17% (2) av tiden. I denne perioden har konkurrentene parasittlast på rundt 35W, imens systemet som ble utviklet til DNV Fuel Fighter har eliminert parasittlasten fullstendig.

Det ble gjort simuleringer av både nytt brenselcellesystem og ny motdrift som forarbeid, høsten 2008. Dette ble presentert i rapporten *Framdriftssystem for Shell Eco-marathon bil, våren 2009* (1). Resultatene av en simulert konkurranse på Lausitz-ring, viste at man i beste fall kunne oppnå et resultat på 1200 – 1250 km/l. Denne simuleringsmodellen ble brukt som grunnlag for alle avgjørelser om hva som skulle gjøres av modifikasjoner på bilen. Fokuset ble flyttet fra ekstremt lav vekt på alle komponenter som man hadde i 2008, til fokus på ekstremt høy energieffektivitet og lavere luftmotstand. Resultatet som endte opp på 1246 km/l viser at det var lønnsomt å fokusere på dette, og at en god simuleringsmodell er gull verdt.

Dataloggedelen av styresystemet ble det på grunn av helt ekstreme tidsfrister dessverre tid til å gjøre helt ferdig. Arbeidet med utviklingen av grensesnittskortet for målinger, ble grundig undervurdert. Selv om man får byttet ut strømtransduceren med en ny, blir målingene trolig veldig unøyaktige på grunn av støy fra motorstyringen. Det må trolig brukes en strømtransducer som bruker et strømsignal for å få en brukbar måling. En del støy må man også regne med å få på målingene for de interne spenningene også. I ettertid er det lett å se at man burde brukt spesiallagd IO-kort med galvanisk isolasjon på inngangene for å måle de interne spenningene, og et IO-kort for måling av 4-20mA sløyfer for trykkmålere og strømtransducer. Disse IO-kortene er ofte utstyrt med antialiasingfiltre på inngangen for å

undertrykke aliasingfenomener. Det ble ikke gjort noen analyser om dette var nødvendig på målingene i dette systemet.

6 Konklusjon

Ved å kombinere resursene til 10 diplomstudenter fra 5 ulike studieretninger har det blitt bygd en ekstremt energieffektiv bil. Målsetningen på 1000 km/l ble oppnådd med høy margin. Dette kunne bare oppnås ved at man i felleskap brukte teorikunnskapen studentene har lært oppgjennom studiet i praksis. Der mange av konkurrentene hadde ekspertise på enkelte smale områder, hadde dette teamet spisskompetanse på alle viktige områder. Derfor ble resultatet en bil som var i en klasse for seg selv.

Brenselcellesystemets enkle oppbygning med fokus på passiv drift, gjorde det mulig å kjøre grundige labtester og implementere systemet i bilen, på bare to måneder. Under labtestingen ble verdien av en god simuleringsmodell oppdaget. Lastsimuleringen på brenselcellestaken gjorde at man kunne se hvor store marginer det var i både kjøle og luftforsyningen til staken. Den grundige labtestingen førte til at brenselcellesystemet kunne implementeres i bilen tilnærmet knirkefritt. På bunnlinjen endte man opp med et brenselcellesystem som hadde en virkningsgrad rundt 60%.

7 Referanser

1. **Gellein, Anders.** *Framdriftsystem for Shell Eco-marathon bil, våren 2009.* s.l. : NTNU, 2008.
2. **Faleide, Rolv Marius.** *Shell Eco Marathon 2009 Electric Drive for World's Most Fuel Efficient Car.* 2009.
3. **International Rectifier.** *IRAM 136 Datasheet.pdf.*
4. **Ballard Power Systems inc.** *Nexa user manual.pdf.*
5. **Larminie, J.** *Fuel Cell Systems Explained.* s.l. : WILEY, 2000. 0-471-49026-1.
6. **Ballard Power Systems inc.** *Mark1020 Datasheet.pdf.*
7. **SHELL.** *sem_rules_2009.pdf.*
8. **Bürkert.** *Type6011 solenoidvalve datasheet.pdf.*
9. **XP Power.** *IZ2412, DC-DC datasheet.*
10. **IMO.** *IMO SRF-1C-SL datasheet.pdf.*
11. **Burr Brown.** *INA137 datasheet.pdf.*
12. **Traco Power.** *TRACO POWER_tel15 datasheet.pdf.*
13. **LEM.** *Lem hais50p datasheet.pdf.*
14. **National Instruments.** *NI9211 manual.pdf.*
15. **Nedymn Technologies.** *HydroKnowz_Datasheet_101.pdf.*
16. **Rognstad, Håkon.** *Development of vehicle participating in Shell Eco Marathon 2008.* s.l. : NTNU, 2008.
17. **Andersen, Hanne Flåten.** *Optimizing fuel cell for Shell Eco-marathon 2009.* s.l. : NTNU, 2009.
18. **Shell.** Webområde for Shell Eco Marathon. [Internett]
http://www.shell.com/home/content/eco-marathon-en/europe/2009/results/app_results_2009.html.

19. **Bürkert.** *Type8314 trykksens datasheet.pdf.*

20. **Agilent.** *Agilent 34970 manual.pdf.*

21. **National Instruments.** *user guide sbrio96xx.pdf.*

Aller pdf-filer kan man finne på vedlagte CD i mappen, *Referanser*