

Departement Industriële Wetenschappen en Technologie

Opleiding Bachelor in de elektromechanica

Afstudeerrichting elektromechanica

Ontwerp van een demo-opstelling voor energieproductie en -opslag met waterstofgas

Eindwerk aangeboden tot het behalen van het diploma van
Bachelor in de elektromechanica

door **Matthias De Keuleneir**

o.l.v. Patrick Declerck, KHBO
Kurt Vandelanotte, Power-link

Academiejaar 2012 - 2013

talent@work

Departement Industriële Wetenschappen en Technologie

Opleiding Bachelor in de elektromechanica

Afstudeerrichting elektromechanica

Ontwerp van een demo-opstelling voor energieproductie en -opslag met waterstofgas

Eindwerk aangeboden tot het behalen van het diploma van
Bachelor in de elektromechanica

door **Matthias De Keuleneir**

o.l.v. Patrick Declerck, KHBO
Kurt Vandelanotte, Power-link

Academiejahr 2012 - 2013

1 | Mededeling

Deze eindwerkverhandeling was een examen. De tijdens de verdediging geformuleerde opmerkingen werden niet opgenomen.

2 | Voorwoord

Omdat de toekomst steeds meer problemen ondervindt met fossiele brandstoffen leek het voor mij interessant om een eindwerk te zoeken in de branche van alternatieve energietechnieken. Technologie en economie gaan hand in hand. Saarom zoekt men de dag van vandaag naar economische en milieuvriendelijke oplossingen om energie te benutten en eveneens op te slaan. De voorwaarde hiervoor is dat men bij het gebruik, de productie en consumptie van de energiedragers (brandstoffen) een zo klein mogelijke invloed heeft op het milieu. De realisatie van dit eindwerk zou praktisch onmogelijk geweest zijn zonder de steun die ik bij vele mensen ondervond.

Daarom zou ik graag volgende mensen willen bedanken:

Mijn ouders en vriendin: "Phyllis Degryse", om mij alle dagen te steunen en moed in te spreken gedurende mijn gehele schoolcarrière, als bij het verwerken van dit eindwerk.

Ook wil ik mijn promotoren, Dhr. Patrick Declerck en Dhr. Kurt Vandelanotte bedanken om mijn eindwerk in goede banen te leiden en voor hun geduld, tijd en energie die ze mee in dit eindwerk spendeerden. Ook de mensen van Power-link wil ik zeker een dankwoordje verlenen. Hierbij mag ik zeker Dhr. Joannes Laveyne en Dhr. Brecht Zwaenepoel niet vergeten voor hun directe hulp en ondersteuning bij enige moeilijkheden.

3 | Abstract

Fossiele brandstoffen zijn niet oneindig en het milieu ziet af van de bijkomende vervuiling. Het is slechts een kwestie van tijd vooraleer de mens volledig gebruik zal moeten maken van alternatieve energiebronnen en milieuvriendelijke brandstoffen.

Het eindwerk omvat de opbouw van een demo-opstelling met waterstof als energiedrager in een smart microgrid. Het idee bestaat erin om in een volledige onafhankelijk circuit (microgrid), gevoed door alternatieve energiebronnen (windmolens en zonnecellen), het productieoverschot op te slaan in waterstofgas. Het geproduceerde waterstof(gas) wordt opgeslagen in metaalhydriden die een grotere opslagcapaciteit hebben dan gewone gastanks van hetzelfde volume. De opslag is ook veel stabiel en veiliger. Indien een tekort aan energie zich voordoet in de microgrid (bijvoorbeeld niet genoeg wind) dan kan de opgeslagen energie in de vorm van waterstofgas terug worden omgezet naar elektrische energie door gebruik te maken van een brandstofcel.

De demo-opstelling maakt deel uit van het project: **H2-Regio Vlaanderen â Zuid-Nederland**, waar het opdrachtgevende bedrijf (Power-link) aan anticipeert. De opstelling heeft als doel om studenten en geïnteresseerde particulieren de meerwaarde van waterstof aan te brengen.

Tevens werden er software en hardware problemen aangepakt in samenwerking met de fabrikant. Zo werden gegevens verzameld via de bijgeleverde software en uitgezet in grafieken voor analyse. Er werd ook nog een uitbreiding voorzien die gebruikt maakt van het software pakket labview. Zo worden de laad en ontladkleppen gestuurd van de hydridetanks via 2 druksensoren, ingelezen als referentie voor de sturing. Voor het ontwerp werd er gebruik gemaakt van de software: Inventor, Autocad en Eagle Cadsoft.

In deze eindwerkbundel wordt de theorie langzamerhand opgebouwd tot de uiteindelijk uitvoering van de opstelling. Zaken die aan bod komen zijn: wat is waterstof, productie, opslag, brandstofcellen, elektrolyzers met de daarbij horende theorie en werkingsprincipes.

Inhoudsopgave

1 Mededeling	2
2 Voorwoord	3
3 Abstract	4
4 Inleiding	9
4.1 Waterstofpotentieel	9
4.1.1 Reden waterstofvoorkeur	10
4.1.2 Ontginnen?	10
5 Power-link	13
5.1 Power-Link	13
5.1.1 Fabricatieprogramma	14
5.1.2 Bedrijfsorganigram	14
5.1.3 Situering van de thesis in het bedrijf	15
5.1.4 Vestiging	15
5.1.5 H2 Regio	16
5.2 Wat is Greenbridge?	17
5.3 Wat doet Greenbridge?	17
Afkortingen	i
6 Opdracht	1
7 Wat is waterstof?	3
7.1 Algemeen	3
7.2 Fysische eigenschappen	3

7.3	Verbindingen	4
7.3.1	Koolwaterstoffen	4
7.3.2	Water	5
7.4	Waterstofgas	6
7.4.1	Gevaren verbonden aan waterstofgas	7
8	Productie van waterstof	12
8.1	Inleiding	12
8.1.1	Fossiele brandstoffen	12
8.2	Reforming van fossiele brandstoffen	12
8.2.1	Stoom reforming van aardgas	14
8.2.2	Partiële oxidatie van aardgas	15
8.2.3	Waterstof uit ruwe aardolie	15
8.2.4	Waterstof uit steenkool	16
8.3	Waterstof uit elektrische energie	19
8.3.1	Elektrolyse	19
8.3.2	Soorten elektrolyzers	20
8.3.3	Productieopstelling van elektrolyse met een unipolaire cel	25
8.3.4	Productie opstelling elektrolyse met een bipolaire cel	26
9	Opslag van waterstof	28
9.1	Opslag gasfase	30
9.2	Opslag vloeibare fase	31
9.3	Opslag in metaalhydriden	33
9.3.1	Principe van opslag in een metaalhydrid	35
9.3.2	Hoe bepaalt men de capaciteit van een metaalhydride?	36
9.3.3	Nanotechnologie	37
10	Brandstofcellen	39
10.1	Opbouw brandstofcel	39
10.2	Werking van een brandstofcel	40
10.3	Soorten brandstofcellen	41

10.3.1	AFC brandstofcel	41
10.3.2	PEM brandstofcel	42
10.3.3	PAFC brandstofcel	44
10.3.4	SOFC brandstofcel	45
10.3.5	MCFC brandstofcel	46
11	Praktische uitwerking	47
11.1	Doel van de opstelling	47
11.2	Prinipe van de opstelling	48
11.3	Mogelijke uitbreidingen voor de opstelling	49
11.3.1	Uitbreiding 1: Labview integratie	49
11.3.2	Uitbreiding 2: Sunny Islands	49
11.4	Ontwerp van de demo-opstelling	50
11.4.1	Ontwerpen	51
11.5	Componenten	55
11.5.1	Brandstofcelunit - Nexa 1200	55
11.5.2	Elektrolyser NMH2 1000	56
11.5.3	Metaalhydriden canisters	57
11.5.4	DCDC converter - Nexa DC1200	58
11.5.5	Hybride extensie kit	59
11.5.6	Accu's	59
11.6	Aansluitschema	60
11.7	Problematiek	61
11.7.1	Probleem 1: Opstartprobleem brandstofcel	61
11.7.2	Proleem 2: Communicatieprobleem brandstofcel - DCDC converter	62
11.7.3	Probleem 3: Blackouts DCDC converter	63
11.8	Uitbreiding 1: Sturing met labview	67
11.8.1	Principe	67
11.8.2	Schema	68
11.8.3	Uiteindelijk schema van de opstelling	70
11.8.4	Selectie van de componenten	70

11.8.5	De geselecteerde onderdelen	73
11.8.6	Transistor-relais drive	79
11.8.7	Transistor-relais drive op PCB bord	80
11.9	Labview programmatie	81
11.9.1	NI-DAQ	81
11.9.2	Labview front panel	83
11.9.3	Labview block diagram	83
11.9.4	Overlopen van het programma	84
11.10	Uitbreiding 2: Integratie met de Sunny Islands	89
11.10.1	Wat is een Sunny Islands?	89
11.10.2	Uitbreidingsprincipe met de demo-opstelling	90
12	Besluit	91
13	Bijlagen	92
13.1	Foto's Elektrolyser	92
13.2	Foto's brandstofcel	93
13.3	Schetsen opstelling	94

4 | Inleiding

In het kader van een waterstofproject: Vlaanderen-Zuid Nederland wil men een demo-opstelling maken zodat men studenten tijdens leerdagen of tijdens een workshop bewust kan maken van de mogelijkheden die waterstof kan bieden.

Een tweede mogelijkheid is dat men de waterstofinstallatie zal gaan gebruiken om een batterijbank in een microgrid installatie op te laden indien deze niet kan worden opgeladen door de windenergie van de windmolens of de zonne-energie van de zonnepanelen

Een derde mogelijkheid is dat men deze als 2de energieoptie zal gaan gebruiken in een installatie om bijvoorbeeld enkele verbruikers te gaan voeden. Als uitbreiding had men graag dat de installatie zelf het opladen en ontladen van de flessen zal regelen afhankelijk van het gevraagde vermogen van de verbruikers. Deze zullen we proberen te realiseren via labview met feedback van sensoren.

In deze thesis wordt de gehele waterstofketen systematisch verklaard. Zo komen volgende zaken aan bod: wat is waterstof?, eigenschappen, productie en productiemethoden, opslag onder verschillende vormen, elektrolyser, brandstofcellen, ... [Martens \(2013\)](#)

4.1 Waterstofpotentieel

Europa heeft gedebateerd over de energievoorzieningen van de toekomst. Als gevolg hiervan werd de liberalisering van de gas- en energiemarkt aangevangen. Hierbij heeft men ook gedacht aan het milieu-aspect en werden de doelstelling 20/20/20 opgesteld. Deze doelstelling omvat 20% reductie van CO₂, 20% energie-efficiënter, met 20% hernieuwbare energie, geformuleerd tegen het jaartal "2020". De olie- en gasprijzen worden weergegeven in een onophoudelijke stijgende lijn. Landen die zich momenteel in een snel stijgende evolutie bevinden zoals China en India, vergroten steeds meer en meer de vraag naar energie. Bij vele internationale toekomstverkenningen wordt waterstof als potentiële energiedrager naar voor geschoven met verbrandingsmotoren en brandstofcellen als conversietechnologie. In de Verenigde Staten van

Amerika en Japan zijn ze volop bezig met onderzoek naar waterstoftechnologieën. Zo wordt er in Californië vooral onderzoek uitgevoerd naar automotieve toepassingen. In Japan gaat men zich dan meer focussen op de stationaire toepassingen (demonstratieprojecten). Hierbij wil Europa zich aansluiten en worden enkele projecten gelanceerd zoals het project: "H2-Regio". [Martens \(2013\)](#)

4.1.1 Reden waterstofvoorkeur

Er zijn verschillende redenen waarom de internationale bijeenkomsten besloten om waterstof als energiedrager te verkiezen.

Voordelen

- 1) Waterstof is een flexibele en milieuvriendelijke energiedrager.
- 2) Brandstofcellen hebben zeer hoge rendementen ondanks de zeer lage emissies.
- 3) Verlaging van milieubelastende emissies (H₂O uitstoot).
- 4) vermindering van afhankelijkheid van fossiele brandstoffen
- 5) Verbetering leefmilieu (emissies, lawaai) in steden
- 6) Maximaliseren waarde en inzet van duurzame elektriciteit via buffering van energie via waterstof.
- 7) Hightech ontwikkelingen betekenen bijkomende duurzame werkgelegenheid in een nieuwe te ontwikkelen industrietak, die gedomineerd wordt door de noodzaak van hoogtechnologische innovaties.

Door bovenstaande voordelen, zou waterstof een belangrijke rol kunnen krijgen in de toekomst als energiedrager. Hierbij zijn de cruciale uitdagingen gelegen bij de energievoorzieningszekerheid en het minimaliseren van emissies van milieubelastende stoffen. Dit kan gecombineerd worden met het aanvangen van een arbeidsmarkt die zich toespitst op innovatie en duurzaamheid. ([Martens, 2013](#))

4.1.2 Ontginnen?

Waterstof komt zelden in vrije vorm voor en moeten dus worden ontgonnen. Waterstof kan worden geproduceerd als bijproduct in een proces, zoals bij de productie van chloor. Andere methodes voor de productie van waterstof kan via **reforming van fossiele brandstoffen (hoofdstuk**

8.1.1) of elektrolyse (hoofdstuk 8.3.1). Tevens kan men via bioproductie ook waterstof produceren, zoals bij algen. Hierbij gaat men zwavel van de algen onthouden, waardoor ze waterstof beginnen te produceren in plaats van zuurstof. Dit kan men echter niet op grote schaal toepassen en zal verder in deze thesis niet worden besproken. Wereldwijd wordt er voor 95% van de waterstof geproduceerd via reforming van fossiele brandstoffen, en 5% via elektrolyse. Deze laatste zou men kunnen toepassen om bij overproductie van energie het net te ontlasten. Om duurzame waterstof te bekomen, kan men deze gaan produceren met de elektriciteit van windturbines en zonnecellen. Zo verkrijgt men opgeslagen energie in de vorm van waterstof zonder dat er enige emissie vrijkwamen. [Martens \(2013\)](#)

Energievoorziening met waterstof

Duurzame waterstof heeft dus een beloftevol perspectief voor de toekomst (geen emissies en geen fossiele brandstoffen) en is een structurele uitweg naar een duurzamere energievoorziening. Om de duurzame energievoorziening te bekomen, kan men gebruik gaan maken van de regionale, beschikbare technologie. De economische en technische haalbare factor, zet echter nog een rem op dit traject. Daarom moet er meer onderzoek worden uitgevoerd, voor de verbetering van de rendementen, levensduur, betrouwbaarheid, investerings en exploitatiekosten. Deze punten, liggen aan de basis van vele innovatieprojecten zoals het project, waarvan dit eindwerk deel van uitmaakt. Het doel van deze projecten om waterstof naar voor te schuiven als concrete oplossing voor opslag van hernieuwbare energie en eventueel niet hernieuwbare energie, om de overbelasting van het net te voorkomen. Windenergie en zonne-energie zijn nooit volledig voorspelbaar. Men kan aan de hand van een weerbericht weten, of het morgen zal waaien, regenen, . . . Men weet dan nog altijd niet op welk tijdstip, dit zal voordoen. Wind- en zonne-energie is telkens nooit monotoon. Hierbij kan waterstof aan te pas komen om de piekvermogens en de overschot aan geproduceerde hernieuwbare energie op te slaan in de vorm van waterstof. Dit kan men verwezenlijken om met de overschot van de geproduceerde hernieuwbare energie, water te elektrolyseren. De geproduceerde waterstof kan men opslaan in gasvorm in gastanks onder hoge druk of in metaalhydriden. Dit is een veel duurdere maar stabielere opslagmethode om waterstofgas in op te slaan. De metaalhydriden bieden trouwens een grotere opslagcapaciteit (> factor 90) aan voor een soortgelijk volume van een gastank. Een andere mogelijkheid is

het waterstof opslaan in vloeibare vorm (stationaire toepassingen). Zie hoofdstuk 9!

Wanneer er dan een tekort is aan hernieuwbare energie, bijvoorbeeld de zon zit achter de wolken, kan men gebruik gaan maken van brandstofcellen (zie hoofdstuk 10) om de waterstofenergie terug om te zetten naar elektrische energie. Deze elektrische energie kan men dan investeren aan de verbruikers om het tekort te compenseren. Waterstof biedt dus als het ware, de oplossing om hernieuwbare energie op een continue basis te gebruiken. Maar waterstof hoeft niet per se alleen worden toegepast in combinatie met de hernieuwbare technologie. Hedendaags worden de meeste netten nog voorzien met energie van kerncentrales. Nu in de zomermaanden, kunnen de hernieuwbare bronnen, flink wat opleveren aan energie. Deze overproductie kan echter het net overbelasten, met veel schade tot gevolg. Om dit te voorkomen, zullen ze de hernieuwbare bronnen, zoals de zonnecellen uitschakelen. De eigenaar(s) van die installaties zijn hier echter niet tevreden mee. Men heeft geld geïnvesteerd en wil er een maximale opbrengst uithalen. In plaats van de hernieuwbare bronnen uit te schakelen, kan men met de geproduceerde elektriciteit, water gaan elektrolyseren tot waterstof. De geproduceerde waterstof kan men dan gaan opslaan om te gebruiken in procédés, hydromotoren of terug energieopwekking om eventuele piekvermogens te verwerken. Terugkomend op het gebruik van waterstof in processen, wereldwijd wordt er jaarlijks "500 miljard m^3 aan waterstof verbruikt voor industriële doeleinden. Indien men dus hiervoor duurzame waterstof zou kunnen gebruiken, zal de industrie ook langzamerhand kunnen groeien tot een duurzame(re) industrie.

Waterstof heeft dus een hele ruime waaier aan toepassingen te bieden. Maar waterstof is eigenlijk niet nieuw. In de vroegere jaren, was het zogenaamde stadsgas zeer populair. Het werd voornamelijk gebruikt voor de centrale verwarming, koken en voor de verlichting (lichtgas). Dit gas werd geproduceerd in gasfabrieken via de vergassingsmethode van steenkool. Dit gas bevatte namelijk 50% waterstof (H_2). Momenteel wordt waterstof enkel gebruikt als chemische grondstof, op enkele uitzonderingen na (H_2 -brandstofcellen, ruimtevaartbrandstof). Indien de technologie en de maatschappij zich meer zullen toespitsen op waterstof, kan deze in vele toepassingen een plaats vinden. Voorbeelden: automotieve, gasturbines, brandstofcellen, ... [Martens \(2013\)](#)

5 | Power-link

5.1 Power-Link

Power-Link is een energiekennisplatform, een gezamenlijk initiatief van AG Haven Oostende en de Universiteit Gent. Deze is gehuisvest op het wetenschapspark Greenbridge in de Oostendse achterhaven.

Als **kennispartner** is Power-Link samen met haar hogeschoolpartners uitgegroeid tot een West-Vlaams wetenschapsplatform met LED-werking en sensibiliseert tot het rationeel, reductief en alternatief energiegebruik.

Als **netwerkpartner** speelt Power-Link in op het actuele en creatieve karakter van de nieuwe productie- en consumptie-energiemarkt. Zo creëert ze een onderzoeksplatform met een high tech omgeving namelijk het: "Greenbridge wetenschapspark".

Als **communicatiepartner** werd de vzw Power-Link opgericht, die een professionele cleantech portaalsite aanbiedt en zo de inhoudelijke werking van het kennisplatform versterkt. [pow](#) (2013); Martens (2013)



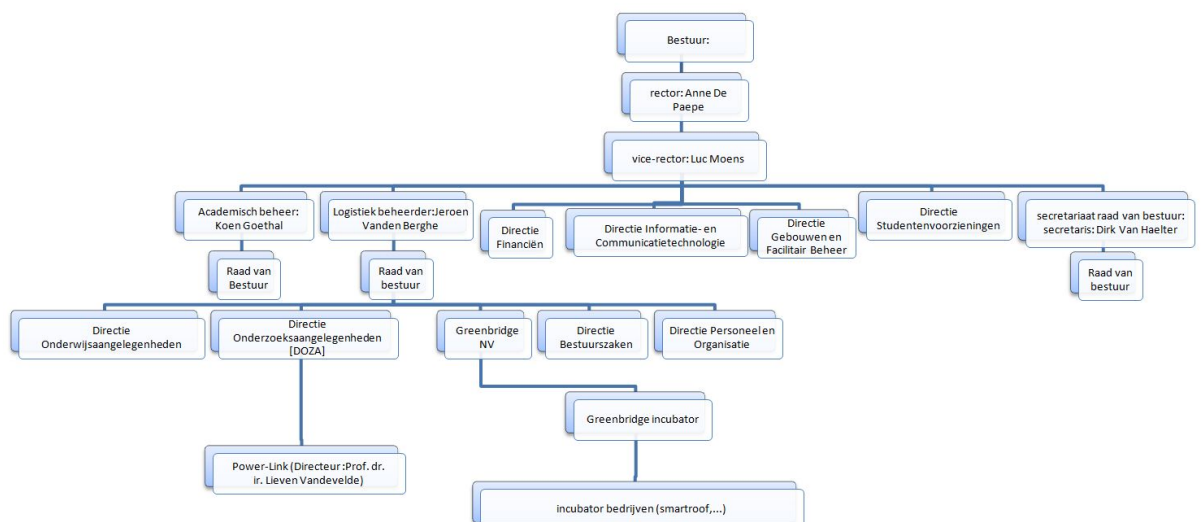
5.1.1 Fabricatieprogramma

Power-link voorziet verscheidene faciliteiten voor onderzoek (educatief, demonstratie en op OO niveau) rond clean tech in het algemeen en hernieuwbare energie in het bijzonder. Zo is er het "SWT field lab", waar men windturbines test. Power-link kan verschillende doeleinden hebben,

- Ondersteunen van bedrijven of onderzoek(en)
- Demonsteren van nieuwe of bestaande technologieën
- Nieuwe technieken en technologie bijschaven aan het educatief niveau.
- ...

Voor bepaalde bedrijven kan dit van groot belang zijn, omdat ze niet altijd de tijd en middelen beschikbaar hebben. Zo gaat men bijvoorbeeld windturbines uittesten, analyseren en feedback geven aan de fabrikant. Mogelijke zaken die hiermee verklaard kunnen worden zijn bijvoorbeeld: Zijn de opgegeven rendementen haalbaar in de praktijk? Via deze manier kan Power-link ondersteuning bieden, door hun producten gedurende bepaalde tijd te testen.

5.1.2 Bedrijfsorganigram



Figuur 5.1: Bedrijfsorganigram Power-link

5.1.3 Situering van de thesis in het bedrijf

Power-link heeft als bedrijf de doelstelling om een centrum uit te bouwen, dat instaat voor toegang tot informatie, documentatie en kennis omtrent duurzame en hernieuwbare energie, beschikbaar voor zowel de wetenschappelijke wereld als voor het bedrijfsleven. Daarbij komen ook nog de professionele gebruikers, geïnteresseerde particulieren en diverse overheden. Tevens streeft Power-link naar een bevordering van het fundamenteel en toegepast onderzoek inzake duurzame en hernieuwbare energie, met een streven naar de zichtbaarheid en valorisatie van het wetenschappelijk onderzoek.

Onder deze laatste wordt het eindwerk verwerkt als opgebouwd. Het eindwerk maakt immers deel uit van het project "H2-Regio". De uitvoering van deze thesis vond plaats in de laboruimte van Power-link en deels in het KHBO te Oostende. In deze laboruimte kunnen eenvoudige (elektrische) metingen uitgevoerd worden in het kader van de dienstverlening die Power-link aanbiedt voor bedrijven of die gebeuren in het kader van een duurzaam energieproject: **H2 Regio Vlaanderen - Zuid-Nederland**. Power-link is een zeer open bedrijf. Dit wil zeggen dat de verschillende projectingengieurs onderling samenwerken aan verscheidene projecten.

5.1.4 Vestiging

Power-link is gevestigd in de Greenbridge incubator (vroeger: energybox) van Greenbridge.

Adres: Wetenschapspark 1, 8400 Oostende



5.1.5 H2 Regio

De regio Vlaanderen - Zuid-Nederland huisvest een aantal potentiële belangrijke en beloftevolle spelers als eindgebruikers (markten) voor waterstof. Met het project wil men de regio Vlaanderen - Zuid-Nederland tot kennisintensieve regio ontwikkelen op het gebied van waterstoftoepassingen, gebruikmakend van duurzaam geproduceerde waterstof (elektrolyse via wind- en zonne-energie). Daartoe worden een aantal demonstratie-projecten uitgevoerd, met accenten in de verschillende provincies, en werd het startschot gegeven voor de implementatie van een waterstof tankinfrastructuur. **Binnen dit project fungeert Power-link als contactpunt voor West-Vlaanderen en is actief in volgende onderdelen:**

- Uitrol waterstofinfrastructuur
- Ontwikkeling testmomenten
- Inschakelen van studenten in demonstratieprojecten
- Projectcoördinatie - communicatie
- Regionale, (inter)nationale netwerking en profilering
- Portfolioanalyse en ontwikkeling bijkomende projecten

De thesis maakt deel uit van het onderdeel **Ontwikkeling testopstelling of demo's ten behoeve van het onderwijs.**

Voor dit project (H2 Regio) werd ook een projectcoördinator aangeduid.

5.2 Wat is Greenbridge?

Greenbridge is een West-Vlaams wetenschapspark van de Universiteit Gent. Ze is gelegen in de achterhaven van Oostende en huisvest de gelijknamige Greenbridge-incubator, opgericht door Unief Gent, POM West-Vlaanderen, KHBO en AG Haven Oostende. Iets later werden ADMB (2007) en ook HOWEST (2010) aandeelhouder van Greenbridge.

5.3 Wat doet Greenbridge?

Greenbridge wil een innovatief en ondernemend klimaat creëren in de regio Oostende. In de incubator faciliteiten begeleiden ze specifiek hightech start-ups en/of spin-offs bij de uitbouw van hun onderneming. Verder bieden ze ook nog eens professionele ondersteuning in alle uitdagingen die de hightech start-ups op hun weg tegenkomen.

Daarbij onderscheiden we:

- Actieve steun: aanbieding van aangepaste infrastructuur, professionele begeleiding, ondersteunende diensten en toegang tot financiële middelen.
- Promotionele activiteiten: via bijkomende initiatieven, bijvoorbeeld seminars, helpen ze de start-ups aan de eerste contacten op de markt.

Ook voor ervaren bedrijven:

- Ruime vrijheid voor bouwplannen
- Nabijheid van gespecialiseerde knowhow
- Gunstige omgeving

Afkortingen

AFC: Alkaline Fuel Cell = brandstofcel die gebruik maakt van een alkali of Chloor-alkaline substantie als membraam

CAN: Controller Area Network, communicatiebus (voorloper Profibus).

F.C: Brandstofcelunit, Fuel Cell

HOWEST: Hogeschool West-Vlaanderen

HTGR: Hoge Temperatuur Gasgekoelde Reactor, zeer geavanceerde technologie.

KHBO: Katholieke Hogeschool Brugge-Oostende

LWR: Light Weight Reactor, reactor gekoeld met bepaalde vloeistof (niet noodzakelijk water!).
= Meest toegepaste Reactor hedendaags!

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell = brandstofcel die gebruik maakt van lithium al kalium-carbonaten als membraam.

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell **PEM:** Poly-Elektrolyt-Membraam. Deze worden toegepast in brandstofcellen als elektrolyzers.

POM West-Vlaanderen: Provinciale Ontwikkelingsmaatschappij West-Vlaanderen

SOFC: Solid Oxide Fuel Cell = brandstofcel die gebruik maakt van een keramisch materiaal als membraam (elektrolyt).

UCG: Underground Coal Gassification = Ondergrondse kolenvergassing

Lijst van figuren

5.1	Bedrijfsorganigram Power-link	14
7.1	Koolwaterstofverbindingen	4
7.2	Moleculaire structuurverbindingen van water	5
7.3	Molecule van waterstofgas	6
7.4	Coëfficiënt Joule-Thompson	7
7.5	Ontsteking brandstoftank, links waterstofauto, rechts LPG	9
8.1	Reforming van fossiele brandstoffen	13
8.2	Principe van stoom-reforming	14
8.3	Proces: kolenvergassing	16
8.4	Ondergrondse steenkoolvergassing	17
8.5	Principe van elektrolyse	20
8.6	Conventionele elektrolyser	21
8.7	PEM elektrolyser	22
8.8	Solid oxide elektrolyser	23
8.9	Hoge-Temperatuur Elektrolyser	24
8.10	Opstelling elektrolyse met unipolaire cel	25
8.11	Productieopstelling van elektrolyse met bipolaire cellen	26
9.1	Opslagmethoden van waterstof	29
9.2	BMW 7-reeks Hydrogen uitvoering	29
9.3	Europese kleurcodering H ₂ gascilinder	30
9.4	Bolvormige opslagtank H ₂	31
9.5	Principe van waterstofabsorptie in een metaalhydride	35
9.6	PCT-curve: procentuele opname van waterstof afhankelijk van de temperatuur	35
9.7	PCT-curve van legering B [Voorbeeld]	36

9.8	Principe van opslag in een nanomagnesium-hydride	37
10.1	Opbouw en werking van een H ₂ brandstofcel	39
10.2	Werkingsprincipe van een brandstofcel	40
10.3	Principe van een AFC brandstofcel	41
10.4	Recuperatie van energie uit waterstof	42
10.5	Principe van een PEM brandstofcel	42
10.6	Reactie waterstof met Poly Elektrolyt Membraam	43
10.7	Principe van een PAFC brandstofcel	44
10.8	Principe van een SOFC brandstofcel	45
10.9	Principe van een MCFC brandstofcel	46
11.1	Ontwerp van de demo-opstelling	51
11.2	Voor- en zijaanzichten van het ontwerp	52
11.3	Uitgeleend frame door KHBO Oostende	52
11.4	Ontwerp op KHBO frame	53
11.5	Uitwerken van het ontwerp	54
11.6	Brandstofcelunit Nexa 1200 "Heliocentris"	55
11.7	Elektrolyser NMH ₂	56
11.8	Metaalhydriden canisters	57
11.9	DCDC-converter en functies	58
11.10	De Hybride extensie kit	59
11.11	De gebruikte Loodaccu's in de opstelling	59
11.12	Aansluitschema communicatie componenten - 24V	60
11.13	Fouten opsporen met Verbose viewer	61
11.14	Beëindigingsweerstand voor CAN-bus	62
11.15	Software: foutmelding: "Fuel Cell Current to high"	63
11.16	Voorbeeld sample rate naar in excel	64
11.17	Drukverloop van de installatie in werking	65
11.18	Verloop van de elektrische stromen in de opstelling	66
11.19	Verloop van de elektrische spanningen in de opstelling	66
11.20	Sturingschema versie 1	68

11.21	Het uiteindelijk laad en ontlaadschema	70
11.22	Logo ATEX	70
11.23	Voorbeeld van een certificaat conform aan de richtlijn ATEX	72
11.24	Gekozen 3/2-weg ventiel (0330 C Normaal gesloten)	73
11.25	Gekozen 2/2-weg ventiel (0330 A Normaal gesloten)	74
11.26	Gasdruksensor Bürkert	74
11.27	Grafiek van de druk in functie van de spanning	75
11.28	Snijringkoppeling (links) in T-stuk 1/4"Tube OD (rechts)	76
11.29	De leidingadapters ISO M 1/4"naar Tube OD 1/4"	77
11.30	Overgangstuk (adapter) NPT schroefdraad naar ISO M. gasdraad	77
11.31	De 3 magneetventielen met de gemonteerde leidingadapters	77
11.32	De druksensor met het montage T-stuk	78
11.33	Assembly van de druksensor in het T-stuk	78
11.34	Een transistor-relais drive	79
11.35	Transistor-relais drive schema op PBC bord	80
11.36	National Instruments USB module	81
11.37	Poorten op de National Instruments Module 6008/6009	81
11.38	NI-DAQ assistant	82
11.39	Front panel van de labviewprogrammatie	83
11.40	Block diagram van de labviewprogrammatie	83
11.41	Spanningsindicatoren van druksensoren	84
11.42	Inlezen van de spanning via DAQ-assistant	84
11.43	Mean VI	85
11.44	Waiting front panel activity functie	85
11.45	Waiting front panel activity functie	85
11.46	Indicatie van de druk op het frontpanel	86
11.47	Omzetten van een spanning naar een druk	86
11.48	Manuele overnamemogelijkheid van de ventielen (front panel)	87
11.49	Manuele overnamemogelijkheid van de ventielen (diagram panel)	87
11.50	De OF-functie	87

11.51 Schematisch overzicht sturing H2 kring	88
11.52 Foto van een Sunny Island	89
11.53 Schematisch overzicht uitbreiding 2 met Sunny Island	90

Lijst van tabellen

7.1	Fysische eigenschappen van waterstof vergeleken	4
8.1	Elektrolyse versus Thermochemische splitsing van water	19
11.1	Kenplaatgegevens Nexa 1200 (brandstofcel)	55
11.2	Omzetten spanning over weerstand naar druk	75

6 | Opdracht

In het kader van het project: "H2 Regio Vlaanderen - Zuid-Nederland" bouwt Power-link momenteel een demo-opstelling met waterstof als energiedrager. Dit eindwerk en project maakt deel uit van de uitbouw van het Greenbridge wetenschapspark als demonstratie- en sensibilisatie site voor toepassingen omtrent clean tech. Bij deze demonstraties kunnen vragen worden beantwoord als:

- Wat is het rendement bij de productie en opslag van waterstof?
- Wat is het totale rendement van de installatie?
- Hoe wordt waterstof opgeslagen?
- Wat zijn de mogelijkheden van waterstof?

De demo-opstelling moet een duidelijk overzicht bieden aan potentiële bezoekers zoals studenten en particulieren. Tevens is er ook een duidelijke en kortsamenvattende handleiding in de vorm van een draaiboek gewenst voor de correcte bediening van de opstelling. De opstelling omvat volgende belangrijke componenten:

- H2 generator (elektrolyser)
- Metaalhydrideflessen (x3)(waterstofopslag)
- brandstofcelunit (Fuel Cell).
- DCDC converter
- Loodaccu's (x2)

Via labview (software pakket) had men graag al de gegevens van zowel verbruik als productie visueel op één beeldscherm weergegeven. De taak van het labviewprogramma richt zich tot het regelen van de gasdruk in de 3 canisters. Hiervoor werden er 2 sensoren aangekocht en in

het systeem geïntegreerd. De bedoeling is om aan de hand van de druk de (aangekochte) magneetventielen te bedienen, zodat tijdens het proces één canister kan worden opgeladen terwijl de andere worden ontladen. Met andere woorden is dit systeem een volledig geautomatiseerde "aan- en afkoppeling" van de canisters aan de elektrolyser en de brandstofcelunit.

7 | Wat is waterstof?

7.1 Algemeen

Waterstof is een chemisch element met symbool H (**Hydrogenium**). Ze bestaat enkel uit 1 proton en 1 elektron. Hierdoor is waterstof uniek omdat alle andere elementen meerdere protonen, neutronen en elektronen bevatten. Dit is de reden waarom waterstof een geringe massadichtheid heeft. Waterstof komt onder normale omstandigheden niet voor in geïsoleerde toestand. Deze is namelijk te wijten aan het feit dat waterstof een hoge reactiviteit heeft. Onder atmosferische toestand vormt waterstof zich tot een twee-atomige molecule met de naam diwaterstof. Diwaterstof is ook wel beter bekend als waterstofgas.

- Waterstof = H
- Waterstofgas = H₂

khl (2011); Martens (2013); NWV (2013); Martens (2005)

7.2 Fysische eigenschappen

Waterstof is zeer licht (14 x lichter dan lucht) als gevolg van zijn geringe massadichtheid. Het kookpunt van waterstof is erg laag en doet zich al voor bij 20,28K (-252°C), het smeltpunt ligt bij 14,01K. Onder hoge druk zoals op planeten Jupiter en Saturnus komt metalisch waterstof voor. Door de hoge druk wordt waterstof samengedrukt tot vloeibaar metaal. Zoals eerder vermeld heeft waterstof een zeer geringe massadichtheid en natuurlijk is hierdoor de massa ook gering.

Zie volgende pagina voor de vergelijkingstabel van waterstof met methaangas (aardgas) en benzine.

.	Waterstofgas	Aardgas (Methaan)	Benzine
Smelttemperatuur (atm. druk) (°C)	-259	-183	-20
Kookpunt (atm. druk) (°C)	253	161	38-205
Relatieve dichtheid gas (lucht=1)	0.07	0.6	4
Relatieve dichtheid vloeistof (water=1)	0.070	0.5	0.7-0.8
Verbrandingswaarde (MJ/kg)	120	50	44.5
Verbrandingswaarde (MJ/l)(atmosferisch)	0.010	0.0325	31.1
Vlampunt (°C)	brandbaar gas	brandbaar gas	<-20
Benodigde ontstekingsenergie	0.02mJ	0.29mJ	0.24mJ

Tabel 7.1: Fysische eigenschappen van waterstof vergeleken

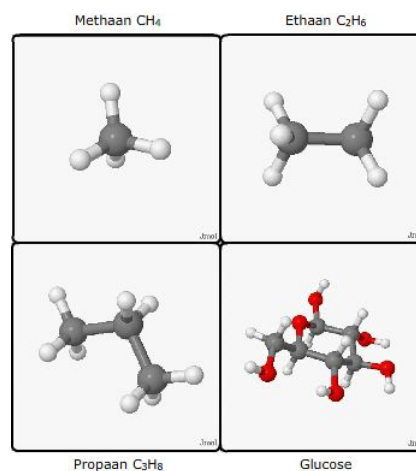
7.3 Verbindingen

Waterstof is het meest voorkomende element op aarde. Maar een los waterstofatoom bestaat niet. Ze komt alleen voor in verbindingen.

7.3.1 Koolwaterstoffen

Vele van deze waterstofatomen zijn chemisch verbonden aan koolstofatomen (C). Op deze manier vormen ze zich tot koolwaterstoffen. Er zijn duizenden koolwaterstof moleculen. **Enkele voorbeelden:**

- methaan CH_4
- ethaan C_2H_6
- propaan C_3H_8
- glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$



Figuur 7.1: Koolwaterstofverbindingen

bron: www.khlim-inet.be

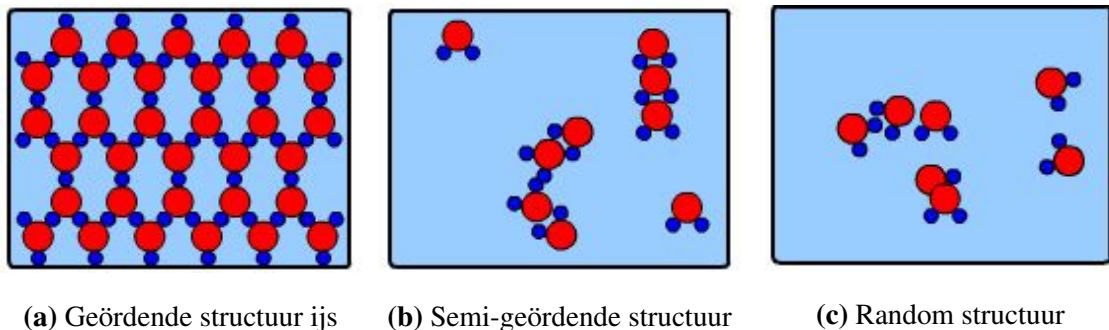
7.3.2 Water

Naast koolwaterstoffen zijn heel veel waterstofatomen gebonden aan zuurstof in de vorm van watermoleculen (H_2O).

Watermoleculen komen vooral voor in de vormen ijs, vloeibaar water en waterdamp. Deze vormen zijn afhankelijk van de structuur van hun moleculaire verbindingen.

- Geördende moleculaire structuur = ijs.
- Semi-geördende moleculaire structuur = water.
- Random moleculaire structuur = waterdamp.

De structuren variëren naargelang de toegevoegde energiewaarde. Bijvoorbeeld indien men energie zal toevoegen in de vorm van warmte zullen de moleculen beginnen trillen en zo meer afstand van elkaar gaan nemen. Hierbij kan men een simpel voorbeeld nemen zoals van water naar waterdamp.

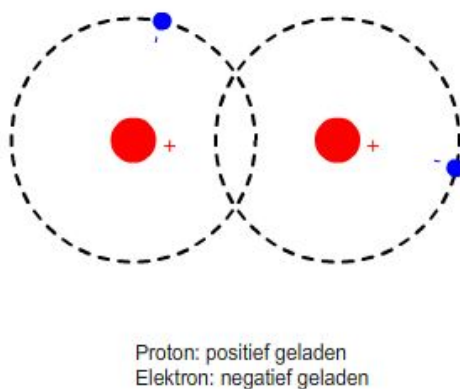


Figuur 7.2: Moleculaire structuurverbindingen van water

bron: www.khlim-inet.be

7.4 Waterstofgas

Wanneer 2 waterstofatomen zich onderling verbinden vormen ze Waterstofgas. Vandaar komt dus de 2 in de wetenschappelijke notatie H_2 . Waterstofgas wordt alleen vloeibaar bij temperaturen dicht bij het abs. nulpunt(0K). Bij alle normale voorkomende temperaturomstandigheden op aarde is waterstof een gas. Waterstof en waterstofgas worden hierdoor regelmatig door elkaar gehaald.



Figuur 7.3: Molecule van waterstofgas
bron: www.khlim-inet.be

Het waterstofgas bestaat uit 2 gekoppelde protonen. Rondom ieder proton draait een elektron. Een proton is positief en een elektron negatief. Positief en negatief heffen elkaar op, Er kan dus geconcludeerd worden dat waterstofgas elektrisch neutraal geladen is. Met andere woorden "ongeladen". Niet iedereen heeft of neemt echter waterstofgas tot zijn beschikking. Een mogelijkheid hiervan kan te wijten zijn aan het feit dat er redelijk wat opvattingen zijn omtrent waterstofgas.

Enkele voorbeelden:

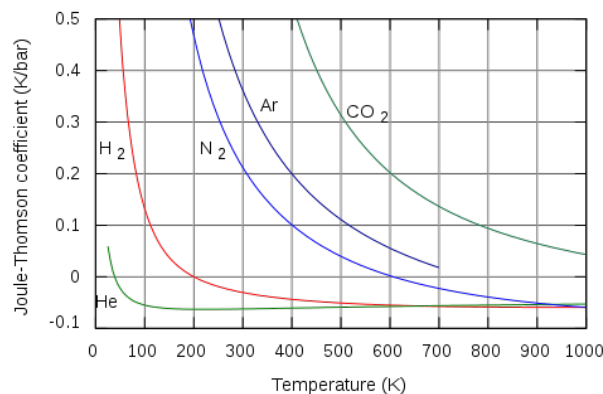
- Waterstof? Zeer gevaarlijk, kijk naar waterstofbom
- Waterstof? Men bedoelt waarschijnlijk knalgas, deze explodeert vanzelf.
- Waterstof? De Hindenburg (legendarische zeppelin) brandde af in 1937.
- Waterstof? Deze is veel lichter dan aardgas, daarom is ze ook veel gevaarlijker en explosiever.

Waterstof is echt wel gevaarlijk Hierboven dus een aantal voorbeelden van de meest voorkomende opvattingen rond waterstof. Men is echter wel verplicht om bij gebruik van waterstofgas zeker alert te zijn op gebied van veiligheid. Gebruik en productie van waterstofgas kunnen gevaren met zich meebrengen.

7.4.1 Gevaren verbonden aan waterstofgas

Ontvlambaarheid

Waterstofgas is een zeer licht en extreem ontvlambaar gas. Bij verbranding in de open lucht heeft het een bleekblauwe vlam (vergelijkbaar met aardgas) maar praktisch bijna onzichtbaar bij concentraties van 4 tot 75% in standaardcondities. Bij gassen zoals methaan en propaan (even ter vergelijking) liggen de ontvlambaarheidsgrenzen tussen de 5,3 - 15% en 2,1 - 9,5%. De explosiegrenzen van waterstofgas zijn afhankelijk van 3 factoren, namelijk: de druk, de temperatuur en de vochtigheidsgraad van de omgeving. Waterstofgas kan extreem hoge temperaturen halen bij verbranding. Zo bedraagt de hoogste temperatuur in de waterstofvlam 2318°C. Deze waarde wordt bereikt bij een waterstofconcentratie van 29%, maar in een zuurstofatmosfeer kan de temperatuur oplopen tot 3000°C. Wat waterstofgas ook zo gevaarlijk maakt is het



Figuur 7.4: Coëfficiënt Joule-Thomson

bron: Wikipedia

feit dat deze een zeer geringe hoeveelheid ontstekingsenergie nodig heeft. De minimale ontstekingsenergie bedraagt $0,02mJ$. De ontstekingsenergie is de hoeveelheid energie die nodig is om een stoichiometrisch mengsel van brandstof/zuurstof te ontsteken. Voor het ontsteken van waterstofgas is dus ongeveer een tiende nodig van de energie van een ontlading of statische elektriciteit. Een boog of vonk volstaat dus om waterstofgas te ontsteken. Het is vanzelfsprekend dat bij toepassingen met waterstofgas hoge veiligheidsnormen zijn geboden. Waterstof onder verhoogde druk wordt behandeld omdat bij lekkage, het waterstofgas het inverse Joule-Thomson effect kan in werking brengen. Het inverse Joule-Thomson effect, door de wrijving

van het ontsnappende gas door de scheur kan het gas voldoende opwarmen om direct te ontsteken. De kleine hoeveelheid ontstekingsenergie die dus vereist is om waterstof te ontsteken verhoogt aanzienlijk de kans op een ontsteking. Ten opzichte van andere ontvlambare gassen is waterstofgas dus één van de gevoeligste. Waterstofgasmoleculen zijn zeer klein, wat hun toelaat om door de allerkleinste openingen te stromen. Bij apparatuur die waterstofgas bevatten is dus een zeer hoge nauwkeurigheid geboden. Dit verhoogt dan ook nog eens het kostenplaatje van de apparatuur bovenop de hoogwaardige materialen die men nodig heeft. Om de lektheid van apparatuur te controleren die waterstofgas moet bevatten, zal men een inert gas, namelijk: "helium" gaan gebruiken. De moleculen van heliumgas hebben een vergelijkbare grootte met deze van waterstofgas. Het explosiegebied van waterstofgas bevindt zich in een interval tussen 13 en 59%.

De diffusiecoëfficiënt bedraagt $0,61 \text{ cm}^3/\text{s}$, dit is 4 keer lichter dan bij methaan. Dit is de reden waarom waterstofgas zich veel sneller en gemakkelijker kan mengen met lucht dan methaan of bijvoorbeeld petroleumdampen. Dit is een voordeel in open lucht. Het waterstofgas dat ontsnapt in open lucht lost volledig op in lucht en heeft verder geen schadelijke gevolgen voor het milieu (voordeel). In gesloten niet geventileerde ruimtes kan dit dan een nadeel zijn. Waterstofgas is lichter dan lucht en stijgt, propaan blijft aan de grond en verhoogt de kans op explosie. Uit ervaring blijkt dat waterstofgas niet ontsteekt in open lucht. Er kan besloten worden dat als men het gehele plaatje bekijkt, het grootste gevaar verbonden aan het gebruik van waterstofgas, de vorming is van een ontvlambaar mengsel met lucht dat in contact komt met een ontstekingsbron. Die ontstekingsbron kan resulteren tot verbranden of deflagraties. Omdat een waterstofvlam zich door een veel nauwere opening kan verspreiden dan de meeste gassen, is het veel moeilijker om elektrische motoren te bouwen die voldoende exproof zijn om te gebruiken in atmosferen waar een ontvlambaar mengsel waterstof-lucht kan aanwezig zijn. In het geval waarbij vloeibare waterstof wordt toegepast, moet men 2 mogelijke gevallen bekijken. In het geval van **kleine lekken van vloeibare waterstof is er een onmiddellijke verdamping. De vrijgekomen gasvormige stroom wordt snel opgewarmd en verdund in de lucht. In het geval van grote lekkende hoeveelheden H_2** zal een deel van de lekkende vloeibare waterstof verdampen maar het andere deel kan lekken en een vloeibare waterstofplas vormen op de grond (indien de grond voldoende verkoeld is). De verdamping is hierdoor veel trager en waterstof-

gas heeft bij lagere temperaturen een dichtheid die vergelijkbaar is met die van lucht. Door de verdamping ontstaat een lucht/waterstof-mengsel. Dat mengsel verspreidt zich progressief in de atmosfeer. Indien het mengsel niet onvlamt dicht bij de bron en zich verder verspreidt kan dit na bepaalde tijd een gevaar op brand creëren. De uitbreiding van zo'n waterstofgaswolk kan tot wel enkele tientallen meters lang worden. Een voordeel van waterstofgas is dat deze bij detonatie niet in alle richtingen explodeert maar eerder een steekvlam vormt in een welbepaalde richting. In de automobiellndustrie zou men dit als een voordeel kunnen zien ten opzichte van de LPG-voertuigen.



Figuur 7.5: Ontsteking brandstoftank, links waterstofauto, rechts LPG

Gezondheidsrisico's

Waterstof(gas) is niet toxisch maar wordt bekeken als een verstikkend gas. Dit omdat bij bijvoorbeeld in een besloten ruimte zonder voldoende ventilatie de normale concentratie van 21% waterstofgas, de aanwezige zuurstof kan reduceren. Hierbij bestaat het gevaar dat waterstofgas niet kan gedetecteerd worden door een persoon omdat het gas geur- en kleurloos is. Verstikking van personen en andere levende wezens kan optreden wanneer de zuurstofconcentratie verdrongen is tot 18%. Bij verstikking door tekort aan zuurstof treden volgende effecten, symptomen op:

- Snelle ademhaling
- Verzwakte alertheid
- Verzwakte spierwerking
- Onduidelijk onderscheidingsvermogen

- Emotionele instabiliteit
- Vermoeidheid

Indien de verstikking verder vordert, zullen symptomen verschijnen zoals misselijkheid, braken, bewustzijnverlies, totale uitputting en uiteindelijk leiden tot de dood. Wat men moet weten is dat de concentraties van waterstof veel lager liggen bij kans op ontvlammen of explosie dan bij risico op verstikking. Het echte gevaar kan dan ook liggen bij extreme brandwonden. Een brandende waterstofvlam kan men niet waarnemen of ruiken. Een andere mogelijkheid is dat bij vloeibare waterstof de kans op vrieswonden groot is door de koude waterstofdampen.

Gevaren verbonden aan constructiematerialen

Waterstof is niet corrosief, maar bepaalde metalen reageren met waterstof waardoor deze verbrossen. Deze metalen zijn vooral getemperde metalen. Bij gedeeltelijk hoge temperaturen en verhoogde drukken kunnen stalen worden beschadigd of verbrossen door in contact te komen met waterstof(gas). Staal dat in contact komt met waterstof ondergaat decarboxilatie. Deze veroorzaakt een verlies aan ductiliteit en is verantwoordelijk voor de vorming van microscheurtjes ter hoogte van de korrelgrenzen. Na lange blootstelling vormen er zich altijd maar meer microscheurtjes in tot uiteindelijk grote brokstukken beginnen af te brokkelen. Hierbij daalt telkens ook nog eens de weerstand van het materiaal tegen decarboxilatie. Decarboxilatie van staal is omkeerbaar, maar de vorming van microscheuren niet. Decarboxilatie en microscheurvorming doen zich voor bij temperaturen tussen de 300 en 500°C. Men kan de weerstand van staal tegen waterstofbrosheid aanzienlijk verhogen door additieven toe te voegen. Vaak past men staallegeringen zoals CrMo toe voor toepassingen met waterstof(gas).

Specifieke gevaren bij vloeibare waterstof op extreem lage temperaturen

Waterstof is enkel vloeibaar te krijgen op extreem lage temperaturen (-252,87°C) en onder druk. Vloeibare waterstof wordt ook wel geschreven als LH₂ en bestaat voor 99,97% uit parawaterstof en 0,21% uit orthowaterstof. Verscheidene materialen die worden blootgesteld aan vloeibare waterstof bij extreem lage temperaturen worden bros. Enkele voorbeelden hiervan zijn: koolstofstaal, kunststof en rubber.

Onafhankelijk van de gebruikte materialen moet men op alle vlakken verontreiniging door water vermijden. Ijsvorming in de componenten en leidingen kunnen scheuren veroorzaken en zo een doorgang creëren voor de vloeibare waterstof.

In geval van brand moet men weten dat vloeibare waterstof behoort tot de cryogene vloeistoffen. Deze kunnen water zeer gemakkelijk bevriezen. Het bevroren water of ijs kan veiligheidskleppen gaan blokkeren die bijvoorbeeld verantwoordelijk zijn voor het veilig afvoeren van de vloeibare waterstof.

Water is vergeleken met vloeibare waterstof zeer warm. Indien het "warme water" in contact komt met de vloeibare waterstof zal deze de waterstof de mogelijkheid geven om te verdampen door afgifte van warmte. Het verdampende waterstof vormt zich tot waterstofgas. Deze zal de brand nog meer kunnen voeden wat tot een onvermijdelijke inferno kan leiden.

Bepaalde inerte gassen zoals stikstof (CO_2) kunnen ook bevriezen en opblokkingen veroorzaken. Deze opblokkingen kunnen op hun beurt opblokkingen teweeg brengen in de leidingen en kleppen en zo breuken veroorzaken (door de stijgende druk en ijsvorming). Breuken kunnen zich voordoen in bijvoorbeeld transfertleidingen of erger: "de opslagtank".

8 | Productie van waterstof

8.1 Inleiding

Bij de productie gaat men in het eerste stadia van de opbouw zich steeds de vraag stellen: waar zal men het waterstofgas vandaan halen? Met andere woorden de locatie en de productiemethode. De locatie zal ongetwijfeld een invloed hebben op de ontginningsmethode en omgekeerd. Er bestaan verschillende vormen van waterstofproductie. Deze zullen verder in dit hoofdstuk aan bod komen. De hedendaagse, meest economische energievorm is nog steeds die van de fossiele brandstoffen.

8.1.1 Fossiele brandstoffen

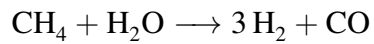
Fossiele brandstoffen zijn voor bijna alle mensen doodnormaal. Maar als men in gedachten naar het vormingsprocédé van de fossiele brandstoffen bekijkt, dan weet men dat deze gevormd werden door een proces waarbij planten en dieren die miljoenen jaren onder de grond, onder bepaalde druk en temperatuur werden omgevormd tot olie, aardgas en steenkool. Men kan dus besluiten dat dit opgeslagen zonne-energie is omdat planten en dieren zonne-energie gebruikten om te groeien en te overleven. Bijvoorbeeld planten gebruiken zonne-energie om hun groei in koolwaterstofverbindingen te kunnen vastleggen.

8.2 Reforming van fossiele brandstoffen

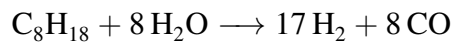
Olie en aardgas bevatten koolwaterstofmoleculen. Deze bestaan vaak uit grote ketens van waterstof- en koolstofatomen. Door het toepassen van een omvormingsproces waarbij hoge temperatuur en druk toegepast worden (reforming), kunnen de koolstofatomen van de waterstofatomen gesplitst worden. Hierdoor ontstaat waterstofgas. De overgebleven koolstofatomen verdwijnen in de atmosfeer onder de vorm van koolstofdioxiden.

Een chemisch voorbeeld:

- Stel methaan als grondstof

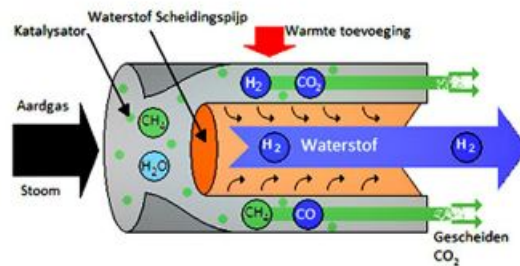


- Stel benzine als grondstof



Reforming van fossiele brandstoffen om waterstof(gas) te produceren behoort tot de methode van de niet hernieuwbare energieproductie. Ze wordt hedendaags toegepast bij volgende fossiele brandstoffen:

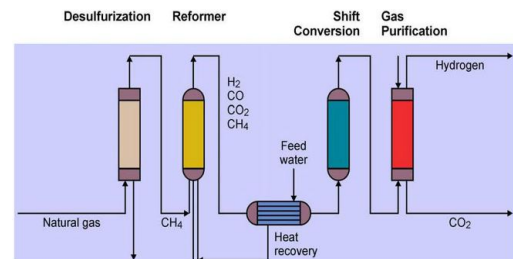
- Ruwe minerale olie
- Aardgas
- Steenkool
- Uranium



Figuur 8.1: Reforming van fossiele brandstoffen

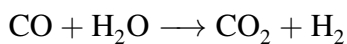
8.2.1 Stoom reforming van aardgas

Waterstof kan worden geproduceerd uit stoom-reforming van bijvoorbeeld methaan-gas (aardgas). In dit proces zal het methaan-gas in aanwezigheid van een katalysator gaan reageren met stoom onder een druk van 3 tot 25 bar. De uitgangproducten van dit proces zijn waterstof en koolmonoxide. In dit principe geldt: hoe hoger de druk, hoe hoger de temperatuur van de stoom. Parallel aan dit proces is er nog een subreactie. Namelijk de **water-shift-reactie**. Hierbij zal een klein deel van de gevormde koolmonoxide met de stoom en de katalysator gaan reageren en zich vormen tot waterstof en CO₂. Stoom-reforming is een endothermisch proces. Dit houdt in dat om het proces vlot te laten verlopen energie in de vorm van warmte moet toegevoegd worden.



Figuur 8.2: Principe van stoom-reforming

De water-shift-reactie



pressure-swing-adsorption:

In deze laatste stap van het stoom-reforming-proces worden de onzuiverheden zoals CO₂ en andere onzuiverheden uit de gasstroom verwijderd zodat zuiver waterstofgas overblijft. Deze methode van waterstofwinning uit fossiele brandstoffen kan ook toegepast worden bij andere fossiele brandstoffen zoals benzine en propaan.

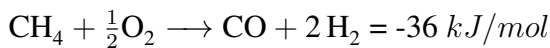
Kortom dit proces is een reactieproces waaraan 3 voorwaarden zijn verbonden. Deze zijn:

- druk
- warmte
- katalysator

8.2.2 Partiële oxidatie van aardgas

Bij partiële oxidatie (POx) worden methaan en andere koolwaterstofverbindingen die voorkomen in aardgas met een beperkte hoeveelheid zuurstof (voornamelijk lucht) geoxideerd bij temperaturen van 950 tot 1100°C. De lucht die aangevoerd wordt bevat te weinig zuurstof om het aardgas compleet tot CO₂ en water te oxideren omdat er geen stoichiometrische hoeveelheid zuurstof beschikbaar is. In dit proces worden voornamelijk waterstof en koolmonoxide gevormd.

Methaan:



Propaan:



Benzine:



Hierboven werd er iso-octaan genomen als voorbeeldstof. Dit proces wordt uiteindelijk gevolgd door de zogenaamde: "Water-Gas Shift" Reactie.



8.2.3 Waterstof uit ruwe aardolie

Ruwe aardolie bestaat uit:

84 %C + 14 %H₂ + 1 tot 3 %N₂ + <1 %zuurstof + <1 %metalen + < 1%zouten. Het is niet mogelijk om waterstof direct uit aardolie te winnen. Voor men het waterstofgas kan ontginnen moet men allereerst de aardolie "kraken" in een raffinaderij. Na dit kraken houdt men lichte fracties over van de aardolie die men kan gebruiken in het " stoom reforming of Pox proces"(zie eerder). De gekraakte aardolie wordt dus omgevormd in een "stoom reforming of partiele oxydatie"proces tot waterstofgas en CO₂.

8.2.4 Waterstof uit steenkool

Naast de ontginning van waterstofgas uit aardgas en aardolie is er ook een ontginningsmogelijkheid uit steenkool. Voor de productie van waterstofgas uit steenkool zijn er 3 principes. Deze 3 principes worden van elkaar gescheiden door hun productiemethode. De 3 methodes zijn:

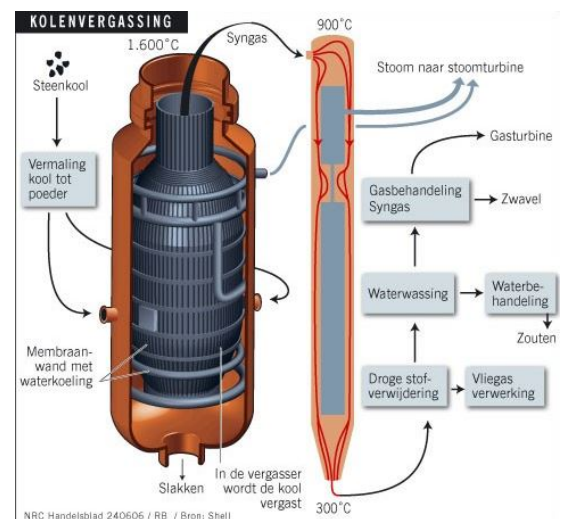
- Kolenvergassing
- Ondergrondse kolenvergassing (UCG proces)

UCG proces = Underground Coal Gassification.

Bij deze 3 genoemde methodes worden de vooral laatste 2, toegepast omdat de eerste methode economisch niet voordelig is. Verder heeft ze ook nog een sterker vervuilende waarde met een hogere CO₂ productie dan de andere 2 methodes. Om deze redenen zal er daarover niet verder worden op in gegaan.

Kolenvergassing

Deze methode wordt vooral toegepast bij de productie van kunstmest en methanol en ook gebieden waar aardgas niet direct beschikbaar is. Voor een rendabele productie van waterstofgas uit steenkool moet de steenkool ook een kleine behandeling ondergaan. Deze behandeling omvat het toevoegen van enkele additieven. Het proces verloopt als volgt: De steenkool wordt bepoederd en via toevoeging van lucht en stoom op hoge temperatuur gebracht in een reactor. Bij dit proces ontstaat waterstof (H₂ en CO en CO₂ en een zeer geringe hoeveelheid CH₄). Dit proces verloopt echter niet zuiver. Er doen zich voornamelijk ook gasvormige verontreinigingen voor zoals COS en waterstofsulfide. Deze moeten uiteraard worden verwijderd omdat ze de katalysatoren vergiften die in dit



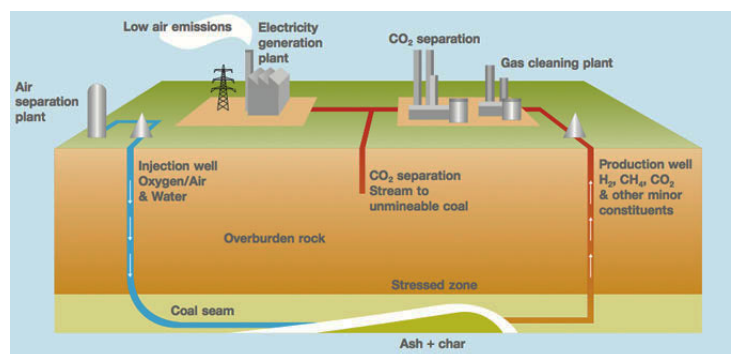
Figuur 8.3: Proces: kolenvergassing

bron:<http://vorige.nrc.nl>

proces gebruikt worden. Vergeleken met stoom reforming is dit proces veel complexer door de vele behandelingen die de steenkool moet ondergaan als ook de verwijdering van de vele ongewenste bijkomende producten. De installaties op zich zijn zeer complex en worden daarom niet op kleine of middelmatige schaal toegepast. Ze worden enkel en alleen toegepast op installaties voor productie op grote schaal. Deze dergelijke installaties zijn goed voor een productie variërend van 20 000 tot 100 000 m^3 H_2 /uur.

Ondergrondse kolenvergassing of het UCG-proces

Bij ondergrondse kolenvergassing gaat men waterstofgas als het ware produceren onder de grond en mede met de warmte van de aarde en in de buurt van een steenkoollaag. In plaats van de steenkool te ontginnen gaat men 2 gaten boren in de steenkoollaag. Het eerste boorgat dient om lucht te injecteren (oxydansen). Het tweede boorgat wordt gebruikt om het gas en met andere woorden het gewenste product (met nog enkele onzuiverheden) naar boven te brengen. Een steenkoollaag heeft een bepaalde doorlaatbaarheid. Deze is afhankelijk van haar geschiedenis, geologie en haar ouderdom. Volledig vertrouwen op de permeabiliteit van deze laag is dus zeker onvoldoende. Er werd met succes "high pressure hydrofracking" toegepast of met andere woorden met water onder hoge druk de steenkoollagen breken in combinatie met "reverse combustion". Deze techniek wordt toegepast bij steenkoollagen dieper dan 500m. Verder is er ook nog de mogelijkheid om dit offshore toe te passen. Deze laatste is eventueel nog interessant. Het breken van steenkoollagen kan namelijk aardverschuivingen en aardbevingen met zich meebrengen.



Figuur 8.4: Ondergrondse steenkoolvergassing

bronnen: <http://climategate.nl> en <http://www.ergoexergy.com/>

Milieuvoordelen van ondergrondse kolenvergassing

- Lagere uitstoot doordat de vergassing ondergronds plaatsvindt. Dit heeft ook als gevolg dat er minder inspanning moeten zijn voor het milieubeheer en de daarop volgende kosten.
- De productie van vaste stof deeltjes is met de helft gereduceerd en er is geen emissie naar de lucht.
- CO₂ kan worden ingevangen en worden verwijderd.
- Er is een kleiner risico op vervuiling van oppervlakte water (= natuurlijke filter).
- De uitstoot van methaangas wordt gereduceerd door op te vangen en terug te winnen door deze terug in het vergassingsproces te gebruiken. Er is dus geen sprake van emissie van het methaangas naar de atmosfeer. Dit is anders dan bij conventionele mijnbouw.
- UCG heeft geen externe waterbron nodig doordat er genoeg grondwater beschikbaar is op dergelijke dieptes (>500m).

Martens (2013, 2005); khl (2011); Didde (1996)

8.3 Waterstof uit elektrische energie

8.3.1 Elektrolyse

Elektrolyse versus thermochemische productie van H₂

Elektrolyse	Thermochemische splitsing van water
Elektrische energie voor splitsing water H ₂ aan de Kathode (+) en O ₂ aan de Anode(-) Stoom elektrolyse maakt gebruik van warmte i.p.v elektriciteit om splitsen van water rendabeler te maken	Warmte energie op hoge temperatuur (ong. 1000°C) Splitsen van water in deeltjes
water	water
Elek. geproduceerd van nucleaire reactoren of warmteafval (restwarmte).	Hoge temperatuur van gasgekoelde nucleaire reactoren
Verdere ontwikkeling vereist van Light water reactors (LWR) of geavanceerde light water reactoren Nodige ontwikkeling van hoge temperatuursreactoren voor stoom elektrolyse op hoge temperaturen	Onderzoek naar beter gebruik (rendement) van de hoge temperatuurswarmte van de gasgekoelde nucleaire reactoren om water te splitsen in H ₂ en O ₂
middeltermijn productie	Lange termijn productie

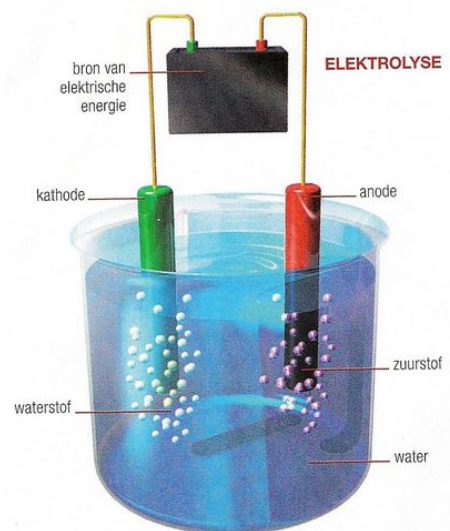
Tabel 8.1: Elektrolyse versus Thermochemische splitsing van water

Elektrolyse van water is een zeer schone productiemethode voor waterstof. Het is echter economisch niet zo interessant door het zeer slechte rendement. Het levert wel de meest zuivere vorm van waterstofgas op met bijproduct: zuurstof O₂. Elektrolyse vindt plaats in een elektrolyseer apparaat of beter wel elektrolyser genoemd. De eenvoudigste vorm van een elektrolyser kan bijvoorbeeld een simpele kan gevuld met water zijn. Met in die kan 2 elektroden, een anode (-) en kathode (+). Hierbij is water de grondstof voor de productie van waterstof.

Elektrolyse van water is een welbekende en veel toegepaste techniek. Europa heeft hier echter een ondergeschikte rol door de veel te hoge energieprijzen. Men kan elektrolyse echter toepassen met de restenergie die beschikbaar is. Bijvoorbeeld elektrolyse toepassen tijdens de daluren om waterstof te produceren. Hedendaags wordt er slechts 5% van het waterstofgas voor industriële doeleinden geproduceerd met elektrolyse. Het merendeel van waterstof toegepast in de industrie wordt geproduceerd met "steam reforming van methaangas".

Principe van elektrolyse

Bij elektrolyse wordt water met behulp van elektriciteit gesplitst in waterstof- en zuurstofatomen. Dit is een proces dat al meer dan honderd jaar wordt gebruikt. Het werkt als volgt: twee elektroden, een positieve (anode) en een negatieve (kathode) worden ondergedompeld in puur water dat beter geleidend is gemaakt door de toevoeging van een elektrolyt (bijvoorbeeld zout). Wanneer men door het water elektriciteit (gelijkstroom) laat lopen, borrelt de waterstof omhoog bij de negatieve elektrode (de kathode) en de zuurstof bij de positieve elektrode (anode). Bij elektrolyse van 1 mol water wordt er 1 mol H_2 en 0,5 mol O_2 gas geproduceert.



Figuur 8.5: Principe van elektrolyse
bron: members.multimania.nl

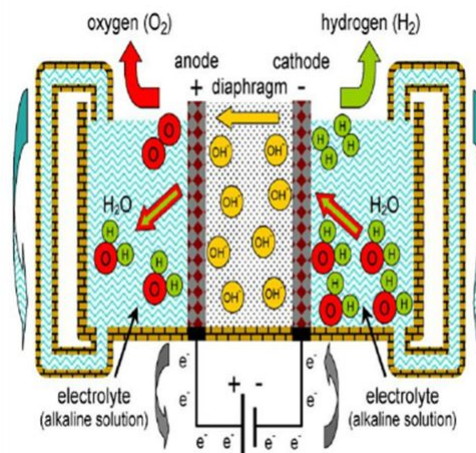
8.3.2 Soorten elektrolyzers

Naargelang de opbouw en toegepast membraam onderscheiden we:

- Standaard elektrolyser
- Poly-Elektrolyt-Membraam elektrolyser
- Solid Oxide elektrolyser
- Hoge-Temperatuur elektrolyser

Standaard elektrolyser

Bij de conventionele of de standaard elektrolyzers wordt er water ontleed in waterstofgas en zuurstofgas als gevolg van een elektrische stroom. Hierbij is de gebruikte grondstof, water, beter geleidend gemaakt door het toevoegen van een elektrolyt. Als voorbeeld een kaliumhydroxide (KOH) oplossing.

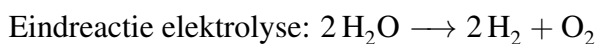
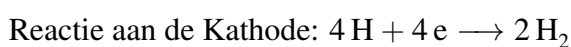
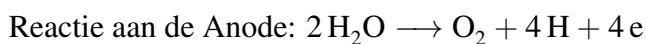


Figuur 8.6: Conventionele elektrolyser

bron: www.khlim-inet.be

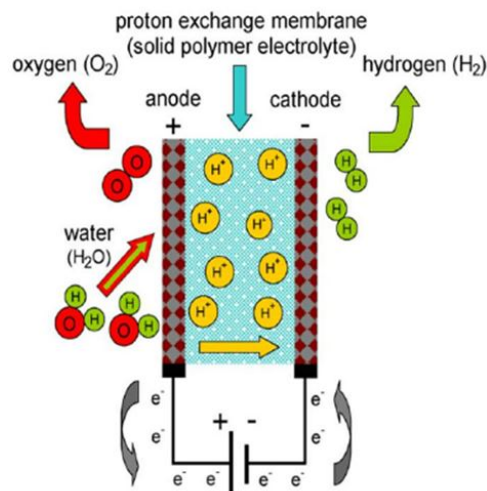
De elektroden zijn zoals te zien op bovenstaande afbeelding gescheiden door een diafragma. Aan de anode worden elektrische ladingen (elektronen) onttrokken terwijl aan de kathode elektrische ladingen worden toegevoerd. Door deze reactie worden de chemische bindingen van de watermoleculen verbroken. Hierdoor ontstaan zogenaamde ion-bindingen. Het eindresultaat van dit proces is dat aan de positieve pool, (anode) kationen (H⁺) de pool beslaan. Het gevolg is dat aan de positieve pool zuurstofgas ontstaat (O₂). Tijdens dit gebeuren beslaan anionen (OH⁻) de negatieve pool waardoor waterstofgas (H₂) ontstaat.

De reactie kortgevat:



Poly-Elektrolyt-Membraam elektrolyser

Bij een PEM elektrolyseer cel berust de werking op het gebruik van de zeer dure edelmetalen als katalysator. Dit is in de meeste gevallen platina (Pt) of een legering van platina/ruthenium (Pt/Ru). Ruthenium kan men aanwijzen als een zilvervariant of afgeleide. Ze word soms toegevoegd aan metalen als titanium om zo de corrosiebestendigheid te vergroten. Naast de katalysator is er ook nog een poly-elektrolyt bestaande uit Nafion ($C_7HF_{13}O_5S.C_2F_4$) toegepast als geleidend materiaal voor de overdracht van waterstofkernen (protonen en H^+ ionen). Nafion is een gesulfoneerd tetrafluorethyleen gebaseerde fluorpolymeer-copolymeer. Het gebruik van deze PEM cellen geeft als voordeel dat men kan gaan werken met hogere stroomdichtheden ($1-2A/cm^2$ of $10-20kA/m^2$). Bij de (klassieke) alkalische elektrolyzers is dit een stuk lager (max $2kA/m^2$). De conversie efficieny bij PEM-cellen ligt tussen 50 en 90%. Deze resultaten zijn echter nog niet behaald bij de hoge stroomdichtheden.

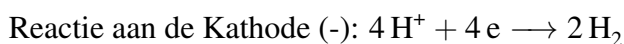
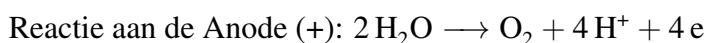


Figuur 8.7: PEM elektrolyser

bron: www.khlim-inet.be

Het grote voordeel van PEM elektrolyzers is dat er geen circulerende vloeibare elektrolyt vereist is.

De reactie van elektrolyse wordt even kortgevat:

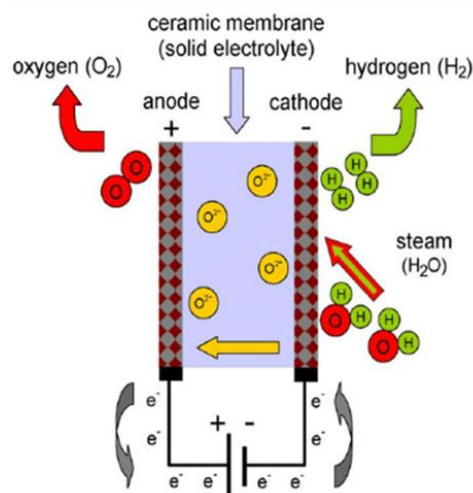


Solid Oxide elektrolyzers

Bij Solid oxide elektrolyzers worden keramische materialen (solid) gebruikt als elektrolyt. De keramische materialen laten bij hoge temperaturen selectief de negatief geladen zuurstof ionen door. Bij deze methode ontstaat het waterstofgas op een geheel andere manier dan bij de andere genoemde elektrolyzers.

Het principe:

Water neemt aan de zijde van de kathode elektronen op, op het externe elektrisch circuit (voedingsnet van de elektroden) en vormen zo waterstofgas. Hierbij ontstaan negatief geladen zuurstof ionen die zich doorheen het membraam verplaatsen naar de zijde van de anode. Aan de zijde van de anode gaan de negatief geladen zuurstof-ionen elektronen afgeven aan het externe circuit. Als gevolg van deze reactie ontstaat zuurstofgas. Vergeleken met de PEM (800 - 1000°C) alkaline (1000 - 1500°C) elektrolyzers werken de Solid oxide elektrolyzers op veel hogere temperaturen. Zo worden temperaturen van 6000 tot 8000°C behaald.



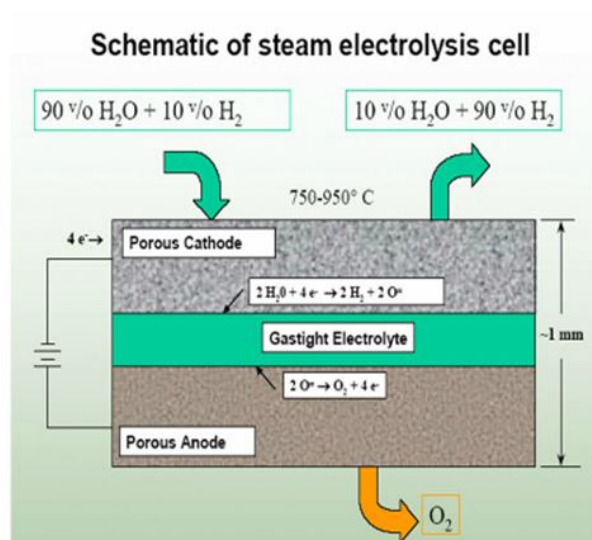
Figuur 8.8: Solid oxide elektrolyser

bron: www.khlim-inet.be

Men kan dus besluiten dat solid oxide elektrolyzers effectief kunnen worden toegepast bij kern-energie als energiebron wegens de werking op hoge temperaturen die bij kernenergie vrijkomen. Hiermee heeft men een hogere "all-over efficiency"(hogere totale efficiëntie).

Hoge-Temperatuur Elektrolyser

Naast de PEM, alkaline en de solid oxide elektrolyzers onderscheiden we de Hoge-Temperatuur Elektrolyzers of afgekort "HTE". Met de HTE-cel gaat men voor de elektrolyse gebruik maken van poreuze elektroden en stoom. Tijdens het proces wordt de nodige energie toegevoerd in de vorm van warmte in plaats van elektriciteit om het water te ontleden. De totale benodigde energie daalt door bovenstaande reden. Bij de HTE-proces wordt een vergelijkbaar principe toegepast als bij de "Solid Oxide Fuel Cell"(SOFC). De energie efficiëntie die men hiermee bereikt is hoger dan bij de SOFC omdat het rendabeler is de warmte direct te benutten in plaats van deze eerst om te zetten in elektriciteit om vervolgens te elektrolyseren. Dit alles echter onder de voorwaarde dat er sprake is van een directe en snelle bereikbare warmte afkomstig van een niet-fossiele brandstofbron, zoals een geavanceerde hoge-temperatuur kernreactor of een aangepaste zonne-energie installatie.



Figuur 8.9: Hoge-Temperatuur Elektrolyser

bron: www.khlim-inet.be

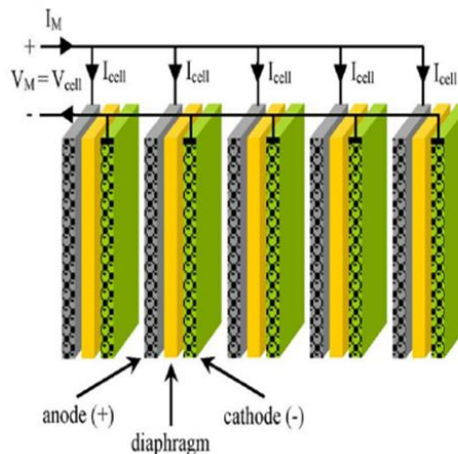
8.3.3 Productieopstelling van elektrolyse met een unipolaire cel

De onderstaande figuur is een schematisch overzicht van een elektrolyse opstelling met unipolaire cellen. Dit zijn cellen gedompeld in een oplossing van 20 - 30% KOH (=elektrolyt). Per cel is een werkspanning vereist van 1,9 - 2,5V (volt).

Voordeel Het grote voordeel van een dergelijke opstelling is dat deze zeer gemakkelijk is in onderhoud en reparatie dankzij zijn eenvoud.

Nadeel Het nadeel is dat deze alleen werkt op lage temperaturen en dit tevens met een lage stroomdichtheid (A/cm^2).

Verklaring van een elektrolyt oplossing Een elektrolyt oplossing geleidt de elektrische stroom via transport van ionen. Er worden echter geen elektronen getransporteerd in een waterige oplossing. Dit is een veel voorkomend misverstand. Men moet dus een elektrolyt aan water toevoegen om elektronen te kunnen transporteren.



Figuur 8.10: Opstelling elektrolyse met unipolaire cel

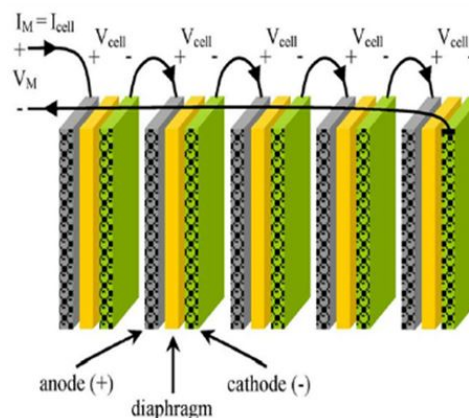
bron: www.khlim-inet.be

8.3.4 Productie opstelling elektrolyse met een bipolaire cel

Een andere productie elektrolyse cel is de bipolaire cel. Dit ontwerp noemt men ook wel eens de "filter-pers". Tussen de 2 elektroden, namelijk: kathode (-) en anode (+), bevinden zich de alternerende bipolaire elektroden. Deze zijn gescheiden van elkaar doormiddel van een diafragma membraam. Dit alles is opengestapeld en ingeklemd in een wat men noemt een "stack". Deze cellen of "stacks" zijn van redelijk dunne aard en kunnen in serie geschakeld worden. Hierdoor kan men hogere spanningen behalen. Wegens hun afmetingen kunnen de bipolaire cellen veel kleiner zijn dan hun unipolaire broeders.

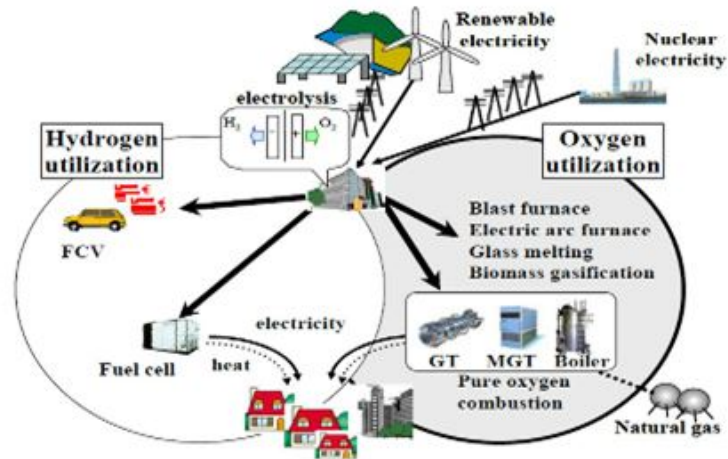
Voordeel Doordat de cellen in serie geschakeld worden en zodoende hogere spanningen bereikt worden, kan men ook hogere stroomdichtheden behalen. Dit heeft het rechtstreekse gevolg dat men dan ook hogere gasdrukken kan behalen met de geproduceerde waterstof- en zuurstof-gassen.

Nadeel Bij onderhoud of herstelling is men verplicht de gehele "stack" uiteen te halen wat dan kan resulteren in dichtingsproblemen.



Figuur 8.11: Productieopstelling van elektrolyse met bipolaire cellen

bron: www.khlim-inet.be

Concept gebruik van door elektrolyse geproduceerde gassen (H_2 en O_2)

9 | Opslag van waterstof

De opslag van waterstof is de dag van vandaag nog steeds een grote uitdaging. Zeker om dit op een gehele efficiënte manier en op grote schaal te kunnen toepassen. De specifieke energie-inhoud van waterstof op basis van gewicht is erg hoog (120MJ/kg). Op basis van volume is deze dan echter weer klein ($10,8\text{MJ/nm}^3$). Om deze 2 redenen is een compacte opslag van energie in de vorm van waterstof een grote uitdaging. Bij de opslag van waterstof onderscheiden we 3 vormen. Namelijk:

- Gas onder druk
- Vloeistof
- Metaalhydride

Op temperaturen van 0 tot 14 Kelvin komt waterstof ook voor onder vaste vorm. Op technisch vlak bekeken kan men waterstof ook opslaan onder vaste vorm. Economisch bekeken, is dit niet zo interessant. Daarom zal dit niet verder worden behandeld. De vorm die men toepast voor opslag van waterstof wordt bepaald door de toepassing. Zo zal men voor stationaire toepassingen eerder gaan kiezen voor opslag van waterstof onder gasvorm in een tank. Dit is omdat bij vaste toepassingen er meestal voldoende ruimte beschikbaar is. Bijvoorbeeld het plaatsen van een tank met een gegoten fundering. Voor mobiele toepassingen is er dan het omgekeerde. Men heeft niet veel plaats beschikbaar en tracht de installatie zo compact mogelijk te behouden. Gewichtbesparing is ook van belang. Daarbij gaat men voor mobiele toepassingen meer en meer beroep doen op de metaalhydriden. Ongetwijfeld is de toepassing van waterstof in de voertuigindustrie de toekomstmuziek. Bijvoorbeeld: De BMW 7 reeks met waterstofverbrandingsmotor of de Mercedes Benz B-klasse met brandstofcel. Hierbij heeft men grote aantallen en economische doelen. Met voornamelijk behoefte aan:

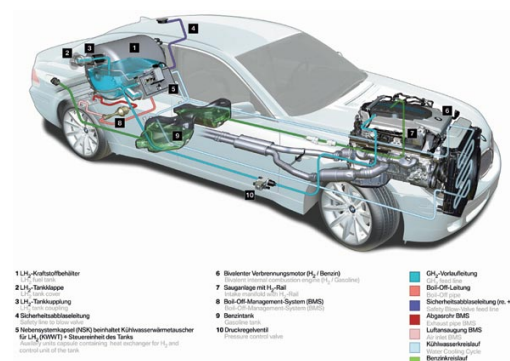
- Lichtgewicht H_2 -opslag installatie met voldoende capaciteit.

- Snel vulbaar.
- Betaalbaar
- Hoogwaardige veiligheid (vooral bij aanrijdingen).



Figuur 9.1: Opslagmethoden van waterstof

Er zijn nog geen opslagmogelijkheden die aan al deze punten voldoet maar men is wel goed op weg. Momenteel heeft men dus voor mobiele toepassingen nog enkele beperkingen. Bepaalde merken zoals BMW en Mercedes-Benz (ook Honda, Toyota) hebben echter het licht gezien en investeren meer en meer in waterstoftoepassingen. Zo heeft BMW haar 7-reeks uitgerust met waterstofverbrandingsmotoren en Mercedes spitst zich meer toe op de brandstofceltechnologie met haar kleinere B-modellen. [Mulder \(2005\)](#); [Martens \(2005\)](#)



Figuur 9.2: BMW 7-reeks Hydrogen uitvoering

bron: www.motorstown.com

9.1 Opslag gasfase

In vele toepassingen kan men waterstof opgeslagen vinden onder de vorm van gecomprimeerd gas. Conventioneel worden drukken toegepast van 200 bar. Voornamelijk in de voertuigindustrie past men op de op waterstof werkende prototypes, drukken toe van 700 bar en meer. In de toekomst zal men waarschijnlijk voor de toekomstige R&D-doelstellingen zich richten tot drukken van >700 bar voor voertuigtoepassingen. Dit vraagt uiteraard nog enkele jaren research en ontwikkeling om de juiste materialen te kunnen toepassen en een hoogwaardige veiligheid te kunnen bieden (verkeersincidenten). Bij de opslag van waterstof in gascylinders bij een vaste temperatuur (kamertemperatuur bij voorkeur) kan er meer waterstof worden opgeslagen naarmate de druk toeneemt (momenteel Max 800 bar). De bepalende factor voor de druk is uiteraard het volume van de cilinder en de gasdichtheid.

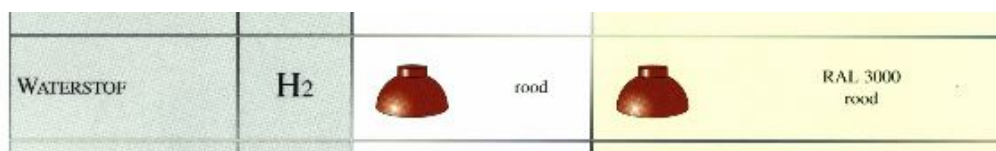
Voorbeeld: Een cilinder van 50l op 700bar bij kamertemperatuur (gasdichtheid = $35\text{kg}/\text{nm}^3$) bevat:

$$\Rightarrow 0.050 \times 35 = 1.75\text{kg waterstof} \quad (9.1)$$

Om de energieinhoud te berekenen kan men de Lower Heating Value gebruiken (LHV).

$$LHV = 120\text{MJ}/\text{kg} \Rightarrow 1.75 \times 120 = 210\text{MJ} \quad (9.2)$$

De reden dat sommige bedrijven voor een installatie kiezen met opslag van waterstof in gascylinders is omdat dit reeds een bewezen technologie is. Het is immers bewezen dat met deze methode waterstof gedurende lange tijd kan bewaard worden (zonder verlies). Voor deze opslag is tevens ook geen koeling vereist. De opslag van waterstof in gascylinders zijn gecodeerd volgens de euronormen en zijn gemerkt met een rode kleur. Martens (2013); pra (2013); Martens (2005); khl (2011)



Figuur 9.3: Europese kleurcodering H2 gascilinder

bron: www.praxair-rhee.nl

9.2 Opslag vloeibare fase

Bij extreem lage temperaturen (-252°C) is transport en opslag van waterstof onder vloeibare vorm mogelijk. Hierbij zal men telkens te kampen krijgen met verdamping van de vloeibare waterstof ("boil-off"). Enerzijds is het grote voordeel van waterstof onder vloeibare vorm dat men kan werken op zeer lage werkdrukken. Anderzijds om de waterstof vloeibaar te behouden moet men de vloeistof continu koelen. Men is dus verplicht om constant energie te investeren (= energieverlies) om de waterstofenergie in vloeibare vorm te behouden. Economisch is dit niet interessant voor installaties die maar af en toe een waterstofafname benutten. Indien vloeibare waterstof wordt toegepast, wordt er een onderscheid gemaakt tussen stationaire en mobiele opslag. Zoals eerder besproken in dit hoofdstuk dringt er warmte in de tank binnen waardoor de vloeibare waterstof zal stijgen in temperatuur. Door de stijging in temperatuur zal de vloeibare waterstof beginnen opkoken en drukstijging in de tank veroorzaken ("boil-off"). Logisch is het feit dat een grote tank procentueel minder verliezen zal ondervinden dan een kleine tank. De reden hiervoor ligt bij de betere verhouding tussen volume en oppervlak. Mulder (2005); Martens (2005); NWV (2013)



Figuur 9.4: Bolvormige opslagtank H_2
bron: www.

Dit wordt praktisch weergegeven via onderstaande berekening.:

De praktische uitgangspunten voor waterstof:

- Cryogene isolatie met warmtegeleidingscoëfficiënt $0,0007\text{W}/(\text{m} * \text{K})$
- Buitentemperatuur: $25^{\circ}\text{C}(= 273,15\text{K} + 25)$
- Kooktemperatuur vloeibaar waterstof onder atmosferische druk: $20,4\text{K}$

Stel een bolvormige tank als in figuur 6.4 met volgende waarden:

- Volume van de bol: 200m^3
- straal van de bol: $3,62\text{m}$
- Oppervlak van de bol: $165,38\text{m}^2$

- Wanddikte tank: 20cm

$$Q = \lambda * A * (\Delta T / \Delta x) Q = 0,0007 * 165,38 * ((298,15 - 20,4) / 0,20) = 160,77 [J/s] \quad (9.3)$$

Nu men de instroming van warmte in de tank kent, kan men de uiteindelijke verliezen gaan bepalen (indien geen koeling!). De massadichtheid van vloeibare waterstof bedraagt 71gram/l. Dit is gelijk aan 71kg/m³. Een volledig gevulde tank van 200m³ bevat dan 14200 kg waterstof of 41,2 ton waterstof. De verdampingswarmte van vloeibare waterstof wordt uitgedrukt in [J/g] en bedraagt 446,3J/g. De warmte instroom is ook gekend dus kunnen we het verlies in gram/s bepalen.

$$160,77 / 446,3 = 0,36 \text{ gram/s} \quad (9.4)$$

Er gaat dus 0,36 gram/s verloren of per dag:

$$(0,36 * 3600s * 24h) / 3600 = 31,104 \text{ kg/dag} \quad (9.5)$$

De opslagtank krijgt dus te kampen met 31,104kg/dag verlies. Voor zo'n groot volume lijkt dit echter maar een klein verlies. Procentueel wordt dit:

$$100 * (31,104 / 41200) = 0,075\% \quad (9.6)$$

Naarmate het oppervlak van de tank zal toenemen zal het verlies procentueel dalen. De dikte van de tankwand zal uiteraard ook een enorme invloed hebben en dus is een goede isolatie van de tank aangeraden. Om deze verliezen ("boil-off") te beperken moet de tank dus gekoeld worden. Voor toepassingen waarin de kosten belangrijk zijn en er niet constant vraag is naar vloeibare waterstof is dit dus allesbehalve interessant. In de lucht- en ruimtevaart kan opslag van vloeibare waterstof relevant zijn. Kosten zijn niet direct van belang en er is een constante vraag om de ruimte- en vliegtuigen te voorzien van brandstof. In de automobiellindustrie zal vloeibare waterstof mogelijk nooit of slechts op kleine schaal worden toegepast. Het koelen van de vloeibare waterstof en de constant stijgende druk vereisen een te complex systeem met speciaal ontworpen druktanks. Opslag in metaalhydriden van waterstofgas zal hiervoor eerder doorbreken. Züttel (2011)

9.3 Opslag in metaalhydriden

Het principe van waterstofopslag in een metaalhydride is dat een metaal als het ware het waterstofgas zal gaan absorberen als een spons. Het waterstofgas wordt chemisch gebonden aan de atomen van een metaal. Meest geschikte hiervoor zijn legeringen van Mg,Ni, Fe en Ti. Bij het proces van de waterstofopname in de legering, dient er warmte te worden ontnomen. Bij de vrijmaking van het waterstofgas uit de legering, dient er dan warmte te worden toegevoerd. Het opname proces is dus omgekeerd evenredig aan het ontnome proces. Het grote voordeel aan metaalhydriden is dat het merendeel van het waterstofgas wordt opgenomen in de legering. Dit zorgt voor een grotere stabiliteit en dus ook voor een kleiner risico vergeleken met een gewone gasfles. De opslag van waterstof in een metaalhydride zit in de lift. Momenteel wordt er onderzoek uitgevoerd naar de opname van waterstof in nanotubes en nanofibers. De legeringen die worden toegepast als hydriden kan men in 2 groepen indelen. De eerste groep is deze van de relatieve zware materiaal hydriden. Enkele praktische voorbeelden hiervan zijn:

- Palladium
- Nikkel
- Ijzer

De tweede groep is deze van de complexe hydriden. Hier vind men de:

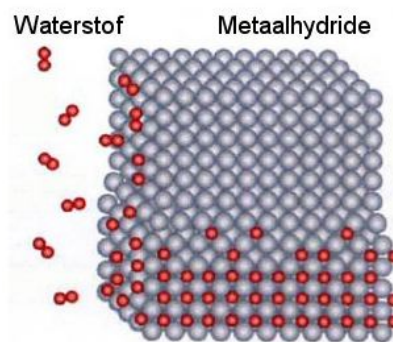
- Lichte zouten
 - Li
 - Na
 - Mg met alanaat (AlH_4)
- Amide (NH_2)
- Boraan (BH_4)

Dit is de momentele lijst van de toegepaste materialen. Dagelijks is men op zoek naar het continu verbeteren van de legeringen. Men heeft als doel voor ogen om een zo geschikt mogelijk

metaalhydrid te creëren, zodat maximale opslag van H₂ in een legering kan worden verwezenlijkt. Deze lijst van materialen is dus met andere woorden zeker niet compleet. Züttel (2011)

9.3.1 Principe van opslag in een metaalhydrid

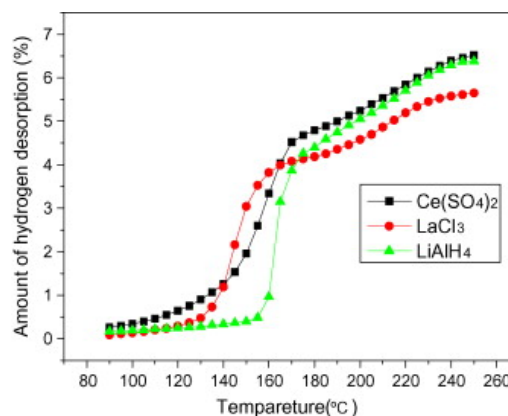
Bij het toevoeren van waterstof onder druk aan een metaallegering zal er een omkeerbare chemische binding ontstaan tussen het waterstofgas en de legering (hydrid). De legering zal als het ware het waterstofgas gaan opnemen in zijn atomen. De binding van het waterstofgas en de legering noemt men een metaalhydrid. Er ontstaat na verloop van tijd een evenwicht in het vrije waterstofgas en het in het metaal chemisch gebonden gas. Het grootste deel van het waterstofgas zal opgenomen zijn in de legering. De opname van een bepaalde hoeveelheid gas



Figuur 9.5: Principe van waterstofabsorptie in een metaalhydride

bron: www.kennislink.nl

bij een bepaalde druk is temperatuursafhankelijk. Deze verhouding kan men terugvinden in zogenaamde PCT-curves. Züttel (2011); Brown (2012); Shenglin (2009)



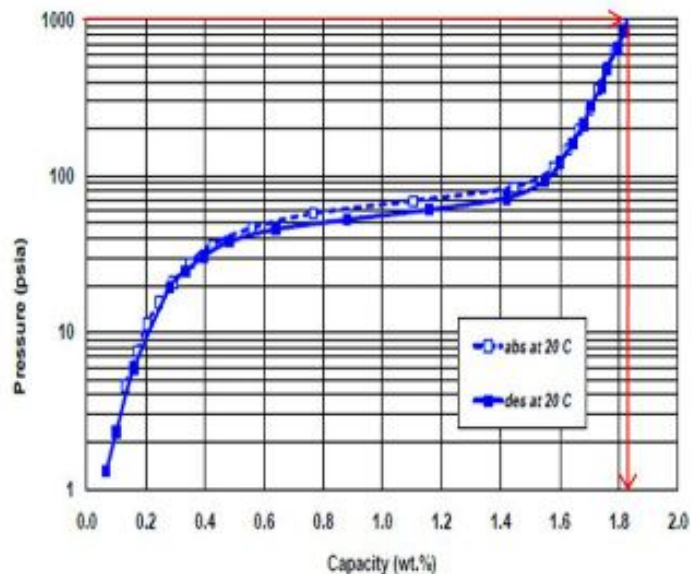
Figuur 9.6: PCT-curve: procentuele opname van waterstof afhankelijk van de temperatuur

bron: www.sciencedirect.com

9.3.2 Hoe bepaalt men de capaciteit van een metaalhydride?

Afhankelijk van de geselecteerde legering, de toegepaste druk en temperatuur kan men een bepaalde hoeveelheid waterstofgas opslaan. De benaderde hoeveelheid kan men bepalen aan de hand van volgend voorbeeld.

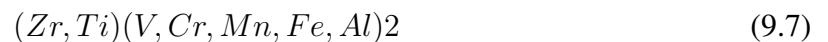
Stel dat we een legering hebben met volgende PCT-curve bij 20°C:



Figuur 9.7: PCT-curve van legering B [Voorbeeld]

bron: www.khlim-inet.be

Bovenstaande grafiek is een voorbeeld van een op lage temperatuur werkende metaalhydride. De legering bestaat voornamelijk uit Zr, Ti, V, Cr, Mn, Fe en Al. De formule voor deze legering:



De grafiek geeft weer dat bij een temperatuur van 20°C en een druk van 60 *psia* ($60 \cdot 6,893 \text{ kPa} = 4,1 \text{ Bar}$) er ongeveer 0,8% waterstof kan worden opgeslagen (absorptie). Rekening houdend met een metaalhydride cilinder van 0,8 liter en een vulbare massa van 3 kg of 3000 gram verkrijgt men een opslagcapaciteit van:

$$3000 \text{ gram} \cdot 0,008 = 24 \text{ gram} \quad (9.8)$$

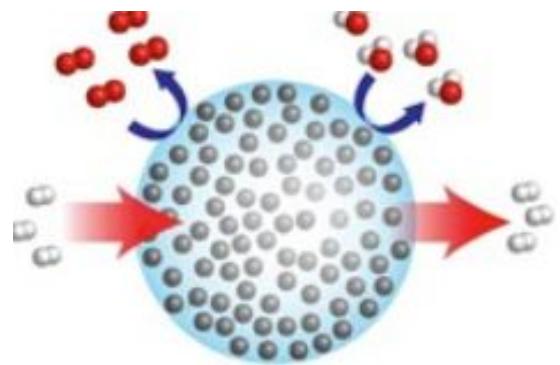
Vergeleken met een gewone gascilinder met hetzelfde volume en bij dezelfde druk en temperatuur is de opslagcapaciteit van een metaalhydride groter. De opslagcapaciteit van een standaard

gascilinder kan men bepalen met de ideale gaswet op voorwaarde dat men te maken heeft met lage drukken. $p * V = n * R * T \Leftrightarrow n = (p * V)/(R * T)$
 $= (4,1 * 10^5 * 0,8 * 10^{-3})/(8,314 * 293,15) = 0,13[mol]$
 Voor een molaire massa van 2 mol per gram vinden we een opslagcapaciteit van 0,2 gram voor een gewone drukcilinder. De opslagcapaciteit van een metaalhydride vergeleken met een gewone cilinder is dus ongeveer (24/0,2) 120 keer groter. De afmetingen van de metaalhydride in dit voorbeeld wijken mogelijk af van de werkelijkheid.

9.3.3 Nanotechnologie

De rijzende sterren bij de metaalhydriden zijn deze van de nanotechnologie. Hierbij worden legeringen deeltje/deeltje opgebouwd. Enkele voorbeelden hiervan zijn de koolstofnanobuisjes als nanomagnesium die zeer geschikt zijn voor opslag van waterstof. Dijkgraaf (2011)

De problematiek bij de metaalhydriden is dat ze zo stabiel zijn dat het desorberen van waterstof praktisch moeilijker en moeilijker werd. Met de nanotechnologie is dit nu verleden tijd. Men heeft ontdekt dat de grootste rem op de reactiekinetiek wordt veroorzaakt door de diffusie van waterstof. De oorzaak hiervan ligt bij de reeds gevormde metaalhydride. De dikte van de hydridelaag wordt namelijk bepaald door de grootte van de toegepaste deeltjes. Hoe kleiner de deeltjes, hoe dunner de hydridelaag wordt gevormd. Bij deze methode wordt ook een kunstof(perspex) namelijk "polymethylmethacrylaat, PMMA" toegepast. Het perspex heeft 2 taken. In de eerste plaats moet ze de nanodeeltjes uit elkaar houden, maar belangrijker is dat het perspex zal werken als een gasbarrière. Dit houdt in dat waterstofmoleculen door het perspex kunnen maar O₂ en H₂O niet. Hierdoor kan het magnesium niet oxideren en als gevolg daarvan onbruikbaar worden. Dankzij deze technologie is sneller vullen en in een grotere capaciteit mogelijk. Tevens heeft men ook een iets snellere ontnametijd (vereiste tijd voor het ontnemen van waterstofgas uit



Figuur 9.8: Principe van opslag in een nanomagnesium-hydride

namelijk "polymethylmethacrylaat, PMMA" toegepast. Het perspex heeft 2 taken. In de eerste plaats moet ze de nanodeeltjes uit elkaar houden, maar belangrijker is dat het perspex zal werken als een gasbarrière. Dit houdt in dat waterstofmoleculen door het perspex kunnen maar O₂ en H₂O niet. Hierdoor kan het magnesium niet oxideren en als gevolg daarvan onbruikbaar worden. Dankzij deze technologie is sneller vullen en in een grotere capaciteit mogelijk. Tevens heeft men ook een iets snellere ontnametijd (vereiste tijd voor het ontnemen van waterstofgas uit

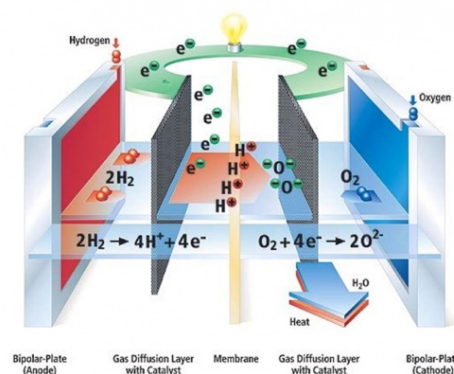
de hydride). Verder zal er hier niet worden op ingegaan. Even samenvattend is dat metaalhydriden een grotere opslagcapaciteit bevatten dan gewone gasflessen. Er is een nieuwe technologie (nanotechnologie) in aantocht waardoor waterstof mogelijk in de toekomst een grotere rol zal kunnen spelen.

10 | Brandstofcellen

In dit hoofdstuk worden de verschillende soorten brandstofcellen even overlopen. Hierbij komen enkele toepassingsvoorbeelden aan bod als ook de visie naar mogelijke nieuwe technologie

10.1 Opbouw brandstofcel

De opbouw van een brandstofcel kan men vergelijken met dat van een doornsee accu. In de kern van de brandstofcel bevindt zich een membraan die de brandstofcel in 2 gelijke helften verdeelt. Aan beide zijden van de brandstofcel zijn elektroden voorzien om de vorming van elektrische energie uit de brandstof (waterstof) via een chemische reactie te ontginnen.

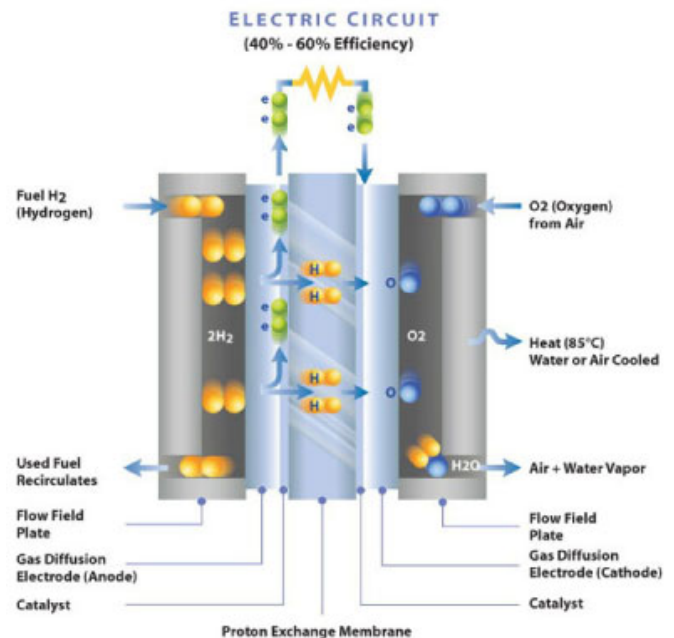


Figuur 10.1: Opbouw en werking van een H₂ brandstofcel

bron: www.wikimobi.nl

10.2 Werking van een brandstofcel

Een brandstofcel zet door middel van een chemische reactie waterstofgas om in elektrische energie. Het principe is vergelijkbaar met dat van een batterij. Twee helften zijn gescheiden door een membraam (elektrolyt). Aan beide zijden van het membraam, of beter gezegd elektrolyt, is er een elektrode aanwezig. Deze zijn verbonden door een brug (kabel, stroomdraad). Aan de ene zijde van het membraam wordt er waterstofgas (H_2) toegevoerd, terwijl er in de andere helft zuurstof geleidelijk aan binnestroomt. Het waterstofgas dringt door het membraam en veroorzaakt een elektrochemische reactie met de zuurstof. Hierdoor ontstaat aan beide zijden van het membraam een ladingverschil. Dit ladingverschil zorgt ervoor dat de elektronen zich beginnen te verzamelen aan de zijde van de anode (H_2 -zijde) en dankzij de brug (stroomdraad) zich zullen verplaatsen naar de andere zijde van het membraam. De elektronen zijn zowaar verplicht deze weg te volgen omdat ze onmogelijk door het membraam kunnen (elektrolyt). De restproductie van de elektrochemische reactie waterstof en zuurstof is H_2O (waterdamp) en een zeer geringe hoeveelheid CO_2 . Een brandstofcel is dus inderdaad vergelijkbaar met een batterij. Tussen de twee elektroden kan men een DC verbruiker aansluiten. Bijna in alle gevallen wordt er echter eerst een DCDC-converter aangesloten om het nodige vermogen te eisen van de brandstofcel en als bescherming voor de gebruiker (overspanning of -stroom). Indien men echter een AC vermogen eist, is een inverter (DC \rightarrow AC) nodig. De vermogens die kunnen behaald worden met brandstofcellen zijn afhankelijk van de afmetingen van de toegepaste brandstofcel als de brandstofcel zelf. NWV (2013)



Figuur 10.2: Werkingsprincipe van een brandstofcel

bron: www.waterstofvereniging.nl

10.3 Soorten brandstofcellen

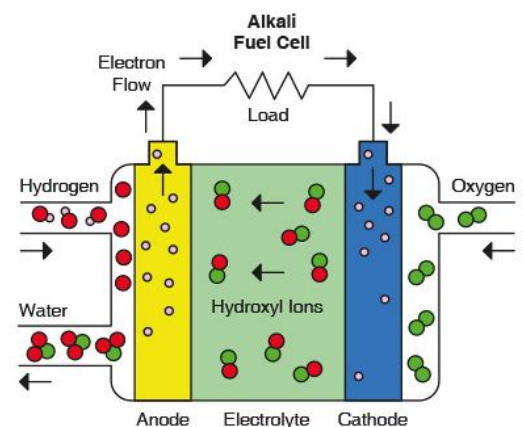
De brandstofcellen worden ingedeeld naarmate hun opbouw maar voornamelijk op basis van het toegepaste elektrolyt (membraan). De meest toegepaste elektrolyten zijn:

- Kaliumhydroxide oplossing (KOH)
- Polymeer ioniserend membraan (PEM)
- Fosforzuur
- Keramisch materiaal
- Gesmolten zout

De bedrijfstemperaturen van de brandstofcellen die men met deze elektrolyten toepast verschillen onderling zeer sterk. Afhankelijk van de vermogens die de toepassing eist van de brandstofcellen zal de toegepaste bedrijfstemperatuur verschillen. Zo zal men voor een vraag van enkele honderden *Kw*'s een brandstofcel selecteren met een hogere bedrijfstemperatuur. [Martens \(2005\)](#); [NWV \(2013\)](#)

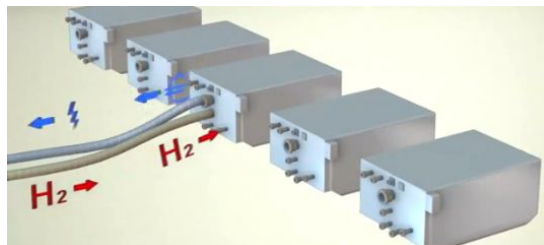
10.3.1 AFC brandstofcel

In de industrie en voornamelijk de **Chloor-alkaline-industrie** is één van de grootste en voornaamste bijproducten waterstof. Deze industrie verbruikt bijna 1,5% van de globale elektriciteitsproductie. Bij de productie van Chloor-alkaline wordt er jaarlijks 1,65 miljoen ton waterstof geproduceerd als bijproduct. Zo zijn er dus bedrijven die genoeg waterstof produceren om 54MW aan elektrische energie te produceren. Dat is normaal voldoende om een kleine stad te voorzien van elektrische energie. Waterstof kan dus ook een bijproduct zijn bij de productie van chloor. Zo wordt er 327000 liter waterstof geproduceerd per



Figuur 10.3: Principe van een AFC brandstofcel

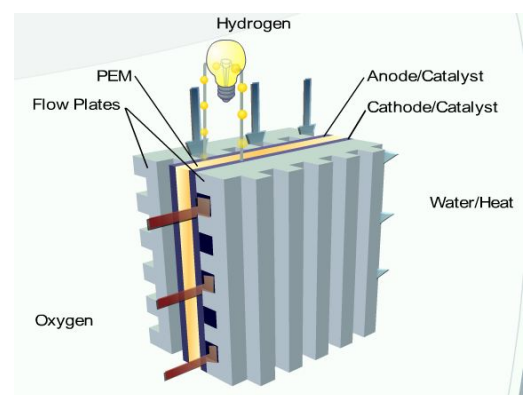
ton geproduceerde chloor. Hedendaags wordt er nog veel van die geproduceerde waterstof opgebrand of doorverkocht aan andere industrieën. Met de alkaline brandstofcellen zal men het bijproduct (waterstof) via een chemische reactie gaan omzetten in elektrische energie. De geproduceerde elektriciteit van de brandstofcellen wordt terug op het eigen net geïnjecteerd of doorverkocht aan energiemaatschappijen. Dankzij de alkaline brandstofcellen is men in staat om 55% van de energie te recupereren uit het bijproduct (waterstof). Bij de AFC brandstofcellen past men vloeibare alkaline of kaliumhydroxide toe als elektrolyt. Door de aanwezigheid van de hydroxilionen ontstaat een elektrische stroom over het elektrolyt. *energy (2013); Martens (2005)*



Figuur 10.4: Recuperatie van energie uit waterstof

10.3.2 PEM brandstofcel

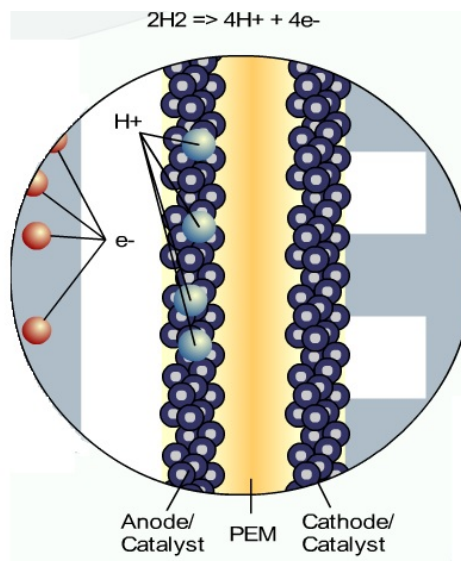
Bij een PEM brandstofcel maakt men gebruik van een Poly-Elektrolyt-Membraan. PEM is een dunne, stevige, organische verbinding, meestal de consistentie van plasticfolie en ongeveer zo dik als 2 tot 7 vellen papier. Het membraan functioneert als elektrolyt: een stof die ionen (in dit geval protonen) geleidt, maar geen elektronen. Hierdoor kan de toegepaste oplossing (waterstof) elektriciteit geleiden. Dit membraan moet men vochtig houden om de geleiding van deeltjes door het membraan te kunnen vrijwaren. De werking van een PEM brandstofcel staat zeer dicht



Figuur 10.5: Principe van een PEM brandstofcel

bron: www.fueleconomy.gov

bij het basisprincipe. De brandstofcel bestaat uit 2 elektroden: een anode en een kathode. Deze zijn gescheiden door het bovengenoemde membraam. Aan de zijde van de anode voert men waterstof toe, terwijl men aan de kathode zijde, zuurstof O_2 toevoert. Het waterstofgas stroomt binnen in de kamer van de anode en baant zich een weg door het membraam. Het membraam kan enkel ionen(protonen) doorlaten en geen negatieve elektronen. Hierdoor ontstaat de ionisatie van het waterstofgas waardoor de elektronen zich beginnen te verzamelen aan de anode. Aan de kathode zijde komt het geïoniseerde waterstof in contact met de zuurstof. Deze brengt een thermochemische reactie teweeg. Als gevolg van de thermochemische reactie ontstaat een ladingverschil. Naarmate het ladingverschil stijgt zullen meer en meer elektronen van de anode zijde naar de kathode zijde stromen via de stroomdraad die kathode en anode met elkaar verbindt. Het restproduct van de thermochemische reactie van waterstof (H_2) met zuurstof (O_2) is tevens waterdamp (H_2O). of Energy (2013); Martens (2005)



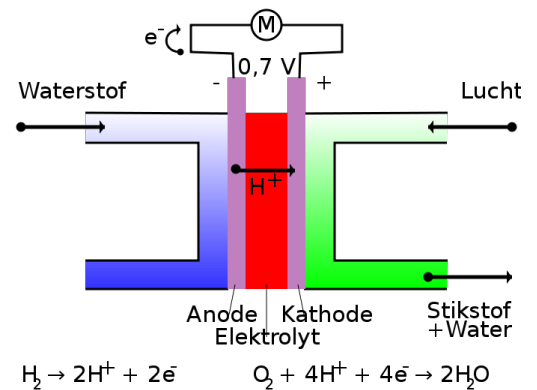
Figuur 10.6: Reactie waterstof met Poly Elektrolyt Membraam

bron: www.fueleconomy.gov

10.3.3 PAFC brandstofcel

De PAFC brandstofcel staat voor Phosphoric Acid Fuel Cell. In het nederlands heet dit dus een fosforzuur brandstofcel. Men gaat dus gebruik gaan maken van fosforzuur als een elektrolyt (membraan). Ook wordt gebruikt gemaakt van een silicone carbide zodat direct contact van de ongeïoniseerde waterstof en het zuur onmogelijk is. Waterstof zal door de silicone carbide en het fosfuurzuur banen naar de kathode zijde (zuurstofzijde). Alle brandstofcellen berusten dus altijd op het principe toevoer aan de anode zijde van waterstof en toevoer van zuurstof aan de zijde van de kathode. De toegepaste elektroden in de brandstofcel bestaan uit platina (Pt) of vormen er een

legering mee. De bedrijfstemperatuur van de fosforzuurbrandstofcel schommelt tussen de 150 en 220°C. Bij lagere temperaturen geleidt het fosfuurzuur zeer moeizaam ionen en worden de elektroden vergiftigd door de vorming van koolstofmonoxide (CO). De fosforzuur brandstofcellen hebben hun nut al bewezen in grote aantallen. Wereldwijd is er voor een vermogen van 40MW beschikbaar aan PAFC-brandstofcellen. De toegepaste vermogens voor de fosforzuurbrandstofcellen situeuren zich tussen de 50 en de 200kW. Er zijn echter al met succes brandstofcellen gebouwd van dit type met een capaciteit van 1 tot 5MW. De hedendaagse grootindustrieën zijn: International Fuel Cells Corporation (USA), Fuji Electric Corporation (Japan) en Mitsubishi Electric Corporation (Japan). NFCRC University of California (1999); NWV (2013); Martens (2005)



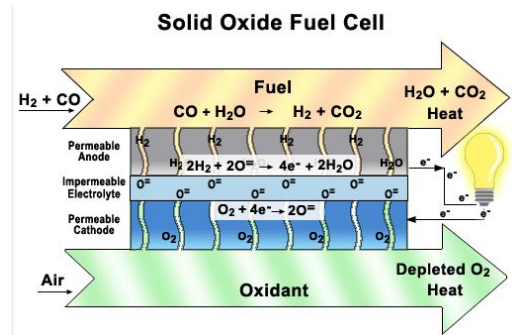
Figuur 10.7: Principe van een PAFC brandstofcel

bron:www.wikimedia.org

10.3.4 SOFC brandstofcel

SOFC staat voor Solid Oxide Fuel Cell of met andere woorden de vaste oxide brandstofcel. Bij dit type brandstofcel zal men gebruik gaan maken van een keramisch materiaal als elektrolyt. Deze brandstofcel werkt op zeer hoge temperaturen. De temperaturen lopen op tot boven 800°C. Ze behoort dan ook tot de hogetemperatuursbrandstofcellen. Het grote voordeel van de SOFC brandstofcellen is dat ze niet zo kritisch zijn op gebied van verontreiniging en enkel geschikt zijn voor één specifieke brandstof. Dankzij de hoge werkingstemperatuur heeft ze de mogelijkheid om direct op aardgas te worden aangedreven.

Daarom kan men de vaste oxide brandstofcellen ook dikwijls terugvinden in de WKK-technologie. Voorbeelden hiervan kan men terugvinden bij Siemens die inmiddels al in 1999 met succes een SOFC brandstofcel heeft toegepast met een vermogen van 100kW. De dag van vandaag levert deze nog steeds arbeid. Dit geeft dan ook een mooie toekomstblik op vlak van duurzaamheid. Iedere brandstofcel bevat een gering aantal bewegende delen die voornamelijk worden toegepast voor de compressie van de zuurstof en brandstof. Ook voor de koeling zijn een gering aantal bewegende delen voorzien. Men noemt de vaste oxide brandstofcel ook wel de alleseter onder de brandstofcellen vanwege zijn ruime toepassing met verschillende brandstoffen. Zo kan men bijvoorbeeld ook ammoniak gebruiken als brandstof voor de brandstofcel. Ammoniak is toch giftig? Ja dit is het zeker maar bij het thermochemische proces wordt de schadelijk ammoniak volledig verwerkt tot een onschadelijk restproduct. Dit komt bijzonder goed uit voor de rioolverwerkingsindustrie. Men kan moeiteloos methaan en ammoniak disecteren uit mest en rioolslip. In vele gevallen kan men met de ammoniak geen weg tenzij aan enkele kleine afzetmarkten. Dankzij de SOFC brandstofcellen kan hier dus het tij volledig keren. Men kan dus het bijproduct ammoniak gaan recycleren en herleiden tot elektrische energie. Deze elektrische energie kan men dan doorverkopen aan derden of in eigen elektriciteitsnetwerk investeren (= injecteren). Wolters (2011); Mulder (2005); Rietveld (2009)

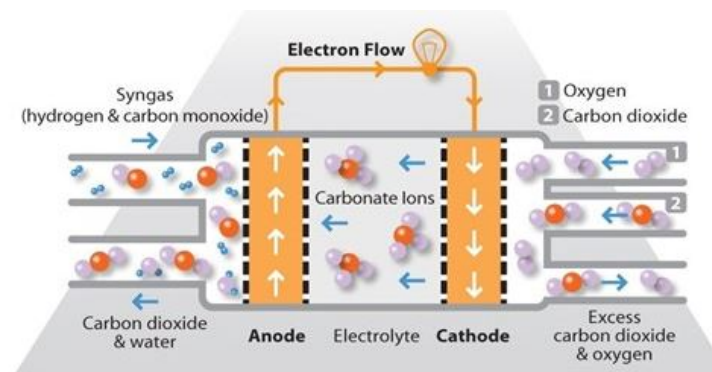


Figuur 10.8: Principe van een SOFC brandstofcel

bron:www.climategate.nl

10.3.5 MCFC brandstofcel

De MCFC maakt gebruik van gesmolten lithium en kaliumcarbonaten omsloten door een poreus keramisch materiaal. De afkorting MCFC staat dan ook voor Molten Carbonate Fuel Cell. De MCFC brandstofcellen maken ook deel uit van de hogetemperatuurbrandstofcellen. De bedrijfstemperaturen schommelen rond de 650°C en meer. Het grote voordeel van deze op hoge temperatuur werkende brandstofcellen is dat men niet noodzakelijk nog gebruik moet maken van de hoge edele metalen. Bij werking met hoge temperaturen lopen de brandstofcellen een kleiner risico op koolstofmonoxidevergiftiging (= verontreiniging) van hun elektroden. Hierbij vormen er zich koolstofmonoxide deeltjes rond de elektroden waardoor de werking van de brandstofcellen meer en meer wordt bemoeilijkt naarmate de bedekking toeneemt. De MCFC brandstofcellen kunnen arbeid leveren met een grote mogelijkheid aan keuze voor wat betreft de brandstoffen (net als bij de vaste oxide brandstofcellen). De brandstofcellen in kwestie vergen echter nog wat ontwikkeling. Zo zijn er nog wat problemen omtrent corrosie van de elektroden vanwege de hoge temperaturen. Een ander nadeel is dat men zich momenteel sneller zal richten tot de vloeibare elektrolyten dan de vaste. De MCFC als de SOFC brandstofcellen worden enkel toegepast op grote schaal. today (2013); Mulder (2005); NWV (2013); Martens (2005)



Figuur 10.9: Principe van een MCFC brandstofcel

bron: www.fuelcelltoday.com

11 | Praktische uitwerking

11.1 Doel van de opstelling

De demo-opstelling dient als voorbeeld van waterstofintegratie in een microgrid. Een microgrid is een onafhankelijk elektriciteitsnet die voornamelijk alternatieve energiebronnen gebruikt zoals windmolens en zonnecellen om de verbruikers in zijn netwerk te voorzien van elektrische energie. Hedendaags worden in microgrids batterijen gebruikt zodat men het overschot van geproduceerde energie kan opslaan in batterijen of een batterijbank(en). Wanneer er dan een tekort aan elektriciteitsproductie is kan de opgeladen batterijbank de nodige elektrische energie injecteren op het net. Het grote nadeel van deze batterijbanken is dat deze in de eerste plaats veel ruimte in beslag nemen. Een tweede nadeel en derde nadeel is dat deze een beperkte levensduur hebben ondanks redelijke kostprijs (= derde nadeel). Indien men de overschot aan energie zou toepassen voor het produceren van waterstof, heeft men nadien ook de mogelijkheid om men via een brandstofcel de opgeslagen energie in de vorm van waterstof terug om te vormen tot elektriciteit. De elektrische energie wordt welliswaar opgeslagen in de vorm van waterstof. In tegenstelling tot batterijen, heeft opgeslagen waterstofgas geen beperkte levensduur, net zoals de opslagtanks. In vergelijking met de batterijen kan er ook een grotere capaciteit aan energie worden opgeslagen in een veel compactere installatie (afhankelijk van de toegepaste opslagmethode). De aanwezige primaire energie in waterstof kan niet verloren gaan zoals bij batterijen die zich zeer gering ontladen en op lange termijn toch een redelijke hoeveelheid van hun energie zijn verloren door ontlading. Stel dat men bijvoorbeeld een veldlab in het midden van het amazonewoud maar slechts om het half jaar bemant. Daar zijn geen directe elektriciteitsnetwerken (grids) voorhanden om energie van af te tappen. Hier zal men dus sneller beroep doen op alternatieve energie. Bij opslag van de zonne- en windenergie in de batterijen zal men mogelijk snel problemen ondervinden. Bijvoorbeeld bij het opstarten na 6 maanden van afwezigheid van enige gebruiker. Waterstof zal bij dergelijke situaties kunnen openbloeien omdat

men een grote hoeveelheid energie kan opslaan in een zo compact mogelijk vorm (mits gebruik van metaalhydriden). Volgeladen accu's (batterijen) moet men even afkoppelen om overlading te voorkomen. De 6 maanden dat er geen mensen aanwezig zijn in het veldlab zou men kunnen benutten voor het non-stop produceren van waterstof al dan niet met de volledig beschikbare alternatieve energie van het veldlab. Achteraf kan men de opgeslagen groene energie in de vorm van waterstof terug omzetten naar elektriciteit door gebruik te maken van één of meerdere brandstofcellen. Bij terugkomst zal direct opstarten normaal geen probleem zijn en zal men onverwachts niet moeten wachten op een levering van nieuwe accu's (time is money!). Het is uiteraard belangrijk dat in de 6 maanden dat het personeel ter plaatse is zeker geen tijd wordt verspild zodat deadlines op een comfortabelere manier kunnen behaald worden.

11.2 Prinipe van de opstelling

Zoals eerder vermeld, bestaat de opstelling uit een elektrolyser, een brandstofcel, DCDC converter en metaalhydride canisters. De demo-opstelling kan worden gekoppeld aan de windmolens aanwezig op het wetenschapspark Greenbridge. Wanneer er genoeg wind of zonne-energie is en men heeft te kampen met een overschot aan energie, zal de elektrolyser in de opstelling, opstarten en de productie van waterstofgas aanvangen. Het waterstofgas wordt langzamerhand opgeslagen in de metaalhydriden. Wanneer dan het overschot wegslinkt zal de elektrolyser zichzelf in standbye modus plaatsen of geplaatst worden. Hierna zal de brandstofcel opstarten en de nodige energie leveren aan het netwerk die men tekort komt met de zonne- en windenergie. De demo-opstelling zal dus als het ware energie opslaan in de vorm van waterstofgas in metaalhydriden en energie leveren met de brandstofcel indien nodig. De DCDC-converter in de opstelling is zowel verantwoordelijk voor de communicatie met de software als voor de vermogensregeling van de brandstofcel. In de opstelling zijn er ook nog enkele veiligheidscomponenten voorzien, zoals een waterstofgasdetector om een eventuele lekkage direct te signaleren. Hiernaast is er ook nog een stroomsensor voorzien om overbelasting, maar ook onderbelasting op de accu's te melden en zo nodig te verhelpen (geregeld door meegeleverde software via de converter).

11.3 Mogelijke uitbreidingen voor de opstelling

11.3.1 Uitbreiding 1: Labview integratie

Tijdens de stageperiode en het ontwerp van de demo-opstelling is men op het idee gekomen om de installatie uit te breiden met een labviewprogramma in combinatie met enkele sensoren en ventielen. Hierdoor zal men de mogelijkheid verkrijgen om de de drukken in de canisters te kunnen inlezen als ook een automatisch regeling kunnen bewerkstellen aan de hand van de druk. Voor deze uitbreiding zal men gebruik gaan maken van 2 druksensoren (geschikt voor H₂) en 3 magneetventielen. Onder de magneetventielen onderscheidt men 2 x 3/2-weg ventielen voor de aan- en afkoppeling van de canisters op de elektrolyser (=laadstand) of de brandstofcel (=ontlaadstand). Tevens is er ook nog een 2/2-wegventiel voorzien die bij een te lage druk in alle canisters zal gaan functioneren als bypassklep. De bypassklep zal de elektrolyser rechtstreeks in verbinding stellen met de brandstofcel. Zo zijn alle componenten op één algemene lijn gekoppeld.

11.3.2 Uitbreiding 2: Sunny Islands

Ook aanwezig bij Power-link zijn de zogenaamde Sunny Islands. De Sunny Islands zijn de hedendaagse toegepaste regelaars voor microgrid installaties (vandaar de naam Islands). Deze units gaan het principe van **overschot en tekort aan energie** gaan regelen in de hele eilandwerking. Zo zullen ze ervoor zorgen dat de batterijbank wordt opgeladen bij een overschot van energie en omgekeerd. Power-link denkt ook aan de mogelijkheid om de batterijbank in verbinding te stellen met de demo-opstelling en dus voornamelijk met de brandstofcel. Dit is realiseerbaar door simpelweg aan de DC zijde van de Sunny Islands een verbinding te maken aan de 2 polen van de Island en de brandstofcel. Deze uitbreiding zal worden behandeld indien er nog voldoende tijd beschikbaar is voor het project.

11.4 Ontwerp van de demo-opstelling

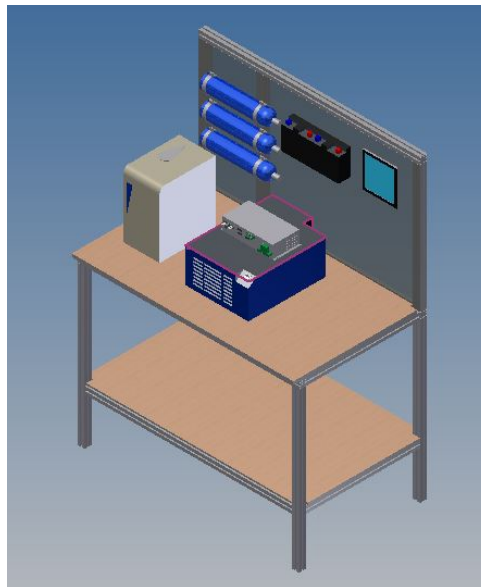
De Demo-opstelling zal worden tentoongesteld in de expo-ruimte van de Greenbridge Incubator. Mogelijk zal de opstelling wel eens worden meegenomen naar beurzen of bepaalde evenementen. Ze zal worden tentoongesteld aan mensen die mogelijk geen of enkel wat technische basiskennis hebben. Om deze redenen is het dus belangrijk dat het ontwerp en dus de opstelling zelf volgende eigenschappen omvat:

- lichtgewicht (comfortabel transport, liften, ...)
- compacte bouw
 - transport in bestelwagens en liften
 - verplaatsen door deuropeningen, smalle gangen
- verrijdbaar (wieltjes)
- taaie constructie (ondanks lichtgewicht)
- overzichtelijk (geen wirwar van draden en leidingen)
- kostprijs
- makkelijke montage/demontage

Met deze eisen werd er begonnen aan het schetsen in inventor. Omdat men een taaie maar lichtgewicht constructie verwachtte, werd er gedacht aan het gebruik van aluminium profielen. Aluminium heeft namelijk deze 2 eigenschappen. Door gebruik te maken van montageprofielen heeft men later nog de mogelijkheid om snel uit te breiden of om in later stadium, de opstelling op een milieuvriendelijke manier te recyclen (hergebruik van onderdelen). Om een duidelijk overzicht te kunnen bieden, leek het voor de firma Power-link voor de handliggend om te vertrekken op basis van een tafel en zo systematisch de opstelling te ontwerpen. Men had dan ook het idee om simpelweg een tafel te verbouwen.

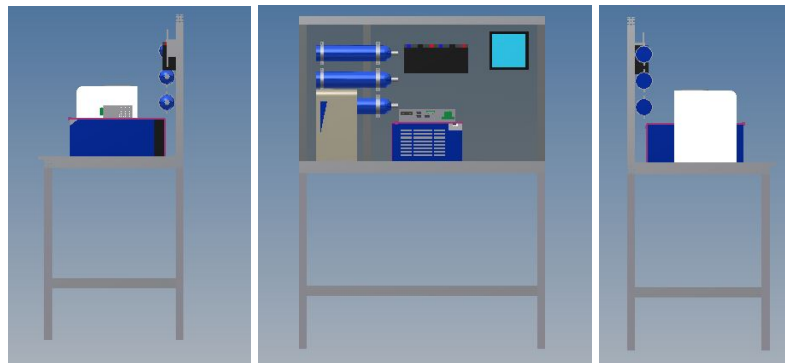
11.4.1 Ontwerpen

Omdat de opstelling door deuropeningen moet en in liften vervoerd kan worden, mag volgens de opmetingen van deuropeningen en liften de opstelling niet breder zijn dan 1m40 en tevens niet hoger dan 1m80. Bij het uittekenen leek het niet relevant om de kleine details uit te tekenen zoals kabels en kleine magneetventielen omdat deze slechts een geringe plaats innemen. Bij het ontwerp moest er voornamelijk worden rekening gehouden met de elektrolyser, de brandstofcel en de DCDC converter (ook nog een computer). Deze componenten zijn de belangrijkste in heel de opstelling. Zo kwam men tot het eerste ontwerp (basis tafel).



Figuur 11.1: Ontwerp van de demo-opstelling

Bij bovenstaand ontwerp zijn de voornaamste componenten duidelijk zichtbaar op het werkblad geplaatst. Op de brandstofcel zijn aluminium montageprofielen aangebracht zodat montage met glijmoeren mogelijk is. Bovenaan op de brandstofcel kan de converter worden bevestigd als ook de hybride extensie kit. De elektrolyser hoeft niet te worden vastgezet. Bij transport is het aangewezen dat deze afzonderlijk wordt vervoerd, stevig verpakt in een doos met de nodige schokdempers. De canisters worden door middel van pijpbeugels bevestigd aan de montageplaat, samen met de batterijen. Onderaan heeft men nog de mogelijkheid om de PC te plaatsen en eventueel enkele kannen met gedemineraliseerd water. Hiermee vult men namelijk de elektrolyser. Het beeldscherm van de PC zal ook worden bevestigd aan de montageplaat.



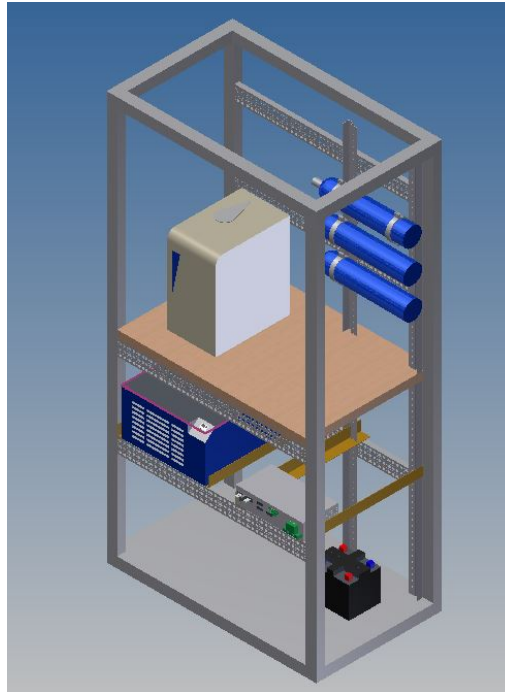
Figuur 11.2: Voor- en zijaanzichten van het ontwerp

Ook niet aanwezig op bovenstaande tekening zijn de wielen. Deze werden niet getekend omdat dit bij het ontwerpen slechts een bijzaak is. De aluminium montageprofielen zijn tevens hiervoor al voorzien. Helaas werd dit ontwerp gestaakt omdat de leverancier van de onderdelen lijdt aan uitstelgedrag en weinig van zich liet horen. De onderdelen konden tevens niet meer worden geleverd vanwege uitbestedingen. Gelukkig heeft het KHBO van Oostende een tijdelijk frame beschikbaar gesteld. Het ontwerpen moest dus opnieuw worden aangevat. Het ontwerpen kan worden opgebouwd met volgend frame:



Figuur 11.3: Uitgeleend frame door KHBO Oostende

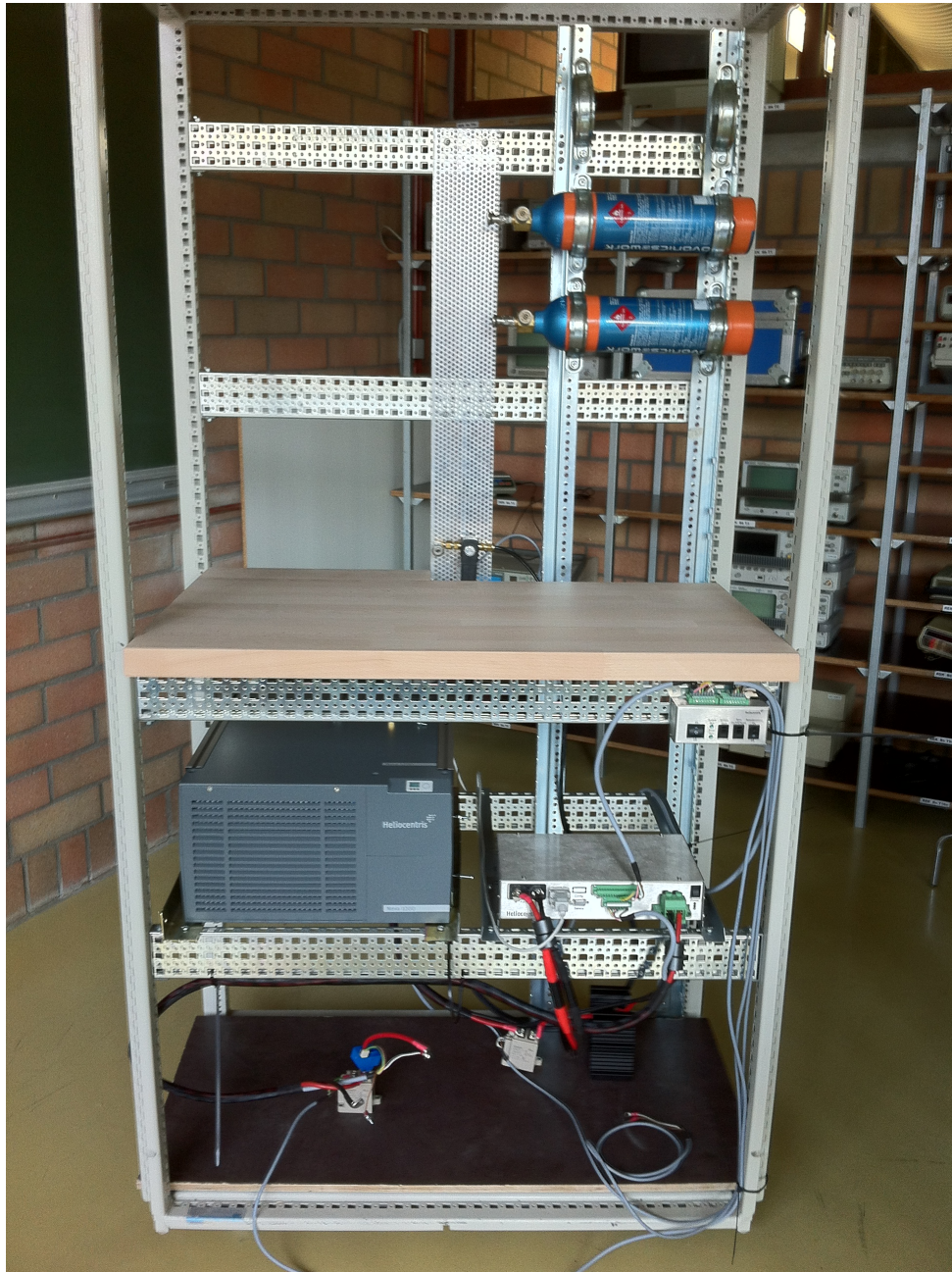
Na het uitvoeren van enkele opmetingen en het verzamelen van wat restmateriaal in het lokaal van bevestigingstechnieken werd volgend ontwerp mogelijk.



Figuur 11.4: Ontwerp op KHBO frame

Het materiaal van de opstelling bestaat voornamelijk uit gegalvaniseerd staal. Dit maakt de opstelling jammer genoeg niet zo licht. Maar dit ontwerp is echter wel compacter dan het origineel. Op het onderste plateau worden de loodaccu's en de schakelrelais gemonteerd. Op het middenplateau kan men de brandstofcel (links) en de DCDC-converter terugvinden (rechts). Achter de converter is nog ruimte voorzien om eventueel daar de pc te bevestigen. Op het bovenste plateau wordt de elektrolyser (wit) geplaatst samen met het beeldscherm van de pc en een toetsenbord met een computermuis. Op de montagewand worden de metaalhydriden (= canisters) flessen opgehangen met pijpbeugels. De verdere details kan men terugvinden op foto's in de bijlage.

Het ontwerp werd in praktijk gebracht. Volgend resultaat werd bekomen:



Figuur 11.5: Uitwerken van het ontwerp

Verdere foto's kan men terugvinden in hoofdstuk 13: "Bijlagen". De bovenstaande foto geeft geen volledig afgewerkt frame weer.

11.5 Componenten

De belangrijkste componenten uit de opstelling worden even kort overlopen.

11.5.1 Brandstofcelunit - Nexa 1200

De brandstofcelunit in de opstelling is een "rack" van 36 brandstofcellen. Ze heeft een vermogen van $1,2\text{kW}$ en weegt ongeveer 50kg . De regeling van de brandstofcelunit verloopt het best via de meegeleverde software van de fabrikant "Heliocentris". De brandstofcel zet via een thermochemische reactie de energie aanwezig in het waterstofgas om in elektrische energie.



Figuur 11.6: Brandstofcelunit Nexa 1200 "Heliocentris"

Kenplaatgegevens brandstofcel Nexa 1200

VDC_in:	12...36V	VDC_out:	20...36V
PDC_in:	110W min	PN:	1200W
TOP:	5...35°C	IDC_out:	60 A max
H2_in:	99,99%	PH₂_in:	1,0...15bar

Tabel 11.1: Kenplaatgegevens Nexa 1200 (brandstofcel)

11.5.2 Elektrolyser NMH2 1000

De elektrolyser produceert waterstof door middel van elektrolyse. Hiermee bekomt men de meest zuivere vorm van waterstof met een verwaarloosbare hoeveelheid CO₂. De elektrolyser is in staat om 1000cc waterstof per minuut te leveren. Dat is niet bepaald veel, maar voor de demo-opstelling is meer niet nodig. Voor de productie van waterstof moet men regelmatig de tank bijvullen met gedemineraliseerd water.



Figuur 11.7: Elektrolyser NMH2

Kenplaatgegevens

- Vermogen: 500VA
- 220-240Vac
- 50/60 Hz

11.5.3 Metaalhydriden canisters

De metaalhydriden canisters hebben als taak om het waterstofgas op te slaan in hun legeringen. Het grote voordeel van deze canisters is dat het overgrote deel van het waterstofgas wordt opgenomen in het hydrid, waardoor er sprake is van zeer stabiele opslag. Men kan ook een grotere capaciteit opslaan in zelfde (= even groot) volume als dat van een gewone gastank. De toegepaste legering bij deze canisters is een legering op basis van aluminium (Al).



Figuur 11.8: Metaalhydriden canisters

eigenschappen

- Type: 900 (toegepast in opstelling)
- Aanbevolen oplaaddruk: 10bar
- Max. omgevingstemperatuur: 50°C
- Gewicht: 7kg
- Afmetingen: 90 x 425mm
- opslagcapaciteit 70 gram H₂ = 8,4MJ primaire energie

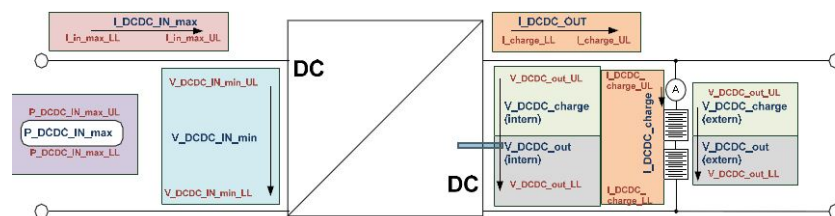
11.5.4 DCDC converter - Nexa DC1200

Het uitgaande vermogen van de brandstofcel is te onstabiel om direct te verbruiken. De eerste taak van de converter bestaat er dan ook in om het uitgaande signaal van de brandstofcel te stabiliseren. Ten tweede is de converter berust met het regelen van het vermogen van de brandstofcel. De regeling die de converter moet teweeg brengen is afhankelijk van de aangekoppelde verbruiker. De converter communiceert met de brandstofcel via een CAN-bus. Zo zal men de juiste parameters moeten instellen om het automatisch opladen van de batterijen op een correcte manier te laten verlopen. De derde taak van de DCDC converter bestaat erin om afhankelijk van het signaal van de veiligheidscomponenten (stroomsensor, spanningsensor), zichzelf uit te schakelen of standby te schakelen in veilige modus om zo de kring te onderbreken. Hierdoor wordt er schade aan verbruikers en aan de opstelling voorkomen, vóór dat het effectieve probleem zich voordoet. Hierbij wordt dus ook de volledig onder- of overlading van de batterijen voorkomen. Het is ook voornamelijk via de DCDC- converter dat de software de gehele opstelling zal regelen en feedback zal ontvangen.



(a) De DCDC converter - Nexa DC1200

bron: Manual Nexa DC1200



(b) Functies van de DCDC converter

bron: Manual Nexa DC1200

Figuur 11.9: DCDC-converter en functies

11.5.5 Hybride extensie kit

Voor de juiste parametrisering van het systeem moet de controlesoftware worden ingesteld en bediend. Afhankelijk van de ingestelde parameters zal de software en het totale systeem volgens een bepaalde functie werken. Bijvoorbeeld de stand: "Automatisch batterij opladen". Via de hybride extensie kit kan men het systeem instellen op remote-werking (via software) of op manueel en het systeem onafhankelijk van de software laten werken. Het opstarten of resetten van de installatie na een eventuele fout moet men ook via de hybride extensie kit bekomen.



Figuur 11.10: De Hybride extensie kit

Het uitschakelen van de werking van de installatie is mogelijk via de on/off-switch op de extensie kit. De DCDC converter zal bijvoorbeeld maar kunnen opstarten indien deze een stroom krijgt van de kit. Het afzonderlijk opstarten van de brandstofcel is echter wel mogelijk indien de Hybride extensie kit is uitgeschakeld.

11.5.6 Accu's

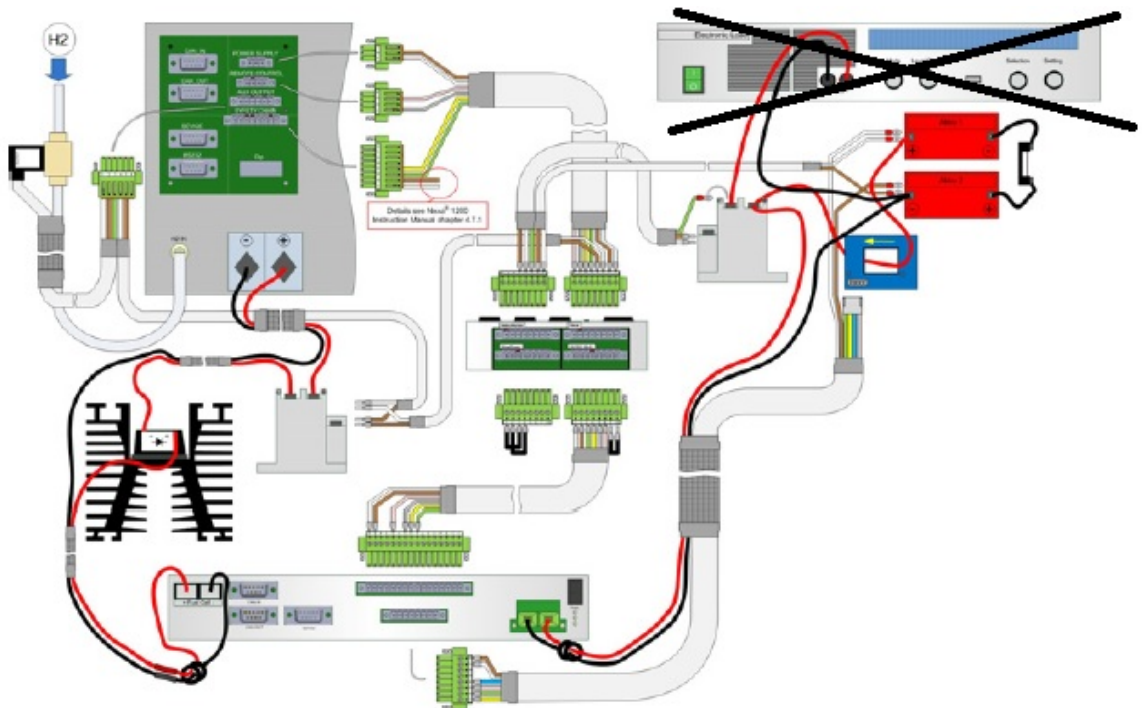
Voor het gebruik van de brandstofcel en de converter in combinatie met een verbruiker zijn accu's vereist die als buffer dienen, zodat de DCDC-converter niet direct wordt belast. Voor de opstelling is er de mogelijkheid tussen 24V of 48V - uitvoering. Omdat men met een demopostelling te maken heeft, zag men het nut er niet van in om de uitvoering van 48V te kiezen. Daarom werd er dus gekozen voor de 24V uitvoering met 2 loodaccu's van 12V met elk een capaciteit van 18Ah. Dit resulteert dus tot een totale capaciteit van 36Ah.



Figuur 11.11: De gebruikte Loodaccu's in de opstelling

11.6 Aansluitschema

Op onderstaande afbeelding kan men het aansluitschema zien van de verschillende componenten onderling. Bij het gehele pakket dat men kan aankopen bij heliocentris, heeft men eveneens de mogelijkheid om een elektronische last aan te sluiten. Hierdoor kan men zo de gehele opstelling simuleren. Omdat dit voor vele mensen niet zo duidelijk is en de opstelling ten slotte een "demo" moet weergeven van waterstofintegratie in een smart microgrid, werd er gekozen om eerder alledaagse componenten te gebruiken zoals verwarmingselementen of eventueel lampen. Dit is mogelijk ook een oorzaak waardoor de software wel eens in de fout gaat. Bij Heliocentris is er hiervoor een software update voorzien die tijdens de uitvoering van dit eindwerk zich nog in de testfase bevindt.



Figuur 11.12: Aansluitschema communicatie componenten - 24V

bron: handleiding Nexa DC1200

11.7 Problematiek

Onvermijdelijk bij het testen van nieuwe technologieën en eveneens bij het aansluiten van verschillende componenten aaneen, is de bijkomende problematiek die zich kan voordoen.

11.7.1 Probleem 1: Opstartprobleem brandstofcel

Na de levering en installatie van de brandstofcelunit bleek bij de eerste opstart al snel dat het niet van een leien dakje ging verlopen. Bij het inschakelen van de voeding lichtten de leds op het display op en voor heel even bleven deze groen. Na een tiental seconden wisselden de leds echter synchroon af en begon de rode led te pinken.

Dit was duidelijk een foutmelding zoals in de handleiding beschreven. De weergegeven fout en de daarbijhorende foutcode kon men niet terugvinden in de handleiding. Daarom werd er wat later getracht om de fout softwarematig te controleren. Na overleg met de fabrikant (Heliocentris) werd er meegedeeld dat de display met de leds niet betrouwbaar zijn voor het weergegeven van een fout. In de software is er een venster voorzien genaamd "verbose view". Bij het openen van dit venster kan men alle mogelijke fouten en de daarbijhorende code-bits bezichtigen. De software gaf kort na opstart de melding: "temperature passed lower limit". Daarom werd op vraag van de fabrikant een screenshot genomen en verzonden naar de fabrikant. De fabrikant kon hieruit afleiden dat het probleem te wijten is aan de aansluitvoorziening voor het veiligheidscircuit. Indien er geen extern veiligheidscircuit aangesloten is, moet men deze fiche overbruggen. Na dit effectief uit te voeren was het probleem verholpen.

```

# FC Error1                                0x0000h - settings:
  Bit 0 FC-Current too high
  Bit 1 FC-Current too low
  Bit 2 System Current too high
  Bit 3 System Current too low
  Bit 4 FC-Voltage too high
  Bit 5 FC-Voltage too low
  Bit 6 System Voltage too high
  Bit 7 System Voltage too low
  Bit 8 V1
  Bit 9 V2
  Bit 10 V3
  Bit 11 V4
  Bit 12 Operating Pressure too h...
  Bit 13 Operating Pressure too l...
  Bit 14 Primary Pressure too high
  Bit 15 -
# FC Error2                                0x0020h - settings:
  Bit 0 H2 Concentration too high
  Bit 1 H2 Sensor failed
  Bit 2 Ambient Temperature exc...
  Bit 3 Ambient Temperature pa...
  Bit 4 FC-Temperature exceded
  Bit 5 FC-Temperature passed l... 1
  Bit 6 Fan Speed
  Bit 7 -
  Bit 8 -
  Bit 9 -
  Bit 10 -
  Bit 11 -
  Bit 12 -
  Bit 13 -
  Bit 14 -
  Bit 15 -
Softwareversionnumber                      1070
DCDC
Electronic Load
Battery

```

Figuur 11.13: Fouten opsporen met Verbose viewer

11.7.2 Proleem 2: Communicatieprobleem brandstofcel - DCDC converter

Na opstarten van beide componenten schakelt de converter na verloop van tijd uit en geeft de melding dat de brandstofcelunit niet gedetecteerd werd. Tijdens het overlopen van het schema, bleek dat een beëindigingsweerstand op de CAN-bus verkeerd was aangesloten. Een dergelijke weerstand heeft als functie bij CAN-bussen om het signaal te beëindigen zodat deze niet kan terugkaatsen aan de ingang en botsen met het volgende toekomstige signaal. De weerstand in kwestie was aangesloten op de uitgangspoort van de CAN-bus van de brandstofcel zodat het signaal niet tot bij de converter geraakte. De weerstand werd verwijderd en aangesloten op de CAN-bus ingang van de converter. Na hertesten bleek dit probleem ook van de baan.



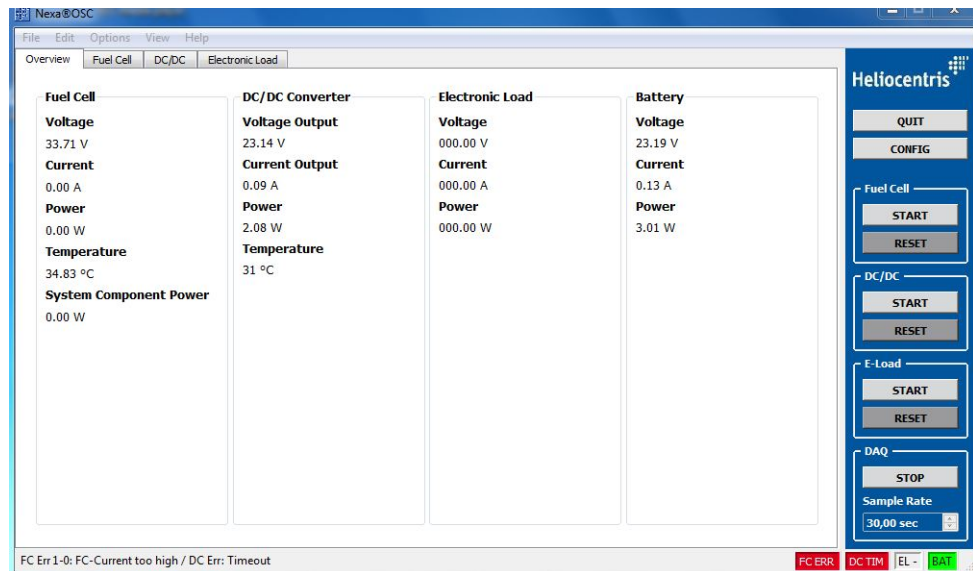
Figuur 11.14: Beëindigingsweerstand voor CAN-bus

CAN-bus

CAN staat voor "Controller Area Network". Het is een bussensysteem op basis van broadcasts. Ieder apparaat gekoppeld op dit netwerk zal hetzelfde signaal ontvangen, maar slechts enkele weten wat ze ermee moeten doen. Dit is zowaar de voorloper van de hedendaagse profibussen. Omdat dit geen relevantie heeft voor het eindwerk, zal er hier niet dieper worden op ingegaan.

11.7.3 Probleem 3: Blackouts DCDC converter

Tijdens de arbeid van de opstelling viel na verloop van tijd de converter uit en schakelde de brandstofcel in standby modus. Hierbij kreeg men ook de melding "Fuel Cell Current to high".



Figuur 11.15: Software: foutmelding: "Fuel Cell Current to high"

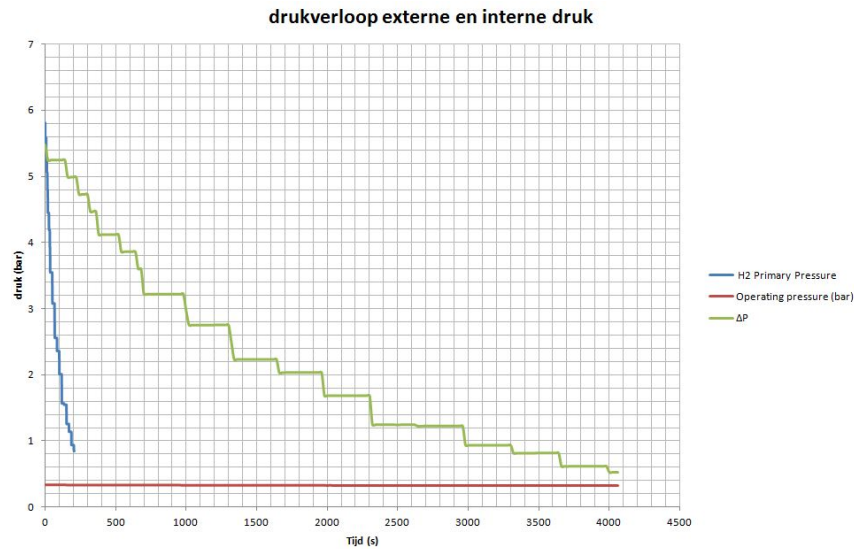
Na enkele van deze black outs te ervaren werd er besloten om enkele meetgegevens te verzamelen. Deze werden dan via excel uitgezet in grafieken. Hieruit kon worden afgeleid, dat de black outs te wijten waren aan een te kort van waterstofgas (te lage druk in de metaalhydride flessen). Indien de druk daalt tot beneden een bepaald peil, duikt de black out op. Normaal gezien moet de software echter de componenten in standby schakelen en niet de converter uitschakelen en veilige modus activeren. Hierdoor is men verplicht om telkens handmatig de parameters opnieuw in te vullen. De opstelling kan dus met de huidige versie van de software niet volledig op zelfstandige basis werken. Hopelijk is dit met de volgende software/firmware update opgelost. De gegevens werden verzameld via de meegeleverde software (Nexa OSC). De software schrijft telkens na verzamelen van de "sample rate"de gegevens weg naar een excel sheet (excel-bestand).

Sample Rate Software OSC in excel bestand

	System Current	System Voltage	FC Current	FC Voltage	Ambient Temp	FC Temp	H2 Primel	Operating Pressur	H2 Concent	Fan Speed	Systemstate	V_DCDC_in	I_DCDC_in	P_DCDC_in	V_DCDC_out	I_DCDC_out	p_DCDC_out	V_BATT	I_BATT	p_BATT
-0.08	23.10	25.64	0.00	25.64	22.23	21.28	5.81	33.90	20	2151	3	1.05	0.20	0.21	19.70	0.00	0.00	19.77	0.00	1.16
1.80	23.10	26.66	1.78	26.66	22.13	21.81	5.58	33.90	20	777	5	26.77	0.20	5.35	20.46	0.00	0.00	20.45	0.00	1.16
1.80	23.10	26.80	1.78	26.80	22.23	22.13	5.58	33.76	18	777	5	26.87	0.20	5.37	20.46	0.00	0.00	20.45	0.00	1.16
1.74	23.10	26.80	1.78	26.80	22.23	22.23	5.58	33.83	18	807	5	26.97	0.20	5.39	20.46	0.00	0.00	20.45	0.00	1.16
1.86	23.10	25.18	4.43	25.18	22.34	22.65	5.58	33.69	18	807	5	24.94	2.46	61.35	28.80	2.29	65.95	28.77	2.02	1.16
1.92	23.10	23.10	7.30	24.07	22.34	23.27	5.58	33.69	17	777	5	23.77	5.42	128.83	26.24	4.94	129.63	26.19	4.73	1.16
1.86	23.10	24.63	7.08	24.63	22.54	24.27	5.58	33.69	17	807	5	24.27	5.20	126.20	25.64	4.95	126.92	25.58	4.73	1.16
1.86	23.10	24.86	7.08	24.86	22.44	25.06	5.58	33.69	17	807	5	24.57	5.10	125.31	25.43	5.05	128.42	25.43	4.78	1.16
1.86	23.10	25.00	6.87	25.00	22.44	25.74	5.32	33.55	17	777	5	24.67	4.99	123.10	25.33	5.05	127.92	25.33	4.78	1.16
1.80	23.10	25.14	6.87	25.14	22.54	26.32	5.32	33.55	17	777	5	24.77	4.99	123.60	25.33	5.05	127.92	25.23	4.79	1.16
1.80	23.10	25.14	6.87	25.14	22.54	26.88	5.32	33.55	17	777	5	24.87	4.99	124.10	25.33	5.05	127.92	25.23	4.79	1.16
1.80	23.10	25.28	6.87	25.28	22.65	27.35	5.32	33.55	17	777	5	24.97	4.99	124.60	25.33	5.05	127.92	25.23	4.79	1.16
1.80	23.10	25.28	6.87	25.28	22.75	27.72	5.06	33.55	17	777	5	24.97	4.99	124.60	25.23	5.05	127.41	25.23	4.77	1.16
1.80	23.10	25.28	6.87	25.28	22.65	28.09	5.06	33.55	17	806	5	25.07	4.89	122.59	25.24	5.05	127.46	25.23	4.77	1.16
1.80	23.10	25.41	6.87	25.41	22.85	28.37	5.06	33.55	17	777	5	25.07	4.89	122.59	25.24	5.05	127.46	25.22	4.77	1.16
1.80	24.10	25.41	6.87	25.41	22.75	29.00	4.80	33.55	17	806	5	25.07	4.89	122.59	25.24	5.05	127.46	25.22	4.77	1.16
1.80	24.10	25.51	6.87	25.51	22.75	29.45	4.80	33.42	17	776	5	25.17	4.89	123.08	25.14	5.05	126.96	25.22	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	22.75	29.54	4.45	33.49	23	866	5	25.31	4.87	123.26	25.14	5.05	126.96	25.11	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	22.96	29.63	4.45	33.49	17	776	5	25.31	4.87	123.26	25.14	4.94	124.19	25.20	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	22.85	29.81	4.45	33.49	17	806	4	25.31	4.87	123.26	25.14	4.94	124.19	25.08	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	22.85	29.98	4.45	33.49	17	807	5	25.31	4.87	123.26	25.14	4.94	124.19	25.08	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	23.06	30.16	4.45	33.34	17	806	5	25.31	4.88	123.51	25.14	4.94	124.19	25.08	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	23.77	30.25	4.45	33.34	17	807	5	25.31	4.78	120.98	25.14	4.94	124.19	25.08	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.07	30.42	4.45	33.34	17	776	5	25.31	4.80	121.49	25.14	4.94	124.19	25.08	4.78	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.07	30.69	4.45	33.34	17	777	5	25.31	4.80	121.49	25.14	4.94	124.19	25.08	4.71	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.07	30.86	4.19	33.34	17	776	5	25.31	4.82	121.99	25.14	5.05	126.96	25.08	4.69	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.27	31.04	4.19	33.34	17	777	5	25.31	4.82	121.99	25.14	5.05	126.96	25.06	4.71	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.27	31.21	4.19	33.34	17	807	5	25.41	4.82	122.48	25.14	5.05	126.96	25.06	4.81	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.37	31.38	4.19	33.34	17	776	5	25.41	4.82	122.48	25.14	5.05	126.96	25.06	4.81	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.47	31.55	4.19	33.34	17	777	5	25.41	4.82	122.48	25.04	5.05	126.45	25.06	4.81	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.47	31.64	4.19	33.34	17	806	5	25.41	4.82	122.48	25.04	5.05	126.45	25.06	4.81	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.37	31.81	3.93	33.34	17	777	5	25.41	4.82	122.48	25.04	4.96	124.20	25.06	4.81	1.16
1.72	24.10	25.69	6.64	25.69	24.37	31.90	3.93	33.34	16	837	5	25.41	4.82	122.48	25.04	4.96	124.20	25.04	4.82	1.16
1.70	24.10	25.74	6.64	25.74	24.47	31.81	3.55	33.47	22	837	5	25.44	4.82	122.67	25.04	4.96	124.20	25.04	4.74	1.16

Figuur 11.16: Voorbeeld sample rate naar in excel

Grafiek drukverloop



Figuur 11.17: Drukverloop van de installatie in werking

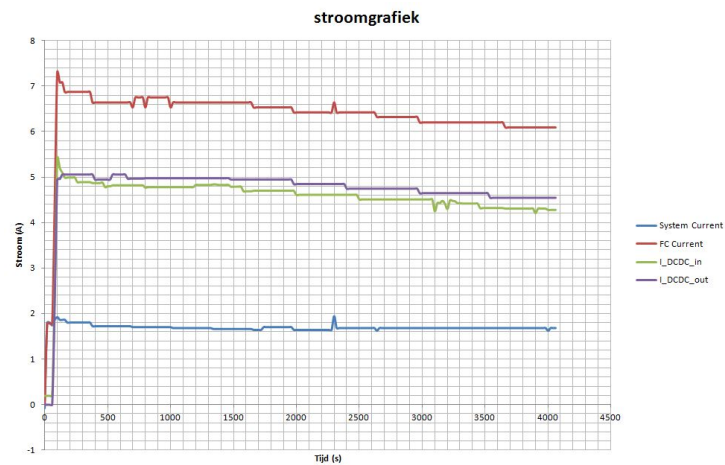
Tijdens de sample rate schakelde de converter plots uit in veiligheidsmodus. Hierbij kwam de eerder beschreven foutmelding: "FC Current to high". Op de bovenstaande grafiek zien we dat ΔP of met andere woorden de druk aanwezig in de flessen beneden de 1bar is gedaald. De software reageert dus foutief op het te kort aan waterstof en zou dus eerder de gehele installatie in standbye moeten plaatsen. De druk in de aangesloten canister of canisters werd bekomen door de formule:

$$\Delta P = H2PrimaryPressure[bar] - OperatingPressure[bar] \quad (11.1)$$

Na het melden van de fout aan de fabrikant, werd meegedeeld dat het gaat over een softwarematig probleem. De fouten zullen volgens de fabrikant, in de volgende softwareversie opgelost zijn.

Stroomgrafiek

Voor de zekerheid werd ook nog een spanning- als een stroomgrafiek uitgezet. Opmerkelijk in de grafiek zijn de verschillende piekjes. Deze doen zich telkens voor op het moment dat de inlaatklep van de brandstofcel opent en er rijkelijk een hoeveelheid waterstofgas binnen stroomt. Door deze tijdelijke grote hoeveelheid die binnen wordt geïnjecteerd, ontstaan stroompieken.



Figuur 11.18: Verloop van de elektrische stromen in de opstelling

Spanningsgrafiek



Figuur 11.19: Verloop van de elektrische spanningen in de opstelling

11.8 Uitbreiding 1: Sturing met labview

11.8.1 Principe

In het begin ging men uit van een algemeen circuit. Alle onderdelen waren aangesloten op een gemeenschappelijk waterstofleiding, zonder enige voorziening om het circuit te onderbreken (bijvoorbeeld kranen). De elektrolyser blijft dus waterstofgas produceren terwijl de brandstofcel af en toe waterstof aan het circuit onttrekt voor de productie van elektrische energie. Hierbij zijn de 3 metaalhydriden ook aangesloten. De elektrolyser produceert en pompt dus waterstofgas in de leiding en eveneens naar de 3 metaalhydriden. Bij opstarten met lege canisters (metaalhydriden) kan het soms lang duren eer er een zekere druk is opgebouwd. Daarom kwam er het idee om één of twee canisters afzonderlijk op te laden terwijl de overige ontladen aan de brandstofcel. Hierdoor kan een zekere buffer worden voorzien zodat opstarten en een langere bedrijfsduur kan worden verzekerd. Al snel kwam het idee om het gehele systeem aan te sturen via labview en een daarbijhorende module: "NI-DAQ of USB6008/6009". Men koos om de kleppen te laten handelen in functie van de aanwezige druk in de canisters. Men heeft dus nood aan druksensoren en magneetventielen.

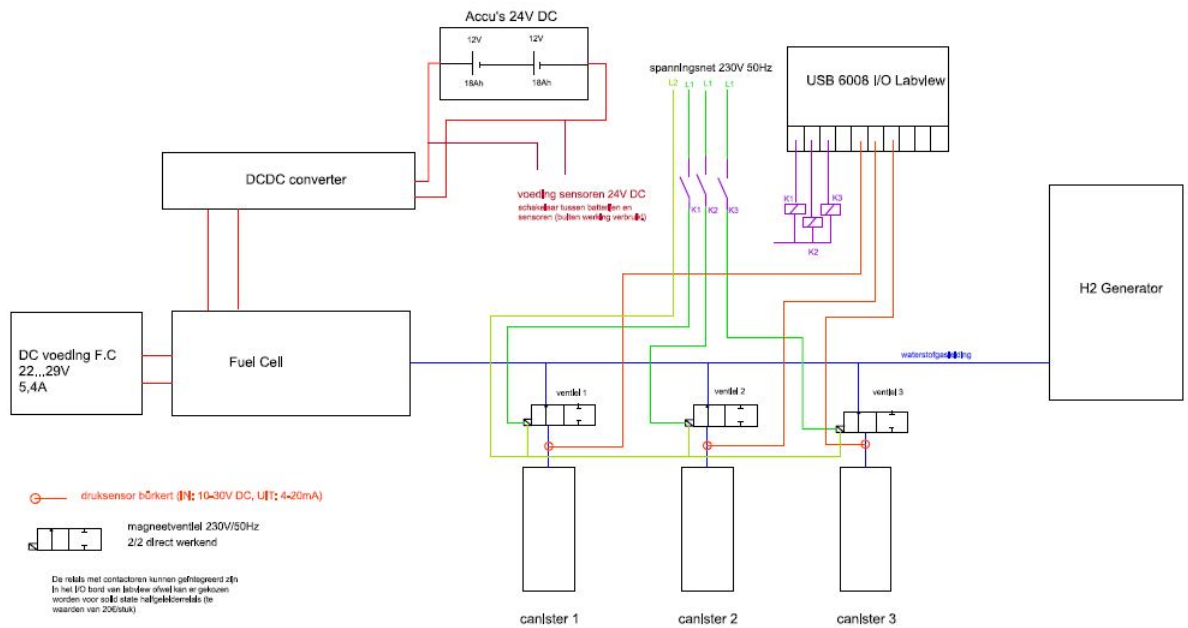
Werkingsprincipe:

De canisters worden afzonderlijk opgeladen en ontladen. Hiervoor gaat men gebruik gaan maken van 2/2- of 3/2-weg magneetventielen, om het waterstofgas in de juiste banen of richting te leiden. De positie van de kleppen (magneetventielenventielen) worden bepaald door de gasdruk in de canisters. Hiervoor moest men op zoek gaan naar druksensoren die geschikt zijn voor het meten van waterstofgas. Eveneens moesten de magneetventielen voldoen aan bepaalde eisen om gebruikt te worden met waterstofgas. De sturing verwezenlijkt men met het softwarepakket: "labview", via een voorziene module (NI-DAQ).



11.8.2 Schema

Voor men onderdelen kan bestellen en verdere plannen gaat uitwerken, is het vanzelfsprekend dat men eerst een schema opstelt. Dit kan dan worden opgevolgd door het aanvragen van offertes bij verschillende fabrikanten van magneetventielen en sensoren.



Figuur 11.20: Sturingschema versie 1

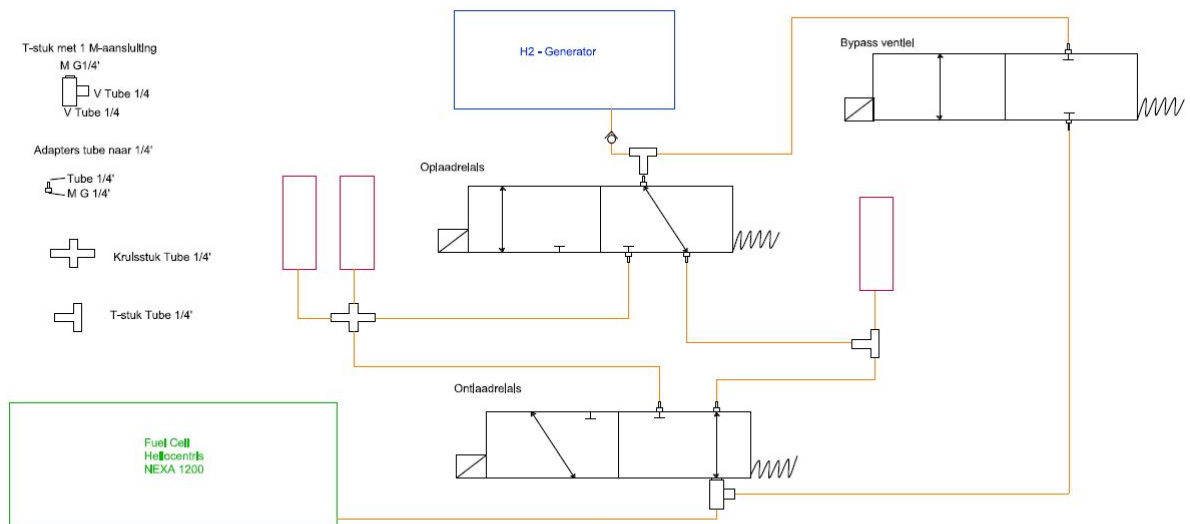
Op het schema wordt voor iedere metaalhydride de druk afzonderlijk gemeten. Tevens wordt er gebruik gemaakt van afsluitkleppen om het individueel openen en sluiten van de metaalhydriden mogelijk te maken. Het afzonderlijk laden en ontladen is hierbij niet mogelijk en de elektrolyser (H_2 -generator) en de brandstofcel zijn nog steeds op een gezamenlijk leiding aangesloten en kunnen niet worden aan- of afgekoppeld van het circuit. Dit is geen eis voor de opstelling! Er werd besloten om het schema in de praktijk om te zetten. Het startsein werd gegeven voor de selectie van de sensoren en de ventielen. Er werd contact opgenomen met verschillende fabrikanten en leveranciers.

Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Burkert
- Adsensys
- Marktechnical
- Handsaeme Machinery
- GEMÜ
- ...

Na ontvangst van de offertes, bleek het voorgaande schema financieel niet haalbaar. De firma Power-link wordt immers gefinancierd door UGent. Men werkt dus met bepaalde budgetten. Het schema moest dus worden herzien. Zo volgde er nog een aantal nieuwe schetsen en offerte aanvragen. Het ontwerpen van de waterstofsturing nam veel tijd in beslag. Hierbij kwamen verschillende schema's en datasheets aan te pas. Daarom zal dit niet verder uitgebreid worden beschreven. Verder volgt het schema dat uiteindelijk werd gekozen en uitgewerkt. De voorkeur ging uit naar Bürkert, omdat het inlaadventiel, meegeleverd in het pakket van heliocentris van dezelfde fabrikant is. De firma heeft tevens een vestiging in Breda (Nederland) maar ook verdelers in Sint-Niklaas en Roeselare. Snelle levering is dus mogelijk. Voor de aansluitingsattributen (T-stukjes, leidingadapters, ...) werd er werd de voorkeur gegund aan de fabrikant Swagelok. Swagelok is wereldwijd gekend en heeft een vestiging in Groot-Bijgaarden. Power-link heeft tevens goede ervaring met dit bedrijf.

11.8.3 Uiteindelijk schema van de opstelling



Figuur 11.21: Het uiteindelijk laad en ontlaadschema

11.8.4 Selectie van de componenten

Normen en certificaten

Toepassingen met waterstof zijn hedendaags nog redelijk experimenteel. Voor waterstofgas is er een zeer gering aantal normen en richtlijnen voor bepaalde toepassing met waterstof of waterstofgas. Voornamelijk zijn ze van toepassing bij installaties met een grote opslagcapaciteit van waterstofgas. De omgeving waarin de installatie is gelegen is ook bepalend voor de norm en/of richtlijnen. Zo is er de richtlijn voorzien die zich richt tot de omgeving waarin het waterstof wordt toegepast. De norm/richtlijn in kwestie is de ATEX-richtlijn. De letters ATEX zijn afgeleid uit het Frans: **Atmosphères Explosibles**.



Figuur 11.22: Logo ATEX

Wat is een explosieve omgeving of atmosfeer?

Onder een explosieve omgeving verstaat men een mengsel van brandbare stoffen onder de vorm van gassen, nevels en stof, in atmosferische omstandigheden, waarin de verbranding na de onsteking zich uitbreidt tot het gehele niet verbrande mengsel.

ATEX

De ATEX-richtlijn richt zich tot alle omgevingen en toepassingen waar explosiegevaar kan heersen. De richtlijn heeft een zeer breed werkingsgebied en richt zich tot gasexplosie- en stofexplosiegevaar. Sinds 1989 is de Europese Kaderrichtlijn: "89/391/EEG" ("Veiligheid en gezondheid van de werknemers op het werk") van kracht in het bedrijfsleven. In 1999 werd de kaderrichtlijn aangevuld met een 15de tak, namelijk: "Bescherming van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar lopen". Deze richtlijn staat beter bekend als **ATEX 137**. Niet veel later kwam er nog een richtlijn op de proppen die zich richt tot de productrichtlijn. Dit is de bekende **ATEX 95** richtlijn. De richtlijnen **ATEX 137 en 95** hebben beiden tot doel om de veiligheid en de gezondheid van werknemers in explosieve atmosferen te waarborgen als ook om het vrije handelsverkeer binnen de **EU** toe te laten voor materieel en beveiligingssystemen die in de betreffende atmosferen worden toegepast. [Winter \(2013\)](#)

ATEX-95

Uiteraard is de richtlijn ATEX-137 niet van toepassing omdat men niet te maken heeft met explosieve atmosferen zoals bijvoorbeeld in de mijnbouw. De toegepaste componenten moeten voldoen aan de richtlijn van ATEX 95. Hier is men ook aangewezen bij vonkvorming, deze mag niet meer bedragen dan de minimum onstekingsenergie van waterstof (0,02 mJ). Hierbij ook rekening houdend met de explosiegrenzen (15-59% bij 25°C, 1 atm) van waterstofgas. [Winter \(2013\)](#); [Martens \(2013\)](#)

Voorbeeld Certificaat



Figuur 11.23: Voorbeeld van een certificaat conform aan de richtlijn ATEX

Auteur (2013)

De normen en richtlijnen zijn enkele van de lange struikelblokken waarmee men te kampen krijg bij het bepalen van de nodige onderdelen. Zeker als het met waterstof te maken heeft. Echte duidelijke omschrijvingen zijn zeer gering. Dit is ook van toepassing bij de kleine keuze die men heeft vanwege de nog experimentele aard van waterstoftoepassingen. Indien men in België tracht een opstelling te bouwen met waterstof(gas), gelijkaardig aan deze van dit eindwerk. Is uit eigen ervaring gebleken dat de best aangewezen firma's de volgende zijn:

- Bürkert

Magneetventielen, sensoren, regelventielen, ...

- Swagelok

Leidingen, fittings, T-stukken, snelkoppelingen, leidingadapters, ...

11.8.5 De geselecteerde onderdelen

Uit het laatste schema bleek dat we volgende zaken zeker nodig hebben:

- Magneetventielen

2 x 3/2-weg ventielen (0-10 bar, 230VA 50 Hz of 24 VDC)

1 x 2/2-weg ventiel (0-10 bar, 230VAC 50 Hz)

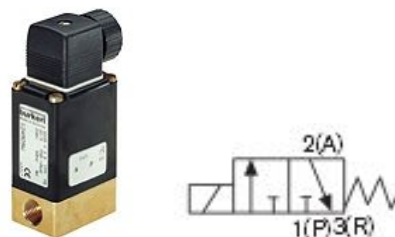
- Sensoren

2 x druksensoren, voorkeur uitgangssignaal 4-20 mA, 0-10 bar

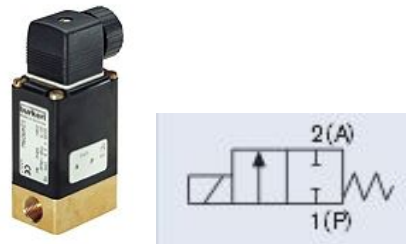
Dit alles op voorwaarde dat er vrijwaring van enige statische of magnetische vonkvorming in verband met de onstekingsenergie is gewaarborgd. Het materiaal waaruit het component is opgebouwd moet uiteraard ook bestand zijn tegen de agressieve, corrosieve uitwerking die waterstof op metalen heeft (chemische resistentie). Na enkele raadplegingen en offertes kwam er de selectie van de onderdelen.

De magneetventielen

Uiteindelijk werd er gekozen voor de uitvoering van de kleppen op 24V DC bij Bürkert omdat dit simpel aan te sturen is via transistor-relais drives, een zeer goedkope oplossing in tegenstelling tot bijvoorbeeld solid state relais die toch een redelijke som geld kunnen kosten ($\pm 100\text{€}/\text{st.}$). Meer uitleg over de transistor-relais drives volgt later.



Figuur 11.24: Gekozen 3/2-weg ventiel (0330 C Normaal gesloten)



Figuur 11.25: Gekozen 2/2-weg ventiel (0330 A Normaal gesloten)

Het materiaal van de magneetventielen bestaat uit messing en roestvast staal (rvs = inox). Dit materiaal is bestand tegen de agressieve corrosieve aard van waterstofgas. Een ander voordeel is dat inox niet magnetisch is en er dus ook een kleinere kans is op magnetische vonkvorming die teweeg kan worden gebracht door de inductievelden van de spoel (aanwezig in het magneetventiel).

De druksensoren

Zoals eerder vermeld ging de voorkeur uit naar druksensoren met een uitgangssignaal van 4-20mA. Zo kwamen tot de pressure transmitter (druksensor) type 8316 van Bürkert. Het uitgangssignaal kan men simpel omzetten naar een spanningssignaal door gebruik te maken van een weerstand. Bij maximum druk zal de sensor een maximale stroom uitsturen. De spanning die dan wordt gemeten over de weerstand is gelijk aan de maximale spanning die kan ingelezen worden door de module (afhankelijk van toegepaste weerstand).



Figuur 11.26: Gasdruksensor Bürkert

De weerstand wordt bepaald als volgt:

Voor 10 bar (max. druk) bedraagt de uitgangsstroom (I_{out}) 20mA. Gevolg hiervan is, dat de spanning over de weerstand 10V ("U_{in}") (= max. analoge ingangspanning) bedraagt. Volgens **de wet van Ohm** heeft men dan een weerstand nodig van $10V/0,020A = 500\Omega$. De spanning wordt dus ingelezen over een weerstand van 500 Ω .

Van een spanning naar een druk

Met het inlezen van de spanningswaarde is er nog geen directe bepaling voor de druk. Het is niet voldoende om direct een bepaalde spanning te koppelen aan een bepaalde druk. Men is als het ware verplicht om de waarde van de spanning te integreren in een wiskundige functie (formule). De functie kan worden gevonden via de regel van drie.

Volgende waarden zijn gekend:

Bij maximum druk (10 bar) bedraagt de spanning over de weerstand: $500\Omega * 20mA = 10V$.

Bij minimum druk (0 bar) bedraagt de spanning over de weerstand: $500\Omega * 4mA = 2V$

0 bar	2 V
p	V
10 bar	10V

Tabel 11.2: Omzetten spanning over weerstand naar druk

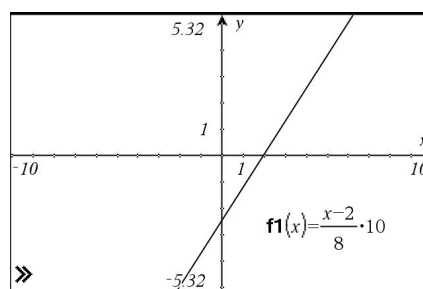
Uit de tabel volgt:

$$(V - 2)/(10 - 2) = (p - 0)/(10 - 0) = (V - 2)/8 = p/10$$

$p = ((V - 2)/8) * 10$ met "V" de waarde van de spanning over de weerstand.

Bijvoorbeeld:

Stel dat er een bepaalde druk aanwezig is in de canisters. De spanning die men meet over de weerstand met de labviewmodule bedraagt 6V. De druk in de canisters is dus gelijk aan: $((6V - 2V)/8) * 10 = 5bar$. De aanwezige druk bedraagt dus 5 bar voor een spanningswaarde van 6V. Indien de functie grafisch wordt bekeken, kan men zien dat het gaat om een naar rechts verschoven rechte door de oorsprong. De x-as komt overeen met de spanning en de y-as met de druk.

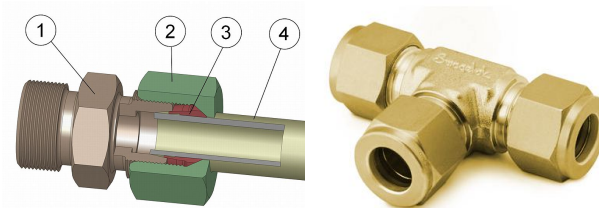


Figuur 11.27: Grafiek van de druk in functie van de spanning

Koppelstukken

Waterstof is een zeer licht en vluchtig gas. Ze is in staat om door de kleinste microscopische scheurtjes te dringen, tot gewoon dwars door enkele materialen. Men kan dus niet genoeg vermelden dat een zeer goede dichting van de leidingen en de koppelstukken van groot belang is. Zo waren er nog enkele verbindingstukken nodig om het schema te kunnen vervolledigen. Bij stukken met uitwendige en inwendige draad werd er gekozen voor ISO.M. conische gasdraad van 1/4". Deze draad was al reeds bepaald door de bestelde magneetventielen en de druksensoren. Gasdraad en zeker conische gasdraad is zelfsluitend, maar voor de zekerheid werden er toch nog enkele lagen teflontape om de draad gewonden. De koppelstukken worden even kort overlopen.

T-stuk voor aansluiting canister In het aansluitschema van de leidingen is zichtbaar dat er een T-stuk vereist is bij de aansluiting van de afzonderlijke metaalhydride (canister). Het T-stuk wordt rechtstreeks aangesloten op de flexibele kunstofleiding (PFA tube). Daarom werd er gekozen voor de aansluiting met snijringkoppeling (swagelok koppeling). Bij de snijringkoppeling wordt een leiding in de aansluitmond gedrukt door een snijring en een moer. De snijring wordt in de leiding genepen door de moer zodat deze zeker niet meer kan verschuiven. De snijring heeft als taak om de leiding ten alle tijden stevig in de mond van de koppeling te houden.

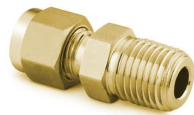


Figuur 11.28: Snijringkoppeling (links) in T-stuk 1/4"Tube OD (rechts)

bronnen: wikipedia, swagelok

- 1: koppelstuk
- 2: spanmoer
- 3: snijring
- 4: leiding of buis

Leidingadapters De aansluitpoorten op de magneetventielen zijn voorzien van inwendige draad ("Female") 1/4"conische gasdraad. Er is dus een overgangstuk om deze te kunnen aansluiten op de flexibele "PFA"(harde kunststof) leiding. De leidingadapters zijn aan de ene zijde voorzien van uitwendige ("Male") conische gasdraad 1/4"en aan de andere zijde van een snijringkoppeling voor een verzekerde dichting bij een leiding met uitwendige diameter van 1/4".



(a) Rechte leidingadapter



(b) Splitsende leidingadapter

Figuur 11.29: De leidingadapters ISO M 1/4"naar Tube OD 1/4"

Na ontvangst van deze koppelstukken kon de montage op de magneetventielen beginnen. Bij bestelling van de splitsende leidingadapter had er zich echter een klein misverstand voorgedaan. De uitwendige schroefdraad was jammer genoeg geen conische gasdraad maar NPT (USA) schroefdraad. Gelukkig kon een overgangstuk worden besteld, in plaats van een geheel nieuw stuk aan te kopen (= goedkoper!).



Figuur 11.30: Overgangstuk (adapter) NPT schroefdraad naar ISO M. gasdraad



Figuur 11.31: De 3 magneetventielen met de gemonteerde leidingadapters

Om de druksensoren in het waterstofcircuit te kunnen integreren werd er gekozen voor 2 T-stukken, waarbij ieder T-stuk over één aansluitzijde beschikt met indwendige gasdraad (1/4", ISO M. conisch)

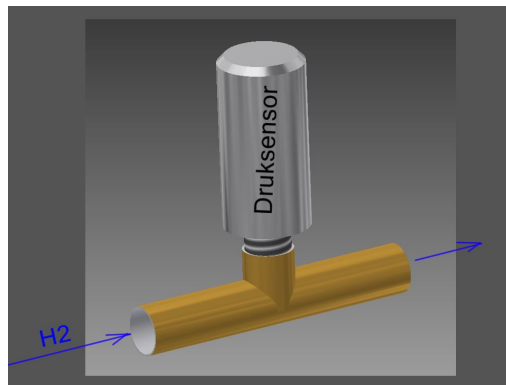


(a) Druksensor Bürkert



(b) T-stuk voor druksensor

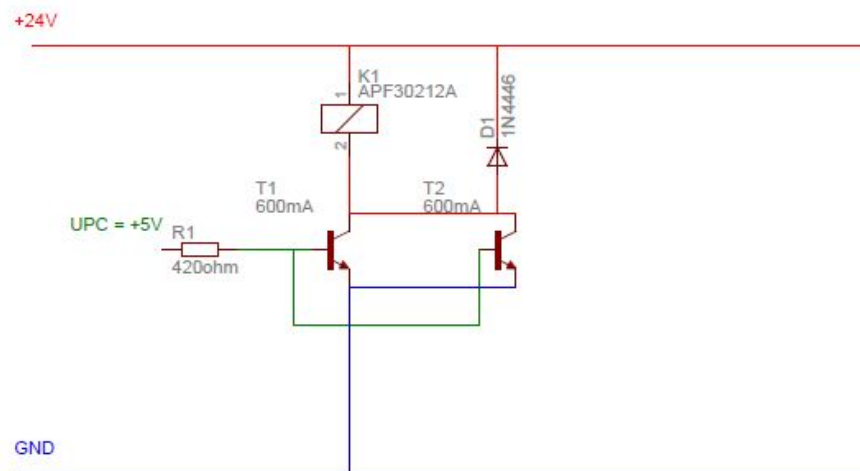
Figuur 11.32: De druksensor met het montage T-stuk



Figuur 11.33: Assembly van de druksensor in het T-stuk

11.8.6 Transistor-relais drive

Om de magneetventielen te kunnen aansturen via labview moest er een oplossing worden gevonden. Het probleem is dat de magneetventielen werken op 24V en de USB module maar 5V kan uitsturen. Men kan een transistor in saturatie brengen door de saturatiestroom van een transistor (datasheet) door de basis te sturen. Op deze manier geven collector en emitter door (= saturatie) en werkt de transistor als een elektronische schakelaar. Er werd gekozen om de ventielen rechtstreeks te bedienen in plaats van een extra relais te gebruiken. De spoelen in de ventielen hebben echter 500mA of 0,5A nodig om het ventiel te kunnen schakelen. Men moest dus transistoren selecteren die zeker 500mA kunnen doorlaten.

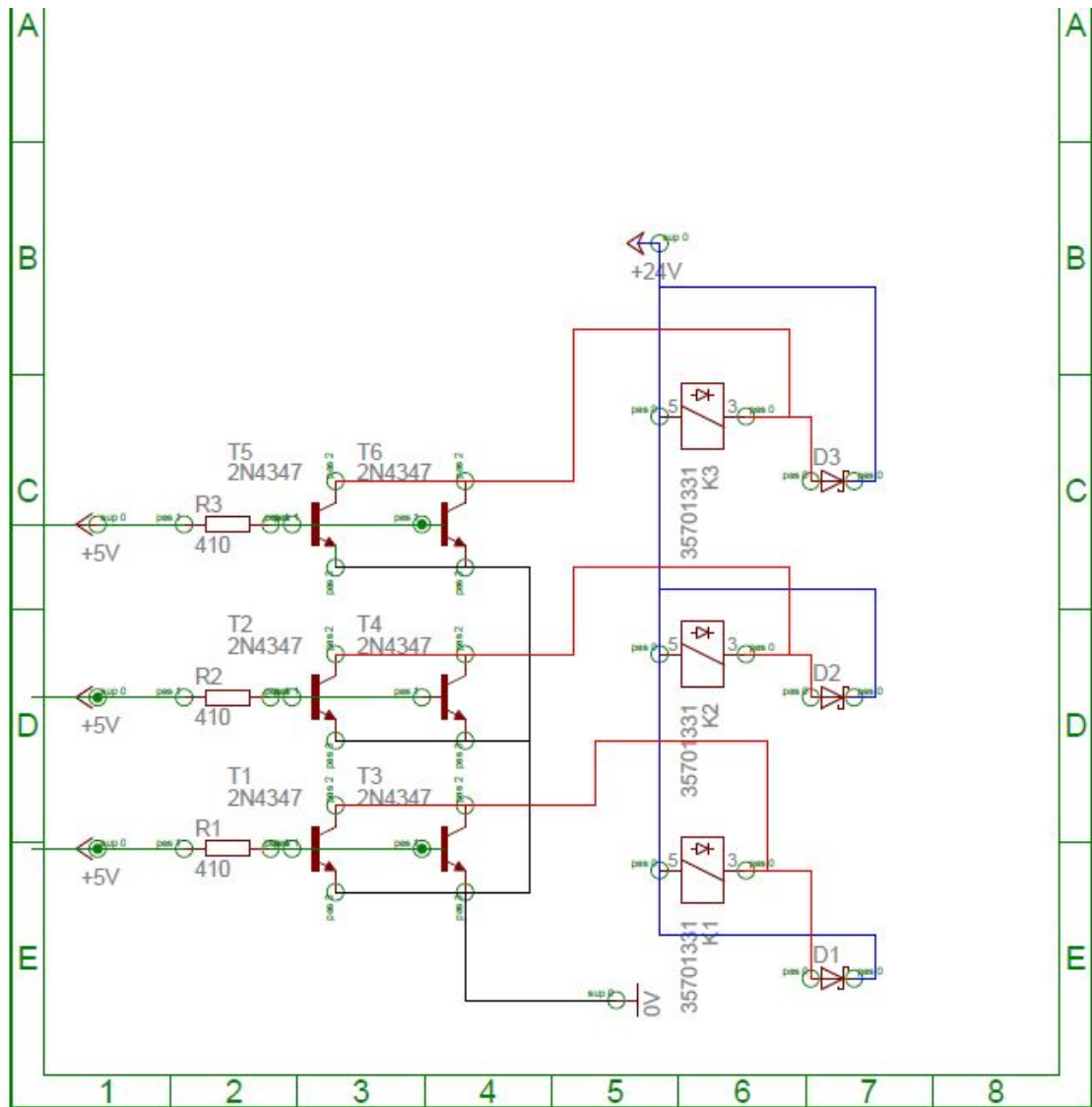


Figuur 11.34: Een transistor-relais drive

Bij het testen van een dergelijke drive, toegepast met één transistor, liep de temperatuur van de transistor snel op en zal hierdoor een veel kortere levensduur hebben. Daarom werd nog een tweede transistor parallel over de eerste geschakeld zodat het totale vermogen van de spoel verdeeld wordt over beide transistoren. Parallel over de spoel van het magneetventiel werd er ook nog een diode in serie geplaatst. Deze voorkomt dat bij het uitschakelen van de klep, de inductiestromen die ontstaan uit het resterende magnetische veld van de spoel, de transistor niet overbelasten en zodoende permanent beschadigen. Per magneetventiel wordt in dit eindwerk een dergelijke drive toegepast. De benamingen van de transistoren (type 1N4448) komen niet overeen met die toegepast in de opstelling (type 2N4401).

11.8.7 Transistor-relais drive op PCB bord

Volledige drive



Figuur 11.35: Transistor-relais drive schema op PBC bord

11.9 Labview programmatie

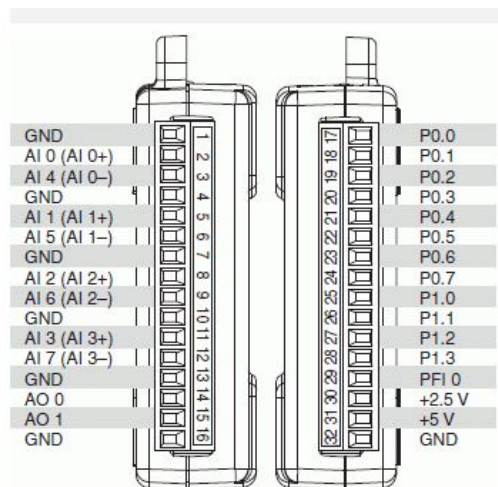
11.9.1 NI-DAQ

Het inlezen en uitsturen van signalen met labview wordt mogelijk gemaakt via de USB 6008/6009 module. Deze module kan analoge signalen inlezen van maximum 10V en digitale signalen uitsturen van maximum 5V.



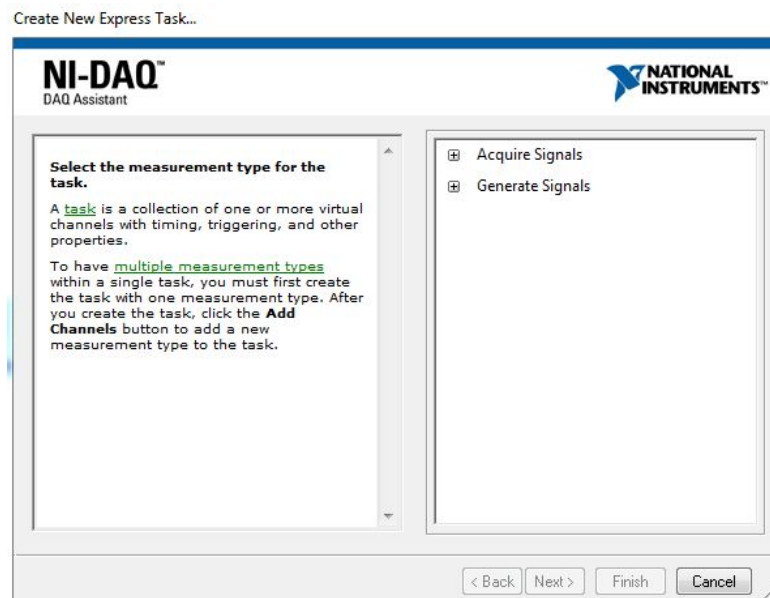
Figuur 11.36: National Instruments USB module

Iedere poort op de module heeft zijn eigen identiteit. Afhankelijk van die identiteit onderscheiden we uitgangen, ingangen en de verdere onderverdeling in analoge of digitale poorten. Indien men programmeert in labview is het aangewezen om de adressen van de vereiste poorten te kennen. Dit is tevens ook van belang bij de aansluiting van de sensoren, kleppen of andere.



Figuur 11.37: Poorten op de National Instruments Module 6008/6009

Het inlezen van de drukken en het aansturen van de kleppen zijn mogelijk via de "express VI: DAQ - assist". Afhankelijk van de functie inlezen/uitsturen declareert men de optie Acquire signals (= ontvang signalen) of Generate signals (stuur signalen uit).



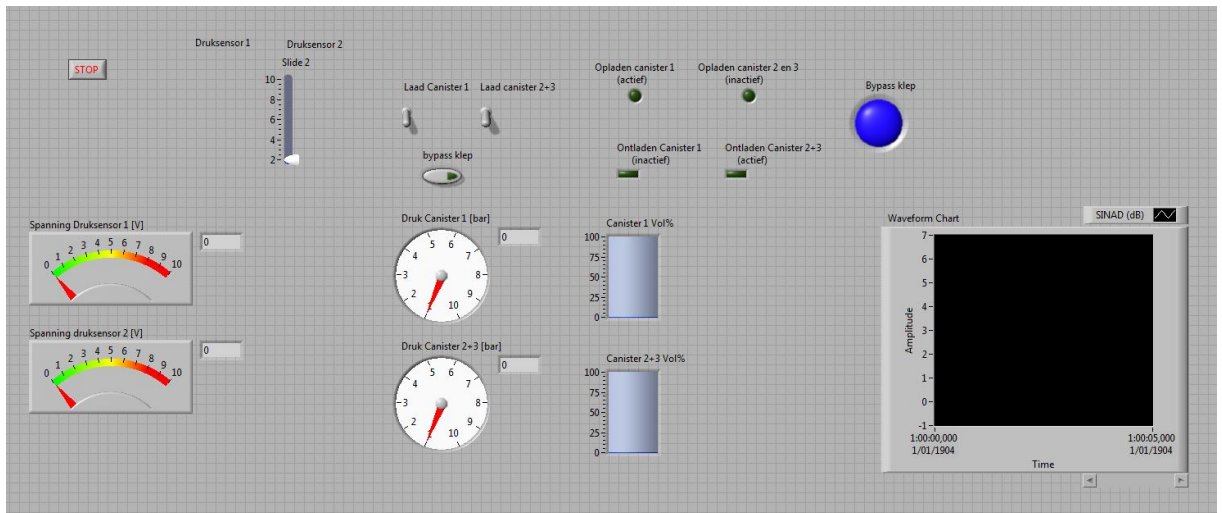
(a) DAQ manager



(b) DAQ symbool

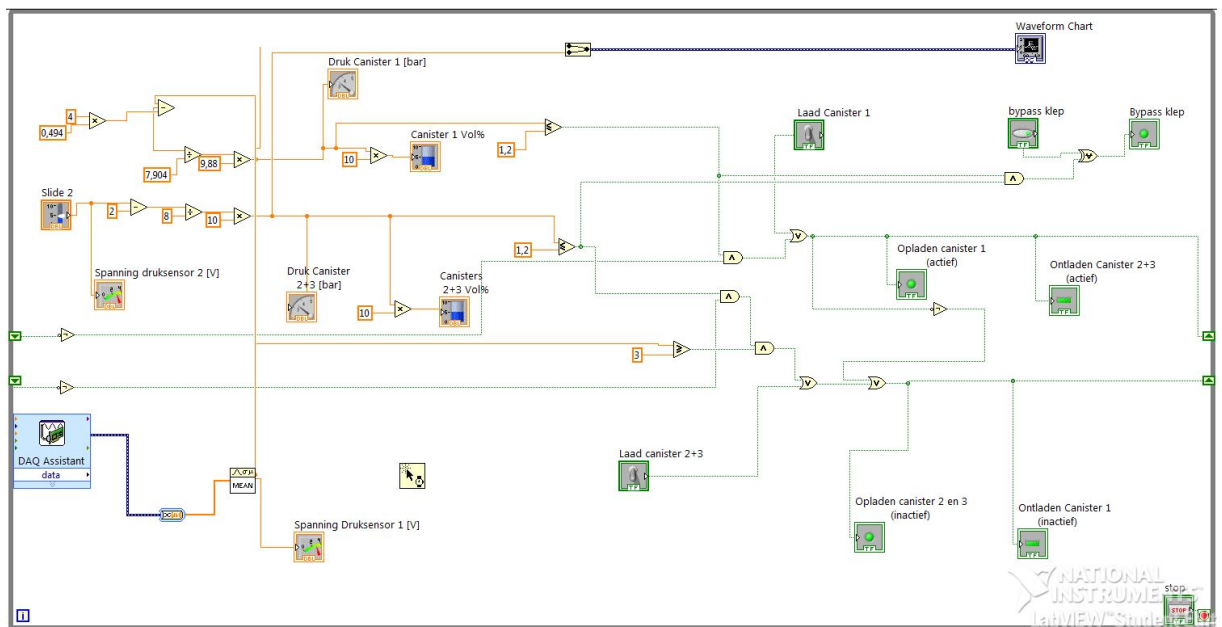
Figuur 11.38: NI-DAQ assistant

11.9.2 Labview front panel



Figuur 11.39: Front panel van de labviewprogrammatie

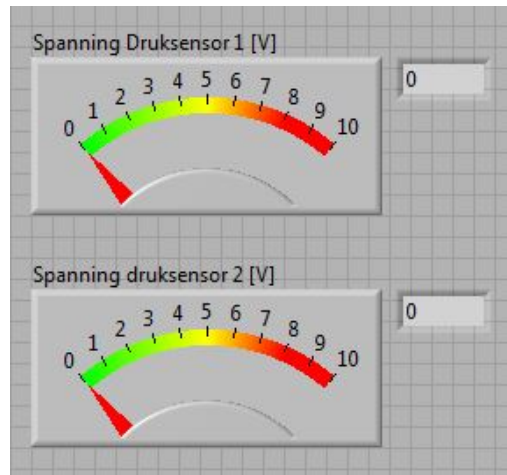
11.9.3 Labview block diagram



Figuur 11.40: Block diagram van de labviewprogrammatie

11.9.4 Overlopen van het programma

Spanning over de meetweerstand (druksensor)

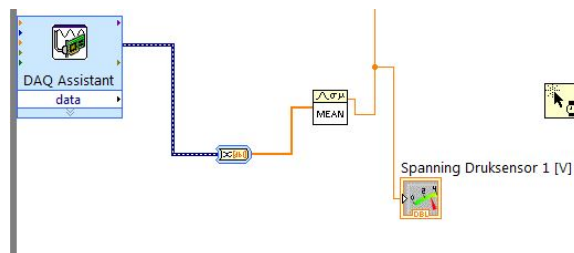


Figuur 11.41: Spanningsindicatoren van druksensoren

Via deze indicatoren kan men de spanningswaarde over de meetweerstand aflezen. Het signaal kan variëren van 2 tot 10 V. Bij 2V is de waarde van de druk 0 bar. Dit is echter onmogelijk, tenzij er een lek aanwezig is in het circuit of dat de voeding van de druksensoren niet is aangesloten. De druksensoren meten relatief en zullen dus bij het meten in de gewone atmosfeer (1 bar) geen druk meten (0 bar). De druk in functie van de spanning kan men afleiden uit de functie:

$$(p = ((U - 2V)/8V) * 10bar = ...[bar])$$

Deze formule kan men ook terugvinden in het "block diagram", bij de numerieke VI's. De waarden van de spanning worden ingelezen via DAQ-assistent en de module.



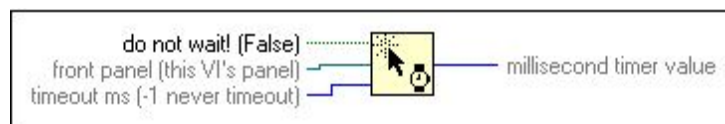
Figuur 11.42: Inlezen van de spanning via DAQ-assistent

VI gemiddelde De spanning over de meetweerstand bij de druksensor varieert veel te sterk en zou bij directe uitlezing een totaal onduidelijk signaal uitlezen. Indien men met dit signaal de kleppen zou aansturen, zouden ze constant aan- en afschakelen. Dit resulteert in een nulwerking. Om deze redenen maakt men gebruik van de "mean VI". Deze zal over een bepaalde tijd waarden opnemen. Daarvan wordt de gemiddelde score berekend en uitgestuurd.



Figuur 11.43: Mean VI

Tijdvertraging Om een vlotte werking te bekomen met het labviewprogramma is het handig om deze functie binnen de "while loop" te plaatsen. Indien men dit niet toepast, zal het programma met een ruime vertraging functioneren. .



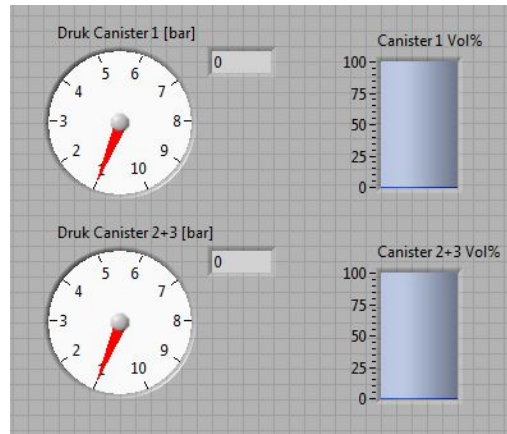
Figuur 11.44: Waiting front panel activity functie

Dit is niet de enige oplossing voor het probleem. Zo kunnen andere tijdsaanspassende VI's worden gebruikt. Twee voorbeelden hiervan zijn te zien op onderstaande afbeelding.



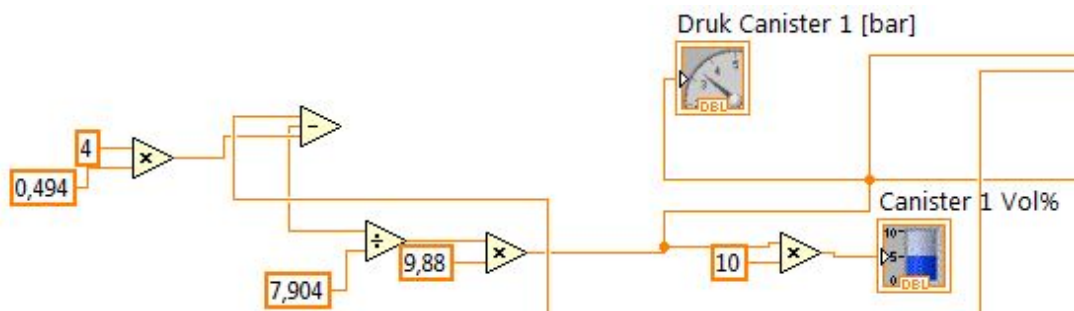
Figuur 11.45: Waiting front panel activity functie

Omzetten spanningswaarde naar drukwaarde



Figuur 11.46: Indicatie van de druk op het frontpanel

Zoals eerder besproken, wordt de spanning omgezet naar een druk via een bepaalde functie. Deze functie kan door middel van enkele numerieke VI's worden ingebracht in het "diagram panel".



Figuur 11.47: Omzetten van een spanning naar een druk

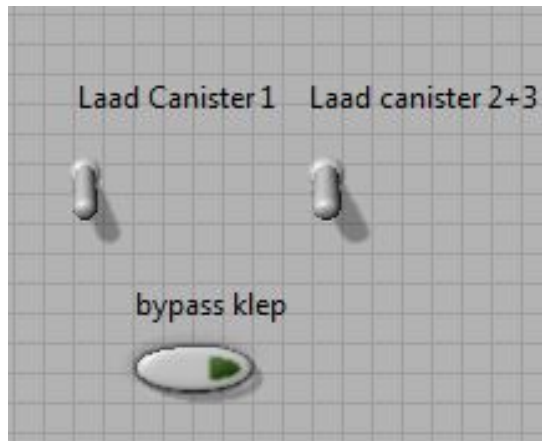
In het diagram panel werd er bij de uitvoering gebruik gemaakt van een weerstand 500Ω ($494\Omega \rightarrow$ geen enkele weerstand is perfect). De formule in het diagram gaat als volgt voor de drukweergave:

$$p = ((U_R - (4mA * 0,494k\Omega)) / 7,904V) * 9,88bar = \dots bar$$

Deze waarde wordt hierna nog eens vermenigvuldigd om het volumetrische drukpercentage te kunnen weergeven. Verder worden deze waarden dan gebruikt om aan de hand van een bepaalde grenswaarde, de kleppen (magneetventielen) aan te sturen.

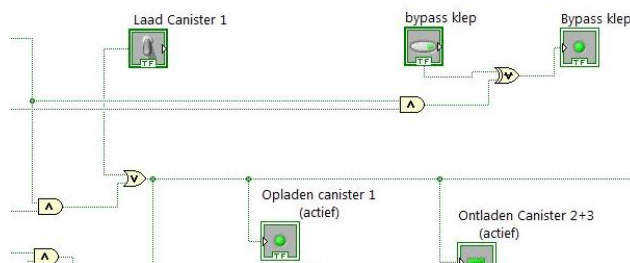
Manueel bedienen van de kleppen

Indien men liever de ventielen manueel bedient, kan er gebruik gemaakt worden van de manuele schakelaars op het front panel. Voor ieder ventiel is er een schakelaar voorzien.

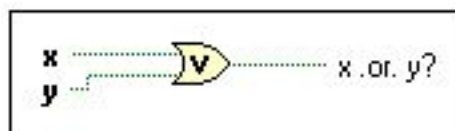


Figuur 11.48: Manuele overnamemogelijkheid van de ventielen (front panel)

De manuele bediening kan men toepassen in het systeem door gebruik te maken van de "OF-functie".



Figuur 11.49: Manuele overnamemogelijkheid van de ventielen (diagram panel)

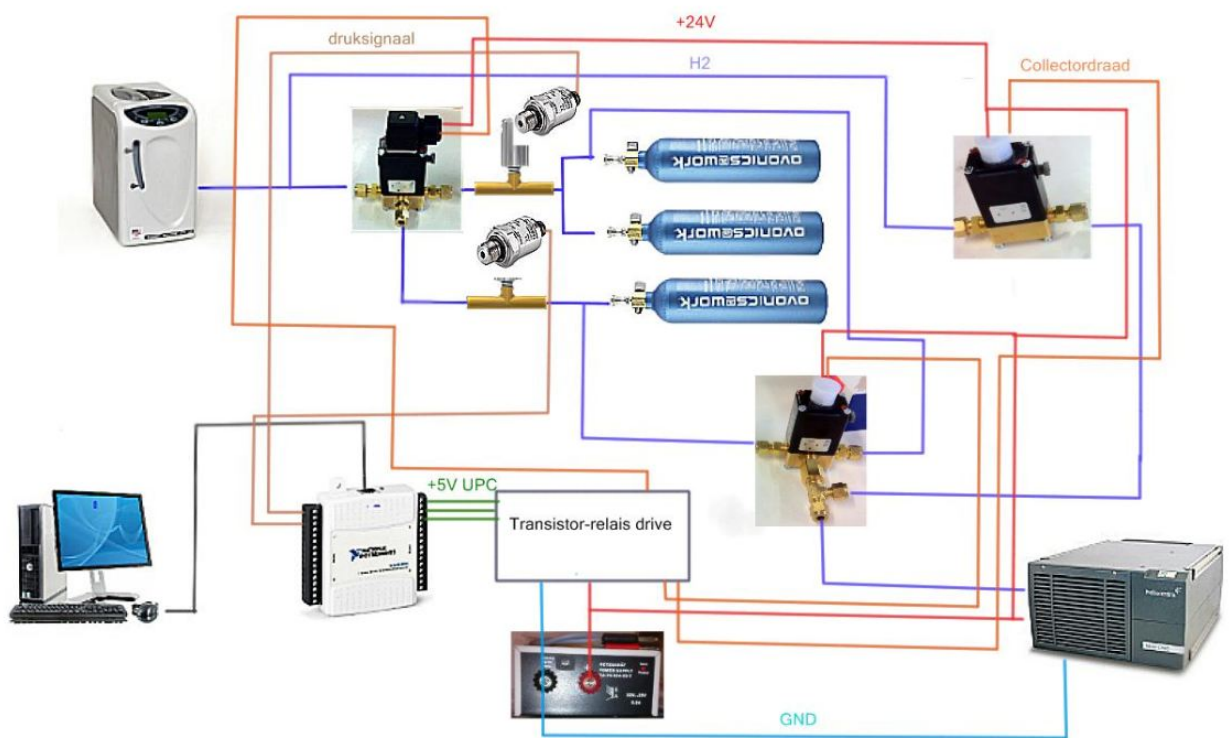


Figuur 11.50: De OF-functie

Indien x of y of boolean "TRUE" is, dan zal de uitgang van de OF-functie ook een true boolean uitsturen.

Volledige aansluitingsoverzicht

Hier werd even praktisch de aansluiting uitgezet. Enkele attributen zoals de koppelstukjes werden niet in het schema gebracht. De onderstaande afbeelding is een volledige schematische weergave van de te maken aansluitingen/koppelingen. Enkele details zoals de meetweerstand en de 24V voeding naar de druksensoren werden bewust weggelaten. De reden hiervoor was om een duidelijk overzicht te behouden.



Figuur 11.51: Schematisch overzicht sturing H2 kring

Kleine opmerkingen De slider (schuifbalk) op het front panel voor sensor 2, is een vervanging van de DAQ-assistent. Dit had als doel om het signaal te kunnen simuleren zonder de (USB) module. In het diagram paneel wordt de aansturing van de kleppen gesimuleerd via signalisatielampen (LED).

De indicatoren (lampen) zullen worden vervangen door een "DAQ-assistent VI" en zal worden geadresseerd aan verschillende digitale uitgangen die de ventielen uiteindelijk zullen aansturen via de transistor-relais drive.

De rest van het programma zal niet worden besproken omdat deze simpelweg af te leiden is uit de voorgaande afbeeldingen. Het voornaamste is dat men weet hoe de spanning wordt ingelezen en omgezet tot een waarde van druk in "bar".

11.10 Uitbreiding 2: Integratie met de Sunny Islands

Deze uitbreiding kon niet worden uitgevoerd, omdat alle tijd vereist was voor het verwezenlijken van de oorspronkelijke opgave en uitbreiding 1. Deze waren de twee streefdoelen en werden op tijd behaald. De tweede uitbreiding zal door Power-link zelf verder worden verwezenlijkt of zal eventueel deel uitmaken van een ander eindwerk of thesis. Ondanks dat het niet verwezenlijkt werd, zal het hier even kort worden overlopen. Hierbij zullen zaken aan bod komen zoals de Sunny Islands, het principe of bedoeling van deze uitbreiding en een klein schematisch overzicht.

11.10.1 Wat is een Sunny Islands?

De "Sunny Island" is een "must have"-systeembeheerder voor (stand-alone) microgrid. Ze worden gekoppeld aan energienetwerken die gebruik maken van alternatieve energiebronnen. Met andere woorden, netwerken met zonnecellen en/of windmolens. De Sunny Islands ontvangen constant feedback van de windmolens en zonnecellen en gaan aan de hand van die gegevens de kring gaan regelen (stabiliteit aanpassen, ...). Tevens kan ook een batterijbank worden gekoppeld aan de Sunny Islands. De bedoeling hiervan is om het overschot aan geproduceerde energie op te slaan in batterijen (mits eerst AC omvormen tot DC). Wanneer er dan niet voldoende energie beschikbaar is voor de gebruikers in het net, zal de Sunny Island het nodige vermogen ontnemen, inverteren naar een wisselspanning en injecteren op het gebruikersnet. De Sunny Island is dus een slimme smart microgrid systeembeheerder. De systeembeheerder op nevenstaande foto wordt toegepast in installaties met een vermogen van 1 tot 9kW en is van het type: "2224". De geïnstalleerde brandstofcel in de demo-opstelling kan een maximum vermogen leveren van 1,2kW. Een be-

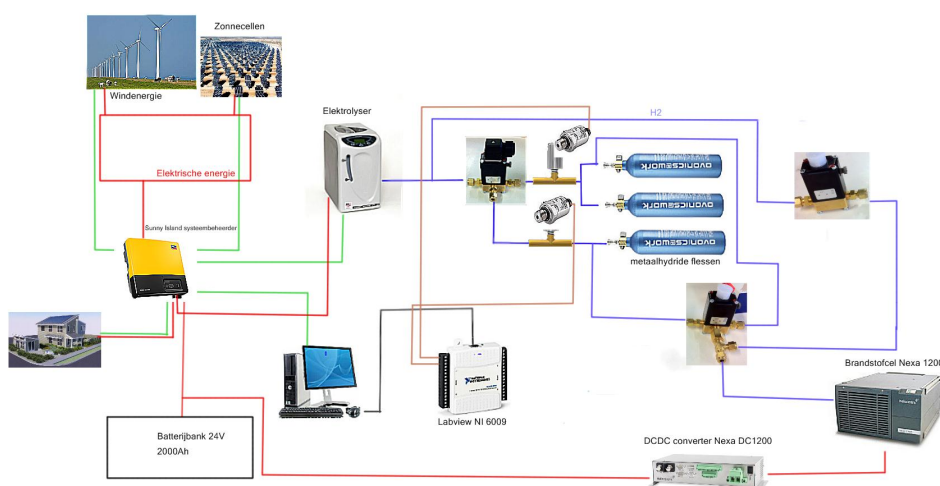


Figuur 11.52: Foto van een Sunny Island

paalde manier van samenwerken zou dus wel eens mogelijk kunnen zijn. De **Sunny Island** is in staat om te communiceren met een pc via RS485 of kan ook worden verbonden met ethernet. Zo kan de Sunny Islands feedback geven van de installatie zoals de werkingstatus vanop afstand.sma (2013)

11.10.2 Uitbreidingsprincipe met de demo-opstelling

De Sunny Island laadt bij overschot aan energie de batterijbank op. Maar wat als men dit nu eens via een waterstofinfrastructuur kon regelen? De bedoeling is om bij overschot energie de elektrolyser te starten en waterstof te produceren. Dit startsignaal zou moeten worden gegeven door de **Sunny Island**. Wanneer de installatie over onvoldoende vermogen beschikt, moet deze het nodige vermogen van de batterijbank ontnemen. Wanneer dan het nodige vermogen is afgegeven, kan de batterijbank terug worden bij- of opgeladen via de waterstofinfrastructuur. De brandstofcel kan dan via de DCDC-converter de batterijbank verder opladen met de eerder geproduceerde waterstof. Dit is goed mogelijk te realiseren maar zal toch enige bijsturing vereisen. De Sunny Islands werken tevens via RS485 onder een gecodeerde software (geëncrypteerd). De elektrolyser communiceert via een RS232 en zal al wat makkelijker te programmeren zijn. Dit alles moet worden bediend via labview met de nodige visualisatie van de data.



Figuur 11.53: Schematisch overzicht uitbreiding 2 met Sunny Island

12 | Besluit

Power-link gaf mij een eindwerk met een zeer uniek onderwerp. Dit eindwerk bestond voornamelijk uit één streefdoel met bijkomstige doelstellingen. Centraal stond de opbouw van de demo-opstelling (waterstofinfrastructuur). De bijkomstige doelstellingen waren het opstellen van een draaiboek en de uitbreiding met labview en de Sunny Islands. Het was een zeer leerrijke ervaring en tof om er heel wat inzeg in te hebben. Zo werd het voorstel om de waterstofinfrastructuur te regelen en uit te lezen via labview goed opgenomen. Het idee groeide uit tot een geslaagd project.

Het moeilijke aan dit eindwerk was de selectie van de componenten. Waterstof is nog geen alledaagse toepassing. Het vinden van de juiste leveranciers en de geschikte onderdelen vergt veel tijd. Hierbij werden richtlijnen en normen onder de loep genomen zoals de ATEX-richtlijnen. Zo onderscheiden we bijvoorbeeld de ATEX-95 richtlijn, die zicht toelgt op de apparatuur. Verder werd ook het juridische aspect bekeken. Maar omdat te opstelling geen grotere opslagcapaciteit heeft dan 50 liter (of bar) (EN 87/404/EEG) is de norm niet van toepassing op de opstelling. Tevens gaat het in de wetgeving dan ook nog eens over gewone drukvaten en niet over de veel stabielere metaalhydriden die effectief worden toegepast voor de opslag van waterstofgas.

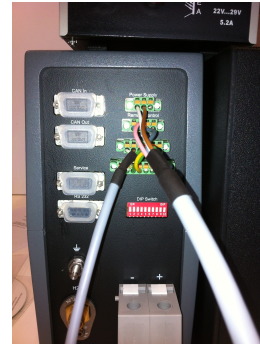
Er waren enkele problemen bij de bestelling van bepaalde onderdelen. Zo werd te laat NPT schroefdraad in de beschrijving opgemerkt in plaats van **conische gasdraad (G1/4"ISO M)**. Gelukkig kon alles worden opgelost. Voor het labview gedeelte was het even terug aanpassen aan het gehele gebeuren. In onze opleiding zou hieraan eventueel wel meer tijd worden besteed. Het draaiboek is bijna af en zal in de loop van Juni 2013 worden afgewerkt en ingediend. De tweede uitbreiding is zoals eerder vermeld niet tot in ontwerp geraakt, maar zal worden afgewerkt door Power-link of een andere thesisstudent. Het was een leerrijke ervaring en ik hoop dat deze technologie snel zal groeien (massaproductie), zodat kosten kunnen worden gedrukt.

13 | Bijlagen

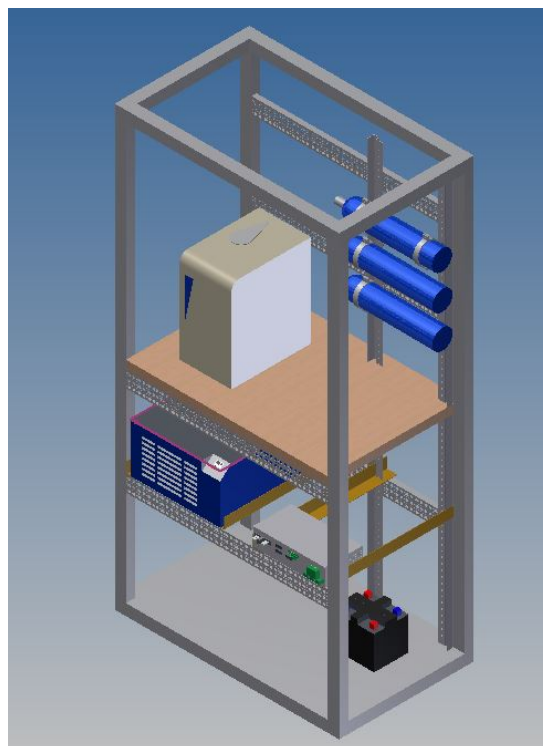
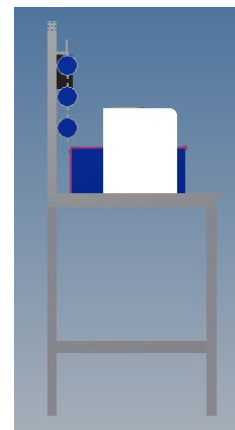
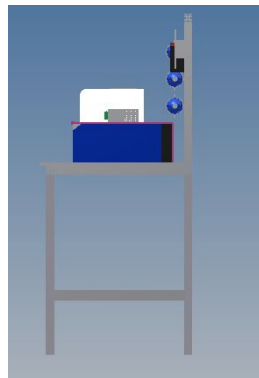
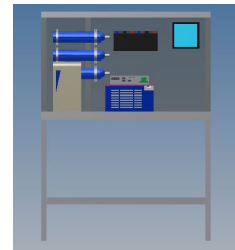
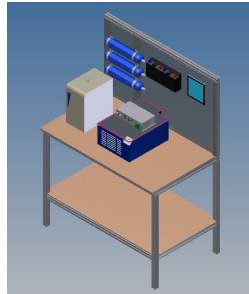
13.1 Foto's Elektrolyser



13.2 Foto's brandstofcel



13.3 Schetsen opstelling



Bibliografie

(2011). Waterstof. <http://www.khlim-inet.be>.

(2013). Gassen - waterstof. <http://www.praxair.be>.

(2013). H2 regio, projectomschrijving. <http://www.power-link.ugent.be/nl/projectomschrijving>.

(2013). Stand alone omvormers. <http://www.sma-benelux.com>.

Auteur, O. (2013). *Core Competences: Hazardous Locations*. Bürkert Fluid Control Systems.

Brown, K. (2012). Metal Hydrides for hydrogen fuel. <http://www.eoearth.org/article>.

Didde, R. (1996). Ondergrondse kolenvergassing als alternatief voor de volgende eeuw. <http://www.delta.tudelft.nl>.

Dijkgraaf, A. (2011). *Nanomagnesium als waterstofopslag*. Lawrence Berkeley Laboratory in Nature Materials.

energy, A. (2013). How an Alkaline Fuel Cell Works. <http://www.afcenergy.com>.

Martens, A. (2005). Vlaams samenwerkingsverband Waterstof en Brandstofcellen vzw. <http://www.vswb.be>.

Martens, S. N. H. V. (2009-2013). H2 - Waterstofnet. www.waterstofnet.eu.

Mulder, G. (2005). *Energie voor overmogen*. VITO Smart Grids elektrische opslag.

NFCRC University of California, I. (1999). Phosphoric acid fuel cell (pafc). <http://www.nfcrc.uci.edu/EnergyTutorial/pafc.html>.

NWV (2011-2013). De Nederlandse Waterstof en Brandstofcellen vereniging. <http://www.waterstofvereniging.nl>.

- of Energy, U. D. (2013). How Fuel Cells Work.
<http://www.fueleconomy.gov/feg/fcvPEM.shtml>.
- Rietveld, B. (2009). Alleseter lust graag waterstof uit ammoniak.
www.ecn.nl/nl/nieuws/newsletter-nl/.
- Shenglin, Z. X. (2009). *Journal of Alloys and Compounds*, volume 481. Elsevier.
- today, F. C. (2013). Mcfc. <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/technologies/mcfc>.
- Winter, I. W. V. . R. (2013). Eu Richtlijnen - ATEX. <http://www.euronorm.net>.
- Wolters, T. (2011). SOFC: De ongekroonde koning van exergie.
<http://climategate.nl/2011/06/24/sofc-de-ongekroonde-koning-van-de-exergie/>.
- Züttel, L. S. . A. (2011). *Hydrogen-storage materials for mobile applications*. EMPA - Swiss Federal laboratories for Materials Research and Testing, CH-8600 Dübendorf.