
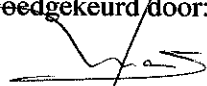
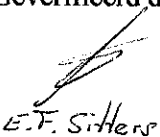
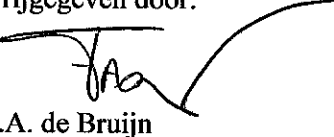


HYCYCLE

De haalbaarheid van de introductie van de waterstoffiets
 aan de Nederlandse burger ter bevordering van
 de maatschappelijke acceptatie van de waterstofeconomie

K. van Hoeven, Van Hoeven Consult
 H. Bastianen, Sparta
 B. d'Herripon, IDbike
 R.C. Makkus, ECN
 J. Smolenaars, G. Westendorp, Hexion
 H. de Wit, Hoek Loos

APRIL 2005

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door:  R.C. Makkus	Goedgekeurd door:  R.K.A.M. Mallant	ECN-Fuel Cell Technology Group: PEMFC & Supercaps
Geverifieerd door:  E.F. Sitters	Vrijgegeven door:  F.A. de Bruijn	

Verantwoording

Het onderzoek 'Hycycle' is verricht in het kader van Subsidieregeling BSE - Energieprogramma Ondersteuning Transitie-Coalities, gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken en uitgevoerd door SenterNovem.

Het onderzoek 'Hycycle' is verricht door een coalitie van penvoerder Van Hoeven Consult en medeaanvragers Sparta, IDbike, ECN, Hexion en Hoek Loos in de periode augustus 2004 tot en met februari 2005.

Abstract

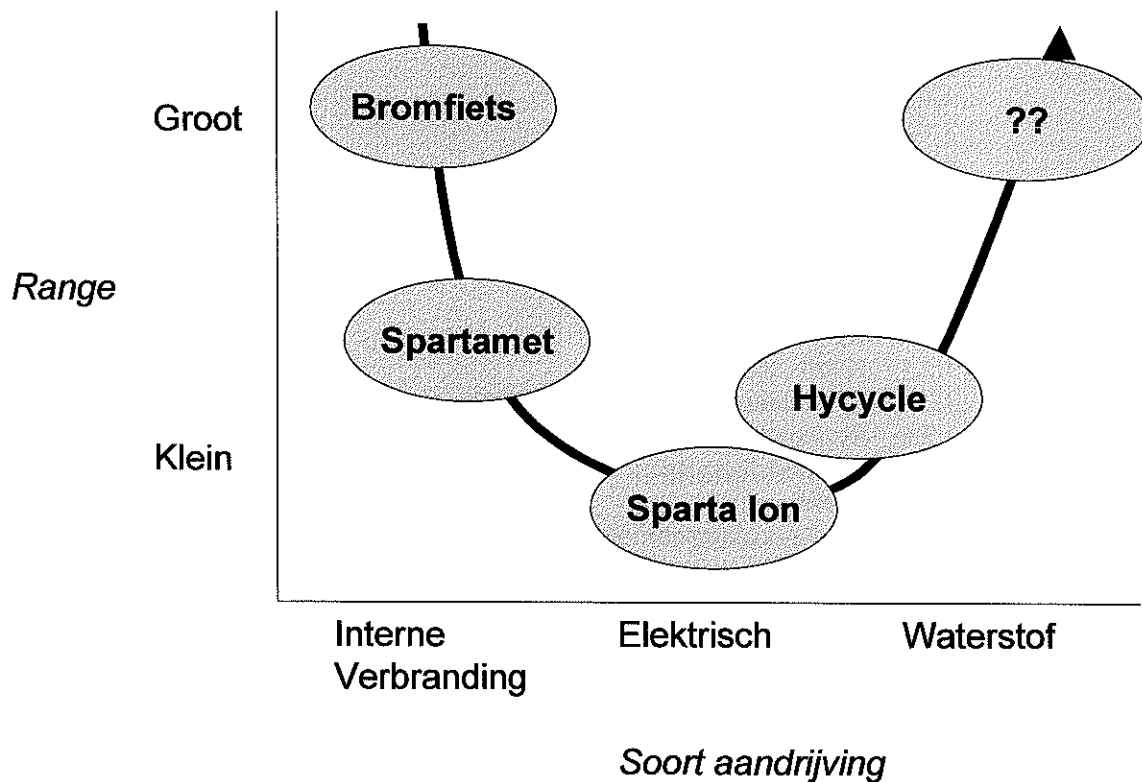
This report describes a feasibility study to develop a pedal assisted bicycle for which the needed electrical energy is supplied by a PEM Fuel Cell system, the "hycycle". The bicycle is based on the existing electric Sparta Ion bicycle. It is concluded that such a "hycycle" is technically and economically feasible, if the PEM Fuel Cell system is produced on a large scale. However, technical developments are needed before entering into a demonstration project.

INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	7
1.1 Aanleiding van het onderzoek	7
1.1.1 Duurzame energiehuishouding	7
1.1.2 Transitie-Coalities	7
1.1.3 Transitie-experimenten	7
1.1.4 Subsidiabele projecten	7
1.1.5 Transitiepad waterstof	7
1.1.6 Hycycle	8
1.2 Aanpak van het onderzoek	8
1.2.1 Coalitiepartners	8
1.2.2 Projectplan en –uitvoering	8
1.2.3 Projectbijdrage en ‘deliverables’ deelnemers	9
1.3 Opzet van het rapport	10
2. DE DOELSTELLING VAN HET ONDERZOEK	11
3. DE RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK	12
3.1 De gebruikseisen	12
3.1.1 Introductie	12
3.1.2 Range en ondersteuning	12
3.1.3 Vermogen	13
3.1.4 Gewicht	15
3.1.5 Omgevingsinvloeden	15
3.1.6 Overige eisen	16
3.2 Het brandstofcelsysteem	16
3.2.1 Inleiding	16
3.2.2 Brandstofcelkarakteristiek	17
3.2.3 Koelmethode	18
3.2.4 Koude start	18
3.2.5 Systeemlay-out en ontwerpgegevens	19
3.2.6 Systeemkeuze	20
3.3 Het waterstofopslagsysteem	22
3.3.1 Inleiding	22
3.3.2 Keuze opslagmethode	22
3.3.3 Keuze metaalhydride	22
3.3.4 Thermische modellering waterstofopslagsysteem	26
3.3.5 Calculatie laad- en ontladprofielen	28
3.4 Het waterstof distributie- en vulsysteem	28
3.4.1 Waterstof distributiesysteem	28
3.4.2 Waterstofvulsysteem	29
3.5 De systeemintegratie op de fiets	29
3.6 De economische haalbaarheid	30
3.6.1 Conceptselectie	30
3.6.2 Kostenschattting brandstofcelsysteem	30
3.6.3 Kostenschattting waterstofopslagsysteem	31
3.6.4 Kosten Balance of Plant en Controls	31
3.6.5 Kostenanalyse Power Pack	31
3.6.6 Kosten systeemintegratie	32
3.6.7 Kosten doorontwikkeling	32
3.6.8 Kosten gebruik fiets	33
3.7 Het demonstratieproject	34
3.7.1 Inleiding	34

3.7.2	Eisen	34
3.7.3	Uitvoeringskarakter	34
3.7.4	Ontwikkelingstraject	35
3.7.5	Timing	35
3.7.6	Discussie gewenste partner	35
3.7.7	Financieringsmogelijkheden	35
4.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	36
4.1	Conclusies	36
4.2	Aanbevelingen	36
5.	BIJLAGE. VULSYSTEEM	37

Stapsgewijze transitie



SAMENVATTING

Inleiding

Hycle is het concept van een waterstoffiets, gebaseerd op de bestaande elektrische Sparta Ion fiets. Hycle wordt een trapbekerachtige fiets die de benodigde (elektrische) energie uit waterstof haalt middels een brandstofcelsysteem.

Hycle is een haalbaarheidsstudie in het kader van het onderzoek naar transitiemogelijkheden naar een duurzame energiehuishouding in Nederland. Deze studie wordt verricht door een coalitie van Sparta, IDbike, ECN, Hexion, Hoek Loos en Van Hoeven Consult, die allen ervaring hebben met de uitvoering van dit soort onderzoek.

Het project is uitgevoerd in de periode augustus 2004 tot en met februari 2005. Daarbij hebben alle partners hun specifieke kennis en deskundigheid ingebracht.

Doelstelling

Het doel van het onderzoek is om de haalbaarheid na te gaan van een praktisch demonstratieproject in Nederland van het gebruik van de waterstoffiets.

Gebruikseisen

De belangrijkste nadelen van bestaande elektrische fietsen zijn de beperkte range en de lange oplaadduur van de batterij. Deze nadelen zijn in principe op te lossen door een hybride ontwerp waarin een brandstofcel gevoed met waterstof uit verwisselbare tankjes wordt toegepast in combinatie met het bestaande batterijpakket.

De voorlopige specificaties van een dergelijk trapondersteunde fiets met brandstofcel zijn:

- Range van 200 km bij een ondersteuningsniveau van 50 %
- Effectief continue vermogen van de brandstofcel van ongeveer 100 W.
- Piekvermogen van het complete systeem: 350 W (brandstofcel + batterijen)
- Maximum gewicht fiets 35 kg; brandstofcelsysteem 13 kg
- Bestand tegen een trillingsniveau van 5 G en stootbelasting van 10 G
- Omgevingstemperatuur tussen -15 en 35 °C tijdens het rijden, tussen -30 en 50 °C in parkeerstand.
- Geen significant geluid
- Verkoopprijs van de fiets van € 2500-3000; maximale kosten brandstofcel € 500
- Gemak en veiligheid als van de standaard Ion
- Uiterlijk zoveel mogelijk lijkend op bestaande Ion
- Boordspanning tussen 18 en 33 volt, nominaal 24 volt.

Het brandstofcelsysteem

Het basisontwerp van het brandstofcelsysteem bestaat uit een brandstofcelstapeling met een actief oppervlak van 18 cm², een bevochtiger voor het bevochtigen van het kathodegas en een warmtewisselaar ten behoeve van de koudstart. De stapeling wordt gekoeld met lucht.

Het gewicht van het totale systeem inclusief besturing, omvormer, warmtewisselaar, ventilatoren en leidingen is ongeveer 2,2 kg bij een volume van 3,2 l.

Het waterstofopslagsysteem

Voor 10 uur fietsen bij 100 W elektrisch is een tank met 1,3 liter metaalhydride nodig, waarin 680 Normaalliter waterstof kan worden opgeslagen. Om bij een temperatuur van -10 °C nog waterstof te kunnen leveren is gekozen voor een lage temperatuur metaalhydride. Dit heeft als gevolg dat de druk bij 50 °C op kan lopen tot 30 bar. Voor de afgifte van waterstof zal een thermisch vermogen van ongeveer 30 W nodig zijn. De cartridge dient zodanig te worden ontworpen dat deze de warmte vanuit de omgeving kan overdragen aan de metaalhydride-

legering. Een dergelijke tank zal circa 4,5 kg wegen bij een cilindervorm van 6,5 cm diameter en 40 cm lengte.

Waterstof distributie en waterstofvulstelsiem

Omdat zelf vullen door de consument onpraktisch en ongewenst is, zal de distributie gebaseerd worden op verwisselbare tankjes. Die kunnen naar keuze op één of meer plaatsen industrieel gevuld worden; de definitieve keuze hangt vooral af van logistieke en economische overwegingen.

Een eenvoudig vulstelsiem heeft een maximum capaciteit van 200 volledige tankjes per dag.

Systeemintegratie op de fiets

De systeemintegratie op de fiets is zowel elektrisch als mechanisch relatief simpel en zal het best slagen indien die meegenomen wordt in het ontwerp van de fiets als geheel. Een eerste prototype kan een omgebouwde Ion zijn.

Economische haalbaarheid

De meerkosten van de Power Pack en de systeemintegratie op de bestaande Sparta Ion zijn:

- o Prototype: + € 8700
- o Kleinserie: + € 4800
- o Serie: + € 660

De brandstofkosten van een (commerciële) fiets bedragen € 1,50 per 100 km.

Demonstratieproject

Een demonstratieproject met 100 fietsen dat 3 jaar duurt, zou op basis van een ruwe schatting ruim € 1,1 miljoen kosten. Dan komen 30.000 mensen in aanraking met het gebruik van waterstof en er worden 60.000 gebruikersdagen gerealiseerd. Die kosten dan circa € 19 per fiets per dag.

Indien onmiddellijk verder gegaan kan worden met verder technisch onderzoek en aansluitende ontwikkeling van de techniek en daarna van het demonstratieproject zou de demonstratie in 2008 kunnen beginnen.

De ideale demonstratiepartner kenmerkt zich door belang bij de uitstraling, een aantrekkelijke omgeving waarin 100 km per dag gefietst kan worden en de mogelijkheid de uitvoering vorm te geven. Een gemeente als Arnhem zou een goede kandidaat zijn.

Conclusies

Een demonstratieproject is technisch en organisatorisch haalbaar en economisch wel realistisch, maar de financiering moet nog gevonden worden.

Aanbevelingen

Voor een mogelijk demonstratieproject dient eerst verder technische onderzoek en doorontwikkeling plaats te hebben. Dat zal 2 jaar duren en € 2 miljoen kosten. Dan worden de volgende fundamentele zaken en optimalisieringsmogelijkheden onderzocht:

- o de effecten van natte en droge bevriezing en de materiaalkundige of systeemtechnische aanpassingen om die effecten te minimaliseren
- o de optimalisering van stack- en systeemontwerp gezien het lage vermogen
- o de invloed van warmteoverdracht van de brandstofcel naar de metaalhydride
- o de optimalisering van de tankgrootte aan de fietsafstand, eventueel door modulaire bouw

1. INLEIDING

1.1 Aanleiding van het onderzoek

1.1.1 Duurzame energiehuishouding

Eén van de uitdagingen waar Nederland voor staat is de overgang naar een duurzame energiehuishouding. Een energiehuishouding dus die betrouwbaar en doelmatig is en een oplossing biedt voor het klimaatprobleem. Deze overgang zal de komende decennia moeten plaatshebben. Hoe precies is niet duidelijk. De Nederlandse overheid wil die overgang stimuleren en faciliteren en gebruikt daarvoor de term transitie-management. De aanpak kenmerkt zich door het creëren van een veelheid van initiatieven die alle een bijdrage kunnen leveren aan het bereiken van die duurzaamheid.

1.1.2 Transitie-Coalities

De subsidieregeling BSE Ondersteuning Transitie-Coalities is een regeling van het Ministerie van Economische Zaken die bedoeld is om de gewenste initiatieven te stimuleren.

Het doel van het energieprogramma Ondersteuning Transitie-Coalities is het bevorderen van haalbaarheidsprojecten ter voorbereiding van transitie-experimenten die een bijdrage leveren aan de overgang naar een duurzame energiehuishouding in Nederland.

1.1.3 Transitie-experimenten

Een transitie is een structurele maatschappelijke verandering over een lange tijd (25-50 jaar). Op het gebied van energie is een transitie-experiment een beproeving van een (deel van een) nieuw duurzaam energiesysteem in Nederland, uit te voeren door een samenwerkingsverband in een situatie die de toekomstige toepassing zoveel mogelijk benadert.

Een transitie-experiment wordt gekenmerkt door het feit dat de deelnemers, zoals bedrijven, kenniscentra, maatschappelijke organisaties en overheid, er vanaf het begin tot aan het eind actief bij betrokken zijn. Deze deelnemers vormen tezamen een samenwerkingsverband, de zogenoemde Transitie-Coalitie.

1.1.4 Subsidiabele projecten

Binnen de subsidieregeling worden alleen projecten ondersteund waarbij samenwerkingsverbanden (coalities), de uitvoering van transitie-experimenten op het gebied van energie voorbereiden. Deze transitie-experimenten moeten bij een erkend transitiepad passen, de route waarlangs een duurzame energiehuishouding in Nederland kan worden bereikt.

1.1.5 Transitiepad waterstof

Het transitiepad waterstof behelst de stapsgewijze introductie van waterstof in de Nederlandse energievoorziening. Daarbij wordt gebruik gemaakt van specifieke Nederlandse karakteristieken. De termijn waarop deze transitie effectief kan worden bedraagt meer dan 30 jaar. Op kortere termijn zal de nadruk liggen op het realiseren van eerste toepassingen van brandstofcellen, die gekenmerkt worden door een bescheiden omvang, maar met een grote en positieve uitstraling.

1.1.6 Hycycle

Het voorgestelde project Hycycle, een onderzoek naar de haalbaarheid van een demonstratieproject voor de introductie van de waterstoffiets aan de Nederlandse burger ter bevordering van de maatschappelijke acceptatie van de waterstofeconomie, past uitstekend binnen de hiervoor genoemde doelstellingen.

1.2 Aanpak van het onderzoek

1.2.1 Coalitiepartners

Hycycle is een coalitie van de volgende coalitiepartners:

Sparta is een gerenommeerde Nederlandse fietsfabrikant gevestigd te Apeldoorn die zich de laatste jaren onderscheidt door innovatieve producten. Dit geldt in het bijzonder voor de Sparta Ion, een trapbekrachtigde fiets op basis van een batterijpakket, een regelsysteem en een elektromotor. Deze fiets is uitgeroepen tot fiets van het jaar 2003 en is ontwikkeld met behulp van een BIT subsidie in samenwerking met o.a. Chinese partners.

Sparta brengt kennis in van het gebruik van fietsen. Sparta wil voorop lopen met de ontwikkeling van nieuwe fietsconcepten en wil graag een waterstoffiets op de markt brengen.

IDbike is een ontwikkelingsbedrijf van fietscomponenten, gevestigd te Goirle. IDbike heeft voor de Ion de trapsensor ontwikkeld die de pedaalkracht meet en op basis daarvan de elektromotor aanstuurt. Ook IDbike heeft geparticipeerd in bovengenoemd BIT-project. IDbike is een ontwerper van innovatieve fietsconcepten en zal een belangrijke bijdrage leveren in het creëren van een praktisch fietsconcept en later in het testen daarvan. IDbike beschikt over testfaciliteiten in de laboratoriumomgeving.

Hoek Loos, gevestigd in Schiedam, levert momenteel al waterstof aan individuele gebruikers. Zij levert kennis van de distributie en opslag van waterstof en heeft de ambitie om ook in de toekomst een rol te spelen in de levering van waterstof in het demonstratieproject en de toepassing later in de totale markt.

Hexion, gevestigd in Arnhem, ontwikkelt en levert thans kleinschalige waterstofproductie-eenheden, waterstofopslagsystemen en andere componenten van een brandstofcelsysteem. Hexion heeft daartoe medewerkers in dienst met kennis van het totale brandstofcelsysteem. Hexion brengt de kennis in van het creëren, ontwerpen en produceren van brandstofcelsysteem-componenten. Hexion is een deelnemer in verschillende nationaal en Europees gefinancierde samenwerkingsprojecten op het gebied van de toepassing van waterstof.

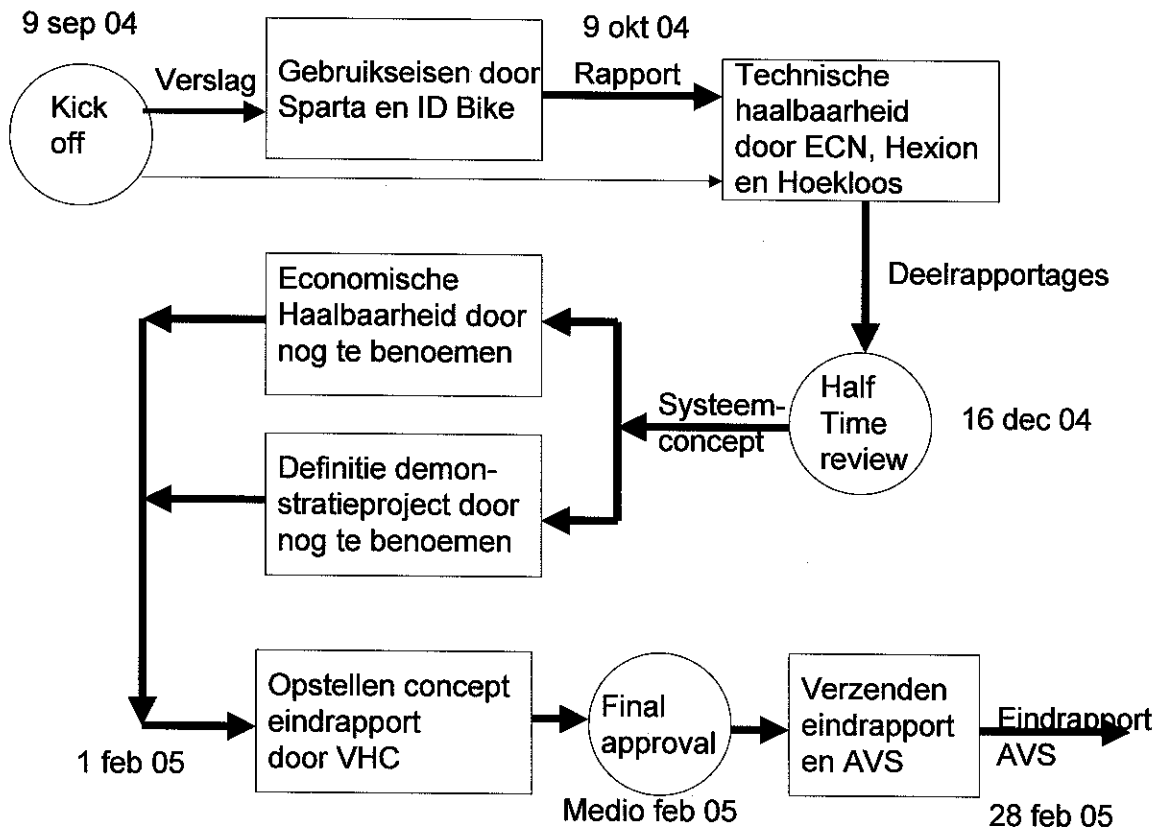
ECN, gevestigd te Petten, voert studies uit naar de introductie van waterstof als energiedrager en heeft uitgebreide kennis van brandstofcellen en het ontwerpen van brandstofcelsystemen. ECN heeft de ontwerp-kennis die nodig is om te komen tot een optimaal systeem. ECN is actief in diverse netwerken en projecten op het gebied van de toepassing van brandstofceltechnologie in voertuigen.

Van Hoeven Consult, gevestigd te Beuningen, is een adviseur op het gebied van innovatie in onder andere duurzame energie. Als specialist in het ontwikkelen van nieuwe proposities door het managen van multidisciplinaire samenwerking neemt Van Hoeven Consult het projectmanagement en de integrale eindrapportage voor zijn rekening.

1.2.2 Projectplan en –uitvoering

In de uitvoering van het project na de toekenning op 27 juli 2004 heeft elke deelnemer zijn specifieke kennis ingebracht door het uitvoeren van een deel van het onderzoek. De definitieve afspraken daarvoor zijn gemaakt tijdens de kickoff op 9 september 2004. Tussentijds heeft

afstemming plaatsgehad op 16 december 2004. De eindresultaten zijn vastgesteld in een finale bijeenkomst op 17 februari 2005.



projectplan Hycycle

1.2.3 Projectbijdrage en 'deliverables' deelnemers

Tijdens de kickoff zijn de volgende afspraken gemaakt als werkverdeling:

Sparta

- Sparta neemt deel om brandstoftechnologie te stimuleren en te leren kennen en heeft geen korte termijn commercialiseringplannen.
- Sparta wil de Ion inbrengen en prepareren voor koppeling met brandstofceltechnologie, maar wil dus geen redesign van de fiets doen in dit project.
- Sparta brengt kennis in van de gebruiksomstandigheden en -eisen
- Als eerste deliverable stelt Sparta i.s.m. IDbike de gebruikseisen op. In de discussie is al naar voren gekomen dat het gemiddeld te leveren vermogen 100 W dient te zijn. De gebruikseisen zullen ook in moeten gaan op 2^o orde effecten als piekbelasting, gebruikspatroon, startverschijnselen, waterstof tanken en dergelijke.
- Daarnaast neemt Sparta het voortouw in de evaluatie van de economische haalbaarheid

IDbike

- IDbike heeft een gebruiksmodel (drivecycle) en ondersteunt Sparta bij het bepalen van de gebruikseisen.
- Daarnaast ondersteunt IDbike de technische haalbaarheid door oplossingen voor de inpassing van het systeem in de fiets te bedenken.

ECN

- ECN richt zich in eerste instantie op het onderzoeken van drie vragen:
 - Is toepassing van brandstofceltechnologie in principe aantrekkelijk?
 - Zou integratie van brandstofcel- en opslagtechnologie tot gunstiger oplossingen kunnen leiden?
 - Welke impact hebben de meest essentiële bijkomende technische aspecten (o.a. koude start)?
- Daarnaast richt ECN zich op het maken van het ontwerp van het brandstofcelsysteem en het nagaan van de economische haalbaarheid daarvan.

Hexion

- Hexion richt zich op de keuze van de waterstofopslagmethode en zal de systeemintegratie ondersteunen in afstemming met ECN. Het onderzoek richt zich daarbij in de technische haalbaarheid op een aantal zaken:
 - Keuze van de metaalhydride, op basis van kinetische en thermodynamische berekeningen
 - Impact op de systeemintegratie
- In de economische haalbaarheid richt Hexion zich op kostenanalyse en balance of plant.

Hoek Loos

- Hoek Loos richt zich op het onderzoek van de waterstof distributie: hoe kun je tanken en hoe ziet de keten er dan uit? De belangrijkste mogelijkheden zijn: zelf tanken of “tankjes” verwisselen.
- Daarnaast onderzoekt Hoek Loos de haalbaarheid van een waterstofvulsysteem en reikt een basisontwerp daarvoor aan.

Van Hoeven Consult

- Van Hoeven Consult richt zich op algemene coördinatie, organisatie van de bijeenkomsten, contact met SenterNovem, eindredactie van de eindrapportage en levert een bijdrage aan het definiëren van het demonstratieproject.

1.3 Opzet van het rapport

Dit eindrapport is opgezet conform de opzet van het project.

In hoofdstuk 1 wordt uitleg gegeven over de achtergrond en aanpak van het onderzoek. Hoofdstuk 2 maakt het doel van het onderzoek helder.

Hoofdstuk 3 geeft de inhoudelijke resultaten van het onderzoek weer in de vorm van de deelbijdragen van de onderzoeks aanpak. De volgende onderwerpen komen aan de orde:

- De gebruikseisen
- Het brandstofcelsysteem
- Het wateropslagsysteem
- Het waterstof distributie- en vulsysteem
- De systeemintegratie op de fiets
- De economische haalbaarheid
- De definitie van het demonstratieproject

Hoofdstuk 4 tenslotte geeft de conclusies weer, gaat na in hoeverre de doelstelling gehaald is en geeft aanbevelingen hoe het project een vervolg kan krijgen om de gewenste bijdrage aan de energietransitie daadwerkelijk te realiseren.

2. DE DOELSTELLING VAN HET ONDERZOEK

De doelstelling van het project is de haalbaarheid na te gaan van een praktisch demonstratieproject van de waterstoffiets (Hycycle) met de volgende projectonderdelen:

- De keuze van een omgeving waarin 50 à 100 waterstoffietsen voor publiek gebruik beschikbaar worden gesteld zodat vele mensen met de technologie kennis kunnen maken
- De toetsing van de haalbaarheid van het systeemconcept van een bruikbare trapbekrachtigde fiets waarvan de bekrachtiging deels geleverd wordt door een in de fiets ingebouwde brandstofcel
- De toetsing van de economische haalbaarheid van een demonstratieproject waarin gebruiksvriendelijk de distributie en het gebruik van waterstoffietsen tot stand komt

Een dergelijke fiets moet gekenmerkt worden door een hoge mate van bruikbaarheid. De uitdaging is een fiets te ontwikkelen die door onervaren mensen gemakkelijk gebruikt kan worden en die het onder alle omstandigheden van het proefgebied doet, dus onder normale Nederlandse omstandigheden. Deze fiets moet zich eveneens lenen voor commercialisering en dus een aantrekkelijk alternatief zijn voor bestaande elektrisch ondersteunde fietsen, zoals de Sparta Ion.

Het project dient daartoe te bestaan uit een onderzoek naar de technische haalbaarheid op basis van de gewenste gebruiksmogelijkheden, een onderzoek naar de economische haalbaarheid van een seriematig vervaardigde fiets op basis van toe te leveren componenten van het brandstofcelsysteem en tenslotte de definitie van een praktisch demonstratieproject, waarbij aspecten als waterstof distributie en -gebruik aan de orde komen.

3. DE RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK

3.1 De gebruikseisen

3.1.1 Introductie

Een huidige fiets met trapkrachtondersteuning heeft een beperkt bereik, dat vooral bepaald wordt door de capaciteit van de batterij. De Sparta Ion bijvoorbeeld, met een effectieve batterijcapaciteit van 200 Wh heeft een bereik van ongeveer 50 km.

Dit bereik is uiteraard afhankelijk van de ingestelde bekrachtiging, en varieert van 25 tot 75 km. Daarna is de batterij leeg en moet weer worden opgeladen via het elektriciteitsnet. Dit oplaadproces duurt 3-4 uur, te lang om hier als gebruiker op te wachten. Daarom wordt in de praktijk de fiets 's nachts opgeladen, zodat overdag effectief 50 km kan worden gereden.

Een brandstofcel zou zowel het probleem van het beperkte bereik als het langdurige laden mogelijk kunnen oplossen. Een nieuwe portie brandstof kan dan eenvoudig en snel worden toegevoegd door bijvoorbeeld het verwisselen van een H₂-patroon. Extra patronen kunnen meegenomen worden om het bereik verder te vergroten.

In deze paragraaf wordt uitgezocht wat het gewenste bereik en ondersteuningsniveau van een elektrische fiets met brandstofcel zou moeten zijn en hoe de overige specificaties er globaal zouden moeten zijn.

Naast de brandstofcel zal de fiets ook een elektrisch opslagsysteem moeten hebben, in de vorm van een batterij. Dat is nodig voor:

- Het opstarten van de brandstofcel.
- De energievoorziening van de fiets tijdens het opstarten van de brandstofcel
- Het opvangen van piekbelastingen tijdens acceleratie en het oprijden van een helling.

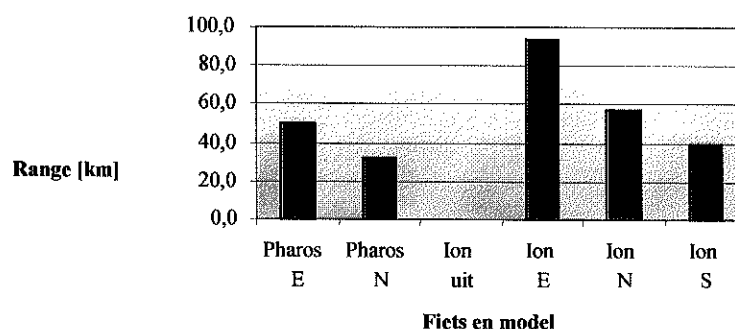
Dit betekent dat de brandstofcel alleen hoeft te voorzien in de gemiddelde energiebehoefte van de fiets. Indien de benodigde elektrische energie lager is dan de energiestroom uit de brandstofcel kan de batterij van de fiets worden opgeladen. Als de batterij vol is wordt de brandstofcel automatisch afgeschakeld. De brandstofcel kan dus zo ontworpen worden dat hij altijd op het punt van de maximale efficiëntie werkt

3.1.2 Range en ondersteuning

Bestaande fietsen

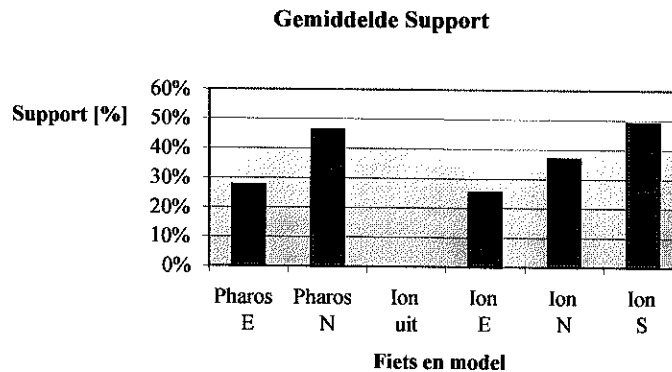
De range van twee bestaande fietsmodellen wordt gegeven in de volgende tabel:

Range bij gebruik 90 % accu



Figuur 1. Range bestaande elektrische fietsen

Hierbij heeft de Pharos een bestaande aandrijving van Japanse fabrikaat, en de Ion is een nieuwe elektrische fiets van Sparta. Er wordt ervan uitgegaan dat 90 % van de capaciteit van de accu (ongeveer 200 Wh) gebruikt wordt
De E(conomy) stand geeft de minste bekrachtiging en de S(portieve) stand het meeste:



Figuur 2. Support (trapondersteuning) bestaande fietsen

In de sportieve stand hoeft de berijder dus slechts 50 % van de benodigde energie te leveren, de andere helft komt uit de elektrische ondersteuning.

Sparta Ion met brandstofcel

Uitgangspunt is dat de Sparta Ion voorzien van een brandstofcel dezelfde ondersteuning moet kunnen bieden als de bestaande Ion in de Sportieve stand. Dit betekent dat het systeem (brandstofcel + batterij) minimaal de helft van de noodzakelijke energie zal moeten leveren.

De range van de waterstoffiets dient echter aanzienlijk groter te zijn, namelijk 200 km zonder waterstof bij te vullen of tankjes uit te wisselen.

Dit betekent dat er ongeveer 5 maal de hoeveelheid energie van de bestaande Ion zal moeten worden meegenomen.

Dit komt neer op een totale energievoorraad van globaal 1000 Wh elektrische energie. Met een rendement van de brandstofcel van 50 % komt dit neer op een chemische capaciteit van 2000 Wh of ongeveer 7 MJ. De hoeveelheid benodigde waterstof zal in 3.3.3 nader gepreciseerd worden.

3.1.3 Vermogen

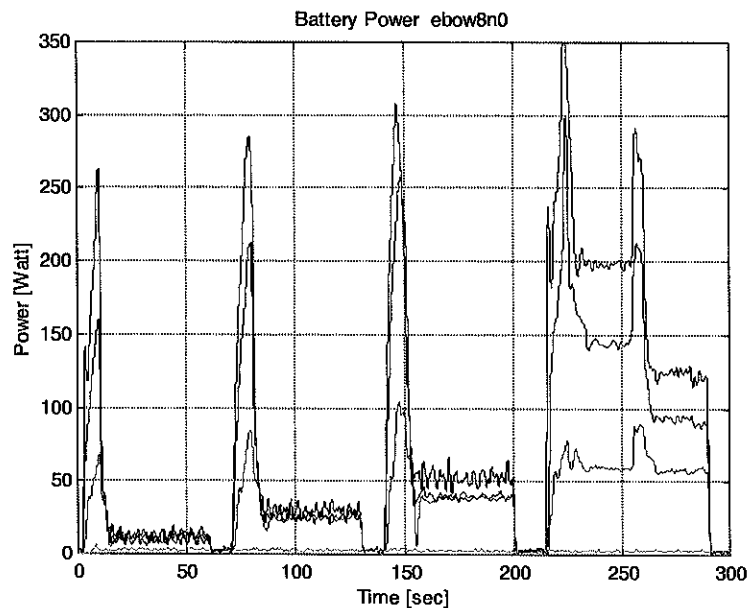
Naast de capaciteit van het systeem is ook het vermogen dat geleverd moet worden van belang. Hierbij kan worden onderscheiden:

- Het continue vermogen: het vermogen dat gemiddeld over een langere tijd moet kunnen worden geleverd om de motor van energie te voorzien
- Het piekvermogen: het vermogen dat gedurende korte tijd, bijvoorbeeld gedurende 10 s., geleverd moet kunnen worden, zoals tijdens het optrekken van de fiets.

Bij de huidige fiets is het continue vermogen van de batterij ongeveer 250 W, het piekvermogen is circa 500 W. De benodigde vermogens liggen echter lager.

Het werkelijk benodigde vermogen is natuurlijk sterk afhankelijk van het rijgedrag van de fietser. Dit rijgedrag is gemeten en beschreven in het rapport "Torque and Power measurements" van 3-5-2001 van IDbike. In dit rapport wordt een gemiddeld benodigd elektrische vermogen berekend van circa 100 W.

IDbike heeft voor de test van elektrische fietsen een proefstand test ontwikkeld, die gebaseerd is op het rijgedrag van een sportieve fietser, zoals beschreven in bovengenoemd rapport. In de volgende grafiek worden de batterijvermogens tijdens een proefstandcyclus van de bestaande Sparta Ion geplot.



Figuur 3. Benodigd batterijvermogen van de bestaande Sparta Ion

Hierbij staat de groene lijn voor de Eco stand, de Blauwe voor de Normaal stand, en de rode voor de Sportieve stand.

Uit de grafiek blijkt dat het piekvermogen voor de S stand 350 W bedraagt, op het moment dat op een helling geaccelereerd wordt (max. 10 s) Rijdend op de helling (4%) bedraagt het continue vermogen 200 W.

Het gemiddelde vermogen over de hele cyclus bedraagt in de Sportieve stand 77 W.

Een continu vermogen van 100 W lijkt dus voldoende voor de gemiddelde situatie, maar dit moet verhoogd worden tot 200 W als de fiets in een heuvelachtig gebied gebruikt moet kunnen worden.

In deze laatste situatie zou echter de accu gebruikt kunnen worden om het continue vermogen tijdelijk "aan te vullen". Als er bijvoorbeeld een accu wordt toegepast met een capaciteit van 5 Ah (ongeveer de helft van de huidige accu), dan kan er iets meer dan een uur tegen een helling van 4 % worden opgereden. Hiermee kan een hoogteverschil overbrugd worden van 360 meter. Daarna valt het beschikbare vermogen terug naar 100 W (van de brandstofcel), en zal de fietser meer vermogen moeten gaan leveren (of langzamer moeten gaan fietsen)

Er is nog een ander criterium voor de bepaling van het continue vermogen dat door de brandstofcel moet kunnen worden geleverd: het maximale vermogen waarmee de accu kan worden geladen. Bij de huidige Ion is dit vermogen circa 24 V (volt) x 4,5 A (ampère) en dus ook ongeveer 100 W.

Als de fiets stilstaat en de accu wordt bijgeladen kan er dus maximaal 100 W aan de accu worden afgegeven door de brandstofcel.

Dit geldt overigens voor de huidige accu van de Ion, bij een accu met de halve capaciteit zou het maximale vermogen op circa 50 W komen te liggen. Te verwachten is dat over enkele jaren ook deze kleinere accu met circa 100 W kan worden geladen, omdat zowel de accutechnologie als de laadtechnologie steeds verbetert.

Concluderend kan gesteld worden dat de brandstofcel een effectief vermogen zal moeten hebben van circa 100 W. Dit betekent het vermogen na aftrek van de benodigde vermogens voor

pompjes, verwarmingselementen en dergelijke, nodig om de brandstofcel op te starten en aan de gang te houden.

Dit effectieve vermogen is tegelijkertijd ook het piekvermogen van de brandstofcel. Het extra benodigde vermogen tijdens acceleratie of het oprijden van een helling wordt geleverd door de batterij.

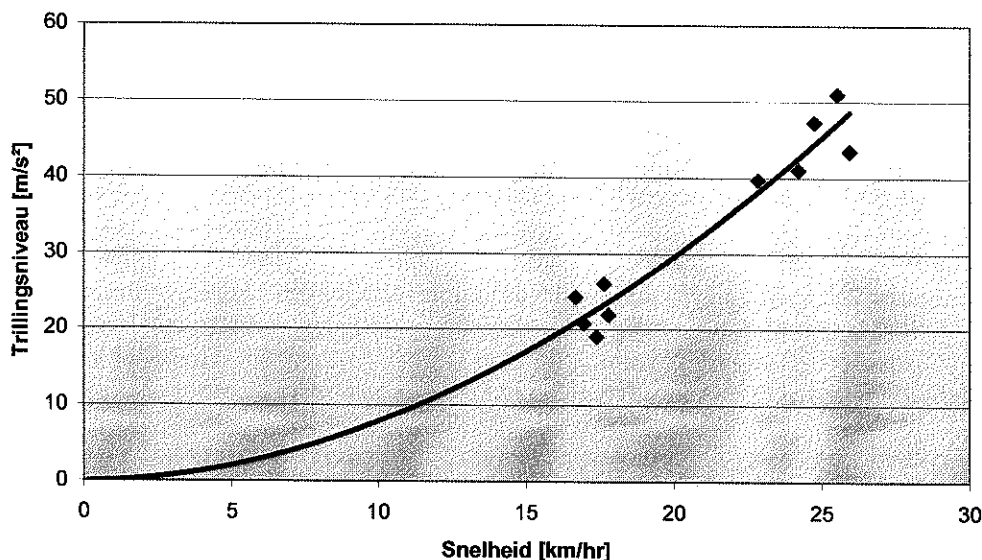
3.1.4 Gewicht

Het gewicht van de bestaande Ion is circa 25 kg, afhankelijk van de uitvoering. Van die 25 kg is de accu een behoorlijk deel. Uitgaande van de veronderstelling dat de accu nodig blijft, zal de Hycle dus zwaarder worden. Een totaalgewicht van 35 kg is het maximum om de fiets nog enigszins handelbaar te houden, bijvoorbeeld voor het meenemen op een fietsdrager aan de auto. Het totale brandstofcelsysteem, inclusief waterstofopslag mag een gewicht hebben van 13 kg.

3.1.5 Omgevingsinvloeden

Trillingsniveau

Eén van de belangrijkste invloeden uit de omgeving betreffen de trillingen vanuit de weg op het fietsframe. Metingen geven voor een weg met kinderkopjes de volgende versnellingsniveaus.



Figuur 4. *Relatie tussen snelheid en trillingsniveau*

Hieruit blijkt dat er een duidelijke relatie bestaat tussen de snelheid van de fiets en het maximaal optredende trillingsniveau. Bij 25 km/uur bedraagt het trillingsniveau 50 m/s² ofwel 5 G. Stel dat er per week 1 uur over dit soort echt slechte weg wordt gereden, dan komt dat na 10 jaar neer op ongeveer 500 uur. Bij het op en afrijden van een stoep kunnen echter nog hogere versnellingsniveaus ontstaan, tot 10 G (schokbelasting).

Als eis kan dus gesteld worden 500 uur een maximaal niveau van 50 m/s² en 1 uur 100 m/s².

Omgevingstemperatuur

De fiets moet blijven functioneren tussen de -15 °C en + 35 °C buitentemperatuur. Als de fiets in een schuur wordt weggezet moeten er geen problemen optreden bij een temperatuurbereik van -30 tot + 50 °C.

3.1.6 Overige eisen

Geluidseisen

De fiets mag in principe geen significant geluid maken, en moet even stil zijn als de bestaande Ion.

Kosten

Uitgaande van de prijs van de huidige ion, lijkt een verkoopprijs van 2500-3000 € acceptabel. Dit betekent een kostprijs van de fiets van 1250 – 1500 €. De kosten van het brandstofcelsysteem in serieproductie (500 stuks/jaar) komen hiermee op circa 500 €.

Gemak, onderhoud en veiligheid

Het systeem dient zodanig onderhoudsvrij te zijn, dat slechts 2 maal per jaar een bezoek aan de dealer hoeft te worden gebracht, eenmaal voor een periodieke check en preventief onderhoud en eenmaal voor een reparatie (in de pilotfase zijn vier reparaties per jaar toelaatbaar).

De fiets moet verder ogenblikkelijk kunnen worden gebruikt, er mag geen beperkende opstarttijd zijn (dat lijkt haalbaar indien de ingebouwde accu voldoende capaciteit heeft om de opstart van de brandstofcel tijdens het gebruik van de fiets mogelijk te maken).

De veiligheid van de fiets is natuurlijk van groot belang. Er moet aan alle van toepassing zijnde normen worden voldaan.

Uiterlijk

De huidige Ion met NiMH batterij is een groot succes. Een van de belangrijke aspecten die hieraan hebben bijgedragen is het uiterlijk van deze fiets, dat nauwelijks afwijkt aan dat van een gewone fiets.

De fiets met brandstofcel moet daarom zoveel mogelijk lijken op de bestaande Ion, liefst moeten er zoveel mogelijk bestaande Ion-componenten worden gebruikt, ook omdat de economische haalbaarheid en ook de praktische realisatie dan het meest bevorderd wordt.

Boordspanning

De spanning waarbij het huidige systeem in de Sparta Ion functioneert bedraagt minimaal 20 en maximaal 27 volt. De spanning die nodig is om de accu op te laden varieert van 18 tot 33 volt. De brandstofcel zal dus een uitgangsspanning moeten kunnen leveren van maximaal 33 volt, om de accu volledig op te laden.

3.2 Het brandstofcelsysteem

3.2.1 Inleiding

Deze paragraaf beschrijft een eerste basisontwerp van het brandstofcelsubstelsysteem.

De relevante zaken voor het basisontwerp van het brandstofcelsubstelsysteem zijn:

1. Effectief vermogen 100 W
2. Busspanning 18 - 33 V; nominaal 24 V
3. Minimum omgevingstemperatuur -30 C
4. Opslag waterstof in MH-tank

Het brandstofcelsysteem fungeert als een range-extender van een batterijpakket, een verhoging van de actieradius van 50 km naar 200 km.

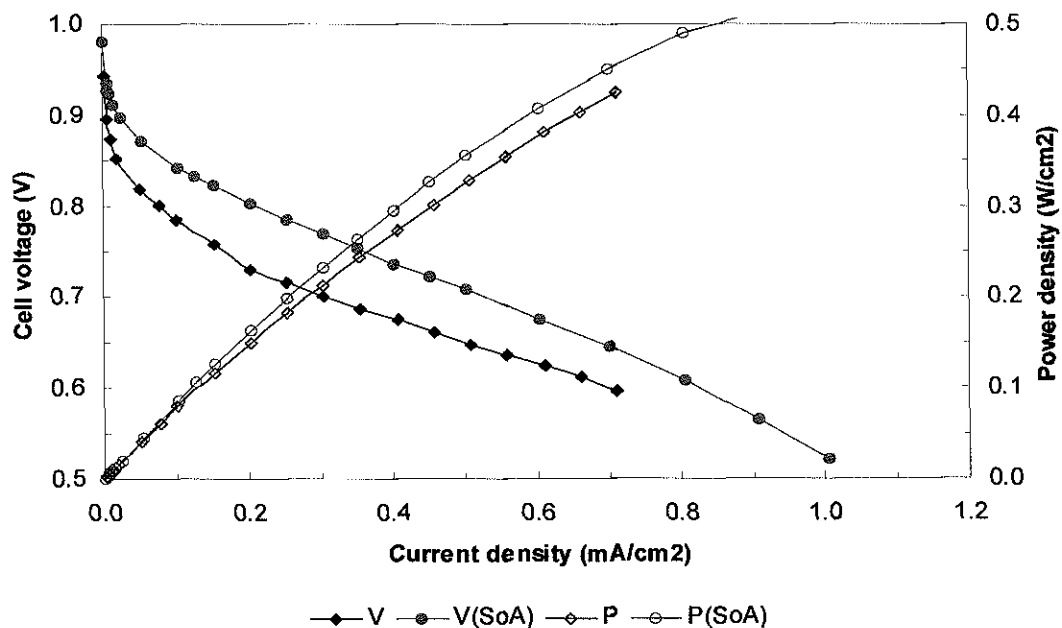
In het vervolg zal kort worden ingegaan op de werking en de karakteristieken van een PEM brandstofcel, de koelmethodes, koude start, systeem lay-out en ontwerpgegevens.

3.2.2 Brandstofcelkarakteristiek

In een brandstofcel wordt chemische energie direct omgezet naar elektrische energie door de reactie van waterstof met zuurstof tot water in twee gescheiden compartimenten te laten verlopen. In de anode wordt waterstof geoxideerd tot protonen en elektronen, in het geval van een PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) migreren de protonen door een protongelegend membraan naar de kathode; de elektronen gaan via een elektrisch circuit naar de kathode. In de kathode wordt zuurstof gereduceerd en reageert daar met de protonen en de elektronen tot water. Een complete cel bestaat uit een anodegasverdeelplaat en kathodegasverdeelplaat, die voor toe- en afvoer en verdeling van gas zorgen alsmede doorgifte van de stroom, en een zogeheten MEA (membrane electrode assembly) met een anode en kathode, gescheiden door een protongelegend membraan.

Een stroomleverende cel heeft typisch een spanning tussen de 600 en 700 mV. Om een hogere spanning te verkrijgen worden cellen gestapeld; het oppervlak van de cel bepaalt de te leveren stroom.

Typische stroom-spanning/vermogen karakteristieken zijn weergegeven in figuur 5; de curve SoA (= State of Art) is bepaald onder ideale omstandigheden, relatieve vochtigheid gassen meer dan 90%. Het realiseren van een dergelijke hoge relatieve vochtigheid kan in praktijksituaties een probleem zijn. Bij een relatieve vochtigheid lager dan 90% daalt de prestatie van een PEM brandstofcel doordat de protongeleding van het membraan vermindert, vergelijkbaar met de tweede curve, die de gebruikelijke praktijk weergeeft.



Figuur 5. Karakteristiek van een brandstofcel

3.2.3 Koelmethode

Naast elektrisch vermogen produceert een brandstofcel ook warmte. Deze warmte kan worden weggevoerd via luchtkoeling of via vloeistofkoeling.

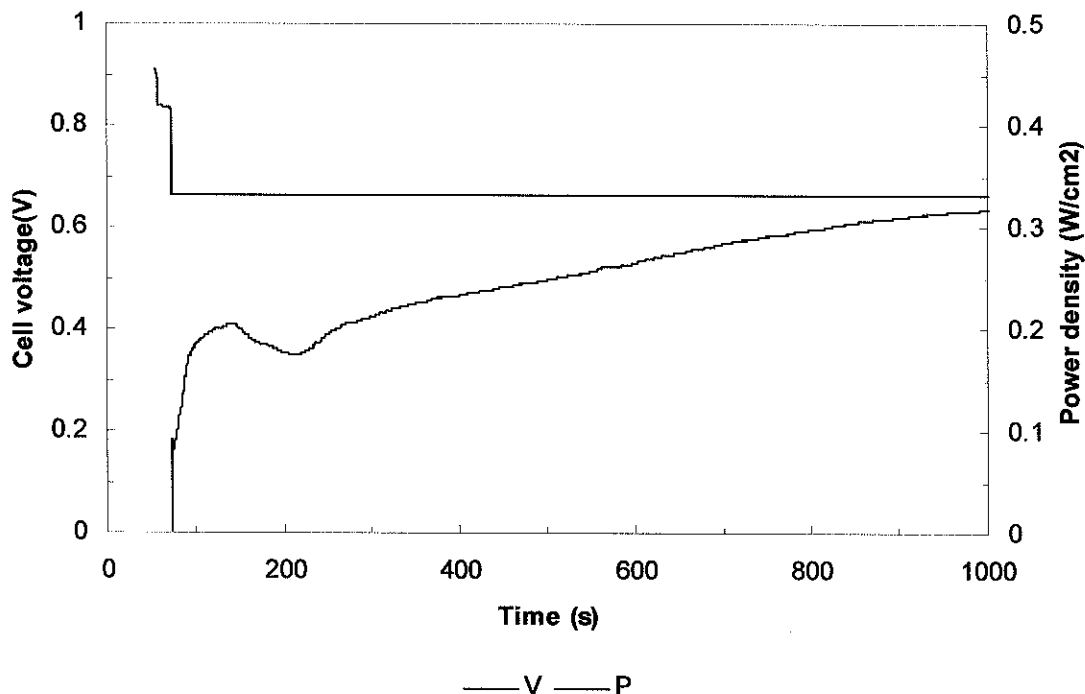
Bij toepassing van vloeistofkoeling kan warmte worden overgedragen aan de metaalhydride tank om afkoeling ten gevolge van de desorptie van waterstof te voorkomen. Voor een vloeistofkoeling is een pomp nodig met een reservoir. Bij opwarmen dient ook de vloeistof te worden verwarmd. De temperatuurgradiënt over de cel is in het geval van vloeistofkoeling in de orde van 5 tot 10 °C.

Luchtkoeling is eenvoudiger, door middel van een ventilator wordt lucht gedwongen te stromen tussen de cellen. De temperatuurgradiënt is groter: van omgevingstemperatuur tot 60 - 70 °C.

3.2.4 Koude start

Een belangrijke eis is dat het systeem moet kunnen worden gestart bij een temperatuur van -15 °C. Een brandstofcel met het huidige protongeleidend materiaal Nafion, heeft vloeibaar water nodig om te kunnen functioneren. Dit houdt in dat een PEM brandstofcel pas bij een temperatuur boven 0 °C kan worden gebruikt. Dus bij een omgevingstemperatuur onder nul moet de brandstofcel actief worden verwarmd. Dit kan gebeuren door het gas en het eventuele koelwater te verwarmen in een warmtewisselaar.

Bij temperaturen boven 0 °C kan een brandstofcel snel vermogen leveren; binnen twee minuten levert de stack ongeveer 2/3 van het nominale vermogen zoals af te leiden is uit figuur 6.

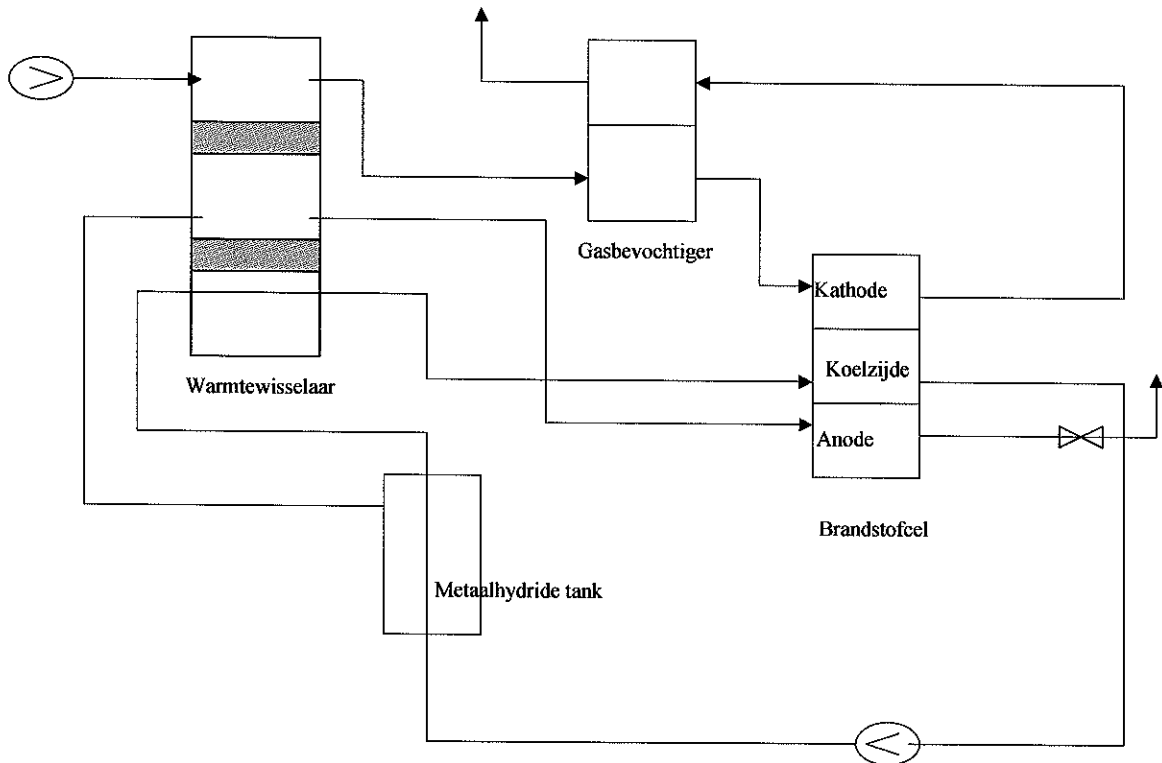


Figuur 6. Respons bij koude start vanaf kamertemperatuur

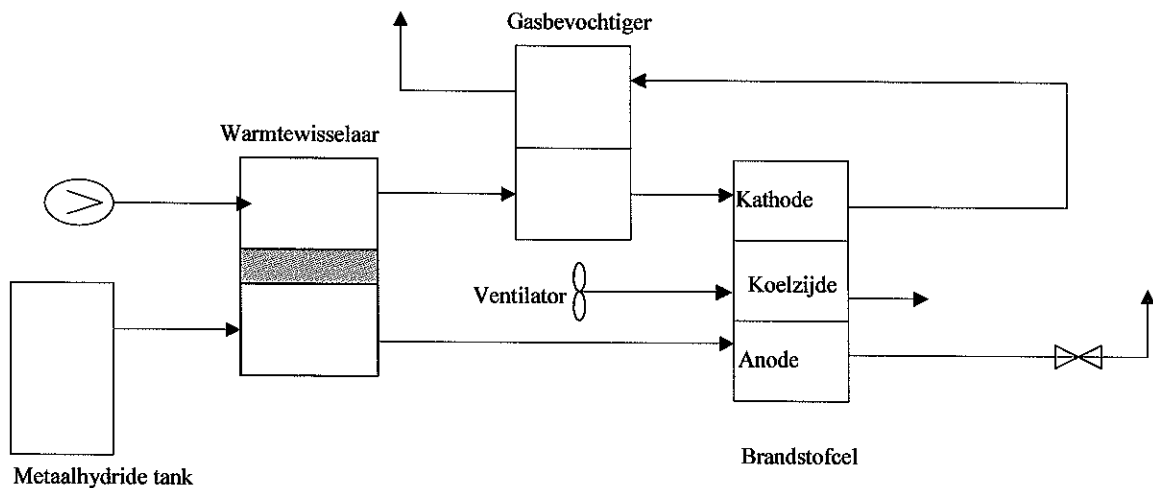
Om beschadigingen aan cel en stack te vermijden bij temperaturen beneden 0°C moet bij deze lage temperaturen het water uit de cellen worden geblazen. Vooralnog is het effect van meervoudig bevriezen en ontdooien op membraan en elektrodes onbekend.

3.2.5 Systeemlay-out en ontwerpgegevens

Een basis systeemlay-out voor het vloeistofgekoelde systeem is weergegeven in figuur 7; het luchtgekoelde systeem is weergegeven in figuur 8. Om een zo hoog mogelijke vermogensdichtheid te verkrijgen is gekozen voor een brandstofcel met bevochtiger. In de membraanbevochtiger wordt de inkomende droge lucht bevochtigd en verwarmd door de uitgaande warme en natte lucht. De lucht wordt aan het systeem toegevoerd middels een kleine ventilator.



Figuur 7. Basis schema van het brandstofcelsysteem met vloeistofkoeling

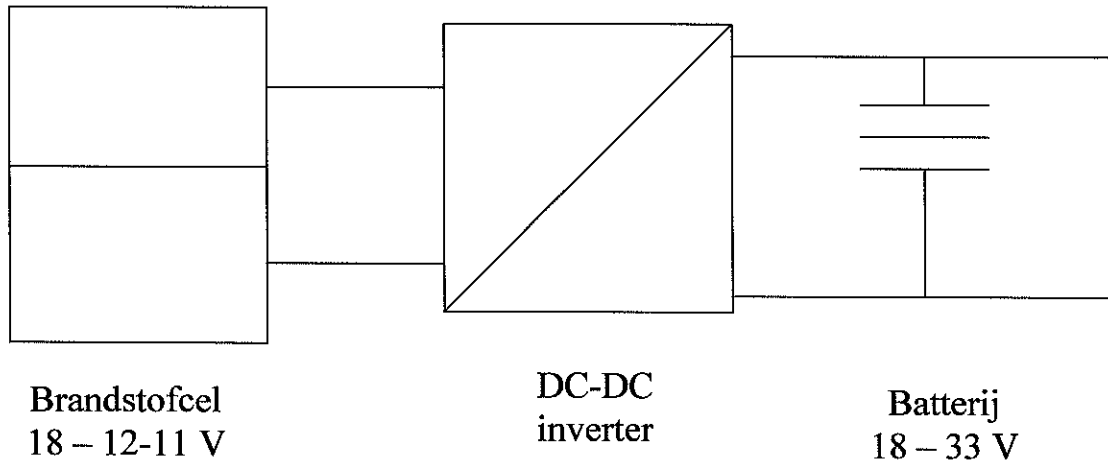


Figuur 8. Basis schema van het brandstofcelsysteem met luchtkoeling

Bij grotere brandstofcelsystemen is het gebruikelijk om een overmaat H_2 aan de anode toe te dienen. De niet gebruikte H_2 wordt door bijvoorbeeld een recirculatiepomp of venturi teruggevoerd naar de ingang, opdat geen H_2 verloren gaat. Door het toevoeren van de overmaat wordt bereikt dat er nergens in de anodegasverdeelplaten water kan ophopen, waardoor de cel lokaal geen stroom zou kunnen produceren. Een dergelijke aanpak is voor een klein systeem niet haalbaar wegens te grote complexiteit en het onevenredig grote energiegebruik van de

recirculatiepomp. Tijdens bedrijf zal de stack de waterstofzijde in zogeheten dead-end situatie worden gebruikt, de anode-uitgang is daarbij afgesloten. Af en toe moet er worden afgeblazen om water en stikstof te verwijderen. Frequentie en tijdsduur van afblazen dient nog nader te worden onderzocht.

Het elektrische schema van het brandstofcel systeem is schematisch weergegeven in figuur 9. De brandstofcel is gekoppeld aan een DC/DC converter om het spanningsniveau van de stack te koppelen aan de spanning van de batterij.



Figuur 9. *Elektrisch schema van het brandstofcelsysteem*

3.2.6 Systeemkeuze

Berekeningen in 3.3 tonen aan dat de metaalhydride tank voldoende warmte uit de omgeving kan onttrekken bij desorptie, zodat er geen warmte hoeft te worden overgedragen van PEMFC stack naar de tank. Dit betekent dat wordt gekozen voor een luchtgekoelde stack.

Het effectieve nominale vermogen van het systeem moet 100 W zijn. Onder de veronderstelling dat het parasitaire vermogen ongeveer 10 W is, resulteert dit in een bruto stackvermogen van 110 W. De locatie van de stack is enigszins vrij te kiezen, mogelijkerwijs naast de zadelbuis of onder de bagagedrager. Voor beide opties geldt dat het actief oppervlak gering dient te zijn. Voor een voorlopig ontwerp is gekozen voor een oppervlak van 18 cm². Koeling en lucht worden toegevoerd middels ventilatoren.

In tabel 1 staan de ontwerpgegevens van de brandstofcelstapeling. In tabel 2 staan de afmetingen van de stack, de bevochtiger die geïntegreerd wordt met de stack en de geschatte afmetingen van de warmtewisselaar vermeld.

Op grond van de massa van de stack, bevochtiger en warmtewisselaar, is bepaald hoeveel energie er nodig is om de stack van -15 °C op te warmen naar 0 °C, zie tabel 3. Bij een opwarmtijd van 10 minuten verbruikt het systeem ongeveer 15 W.

Tabel 1: PEMFC stacksysteem, H₂/lucht gevoed, luchtgekoeld, actief oppervlak cel: 18 cm²

	Nominaal	Piek
Vcel (mV)	650	600
Efficientie (%)	51	47
Stroomdichtheid (mA/cm ²)	500	700
P/cm ² (W/cm ²)	0.325	0.42
P/cel (W/cel)	2.7	4.2
Pstack netto (W)	100	162
Parasitair vermogen (W)	10	10
Pstack bruto (W)	110	144
Debiet H ₂ (NI/min)	1.2	1.7
Debiet lucht (NI/min)	5.7	8
Warmteproductie (W)	108	164

Tabel 2: Afmetingen

Component	Hoogte (mm)	Gewicht (g)
Stack	80	622
Bevochtiger	36	90
Warmtewisselaar/heater	24	240
Totaal	140	952

Tabel 3: Warmtebalans/koude start

	Flow/eindplaten	MEA	Totaal
Massa (g)	933	18.1	
Cp J/gK	0.46	1	
dT	15	15	
Energie (kJ)	6.4	0.3	6.7
Opwarmtijd (min)	10	10	
Vermogen (W)	10.7	0.5	11.2
Heater eff(75%)			15

3.3 Het waterstofopslagsysteem

3.3.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt eerst ingegaan op opslagmethoden voor waterstof in het algemeen, daarna worden de eisen besproken aan het opslagsysteem waarna er uit een aantal alternatieven een keuze wordt gemaakt. Op basis van deze keuze worden in de volgende paragraaf enkele distributiesystemen voorgesteld.

Vervolgens wordt in deze paragraaf de gekozen opslagmethode verder uitgewerkt in een ontwerp mede in relatie met het totale systeem, de combinatie van een brandstofcelsysteem met een wateropslagsysteem, dat wel 'power pack' wordt genoemd.

3.3.2 Keuze opslagmethode

Overzicht opslagmogelijkheden waterstof

Voor het opslaan van waterstof in kleine hoeveelheden, zijn een aantal opties mogelijk:

- in gasvorm onder druk (industriële standaard is 200 barg)
- in vloeibare vorm (-253 °C) onder lage druk in supergeïsoleerde tanks
- in metaalhydride

Naast deze vormen zijn er ook nog een aantal nieuwe opties in voorbereiding zoals in carbon nanofibers. Echter, omdat deze nieuwe opties zich nog in R&D stadium bevinden, worden deze niet in overweging genomen.

Eisen aan opslag

Naast de technische en gebruikseisen die in de vorige paragrafen zijn genoemd, dient de waterstofopslag uiteraard inherent veilig te zijn en moet er rekening mee worden gehouden dat het systeem "idiot proof" is uitgevoerd omdat er vanuit gegaan wordt dat een brede groep consumenten zonder technische achtergrond of inzicht in de veiligheidsaspecten van waterstof van het systeem gebruik moet kunnen maken.

Omdat de waterstof in een brandstofcel gebruikt wordt, is de kwaliteit van de waterstof uiterst belangrijk en raadt Hoek Loos een kwaliteit van 5.0 (99,999 % zuiver) aan.

Alternatieven en keuze opslagmethode

Op basis van de technische eisen valt het opslaan van vloeibare waterstof in de fiets af. De hoeveelheid is gewoonweg te klein om goed koel te kunnen houden. Door het inleken van de omgevingswarmte in de tank waar vloeibare waterstof is opgeslagen, zal de druk snel opbouwen waardoor er waterstof afgeblazen moet worden. Dit kan veilig, maar de tank zal snel leeg zijn.

Hierdoor blijven de opties gasvormige opslag onder druk en opslag in metaalhydride over.

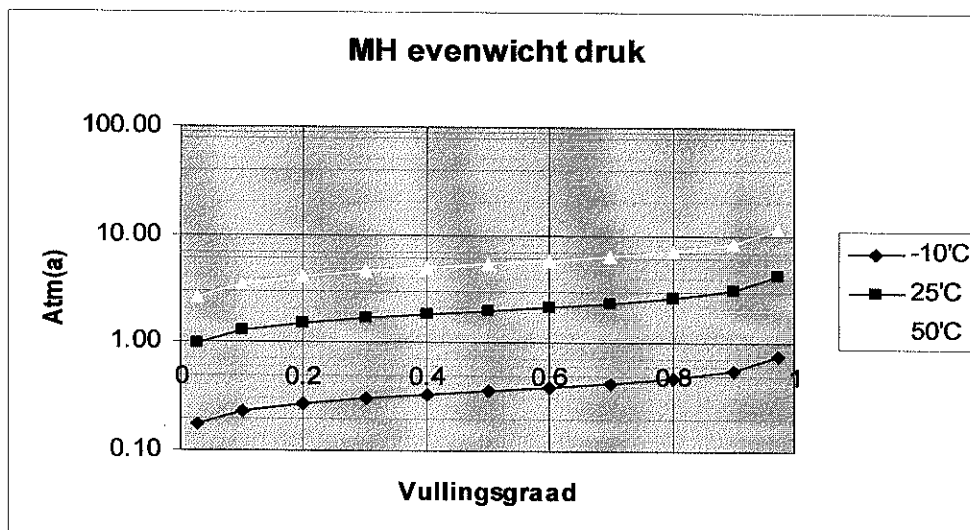
Veiligheidstechnisch valt vervolgens gasvormige opslag onder druk af. Het is niet verantwoord om ongetrainde mensen met een druk van 200 barg te laten werken. Hierdoor blijft alleen de opslag van waterstof in metaalhydride over.

3.3.3 Keuze metaalhydride

Berekeningen aan het Power Pack

De brandstofcel moet gedurende 10 uur een elektrisch vermogen van 100 Watt kunnen leveren. Bij een netto rendement van de stack van 47%, komt dit overeen met 680 NI (normaal liter bij 0 °C en 1 ato) waterstof. Dit zou opgeslagen kunnen worden in een 4 liter drukvat van 200 bar. Een metaalhydride is mooier: een volume van ca 1,3 liter metaalhydride, waarbij de druk slechts enkele bars is. De exacte druk is beïnvloedbaar door ontwerpkeuzes.

Bij een metaalhydride wordt waterstof opgenomen in een metaalrooster. Hierbij komt warmte vrij. De absorptiewarmte is vergelijkbaar met het condensatiewarmte van water: ca 30-40 kJ/mol. Op elk punt in het metaalhydride heerst een thermodynamisch evenwicht tussen geabsorbeerd H_2 en gasvormig H_2 . Figuur 10 toont typische curven voor dit evenwicht. Als het hydride niet bijna leeg of bijna vol is, is er bij benadering een waterstofdruk aanwezig die alleen afhangt van de temperatuur. Bij extreme vullingsgraden (dichtbij nul of dichtbij 1) gaat dit niet meer op.



Noot: Deze curven zijn verschillend voor verschillende hydrides

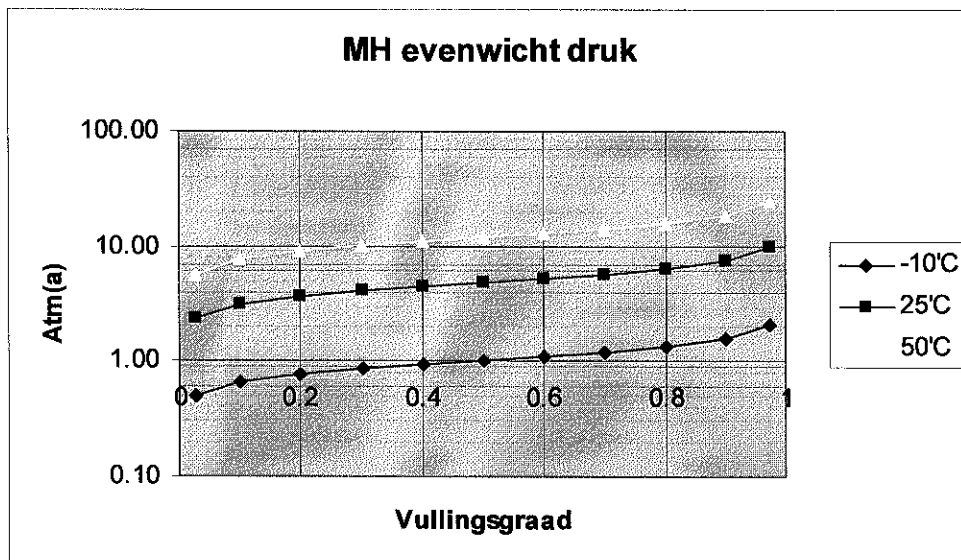
Figuur 10. Gas/Hydride evenwicht curven voor waterstof.

Een vat metaalhydride dat gedurende lange tijd op een constante temperatuur gehouden wordt zonder dat waterstof wordt onttrokken, zal een homogene verdeling van temperatuur, druk en verzadigingsgraad ontwikkelen. Zodra waterstof wordt onttrokken, zal het hydride af gaan koelen. Hierdoor gaat de druk ook dalen. Delen van het hydride die zich dicht bij een warmtebron bevinden, zullen warmte onttrekken aan deze warmtebron. Er ontstaat een profiel van temperatuur en verzadigingsgraad in het vat. De uiteindelijke waterstofdruk wordt bepaald door een samenspel van waterstofafname en warmtetoevoer. Het ontwerp van het opslagsysteem moet zo zijn, dat voldoende warmte kan worden toegevoerd aan het metaalhydride tijdens het onttrekken van waterstof. In sectie 3.3.4 wordt hierop nader ingegaan.

Keuze van het type metaalhydride

Verschillende types metaalhydride hebben verschillende evenwichtcurven. Bij het uitkiezen van een geschikt type zijn temperatuur en druk van belang. Indien bij temperaturen onder 0 °C nog meer dan 1 Atm(a) waterstofdruk nodig is, dan valt de keuze op een lage temperatuur metaalhydride. Een gevolg van deze keuze is dat de druk bij hogere temperaturen relatief hoog is.

De metaalhydride die momenteel de laagste werkingstemperatuur heeft, geeft bij -10 °C en 50% vullingsgraad nog een waterstofdruk van 1 Atm(a). Bij 40 °C is de druk 10 Atm(a), bij 80 graden is de druk 30 Atm(a). Voor de Hyclec toepassing is zo'n lage temperatuur systeem het meest geschikt. Door de kleine afmeting van de tank is de druk van 30 Atm(a) geen probleem voor de veiligheid en de druk bij -10 °C is voldoende om het systeem op te starten. In figuur 11 worden curven weergegeven voor dit type metaalhydride.



Figuur 11. Evenwicht curven voor de gekozen lage temperatuur

Schattingen van enkele systeemp parameters

Hieronder is een model weergegeven waarin een aantal systeemp parameters wordt berekend. De berekeningsgrondslag is als volgt: Uit de energiebalans volgt een hoeveelheid waterstof, die nog afhangt van het rendement. Als bekend is welk type metaalhydride wordt gebruikt, dan kan ook de hoeveelheid metaalhydride berekend worden. Bovendien is dan bekend hoeveel Watt aan absorptiewarmte moet worden toegevoerd. In het model worden ook nog enkele secundaire zaken berekend: Een ruwe schatting van het koelvloeistof debiet, en een aantal energiebalansen van een koude start.

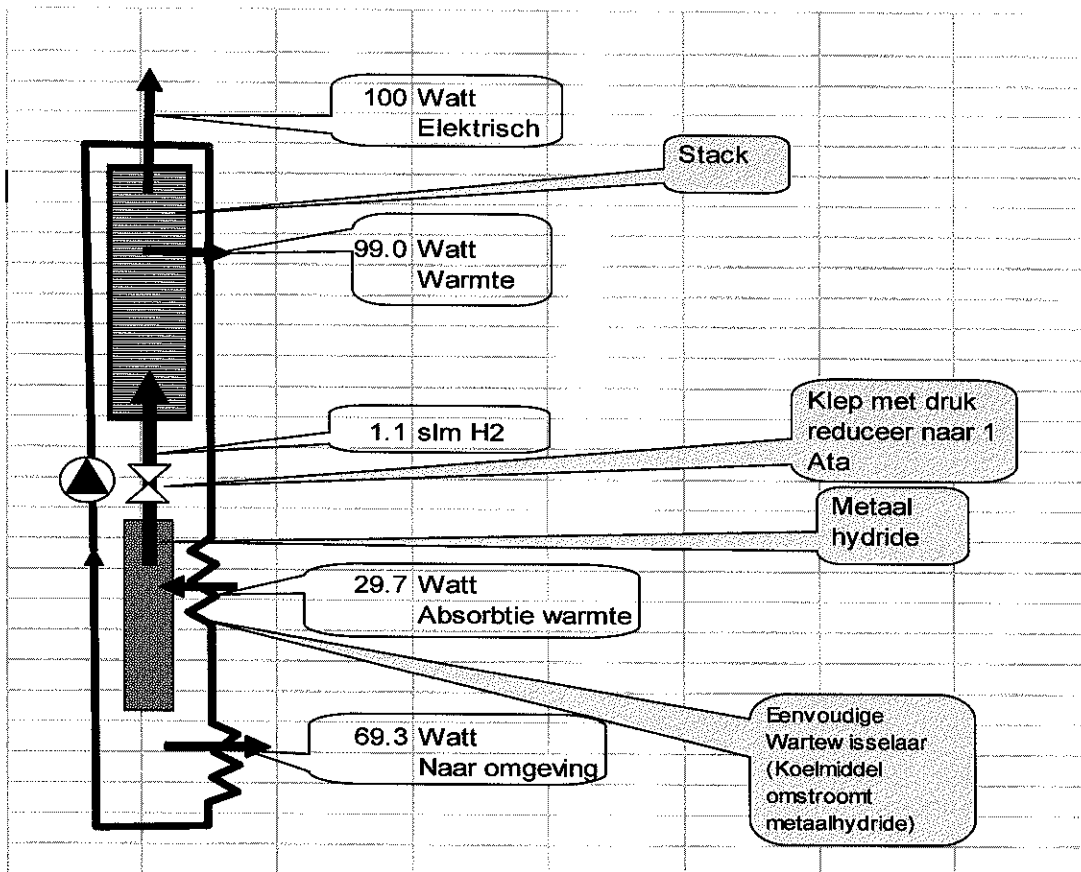
Bij de berekeningen werd eerst nog uitgegaan van vloeistofkoeling. Bij nadere overweging is toch gekozen voor luchtkoeling. Dit betekent voor het hydridevat dat deze al zijn warmte uit de omgeving moet onttrekken. In sectie 3.3.4 wordt hierop nader ingegaan.

Uit de berekeningen komt dat ongeveer 1,3 liter metaalhydride nodig is. Om bij lage temperatuur nog waterstof te kunnen leveren wordt gekozen voor een lage temperatuur metaalhydride. De cartridge dient zodanig te worden ontworpen dat de benodigde absorptiewarmte van 30 W vanuit de omgeving kan worden overgedragen op de metaalhydride.

Figuur 12: Schattingen van systeemparemeters

Hycle Schattingen	
Watt elektrisch	100
Watt parasisair	10,00
Watt stack warmte	99,00
Uur fietsplezier	10
nLiter H2/minuut	1,1
nLiter H2 opslag	685,1
Koeling	
Gewenste dT [K]	1,5
Cp	4,2
liter/min	0,26
MetaalHydride	
Absorbtiewarmte kJ/mol H2	35
nLiter H2/Liter metaal	530
Liter Metaalhydride	1,29
Gewicht [kg]	3,36
Watt absorbtie	29,74
Opwarming	
kg	4
Cp	2
dT [K]	30
Tijd [min]	10
kJ opwarmenergie	240
Watt opwarming	400
Liter H2 (mbv verbranding)	21,9
Liter H2 (mbv absorbtiewarmte)	153,6
kWh (mbv 220V elctr)	0,067

Noot: Bij deze schatting is nog uitgegaan van vloeistofkoeling. Inmiddels is overgestapt op luchtkoeling, waarbij de afgevoerde koeling lucht in eerste instantie niet langs het hydride gevoerd wordt.

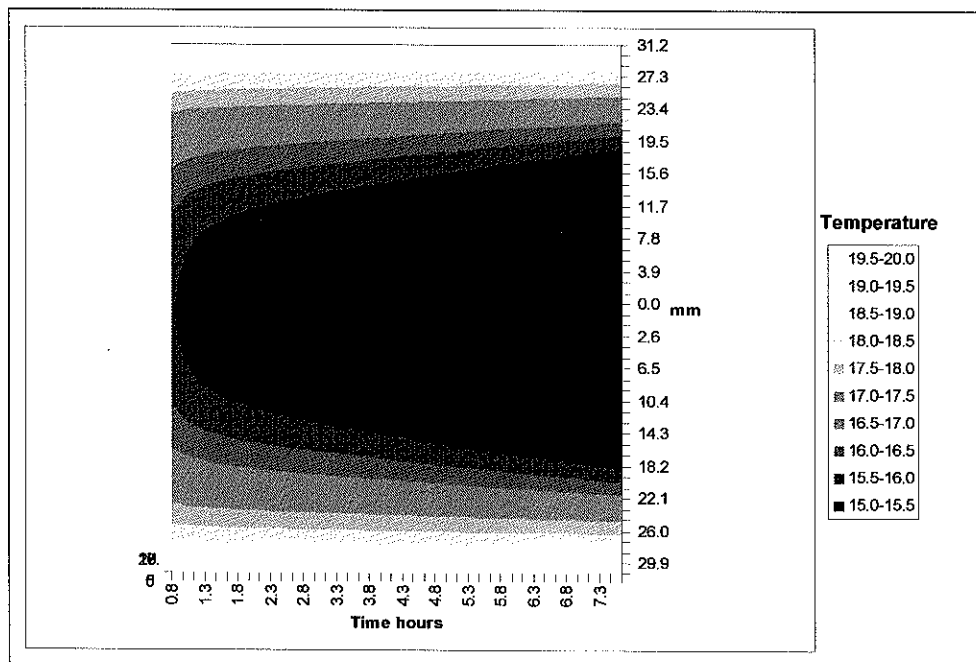


Figuur 13. Systeemoverzicht

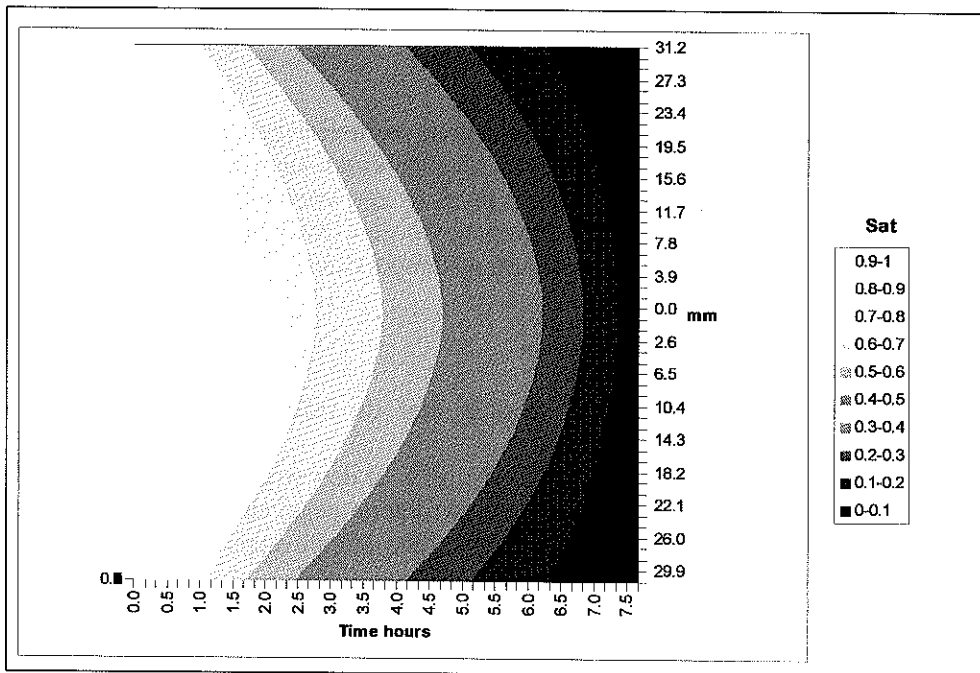
3.3.4 Thermische modellering waterstofopslagsysteem

In het gekozen systeemconcept wordt alle warmte voor de desorptie van H_2 geleverd door warmte uit de omgeving. Om te bekijken hoe dit uitpakt voor een aantal omstandigheden is een model gemaakt van een cilinder van 6.5 cm doorsnede en 40 cm lengte, gevuld met het geselecteerde metaalhydride. (Deze afmetingen zijn slechts indicatief: andere overwegingen kunnen tot andere afmetingen doen besluiten.) Op $t=0$ wordt aangenomen dat het systeem in evenwicht is, bij een vullingsgraad van 90%. Vervolgens wordt een constant debiet H_2 afgenomen, die overeenkomt met 100 W elektrisch vermogen. De wand van het vat wordt aangenomen op omgevingstemperatuur te zijn.

Het model berekent de druk, vullingsgraad en temperatuur als functie van de tijd en positie, rekening houdend met warmtegeleiding en de thermodynamische eigenschappen van het metaalhydride. In figuren 14 en 15 wordt getoond wat het model voor een profielen berekent. Te zien is, zoals te verwachten, dat warmte wordt onttrokken aan het vat, dat via de randen wordt aangevoerd. Hierdoor ontstaat een temperatuurprofiel met de laagste temperaturen in het midden. De laagste verzadigingsgraden vinden we juist aan de randen van het vat.

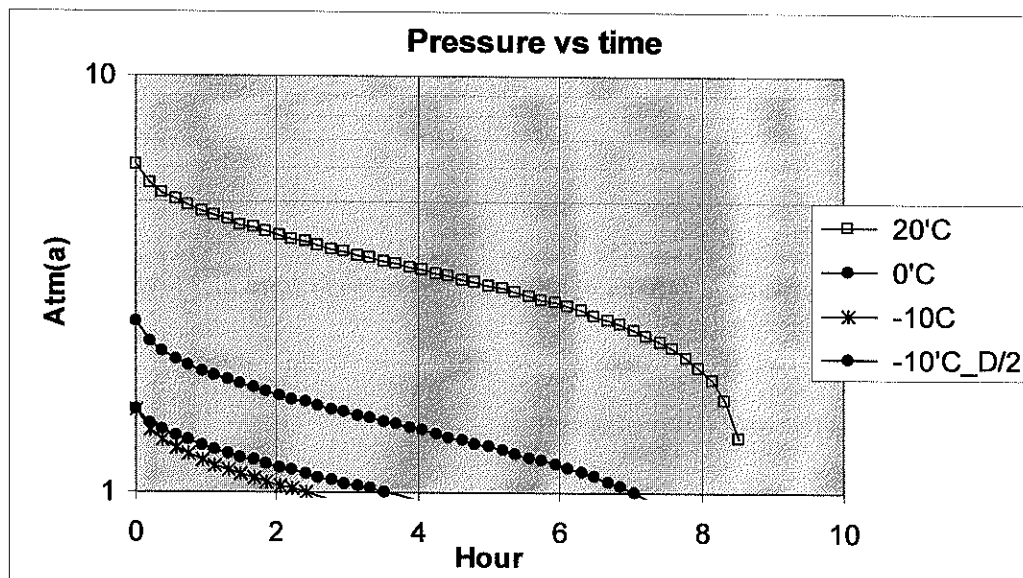


Figuur 14. *Temperatuur/Tijd/Positie plot van een modeluitkomst. Te zien is hoe in de tijd een temperatuurprofiel ontwikkelt. De afstanden zijn mm vanaf de cilinder as.*



Figuur 15. Als figuur 14, maar nu is verzadigingsgraad uitgezet in plaats van temperatuur

Naast temperatuur en verzadigingsgraden, berekent het model ook de druk als functie van de tijd. Resultaten zijn weergegeven in figuur 16.



Figuur 16. Ontlaadcurves als functie van de omgevingstemperatuur

Te zien is dat het systeem het moeilijk krijgt bij lage temperaturen. Bij 0 °C kan men nog ca 6 uur fietsen met een overdruk van 100 mbar. Bij -10 °C blijft er nog maar 2 uur fietsplezier over. Als laatste curve is de druk berekend voor een cilinder met dezelfde inhoud, maar halve diameter. Dit geeft een indicatie voor de te bereiken verbetering door middel van verbeterde warmtewisseling. In de praktijk zal die met bijvoorbeeld interne vinconstructies bereikt worden, de kleinere diameter is slechts een rekentechnisch eenvoudige manier om een indruk te krijgen van het effect van warmteoverdrachtverbeteringen.

Uit figuur 16 blijkt dat door verbeteringen in de warmteoverdracht de bruikbaarheid bij -10 °C verbetert. Dit is aangegeven door de lijn “-10 °C_D/2”. Een nog grotere verbetering zal

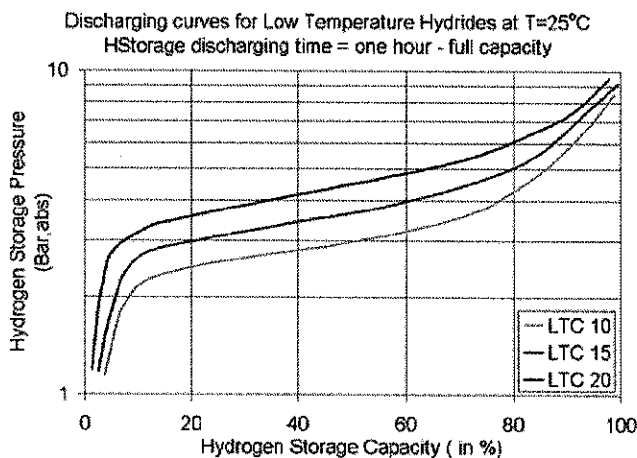
mogelijk zijn door koelwarmte van de stack te gebruiken. Dit kan door de afgevoerde koelwind langs het metaalhydride te leiden.

Hoewel er, zoals hierboven aangegeven, warmtetechnische verbeteringen mogelijk zijn, zou voor een eerste prototype een cilinder als opslagcartridge gebruikt kunnen worden. Het lijkt redelijk dat een eerste prototype niet direct geschikt hoeft te zijn voor extreme temperaturen. Dan moeten er immers vele andere maatregelen genomen worden, zoals het ijsvrij houden van condensafvoer, en afdichtingen die geschikt zijn voor lage temperatuur.

3.3.5 Calculatie laad- en ontlaadprofielen

Gegeven de berekeningen in het voorgaande worden hier de laad- en ontlaadprofielen opgesteld.

Het vat wordt slechts langzaam ontladen. Het ontlaadprofiel is in de vorige paragraaf berekend. Om het vat weer te op te laden (vullen met nieuw H_2), worden de gegevens van de leverancier aangehouden. Met een nog te ontwerpen vulmachine kan een vat in ongeveer 1 uur worden gevuld. Bij het vullen moet warmte worden afgevoerd.



Figuur 17. Laadprofiel zoals door de Hexion opgegeven. Ons hydride staat niet in deze grafiek, maar zal niet wezenlijk anders zijn.

3.4 Het waterstof distributie- en vulsysteem

3.4.1 Waterstof distributiesysteem

Omdat hiervoor de keuze voor een metaalhydride opslag is gemaakt, kan nu een voorstel worden gemaakt voor het distributiesysteem dat als uiteindelijke doel heeft om waterstof met de fiets mee te nemen en in de brandstofcel te verbruiken.

Drie distributiesystemen komen in aanmerking:

1. Vanuit een centrale locatie wordt waterstof in hoge druk pakketten, die ieder goed zijn voor 205 vullingen, naar distributiepunten vervoerd, waar de distributeur (bijvoorbeeld fietsendealer, pompstation o.i.d.) de ontkoppelbare tanks (her)vult en ook losse tanks verkoopt
2. Distributeurs nemen lege tanks in en leveren volle tanks aan de fietser. De tanks worden door de centrale locatie gevuld
3. De fietser vult thuis zelf zijn ontkoppelbare tank bij middels "home refuelling", een elektrolyse apparaat dat uit water en elektriciteit waterstof produceert

De derde optie wordt niet als realistisch gezien, want onpraktisch en te gevaarlijk. Er blijven dan twee opties over: namelijk ontkoppelbare tanks die centraal of op distributiepunten gevuld worden.

Een definitieve keuze daartussen wordt er in dit stadium nog niet gemaakt. Criteria voor een dergelijke evaluatie zijn onder andere: totale aantal benodigde tankjes, capaciteit van het vulsysteem, transportafstand van centraal vulpunt naar distributeurs, veiligheid over de gehele keten, benodigd kennisniveau van eventueel zelf vullende distributeurs en uiteraard kosten.

3.4.2 Waterstofvulsysteem

Een tankstationnetje dat in 2 straten per straat 10 tankjes tegelijkertijd kan vullen is relatief eenvoudig uit te voeren en kost circa € 27.000,-. Een dergelijk station kan dus 20 tankjes tegelijk vullen. Bij een vultijd van 1 uur per tankje en rekening houdende met een beperkte wisseltijd bedraagt de maximum capaciteit circa 200 tankjes per dag.

Uitbreiding van capaciteit door vermenigvuldiging van het concept is makkelijk en goedkoop uit te voeren.

Bijlage 1 toont het ontwerp van dit vulsysteem.

3.5 De systeemintegratie op de fiets

Integratie van de Power Pack op de fiets kent twee aspecten: mechanisch en elektrisch.

De mechanische integratie betreft twee systeemdelen met de volgende afmetingen en gewicht:

Tabel 4: Afmetingen en gewicht systeemdelen

Systeemdeel	Lengte, breedte of diameter (mm)		Hoogte (mm)	Gewicht (kg)
Brandstofcelsysteem	80	40	160	1,2
Waterstofopslagsysteem	65		400	4,5
Besturing en DC/DC converter	120	70	32	1
Totaal			3,21	6,7 kg

Deze integratie lijkt geen onoverkomelijke problemen te geven. Bij een prototype kunnen deze modules bevestigd worden aan een bestaande Ion; voor het demonstratieproject zal een specifieke fiets ontworpen moeten worden, waarin de elementen geïntegreerd worden.

De elektrische integratie betreft vooral de besturing. Voor een prototype kan volstaan worden met een aan-/uitschakelaar; bij kleinseriebouw zal de aansturing geprogrammeerd moeten worden in het besturingssysteem van de fiets.

De vraag kan gesteld worden in hoeverre dit hybride totaalsysteem aantrekkelijker is dan de bestaande batterij. Voor dezelfde range zou een 5x grotere batterij nodig zijn, die dan 16 kg meer zou wegen bij een extra volume van 8 liter. Bovendien is er dan geen sprake van een korte verwisseltijd in plaats van een lange oplaadtijd (verwisselen van batterijpakketten is niet realistisch). Het systeemconcept lijkt dus aantrekkelijk.

Het is denkbaar om voor een tank van halve grootte te kiezen waarvan naar keuze één of twee meegenomen kunnen worden. Dan kan de gebruiker zelf kiezen voor 100 of 200 km range. Deze optie wordt hier verder niet meegenomen, maar zou in de verdere ontwikkeling op zijn merites en effecten beoordeeld moeten worden.

3.6 De economische haalbaarheid

3.6.1 Conceptselectie

Uit de vorige paragrafen komt het gekozen systeemconcept reeds naar voren. Gekozen wordt voor een luchtgekoelde brandstofcel die 100 W nominaal levert, waartoe het bruto vermogen 110 W dient te zijn.

De waterstof wordt geleverd uit een koppelbare metaalhydride tank, die 1,3 l metaalhydride bevat en 680 nL Waterstof kan bevatten. Deze tank bestaat uit een vat met cartridge dat gevuld wordt met metaalhydride.

Voorts is dan een koppeling nodig, de zogenoemde balance of plant componenten (met name twee ventilatoren) en een besturingssysteem.

Tabel 5: De benodigde onderdelen van de Power Pack

Component	Type	Aantal
100 W brandstofcel	ECN	1
Metaalhydridetankje voor waterstof	Hexion	1
Balance of plant componenten	Diversen	2
Omvormer		1
Besturing	PBF 119.987	1

3.6.2 Kostenschatting brandstofcelsysteem

Enkelstuks

In tabel 6 staat een kostenschatting voor de componenten van de stack. De totale materiaalkosten worden geschat op € 300, gebaseerd op huidige prijzen van de materialen en componenten. De maakkosten zijn hoog, gebaseerd op handmatige productie van enkele stuks.

Tabel 6. Kostenschatting van enkele exemplaren van de 100 W brandstofcel

Materiaal	Kosten, €	Arbeid	Kosten, €
Nafion	35	Freeswerk	1400
GDL	40	MEA's maken	800
Katalysator	125	Assemblage	800
Platen	75	Subtotaal arbeid	3000
Pakkingen	15		
Eindplaten	10		
Subtotaal materiaal	300	Totaal	3300

Kleinserie

Bij kleinserieproductie zullen de componentkosten niet drastisch dalen, maar de arbeidskosten wel; bij 100 stuks is iets boven € 1000 per stuk denkbaar. Er is dan een mal nodig van € 20.000 in plaats van het freeswerk. Dan komen de totale kosten op € 1500 per stuk

Seriematig

Voor het bepalen van de mogelijke seriematige kosten van het brandstofcel subsysteem is een kort marktonderzoek uitgevoerd. Bij diverse Europese brandstofcelfabrikanten zijn prijzen opgevraagd. Indien de brandstofcel echter op zodanige wijze wordt ontworpen dat hij naast in de gelimiteerde markt van toepassing in fietsen ook in andere markten kan worden gebruikt, kan worden uitgegaan van een totale productie van enkele tienduizenden stuks per jaar. Kostprijzen zullen in dat geval nog slechts voor een klein deel uit ontwikkelingskosten bestaan. Bij het ontwerp dient dan echter rekening te worden gehouden met een generiek product, dan wel dient een niet optimaal geschikt standaard product te worden gekozen. Op dit moment zijn er nog

geen (standaard) brandstofcellen met een vermogen van 100 W te koop. Daarom is in de financiële analyse uitgegaan van richtprijzen die toekomstige fabrikanten inschatten.

Gebleken is dat een brandstofcel zoals gedefinieerd in dit rapport op termijn, indien zo'n systeem in serie geproduceerd wordt, geleverd kan worden voor circa € 1000 per kWe. Voor het gekozen vermogen van 100 W betekent dit € 100 per stack. Bij deze prijs moet gedacht worden aan seriegroottes van minimaal duizenden brandstofcellen per jaar.

3.6.3 Kostenschatting waterstofopslagsysteem

In Europa bestaat maar enkele fabrikanten van metaalhydridepoeders. Deze maken metaalhydridepoeder voor batterijen. Dit proces bestaat uit zeer grote batches van altijd hetzelfde metaalhydride. Kleine batches van telkens andere metaalhydride-samenstellingen passen niet bij dit soort bedrijven, een enkele positieve uitzondering daargelaten.

Op dit moment worden kleine hoeveelheden legeringen, commercieel aangeboden voor prijzen rond de € 2 per liter watersof opslagcapaciteit. Deze prijs is inclusief de reactor (cartridge) die zorgt voor de aan- en afvoer van warmte uit de legering. Voor het gekozen systeem van 680 normaal Liter betekent dit inclusief aansluitkoppeling en montage-aansluitingen etc. een prijs van € 1600 in een enkelstuks productie voor laboratorium verificatie tests.

In een kleine serie van zo'n 100 stuks zal dit bedrag gereduceerd kunnen worden tot € 1300. Bij het eerste prototype is nog geen keuring van het tankje nodig; bij een kleinserie wel. De geschatte additionele kosten hiervoor bedragen €20.000 oftewel € 200 per stuk, waarmee de totaalprijs voor een veldtestserie op € 1500 per stuk komt.

Op termijn, wanneer massaproductie bereikt wordt, kan deze prijs behoorlijk gereduceerd worden. Analoog aan de situatie bij brandstofcellen, zijn voor een fabrikant van metaalhydride opslagsystemen aantallen van enkele honderden per jaar niet interessant.

Door de ontwikkeling van prijzen van het metaalhydridepoeder in te schatten en voor de overige componenten zoals opslagcontainers actuele prijzen op te vragen bij leveranciers zijn uiteindelijk prijsinschattingen tot stand gekomen. In series van enkele duizenden stuks bedraagt hierbij de prijs rond de € 350 per stuk.

3.6.4 Kosten Balance of Plant en Controls

De kosten van de Balance of Plant zijn op vergelijkbare wijze als in de voorgaande secties tot stand gekomen en bedragen € 200 per systeem in geval van een enkel laboratorium prototype, € 150 bij een productie in kleine series. In grotere aantallen wordt dit beduidend minder, naar onze huidige inschatting ongeveer € 50 per stuk.

Voor de control unit en de omvormer geldt hetzelfde. In enkel stuks bedraagt de prijs hiervan € 2000. In een veldtest serie van 100 stuks komt de prijs op € 1200. Door gebruik te maken van een micro chip besturing kan in serie productie de prijs teruggebracht worden naar € 100 per stuk.

3.6.5 Kostenanalyse Power Pack

De kosten voor de gehele Power Pack bestaat uit de optelsom van de hiervoor beschreven componenten en is weergegeven in de volgende tabel.

In een enkel stuks oplage dient rekening gehouden te worden met een prijs van € 7100. In een oplage van 100 stuks voor een veldtest bedraagt de prijs € 4350. Wanneer het product in series van (tien)duizenden wordt gemaakt, bedraagt de kostprijs voor de Power Pack naar verwachting rond de € 600 per stuk.

Tabel 7: Kostenschattingen Power Pack

Component	Aantal benodigd	Enkelstuks (€)	Kleinserie (€)	Serie (€)
100 W brandstofcel	1	3300	1500	100
Tankje voor waterstof	1	1600	1500	350
Omvormer met besturing	1	2000	1200	100
Balance of plant componenten	1	200	150	50
Totaal		7100	4350	600

3.6.6 Kosten systeemintegratie

De kosten voor systeemintegratie van een prototype zijn verwaarloosbaar, omdat het gebouwde Power Pack niet geïntegreerd wordt maar als losse componenten op eenvoudige wijze op een bestaande Ion gemonteerd kan worden, zoals aangegeven in paragraaf 3.5. Qua montagetijd moeten vier dagen (€ 1600) volstaan.

Voor een veldtest zal onderzoek (technische knelpunten oplossen en systeemintegratie uitvoeren) moeten worden uitgevoerd. Dit is beschreven in paragraaf 3.6.8. De montagetijd voor een serie van 100 stuks zal dan reeds beduidend lager zijn. Wel zal er voldoende getest moeten worden voordat de fietsen in een veldtest worden ingezet. Deze assemblage- en testwerkzaamheden maken deel uit van het beschreven ontwikkelingsproject en worden derhalve niet separaat opgevoerd.

De kosten voor de uitontwikkeling van een seriematig ontwikkelde en gebouwde fiets bestaan vooral uit de specifieke industriële ontwikkelingsaspecten; voor de bouw zijn t.o.v. de bestaande Sparta Ion geen substantiële meerkosten te verwachten.

Als dit meerwerk ingeschat wordt als circa 10 % op de kosten van de Power Pack, dan zal op grond van deze verwachtingen de kostprijs van de Hycycle als kleinserie (demonstratie) uitvoering € 4800 boven de kostprijs van de Ion liggen en in grootserie (commerciële) uitvoering € 660.

3.6.7 Kosten doorontwikkeling

Om tot een kleinserie productie te kunnen komen zal er verificatie en doorontwikkeling van het technische systeem nodig zijn. Het is gebleken dat er toch nog enkele fundamentele onzekerheden zijn die grote invloed kunnen hebben op doorlooptijd en benodigde inspanning van het verkrijgen van prototypes van de Hycycle. Daarnaast zijn er voor het waterstofopslagsysteem enkele alternatieven te overwegen.

Het betreft de volgende fundamentele zaken:

- de invloed van natte en droge bevrozing
- de mogelijkheid om de brandstofcel effectief droog te blazen en de uitvoering daarvan
- de invloed van de 'dead end mode'

Daarnaast is onderzoek nodig voor de optimalisering van de waterstofopslag:

- de invloed van warmteoverdracht van de brandstofcel naar de metaalhydride
- de optimalisering van de tankgrootte aan de fietsafstand, eventueel door modulaire bouw

Voor het volledige technische onderzoek en doorontwikkeling tot en met de kleinserie nodig voor het demonstratieproject worden de volgende kosten geschat:

Tabel 8: Noodzakelijk technisch onderzoek en doorontwikkeling

Aard	Doorlooptijd	Capaciteit	Inspanning (k€) (1 manjaar = € 100.000)	Doel
Onderzoek realiseerbaarheid concept	6 maanden	4 man	200	Creëren van functiemodel op basis van verkrijgbare componenten
Onderzoek fundamentele effecten	6-12 maanden	10 man	750	Betrouwbaar concept
Optimaliseren ontwerp en bouw prototype	6-12 maanden	10 man	750	Uitwerking concept in gebouwd prototype
Opschaling ontwerp voor klein serie	6 maanden	6 man	300	Ontwerp voor kleinserie
Bouwen en testen 100 prototypes voor demo	6 maanden	3 man + 100 x € 6000	750	Gebouwde kleinserie

Totale kosten € 2,75 miljoen.

NB De verdere doorontwikkeling tot een commerciële waterstoffiets is hierin niet opgenomen, omdat die fase buiten de scope en doelstelling van dit project valt.

3.6.8 Kosten gebruik fiets

Het jaarlijks gebruik van een commerciële fiets wordt geschat op gemiddeld 400 uur per jaar bij 200 starts per jaar. Bij een gemiddelde snelheid van 25 km/uur wordt 10.000 km per jaar afgelegd.

Met één tankinhoud kan 200 km worden afgelegd, zodat voor 10.000 km 50 volledige vullingen nodig zijn. Bij een resthoeveelheid van gemiddeld 33% zijn 75 vullingen nodig.

Met het in sectie 3.4.2 beschreven vulsysteem waarmee 20 tankjes tegelijk worden gevuld zijn op basis van productie gedurende 10 uur per dag en 200 dagen per jaar 40.000 volledige vullingen per jaar mogelijk. In de praktijk zal er een resthoeveelheid in de tank achterblijven van naar schatting 33 %; dan zijn 60.000 vullingen per jaar mogelijk.

Bij praktische benutting is deze vulcapaciteit dus goed voor 800 fietsen en zouden de afschrijvings- en rentekosten circa € 0,11 per vulling bedragen. De bijkomende arbeidskosten zullen in de orde van € 0,50 per vulling liggen, terwijl de waterstof zelf circa € 1,35 kost. Eén vulling komt daarmee op € 1,95. En de totale brandstofconsumptie van een fiets op bijna € 150 per jaar.

3.7 Het demonstratieproject

3.7.1 Inleiding

De doelstelling binnen het huidige haalbaarheidsproject is de (concrete) definitie van een omgeving waarin 50 à 100 waterstoffietsen voor publiek gebruik beschikbaar worden gesteld zodat vele mensen met de technologie praktisch kennis kunnen maken.

3.7.2 Eisen

- Afwisselende groep van gebruikers, die de fietsen steeds 1 tot 10 dagen gebruiken, waardoor er op jaarbasis zo'n tienduizend mensen met de waterstoffiets praktijkervaring kunnen opdoen
- Aafgeschermd of tenminste een specifieke omgeving, zodat er toezicht op het gebruik kan zijn, de benodigde infrastructuur gerealiseerd kan worden en de gebruikservaringen desgewenst geregistreerd kunnen worden
- Omgeving waarin het gebruik van voldoende omvang kan zijn, bijvoorbeeld tot 100 km per dag
- Omgeving waarin het gebruik frequent zal plaatshebben
- Omgeving met positieve, bijvoorbeeld natuurlijke, uitstraling

3.7.3 Uitvoeringskarakter

- Voor het demonstratieproject zal een exploitatiemodel gemaakt moeten worden: worden de fietsen verhuurd of gratis ter beschikking gesteld? Hoeveel menskracht is er nodig om de uitgifte en het gebruik te ondersteunen? Op basis van 365 dagen per jaar en 12 uur per dag lokettijd kom je al snel op minimaal 3 personen die dan voor de multifunctionele begeleiding moeten zorgen op één uitgiftepunt.
- Er zal een financieringsbron voor het demonstratieproject gevonden moeten worden. Als een eerste ruwe schatting is het volgende nodig voor een project van 3 jaar:

➤ 100 fietsen à € 6000 per stuk:	600.000,-
➤ Vestigingsruimte van circa 300 m ² à € 150/m ² /jr	135.000,-
➤ 3 Personeelsleden	324.000,-
➤ Onderhoud aan de fietsen € 100 per fiets per jaar	30.000,-
➤ Waterstofvulinstallatie	27.000,-
➤ Waterstof: € 0,50 per gebruiksday per fiets, gem. 200 dagen	10.000,-

➤ Totaal	€ 1.126.000,-
- Er doen zich natuurlijk ook gebruiksvragen voor, zoals:
 - of de fietsen dagelijks geretourneerd moeten worden, of ook voor een langere periode gebruikt mogen/kunnen worden en zit daar dan een maximum aan?
 - of ze ook op de openbare weg gebruikt mogen/kunnen worden?
 - of er dan ook nog andere bijtankadressen zullen zijn?
- Ugaande van 100 fietsen, die 200 dagen per jaar gebruikt worden en gemiddeld 2 dagen per persoon, zouden 10.000 mensen per jaar met de fietsen in aanraking komen.
- In 3 jaar leidt dat tot 60.000 gebruiksdayen, dus bijna € 19 per fiets per day.
- Afhankelijk van de financieringsvorm zou een eigen bijdrage geheven moeten/kunnen worden.
- Er zal een uitvoerder van het project moeten zijn, die de exploitatie voor zijn rekening neemt en de organisatie van het project kan inbedden.

3.7.4 Ontwikkelingstraject

Om na de haalbaarheidsstudie tot een demonstratieproject te kunnen komen zijn conform 3.6.7 de volgende stappen nodig:

1. Onderzoek, bouw en beproeving van een functiemodel
2. Onderzoek van fundamentele en optimaliseringvraagstukken en bouw van een eerste prototype
3. Doorontwikkeling en bouw van een prototypeserie van 100 fietsen
4. Voorbereiding en verkrijging van de infrastructuur
5. Opleiding van de personeelsleden
6. Uitontwikkeling van het exploitatie- en gebruiksmodel, inclusief de gewenste registratie van de gebruikservaringen

3.7.5 Timing

Als stap 1 medio 2005 start zou de start van het demonstratieproject per 1 januari 2008 realiseerbaar moeten kunnen zijn.

3.7.6 Discussie gewenste partner

Uit de eisen en het uitvoeringskarakter van het demonstratieproject blijkt al dat de ideale partner er één zou zijn die een aantal eigenschappen met elkaar verbindt:

- belang hecht aan de uitstraling die een dergelijk project zou hebben
- in de buurt gevestigd is van verscheidene mogelijkheden om een fiets tot 100 km of meer te gebruiken
- de mogelijkheid om het uitvoeringsproject organisatorisch onder te brengen
- gevestigd is op een locatie waar vele mensen komen om te recreëren.

De eerdere gedachte dat het wellicht interessant zou zijn voor een organisatie als het nationaal park De Hoge Veluwe lijkt toch minder waar, omdat het gebruik dan te zeer beperkt blijft tot die locatie, terwijl het ook nog maar de vraag is of de uitvoering van het project daar goed gedragen kan worden.

Mogelijkheden die dan beter geschikt lijken zijn toeristische centra in de buurt van grote natuurgebieden. Bijvoorbeeld voor de gemeente Arnhem zou het zeer positief kunnen zijn: Arnhem wil zich profileren als waterstofstad, ligt in de buurt van vele mogelijkheden voor (langere) fietstochten (Veluwe, Betuwe, de Liemers en De Achterhoek), kan een uitvoeringsorganisatie goed onderbrengen en is al een toeristisch centrum. Een andere goede mogelijkheid zou Texel zijn, dat belang hecht aan een duurzame uitstraling.

3.7.7 Financieringsmogelijkheden

Een uitgebreide analyse van financieringsmogelijkheden valt buiten het kader van dit onderzoek.

4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

4.1 Conclusies

Het blijkt dat aan de doelstellingen van dit onderzoek voldaan kan worden.

Met de huidige stand der techniek is het technisch haalbaar om een demonstratieproject uit te voeren waarin een beperkte vloot van Sparta Ion fietsen uitgerust wordt met brandstofcel-systemen op waterstof.

Het benodigde Power Pack weegt circa 6 kg en bestaat uit enkele systeemdelen van relatief geringe omvang (een doos van 4x7x14 cm en een cilinder van 6,5 cm diameter en een lengte van 40 cm).

Een dergelijk pakket zou meerkosten met zich meebrengen van ongeveer € 3850,- per fiets bij de beoogde seriegrootte van enkele tientallen tot honderd voor een demonstratieproject.

Het blijkt dat de voorgestelde oplossing goed voldoet aan alle gestelde gebruikseisen. Daarbij zijn de volgende opmerkingen te maken:

- 200 km range bij 50 % trapondersteuning wordt gerealiseerd
- Het gewicht komt met 6 kg veel gunstiger uit dan de gestelde grens van 13 kg
- De afmetingen zijn klein genoeg om het huidige uiterlijk van de Ion te kunnen respecteren
- Gebruik onder de - 10 °C is nog niet mogelijk (daartoe zou een verwarmingsvoorziening opgenomen moeten worden)
- De geschatte meerkosten van € 600 per fiets in commerciële uitvoering liggen iets boven de eis van € 500

Een demonstratieproject dat 3 jaar duurt met 100 fietsen kan interessant zijn voor een gemeente als Arnhem. Een uitvoerende organisatie kan de fietsen beheren en onderhouden en de waterstof tankjes vullen met een specifiek gebouwde vulinstallatie die werkt met industriële pakketten van een waterstofleverancier. Een dergelijk project kost ruim € 1 miljoen. Of daarvoor adequate financiering te vinden is, is nog niet onderzocht.

4.2 Aanbevelingen

Ten opzichte van het in dit rapport gekozen technische systeem zijn er zijn nog enkele optimaliseringmogelijkheden en onzekerheden, die nader onderzocht dienen te worden voordat tot serieontwerp gekomen kan worden. Dit betreft:

- de invloed van natte en droge bevroering
- de mogelijkheid effectief droog te blazen en de uitvoering daarvan
- de invloed van de 'dead end mode'
- de invloed van warmteoverdracht van de brandstofcel naar de metaalhydride
- de optimalisering van de tankgrootte aan de fietsafstand, eventueel door modulaire bouw

Voor dit onderzoek en de daaropvolgende doorontwikkeling is een project nodig van € 2 miljoen met een doorlooptijd van 2,5 jaar. De resultaten van dit vervolgonderzoek zijn ook toepasbaar voor andere toepassingen, waarbij de PEM brandstofcel vries/dooi cycli ondergaat en waar een interactie is met een metaalhydride tank. Te denken valt aan powerpacks, en back-up systemen in de lage vermogensklasse.

5. BIJLAGE. VULSYSTEEM

