
RIJSTRATEGIE VOOR SHELL ECO-MARATHON 2012
DE ONTWIKKELING VAN VOERTUIGSIMULATIE

Lester Houtenbos
De Haagse Hogeschool
Werktuigbouwkunde
22 december 2011

RIJSTRATEGIE VOOR SHELL ECO-MARATHON 2012

DE ONTWIKKELING VAN VOERTUIGSIMULATIE



Lester Houtenbos
De Haagse Hogeschool
Werktuigbouwkunde
Delft
ljphoutenbos@gmail.com
50110
22 december 2011

Voorwoord

Dit verslag beschrijft mijn werkzaamheden als afstudeerder werktuigbouwkunde bij de HydroCruisers. Van 29 augustus tot 22 december 2011 ben ik werkzaam geweest bij dit studentenproject dat gevestigd is op de Haagse Hogeschool te Delft.



Figuur 1: De THRIjswijk deed al in 1980 mee met de voorloper van de Shell Eco-marathon.

Graag zou ik de volgende personen willen bedanken voor hun hulp tijdens mijn afstudeerperiode:

Dhr. ir. P. Menger, MoI

Dhr. ing. A.J. Boogert

The HydroCruisers

Mohammed van der Kraats

Ik hoop dat u met het lezen van dit verslag een duidelijke indruk krijgt van de totstandkoming van de voertuigsimulatie en rijstrategie.

Lester Houtenbos

Opdrachtschrijving

De opdracht was om voor The HydroCruisers een dynamisch geïkt model in Simulink op te stellen. In dit model moeten variabele gegevens van de fuel cell, elektromotor en mechanische eigenschappen worden geïntegreerd. Vervolgens moeten verschillende parcoursgegevens, weercondities en rijstrategieën in het model kunnen worden ingevoerd.

Het model dient geïkt te worden. Daartoe wordt een meetprogramma opgesteld. In het meetprogramma wordt bepaald welke gegevens gemeten moeten worden en hoe deze gegevens gemeten zullen worden.

Aan de hand van het meetprogramma worden testritten gereden en meetopstellingen gebouwd waarbij verschillende parameters van het voertuig worden gemeten. Deze testritten worden eerst gebruikt om het model te ijken.

Voor de Shell Eco-marathon 2012 moeten verschillende rijstrategieën worden opgesteld. Deze rijstrategieën hebben als doel de race binnen de vooraf gestelde tijd uit te rijden met een zo laag mogelijk brandstofverbruik.

Wanneer het model geïkt is aan de hand van meetresultaten wordt het model ingezet om de beste rijstrategie te bepalen. Hiermee wordt er een advies gegeven over de rijstrategie van het Shell Eco-marathon parcours van 2012.

Samenvatting

The HydroCruisers is een team van studenten, dat sinds 5 jaar meedoet aan de Shell Eco-marathon, een zuinigheidsrace georganiseerd door Shell. Het doel van the HydroCruisers is om een zeer brandstofefficiënt voertuig te maken en daarmee de Shell Eco-marathon te winnen.

Wat the HydroCruisers de afgelopen wedstrijden heeft gemist is een doordachte en onderbouwde rijstrategie. Om de rijstrategie te onderbouwen is er een hulpmiddel nodig die een score kan aangeven voor een rijstrategie. Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van het hulpmiddel die gebruikt kan worden om een rijstrategie te waarderen.

Het hulpmiddel is een computermodel die het rijgedrag en het energieverbruik van een voertuig simuleert. Om tot dit model te komen moet het voertuig eerst worden geanalyseerd. Er zijn drie analyses gedaan, een procesanalyse, een energiebalans en een circuitanalyse. De procesanalyse analyseert het proces van waterstof tot beweging. De energiebalans analyseert de energiestromen de verschillende processen. Hierbij wordt gekeken naar de energietoevoer en afvoer van de verschillende processen. De circuitanalyse analyseert de verschillende onderdelen in het circuit. Aan de hand van deze analyses kan worden bepaald welke onderdelen gesimuleerd in de voertuigsimulatie

Om het computermodel toepasbaar te maken voor de Innovator 1 moet de voertuigsimulatie worden aangevuld met betrouwbare parameters van de Innovator 1. Voor de benodigde parameters voor de simulatie zijn proeven opgesteld met behulp van testritten en een meetopstelling. De voertuigsimulatie is aangevuld met de resultaten van de proeven en met parameters uit literatuur.

De rijstrategie kan worden bepaald aan de hand van drie factoren. Het circuit, de weersomstandigheden en voertuigefficiëntie. Door het model van de voertuig in de simulatie op deze drie factoren aan te sturen kan er een strategie worden bepaald.

Summary

The HydroCruisers is a student-team that has been participating in the Shell Eco-marathon since 2006. The Shell Eco-marathon is a competition organized by Shell in which participants compete with fuel efficient vehicles to archive the highest possible fuel efficiency.

In the previous races the HydroCruisers was missing a grounded driving strategy. To give a score to a driving strategy a tool is needed. This report describes the development of a tool that can give scores to driving strategies.

The tool is in the form of a vehicle simulation that simulates the driving behavior and the fuel consumption of the vehicle. To come to such a tool, the vehicle and driving course needs to be analyzed. Three different things have been analyzed: Energy equilibrium, the processes and the driving course. Decisions can be made with these analyses about what parts are needed to simulate in the vehicle simulation.

The vehicle simulation must work with parameters from the Innovator one to make the simulation applicable for the Innovator one. Experiments have been formulated to get the necessary parameters. A measuring facility has been made for these experiments. The vehicle simulation uses the parameters attained with the outcome of the experiments and with data from literature.

A driving strategy can be formulated with three factors. The driving course, the weather conditions and vehicle efficiency.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
2	Definities, lijst van afkortingen	7
3	Doelstellingen	8
4	Probleemstellingen	9
5	Onderzoeksvragen	10
6	Analyses	11
6.1	Procesanalyse van het voertuig	11
6.1.1	Waterstoftank; energie opslag	11
6.1.2	Fuel Cell; energie omzetting	12
6.1.3	DC/DC converter en sturing	12
6.1.4	Motor controller	12
6.1.5	Elektromotor, energieomzetting	12
6.1.6	Overbrenging	13
6.2	Energiebalans van het voertuig	14
6.2.1	Fuel Cell	14
6.2.2	Motor controller	15
6.2.3	Elektromotor	16
6.2.4	Overbrenging	17
6.2.5	Weerstanden	17
6.3	Circuitanalyse	19
6.3.1	Optrekken	19
6.3.2	Cruisen	20
6.3.3	Uitrijden	20
6.3.4	Remmen	20
6.4	Model	20
7	Praktijkgegevens	21
7.1	Te bepalen waardes	21
7.1.1	Weerstanden	21

7.1.2	Processen	21
7.2	Testritten	22
7.2.1	Luchtweerstand	23
7.2.2	Rolwrijving	25
7.2.3	Bochtweerstand	25
7.3	Meetopstelling	26
7.3.1	Elektromotor	26
7.3.2	Fuel cell	29
7.4	Verschil analyse van de simulatie	29
7.4.1	Gedrag	29
7.4.2	Resultaten	30
8	Invoergegevens simulatie	31
8.1	Invoerwaardes	31
8.2	Uitvoer	33
9	Rijstrategie	34
9.1	Circuit Rotterdam	34
9.1.1	Gemiddelde snelheid	34
9.1.2	Uitrijden	35
9.1.3	Bochten	35
9.2	Weersomstandigheden	35
9.3	Voertuig	35
9.4	Voorbeelden	35
10	Conclusie	38
11	Aanbevelingen	39
A	Versnelling, snelheid en afstand	41
A.1	Berekeningen	41
A.1.1	Versnelling	41
A.1.2	Snelheid	42
A.1.3	Afstand	42
A.2	Model	42
A.3	Voorbeeld uitvoer	42
B	Luchtweerstand	45
B.1	Berekeningen	45
B.2	Model	46
B.3	Voorbeeld uitvoer	46
C	Rolweerstand	50
C.1	Berekeningen	50
C.2	Model	50

D	Bochtweerstand	52
D.1	Berekeningen	52
D.2	Model	52
D.3	Voorbeeld uitvoer	53
E	Motor controller en elektromotor	55
E.1	Motor controller	55
E.2	Elektromotor	55
E.3	Model	56
E.4	Voorbeeld uitvoer elektromotor en motorcontroller	56
F	Fuel Cell	60
F.1	Waterstoftank	60
F.2	Fuel Cell	60
	F.2.1 Verliezen	60
	F.2.2 Verbruik	61
F.3	Model	62
F.4	Voorbeeld uitvoer	62
G	Kaart Shell Eco-marathon 2012	67
H	Circuit Energiebalans	69

Hoofdstuk 1

Inleiding

Centraal in deze rapportage staat de ontwikkeling van een model dat een optimale strategie voor zuinig rijden van voertuigen kan bepalen. Deze rapportage vormt het afstudeerverslag van Lester Houtenbos. Het is opgesteld als eindstudie voor de Haagse Hogeschool bij the HydroCruisers van 29 augustus tot 22 december 2011. The HydroCruisers is een project dat onder het Expertisecentrum Technology, Innovation and Society (TIS) Delft valt. Het expertisecentrum bevindt zich binnen de Haagse Hogeschool te Delft en wordt gecoördineerd door Peter Menger, hoofd van het Expertisecentrum.

The HydroCruisers is een team van studenten, dat meedoet aan de Shell Eco-marathon. De Shell Eco-marathon is een zuinigheidsrace georganiseerd door Shell. Shell nodigt bij deze marathon studententeams van universiteiten en hogescholen uit om een zo energiezuinig mogelijk voertuig te maken. De wedstrijd is om dit voertuig over een parcours te laten rijden met een laag brandstofverbruik. De winnaar is het team dat met zijn voertuig het parcours heeft afgelegd met het minste brandstofverbruik.

De Haagse Hogeschool toen nog THRIjswijk deed al mee met de toen nog Shell zuinigheidsmarathon in 1980. De eerste keer werd dit op het circuit in Zandvoort georganiseerd. Het team van the HydroCruisers doet sinds 4 jaar mee met de Shell Eco-marathon. Zij doen mee in de Urban concept klasse met als brandstof waterstof.

Vorig jaar heeft het team zich vooral geconcentreerd op het zo zuinig mogelijk te maken van het voertuig. Daarbij is nooit een geteste zuinige rijstrategie tot stand gekomen. Op dit punt kan dus nog veel gewonnen worden. Bovendien bleek tijdens de afgelopen race dat de Innovator one niet reageerde zoals werd verwacht. Dit kwam doordat de kennis ontbrak binnen the HydroCruisers over hoe het voertuig als één systeem werkt.

Er moet kennis worden opgedaan over hoe het voertuig en diens systemen precies functioneren. Met de opgedane kennis wordt een voertuigsimulatie gemaakt, waarin het rijgedrag en verbruik van de Innovator One nauwkeurig en betrouwbaar wordt gesimuleerd. Deze voertuigsimulatie kan rijstrategieën toetsen op verbruik.

Hoofdstuk 2

Definities, lijst van afkortingen

The HydroCruisers	-	Team van studenten van de Haagse Hogeschool
Shell Eco-marathon	-	Zuinigheidsrace georganiseerd door Shell
Innovator one	-	Voertuig waarmee the HydroCruisers deelneemt aan de Shell Eco-marathon
TIS	-	Academy of Technology, Innovation and Society te Delft.
Fuel Cell	-	Systeem waarmee waterstof om wordt gezet in elektriciteit
Simulink	-	Programma voor computersimulatie
Urban concept klasse	-	Klasse van de Shell Eco-marathon waarin the HydroCruisers deelneemt

Hoofdstuk 3

Doelstellingen

Binnen dit project zijn er twee doelen. Voor the HydroCruisers is het doel om bij de Shell Eco-marathon 2012 de eerste plaats te behalen in de urban concept klasse. Om dit te behalen wordt er aan een zuinige rijstrategie gewerkt. Er is nog geen goede methode om een rijstrategie te beoordelen, vandaar dat gewerkt wordt aan een betrouwbare voertuig-simulatie. Deze voertuigsimulatie wordt ingezet als middel om de bedachte rijstrategieën op hun effectiviteit te toetsen.

Tot slot is het voor de afstudeerder het doel om zijn studie aan de Haagse Hogeschool met een nuttig onderzoeksproject af te ronden en daarmee een diploma werktuigbouwkunde te behalen. Hiervoor wordt een afstudeerverslag geschreven, waarna dit wordt gepresenteerd en verdedigd voor een examencommissie.

Hoofdstuk 4

Probleemstellingen

Afgelopen jaren hebben the HydroCruisers bij de Shell Eco-marathon steeds resultaten gehaald die dicht bij elkaar lagen. Er zijn lichte verbeteringen behaald bij mechanische verbeteringen aan het voertuig. Nooit is er een grote slag gemaakt met een goed doordachte rijstrategie. De kennis over hoe het voertuig als één geheel precies werkt is er niet. Vorig jaar bleek hierdoor dat pogingen om verschillende rijstrategieën toe te passen niet het gewenste resultaat hadden. Het voertuig functioneerde niet zoals verwacht. Het vorige team heeft al gewerkt aan een voertuigsimulatie. Deze simulatie is echter onvolledig en er is nooit bewezen dat diens voorspellingen enig verband hebben met de realiteit.

Voor de Shell Eco-marathon 2012 willen the HydroCruisers een slag maken in verbetering van de resultaten met behulp van een doordachte rijstrategie. Een goede rijstrategie maakt gebruik van de sterke en zwakke punten van het voertuig. De precieze werking van de Innovator One en de subsystemen ervan moeten daarom in kaart worden gebracht. Om tot een doordachte rijstrategie te komen, moet een toetsingsmiddel beschikbaar zijn. Dit toetsingsmiddel zal zijn in de vorm van een betrouwbare voertuigsimulatie. Hiervoor moeten betrouwbare gegevens worden verzameld van de verschillende subsystemen en van de Innovator One als geheel. Deze gegevens worden samengevoegd tot één geheel in de voertuigsimulatie. Voordat de simulatie gebruikt wordt om rijstrategieën te toetsen dienen deze eerste geverifieerd te worden. Daarvoor worden de resultaten van voorspellingen van de simulatie vergeleken met resultaten van testritten.

Hoofdstuk 5

Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

- Wat is de beste rijstrategie voor de Shell Eco-marathon 2012?
 - Wat zijn mogelijke rijstrategieën?
 - Welke rijstrategie heeft het laagste brandstofverbruik voor de Shell Eco-marathon 2012 Rotterdam?

Voor de rijstrategie wordt een voertuigsimulatie gebruikt. De onderzoeksvragen gaan over de ontwikkeling van de voertuigsimulatie.

Onderzoeksvragen

- Vraag 1 Welke systemen en subsystemen worden gesimuleerd?
- Vraag 2 Welke gegevens zijn er nodig om een simulatie te maken?
 - Welke input is er nodig voor de simulatie?
 - Welke output moet er door de simulatie worden geleverd?
- Vraag 3 Hoe worden de benodigde gegevens getoetst?
 - Hoe is de gemeten output?
 - Hoe is de gesimuleerde output?

Hoofdstuk 6

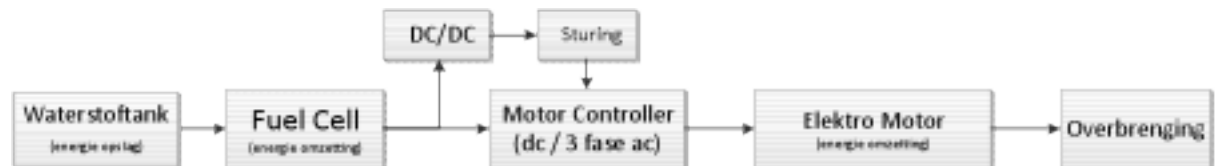
Analyses

De simulatie is een model van het voertuig die gebaseerd is op bewegingswetten van Newton en de eerste hoofdwet van thermodynamica. Het model wordt aangevuld met gegevens van het voertuig verkregen uit metingen. Het model simuleert het dynamische gedrag van het voertuig en geeft een voorspelling van het waterstofverbruik. Om het model niet te complex te laten worden, maar wel nauwkeurig, moeten de onderdelen worden gemoduleerd die de grootste bijdrage hebben in de energiebalans.

In dit hoofdstuk worden analyses gedaan voor de simulatie. Hierbij worden het voertuig, de weerstanden en het circuit geanalyseerd. Op basis van de analyses kunnen er modellen worden gemaakt voor de simulatie.

6.1 Procesanalyse van het voertuig

Voor het omzetten van in het voertuig opgeslagen energie (in de vorm van waterstof) naar beweging en afgelegde afstand zijn verschillende processen gaande. In figuur 6.1 worden de processen in kaart gebracht die zich binnen het voertuig afspelen.



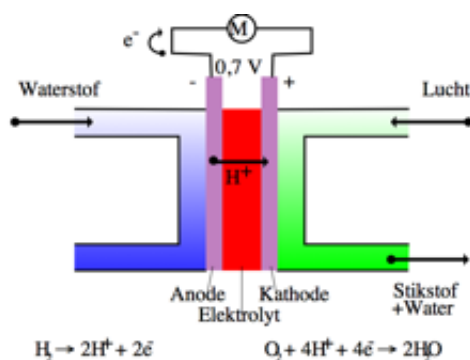
Figuur 6.1: Blokschema van de processen binnen het voertuig

6.1.1 Waterstoftank; energie opslag

De waterstoftank is een 1-liter fles [1] waarin waterstof onder een druk van 200 bar zit. Dit is gelijk aan ongeveer 16 g waterstof en 1950 kJ energie.

6.1.2 Fuel Cell; energie omzetting

De energie uit waterstof wordt via een fuel cell omgezet in elektrische energie. Een fuel cell is een elektrochemisch toestel dat chemische energie van een doorgaande reactie direct omzet in elektrische energie. De chemische energie hoeft dus niet eerst omgezet te worden in thermische energie en mechanische energie, waardoor er nauwelijks verliezen optreden. Daardoor wekt de fuel cell op een hele efficiënte manier energie op. In de cel vindt een redoxreactie plaats. In dit opzicht lijkt een brandstofcel op een batterij of accu, toch is er een belangrijk verschil met een brandstofcel. In een fuel cell kunnen namelijk steeds opnieuw reagentia (waterstof en zuurstof) van buitenaf worden aangevoerd, terwijl de reagentia in een batterij of accu opgeslagen zitten in een gesloten stelsel. [5]



Figuur 6.2: Schematische weergave van de werking van de fuel cell

6.1.3 DC/DC converter en sturing

De fuel cell levert een spanning variërend tussen de 33 en 44 Volt. Voor de sturing moet deze worden omgezet in een spanning van 24 Volt. Dit wordt gedaan door DC/DC converter. De sturing zorgt ervoor dat de motor controller de juiste hoeveelheid stroom geeft aan de elektromotor.

6.1.4 Motor controller

De motor controller zorgt ervoor dat de signalen van de sturing worden verwerkt en dat de elektromotor hier op reageert. Daarnaast zet de motor controller de DC-stroom uit de fuel cell om in een 3-fase AC-stroom.

6.1.5 Elektromotor, energieomzetting

De elektromotor zet elektrische energie om in rotatie energie. De elektromotor bestaat uit een stator en een rotor. De wikkelingen die het elektromagnetisch veld veroorzaken zijn op de stator bevestigd, op de rotor zitten de permanente magneten. Door de juiste wikkelingen op het juiste moment te belasten met een stroom wordt er een koppel gegenereerd.

6.1. PROCESANALYSE VAN HET VOERTUIG



Figuur 6.3: De DIS-2 van motorcontroller uit de Innovator 1

De elektromotor in de Innovator one, zie figuur 6.4 is in samenwerking met Magnetic Innovations ontworpen en gemaakt. De motor is aangepast op de wensen van de Hydro-Cruisers. De elektromotor kan een hoog koppel genereren bij een relatief laag toerental. Hierdoor is er weinig verandering nodig, waarmee energie wordt bespaard.



Figuur 6.4: High torque motor van Magnetic Innovations

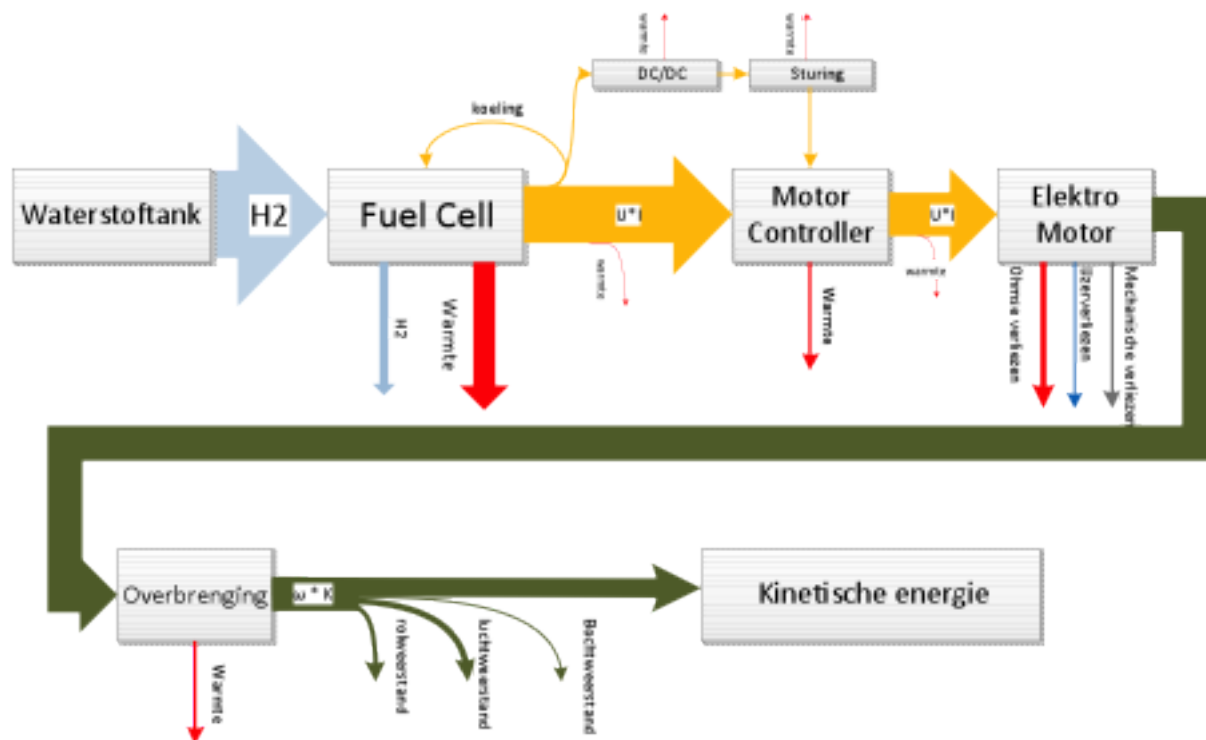
6.1.6 Overbrenging

De overbrenging zorgt ervoor dat het vermogen dat de elektromotor over wordt gebracht naar de wielen. In de overbrenging zit een reductor. Deze vertraagt de omwentelsnelheid met een verhouding van 3:1. Hierdoor wordt het geleverde koppel verhoogt met een verhouding 1:3.

6.1. PROCESANALYSE VAN HET VOERTUIG

6.2 Energiebalans van het voertuig

Om een goed beeld te krijgen van het energieverbruik van het voertuig is het nodig om een energiebalans op te stellen. Hierbij wordt naar de energiestroom van de verbruikte waterstof tot aan het in beweging brengen van het voertuig gekeken. In figuur 6.5 wordt de energiestroom van de waterstoftank tot aan de kinetische energie weergegeven. De dikte van de pijlen geven een indicatie van de hoeveelheid energie.



Figuur 6.5: Een schematische weergave van de energiebalans

In de volgende paragrafen wordt het energieverbruik van de verschillende onderdelen bekeken. Hierbij wordt gekeken naar het energieverbruik van de onderdelen indien een 1 liter tank waterstof leeg wordt gereden. De resultaten zijn verkregen met de voertuigsimulatie.

6.2.1 Fuel Cell

De energietoevoer van de fuel cell bestaat uit waterstof en elektriciteit. De waterstof wordt omgezet in water waarbij een elektrische energie vrijkomt. Het regelsysteem en de koeling van de fuel cell verbruiken een deel van de elektrische energie.

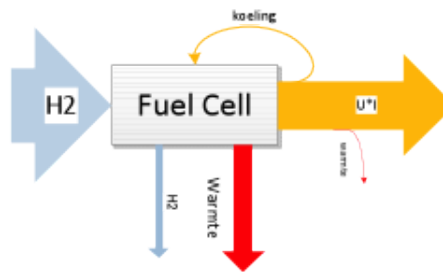
De verliezen binnen de fuel cell zijn op te delen in weerstand verliezen en in verliezen van niet gereageerde waterstof. Weerstandverliezen ontstaan door Ohmse weerstand in de leidingen en stack van de fuel cell en stromingsweerstand van de lucht en waterstof

6.2. ENERGIEBALANS VAN HET VOERTUIG

Tabel 6.1: Overzicht van energieverbruik in het voertuig

IN	[kJ]	UIT	[kJ]	
Waterstof	16g	Verlies fuel cell	723	Zie bijlage F.2
		Verlies motorcontroller	38	Zie bijlage E.1
		Verlies elektromotor	155	Zie bijlage E.2
		Verlies transmissie	42	Zie bijlage B
		Verlies ten gevolge van weerstanden	1008	Zie bijlages B D en C
		Niet gevonden verliezen	[kJ]	
totaal	1950	totaal	1950	

in de leidingen van de fuel cell. Deze verliezen uitten zich in de vorm van warmte.



Figuur 6.6: Energiebalans van de Fuel Cell

Verliezen van niet gereageerde waterstof ontstaan doordat niet alle waterstof die aan de fuel cell wordt toegevoerd reageert met zuurstof. Een deel van deze verliezen komt door het purgen van de fuel cell, het schoonspuiten van de fuel cell met waterstof. Een ander deel komt doordat de uitlaatgassen ongereageerde waterstof bevat.

Tabel 6.2: Overzicht van energiestromen in de fuel cell

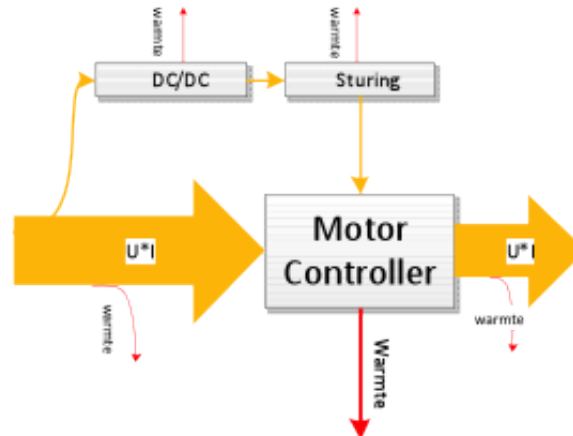
IN	[kJ]	UIT _{nuttig}	[kJ]	UIT _{verlies}	[kJ]
Waterstof	1950	Elektriciteit	1240	Warmte	541
				Onverbruikte waterstof	27
				Secundair systeem	143
totaal	100%	totaal	63%	totaal	37%

6.2.2 Motor controller

De toevoer van de motorcontroller bestaat uit elektrische energie. Een deel van deze energie wordt gebruikt voor het aansturen van de motorcontroller. Deze wordt omgezet in een 24 Volt spanning, waarna het gebruikt wordt voor sturingssignalen. Zie figuur 6.7.

6.2. ENERGIEBALANS VAN HET VOERTUIG

De rest van de elektrische energie wordt omgezet in een 3 fase AC-stroom. Een bijproduct van deze energieomzettingen is warmte.



Figuur 6.7: Energiebalans van de motor controller

Tabel 6.3: Overzicht van energiestromen in de motor controller

IN	[kJ]	UIT _{nuttig}	[kJ]	UIT _{verlies}	[kJ]
Elektriciteit (dc)	1240	Elektriciteit (3 fase ac)	1209	Warmte	31
Sturingsignalen	-				
totaal	100%	totaal	97%	totaal	3%

6.2.3 Elektromotor

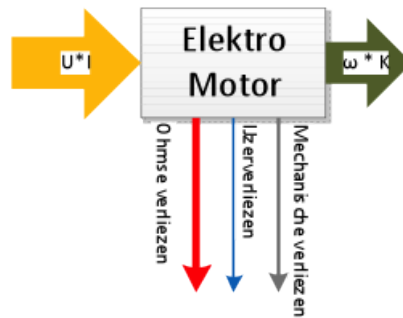
De energie waar de elektromotor op werkt is in de vorm van een 3-fase AC stroom. De elektromotor zet deze elektrische energie om in rotatie energie. Hierbij zijn er verschillende verliezen die ervoor zorgen dat niet alle aangeleverde elektrische energie wordt omgezet in rotatie energie.

Koperverliezen bestaan uit de verliezen die optreden door de stroom die door de spoel van de motorwindingen loopt. De stroom ondervindt een Ohmseweerstand, waarbij energieverlies optreedt.

IJzerverliezen zijn de verliezen die ontstaan door snelle veranderingen in een magnetisch veld.

Mechanische verliezen bestaan uit wrijving- en ventilatieverliezen van de draaiende delen. De verliezen ontstaan vanwege frictie in de motorlagers, tussen rotor en stator en door lucht- verplaatsing.

6.2. ENERGIEBALANS VAN HET VOERTUIG



Figuur 6.8: Energiebalans van de Elektromotor

Tabel 6.4: Overzicht van energiestromen in de elektromotor

IN	[kJ]	UIT _{nuttig}	[kJ]	UIT _{verlies}	[kJ]
Elektriciteit (3 fase ac)	1209	Rotatie energie	1053	IJzerverliezen	40
				Koperverliezen	63
				Mechanische verliezen	53
totaal	100%	totaal	87%	totaal	13%

6.2.4 Overbrenging

De overbrenging zet de rotatie energie om in een rotatie energie met een ander koppel en toerental. Hierbij ontstaat warmte verlies ten gevolg van wrijving.

Tabel 6.5: Overzicht van energiestromen in overbrenging

IN	[kJ]	UIT _{nuttig}	[kJ]	UIT _{verlies}	[kJ]
Rotatie energie	1053	Rotatie energie	1011	Warmte	42
totaal	100%	totaal	96%	totaal	4%

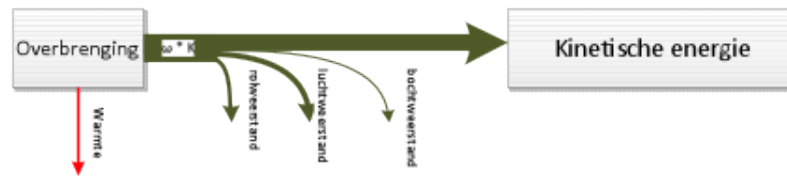
6.2.5 Weerstand

Het voertuig lijdt eveneens energieverlies door de weerstanden die het ondervindt als het rijdt. De voornaamste weerstanden zijn de rolweerstand, luchtweerstand, bochtweerstand en kracht bij een helling. De energie die het voertuig produceert zijn bedoeld om deze weerstanden te overwinnen.

Rolweerstand

De rolweerstand is de weerstand die de banden ondervinden als ze rollen over het wegdek, veelal asfalt. De weerstand wordt voornamelijk veroorzaakt door vervorming van de

6.2. ENERGIEBALANS VAN HET VOERTUIG



Figuur 6.9: Energiebalans de weerstanden en overbrenging

banden en het wegdek. De rolweerstand is afhankelijk van het gewicht van het voertuig, de gravitatie constante en rolweerstandcoëfficiënt.

Voor meting zie paragraaf 7.2.2.

Luchtweerstand

De grootste bijdrager van weerstand is de luchtweerstand. De luchtweerstand is de weerstand die het voertuig ondervindt als het zich door lucht beweegt. De luchtweerstand is afhankelijk van de luchtweerstandcoëfficiënt, dichtheid van lucht, frontale oppervlakte van het voertuig en de snelheid waarmee het voertuig zich ten opzichte van de lucht beweegt.

Voor meting zie paragraaf 7.2.1

Bochtweerstand

De bochtweerstand is de extra weerstand die het voertuig ondervindt door het rijden door een bocht. Deze weerstand komt voort uit de middelpuntvliedende kracht die een extra krachtvector levert op de banden. [7]

Kracht door helling

Doordat het circuit niet altijd vlak is, ondervindt het voertuig een meewerkende en tegenwerkende kracht wanneer het een helling af en op rijdt. De factoren die hierin meespelen zijn de zwaartekracht, de massa en de hoek van de helling. In het totale energiebalans speelt deze niet mee. De energie die in het stijgen wordt gestopt komt terug bij het dalen. Bij het parcours is de finish op de zelfde plek als de start, dus netto is deze energie nul.

Tabel 6.6: Overzicht van verliezen door weerstand

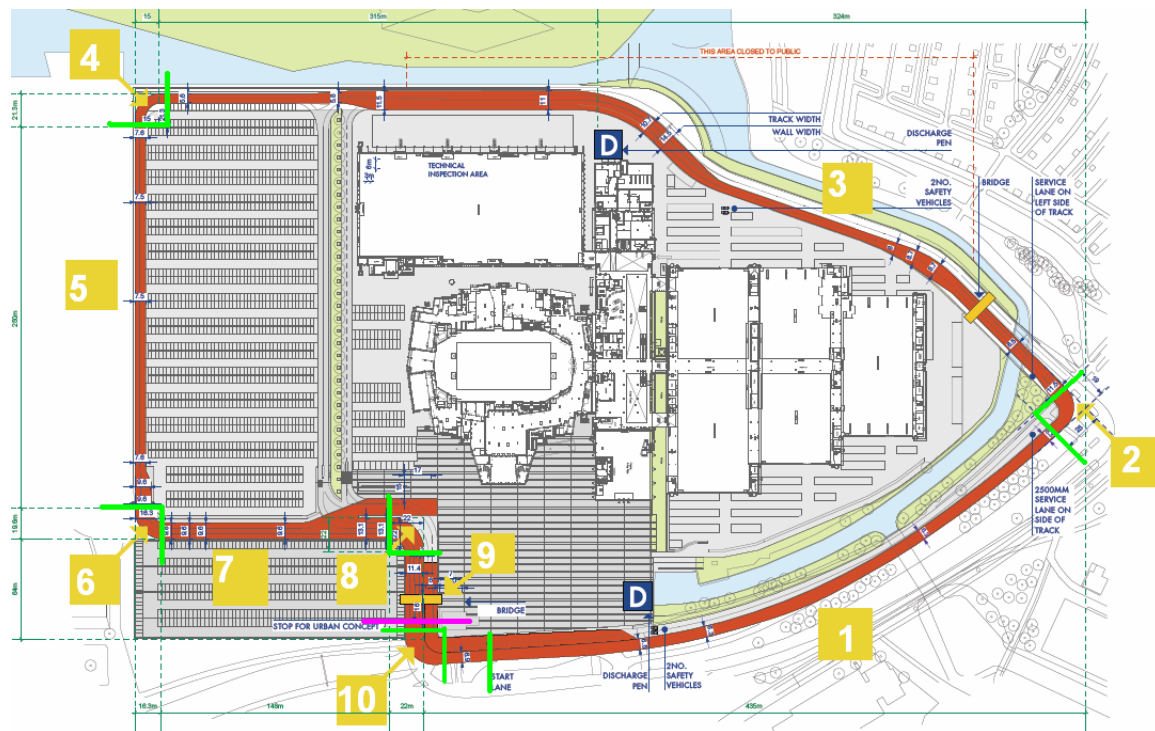
IN	[kJ]	UIT	[kJ]
Rotatie energie	1008	Kinetische energie	0[J]
		Verlies t.g.v. rolweerstand	424
		Verlies t.g.v. luchtweerstand	573
		Verlies t.g.v. bochtweerstand	1
totaal	100%	totaal	100%

6.2. ENERGIEBALANS VAN HET VOERTUIG

6.3 Circuitanalyse

De Shell Eco-marathon 2012 vindt plaats in Rotterdam. Het voertuig zal rijden op een circuit rond Ahoy, zoals te zien is op figuur 6.10.

Het circuit is een korte baan met een lengte van 1,63 km. Voor de race zullen er 10 rondes op dit circuit worden gereden die binnen een tijd van 39 min moeten worden uitgereden [2]. Het circuit bevat een aantal scherpe bochten waarbij rekening moet worden gehouden met de snelheid. Aan het einde van de baan zit een stop, hier moet het voertuig tot stilstand worden gebracht, waarna weer verder wordt gereden.



Figuur 6.10: De baan van de Shell Eco-marathon 2012 voor grote versie zie bijlage G

Voor het model moet het circuit in stukken worden opgedeeld (zie figuur 6.10). Aan elk stuk worden een aantal parameters gekoppeld zoals te zien is in tabel 6.7.

6.3.1 Optrekken

In het begin van de race moet het voertuig optrekken. Hierbij levert de elektromotor vol vermogen en gaat het grootste deel van de energie naar de kinetische energie, het versnellende voertuig. Voor een energiebalans tijdens deze situatie zie figuur H.1 in de bijlage.

Tabel 6.7: Circuit analyse van Shell Eco-marathon 2012 circuit Rotterdam

Nummer	Type	Mogelijke actie	Lengte [m]	Straal [m]	Oriëntatie[°]
1	Start	Optrekken	410	∞	0
2	Bocht	Cruisen	12	16	45
3	Recht	Cruisen	655	∞	135
4	Bocht	Cruisen	16	20	180
5	Recht	Cruisen	250	∞	270
6	Bocht	Cruisen	10	13	270
7	Recht	Uitrijden	151	∞	0
8	Bocht	Uitrijden	12	15	0
9	Stop	Remmen	44	∞	270
10	Bocht	Optrekken	19	21	270

6.3.2 Cruisen

Wanneer het voertuig de snelheid heeft bereikt die nodig is om de race op tijd uit te rijden, blijft het op constante snelheid rijden. Alle toegevoerde energie gaat naar verliezen en weerstanden, de luchtweerstand is de grootste weerstand die het voertuig ondervindt. Voor een energiebalans tijdens deze situatie zie figuur H.2 in de bijlage.

6.3.3 Uitrijden

Wanneer het voertuig moet stoppen is het brandstof economisch meest efficiënt om het voertuig uit te laten rijden, zodat er geen energie verloren gaat aan remmen. Er gaat nog energie naar de motorcontroller en de fuel cell voor koeling en sturing. Voor een energiebalans tijdens deze situatie zie figuur H.3 in de bijlage.

6.3.4 Remmen

Als er te lang wordt uitgereden heeft dit een negatieve invloed op de gemiddelde snelheid, waardoor er in de rest van de race sneller moet worden gereden. Om dit tegen te gaan wordt er uiteindelijk geremd voor de stop.

6.4 Model

Aan de hand van de voorgaande analyses van het voertuig is er een beeld ontstaan van hoe het rijgedrag en het energieverbruik van het voertuig gesimuleerd kan worden. Bij het modelleren is het belangrijk om het model niet te complex te maken, maar wel nauwkeurig. Door de analyses is er inzicht verkregen welke processen gesimuleerd moeten worden en hoe ze gesimuleerd kunnen worden. Zie bijlages voor het simulatie model.

Hoofdstuk 7

Praktijkgegevens

De voertuigsimulatie moet worden gevuld met parameters over het voertuig. Voor een nauwkeurige voertuigsimulatie moeten een aantal parameters vast worden gesteld met betrouwbare data. Dit moet worden gedaan door het systeem door te meten. De parameters met betrekking tot interne verliezen kunnen worden gemeten in een meetopstelling. De overige parameters kunnen worden bepaald door testritten.

7.1 Te bepalen waarden

Niet alle gegevens van het voertuig zijn bekend of nauwkeurig. Door het systeem door te meten kunnen er betrouwbare waarden van de processen worden verzameld. Met testritten kunnen er betrouwbare waarden voor de weerstanden worden verzameld.

7.1.1 Weerstanden

- De rolweerstand is bekend [9] voor de banden. Voor de simulatie is het nodig om bij de rolweerstand ook de weerstanden van de lagers en vrijlooplager toe te voegen. Deze moet nog proefondervindelijk worden bepaald.
- De luchtweerstand is bepaald aan de hand van een schaalmodel van het voertuig in de windtunnel[13]. Of dat de waarden van de windtunnel meting overeenkomen met de werkelijkheid is niet bekend. De luchtweerstand moet dus nog worden bepaald aan de hand van het echt voertuig.
- Over de bochtweerstand is nog niets bekend. Deze moet nog worden bepaald.

7.1.2 Processen

- De toeren-koppelkromme van de elektromotor is niet bekend. Voor de simulatie is het belangrijk dat de toeren koppel kromme bekend is.

- Het rendement van de elektromotor is gegeven door de fabrikant van de elektromotor, Magnetic Innovations. Het blijkt dat gegevens van fabrikanten niet kloppen, dus moeten deze worden nagemeten.
- Het vermogen secundair fuel cell systeem is niet bekend en moet worden bepaald.
- Fuel cell stack spanning is gegeven door MES, de fabrikant van de fuel cell. Dit moet worden gecontroleerd.
- Fuel cell spanning-stroomkromme is gegeven door MES, de fabrikant van de fuel cell. Dit moet worden nagegaan.
- Fuel cell verbruik is gegeven door MES, de fabrikant van de fuel cell. Dit moet worden nagegaan.

7.2 Testritten

De testritten zijn uitgevoerd op de wielervedaan de Spartaan in Rijswijk zie figuur 7.1. Tijdens de testritten is de wind gemeten. De snelheid en tijd is gelogd met een systeem dat aanwezig is in het voertuig. Er is eens in de 5 seconde gelogd vanwege een instellingen van het logsysteem. Voor nauwkeuriger resultaten had eigenlijk vaker gelogd moeten worden.



Figuur 7.1: Locatie van de testritten

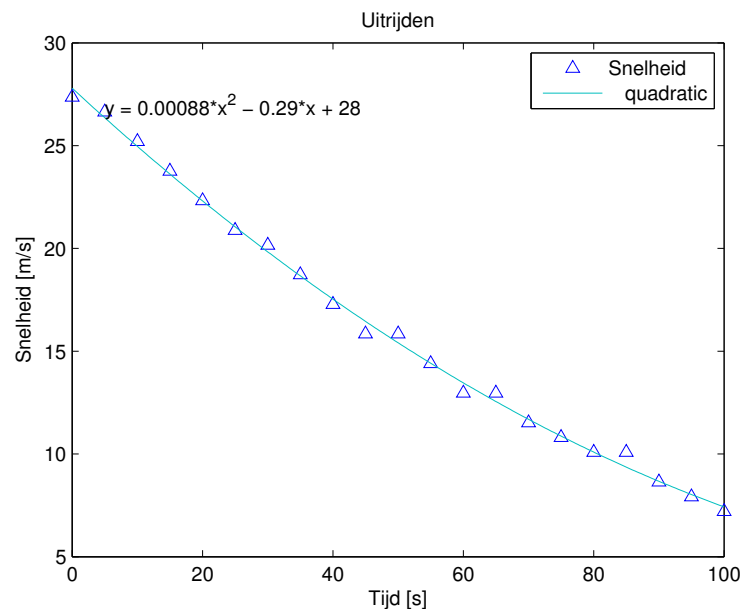
7.2.1 Luchtweerstand

De luchtweerstand kan worden gemeten door met een hoge snelheid het voertuig te laten uitrijden in een rechte lijn. Aan de hand van de vertraging kan de totale weerstand worden afgeleid met de formule $\sum F = m \cdot a$. Bij hoge rijsnelheid is de luchtweerstand de dominante factor in de totale wrijving, de rolwrijving moet ervan worden afgetrokken.

Uitvoering

De proef is uitgevoerd door het voertuig tot 30 km/u te laten optrekken en op een lang recht stuk te laten uitrijden.

Resultaten



Figuur 7.2: Grafiek van het uitrijden

Doordat niet alle meetpunten in één lijn liggen moet er worden gezocht naar een vergelijking die in de trend van de meetpunten ligt. Een methode hiervoor is de kleinste kwadraten methode. Deze methode geeft een tweedegraads polynoom die het best passend is met de meetpunten. De functie $y = 0.00088x^2 - 0.29x + 28$ is passend voor de meetpunten. Hiermee kan de functie van de acceleratie worden bepaald.

Bij het uitrijden kan de volgende formule worden gebruikt.

$$m \cdot a(t) = \alpha \cdot v(t)^2 + F_r \quad (7.1)$$

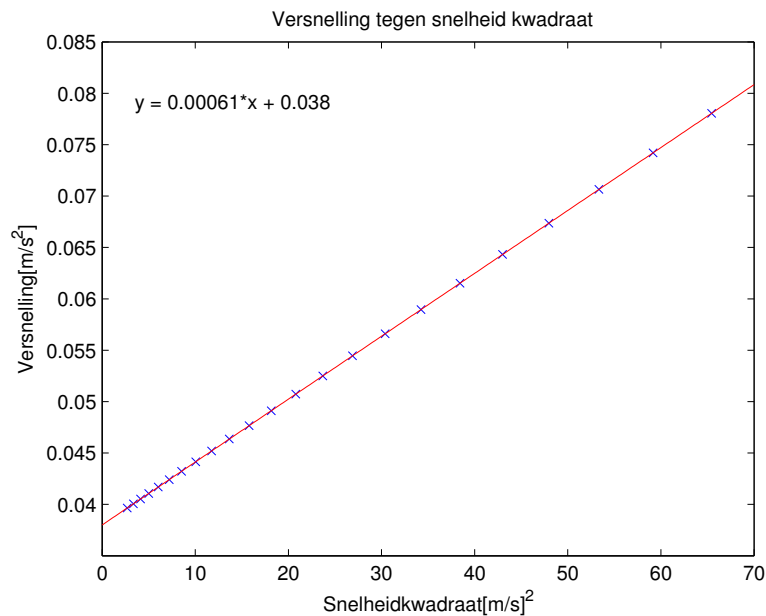
$$a(t) = \frac{\alpha}{m} \cdot v(t)^2 + \frac{F_r}{m} \quad (7.2)$$

met

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \quad (7.3)$$

$$F_r = m \cdot g \cdot \mu_r \quad (7.4)$$

Door de versnelling tegen de snelheid in het kwadraat uit te zetten kunnen α en F_r worden bepaald. Hiermee kunnen de lucht- en rolweerstand worden bepaald.



Figuur 7.3: Grafiek van snelheid in het kwadraat tegen versnelling

De linearisatie geeft de functie $y = -0.0061x - 0.038$. Hiermee kunnen de luchtweerstandcoëfficiënt en rolweerstandcoëfficiënt worden bepaald.

Formule 7.3 en 7.4 geven:

$$c_w = 0.166 \quad (7.5)$$

$$\mu_r = 0.0038 \quad (7.6)$$

7.2. TESTRITTEN

7.2.2 Rolwrijving

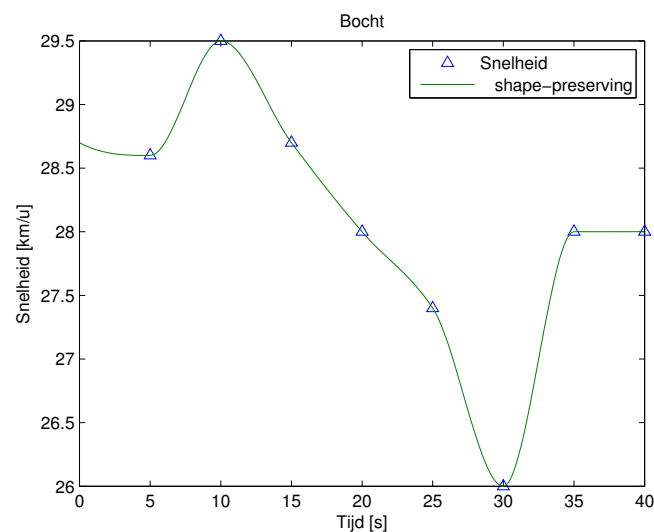
De rolwrijving kan worden bepaald door het voertuig met een lage constante snelheid voort te trekken met een veerunster. Hiermee kan de kracht worden bepaald die nodig is om het voertuig voort te trekken. Doordat er geen acceleratie is, worden alle externe krachten gemeten. Het voertuig moet worden voortgetrokken met lage snelheid zodat luchtweerstand minimaal is. Het voertuig moet in een rechte lijn worden voortgetrokken, zodat er geen bochtweerstand is. Met deze methode wordt niet alleen de rolweerstand gemeten, maar ook weerstanden in de lagers en elektromotor.

Uitvoering

Tijdens de testritten was er geen veerunster beschikbaar. De rolweerstand is nu afgeleid van de uitrolproef.

7.2.3 Bochtweerstand

Bochtweerstandscoefficiënt moet worden bepaald voor de berekening van de bochtweerstand. Dit wordt uitgevoerd met testritten. Door met hoge snelheid door een bocht te rijden zonder aandrijving kan de bochtweerstand worden bepaald aan de hand van de afremming van het voertuig. Hiermee moet wel rekening worden gehouden met de lucht en rolweerstand. De straal en snelheid van het voertuig moeten worden bepaald. Daarnaast moet ook de luchtsnelheid worden gemeten om de luchtweerstand mee te nemen. Een verschilanalyse kan worden toegepast door eerst uit te rijden op een rechte baan om vervolgens een bocht in te sturen.



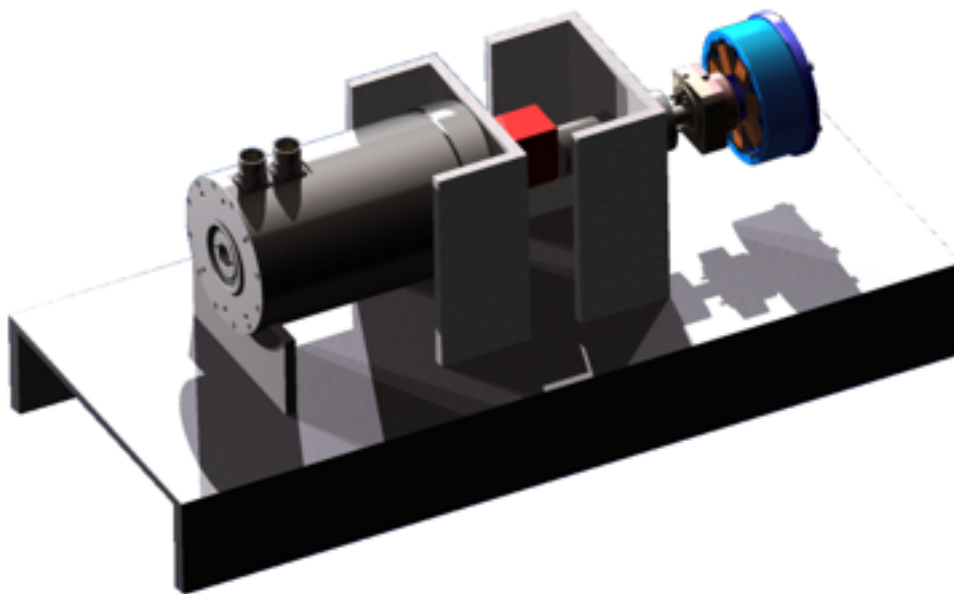
Figuur 7.4: Grafiek van uitrijden in een bocht

Resultaten

De snelheid is eens in de 5 seconde gelogd. Hierdoor zijn de meetpunten in de bochten te schaars om er berekeningen mee te maken.

7.3 Meetopstelling

Er is een meetopstelling ontworpen en gemaakt om metingen uit te voeren met de elektromotor en fuel cell. De meetopstelling is ontworpen met hulp van Guus van Mieghem, teamlid van de HydroCruisers en Mohammed van der Kaats, werknemer van Eriks.



Figuur 7.5: Computerschets van de meetopstelling

De meetopstelling zet de elektromotor in lijn met een koppelmeter (in figuur 7.5 rood) en dynamic load (in figuur zwarte cilinder). De elektromotor wordt aangestuurd door de motorcontroller die uit het voertuig komt en kan worden gevoed door de fuel cell of door een regelbare voeding. De dynamic load verzorgt een regelbare tegenkoppel. Daarnaast meet de dynamic load het toerental, koppel en geleverd vermogen.

7.3.1 Elektromotor

De simulatie heeft twee eigenschappen van de elektromotor nodig:

- De koppel-toerenkromme. Deze kromme geeft het maximum koppel als functie van het toerental weer.

- Het rendement, deze is afhankelijk van het toerental en van het koppel.

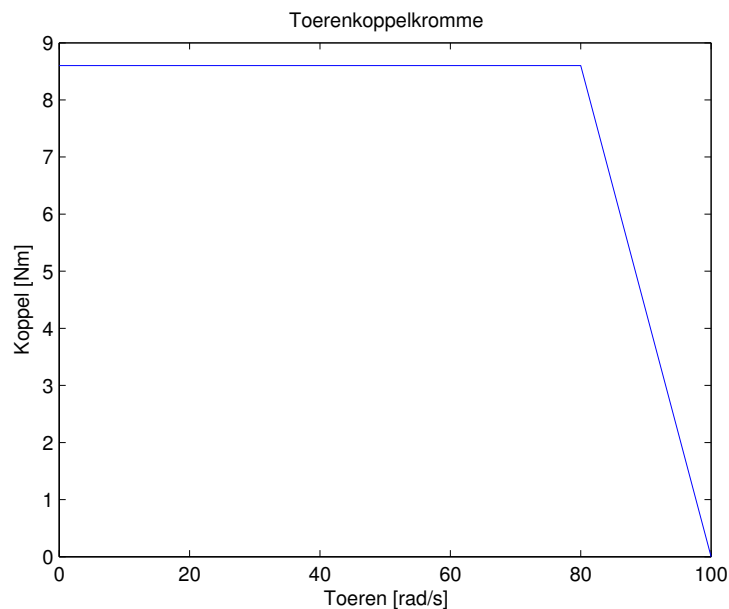
Koppel-toerenkromme meting

De elektromotor wordt op een bepaald toerental gezet. Met de dynamic load wordt het tegenkoppel opgevoerd. Dit wordt gedaan tot het toerental inzakt. Het moment voordat het toerental inzakt wordt het koppel genoteerd. Deze meting wordt gedaan bij toerentallen van 10 rad/s tot 100 rad/s met een interval van 10 rad/s.

Tabel 7.1: Invoertabel voor meting toeren koppelkromme

Toerental (<i>rad/s</i>)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Koppel (Nm)										

Het verwachte resultaat zal een kromme zijn die de vorm heeft zoals in figuur 7.6



Figuur 7.6: Koppel-toerenkromme van de elektromotor

Rendement meting

Het rendement van de elektromotor is het geleverde vermogen gedeeld door het aangevoerde vermogen. Het rendement kan worden bepaald door het toerental, koppel, spanning en stroom te meten. Met deze waarden is het elektrisch vermogen en het mechanisch

7.3. MEETOPSTELLING

vermogen te bepalen. Zie formules 7.7 en 7.9.

$$\eta_{em} = \frac{P_{mechanisch}}{P_{elektrisch}} \quad (7.7)$$

met

$$P_{mechanisch} = \omega_{rotor} \cdot K_{rotor} \quad (7.8)$$

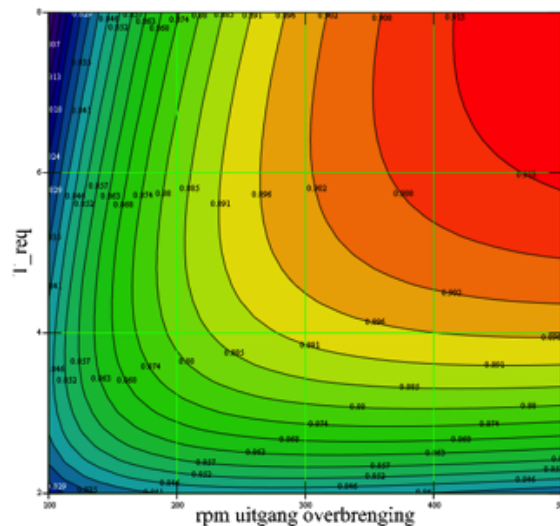
$$P_{elektrisch} = U_{em} \cdot I_{em} \quad (7.9)$$

Het rendement is afhankelijk van het toerental en koppel, de meting moet bij verschillende snelheden en lasten worden uitgevoerd. Deze meting wordt gedaan bij toerentallen van 10 rad/s tot 100 rad/s met een interval van 10 rad/s en met een koppel van 0 tot vol, geschat op 8.7Nm, met een interval van 1 Nm. Tijdens deze meting moet de temperatuur van de spoelen van de elektromotor constant zijn. Deze beïnvloedt het rendement.

Tabel 7.2: Invultabel voor rendement meting bij vast toerental

Koppel (Nm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Spanning (V)										
Stroom (V)										

Er zal een resultaat zoals in figuur 7.7 worden verwacht.



Figuur 7.7: Rendement bepaald door computersimulatie van Magnetic Innovations [8]

7.3. MEETOPSTELLING

7.3.2 Fuel cell

Voor de simulatie zijn drie eigenschappen van de fuel cell nodig. De spanning-stroomkromme, stroom-waterstofverbruikkromme en energiebehoefte van het secundair fuel cell systeem. Deze eigenschappen zijn afhankelijk van het geleverde vermogen. Tijdens de meting levert de fuel cell een vermogen aan de meetopstelling. Hierbij moeten de spanning, stroom, waterstofverbruik en het vermogen van secundair fuel cell systeem worden genoteerd. Deze meting moet worden herhaald van 0 tot 300 Watt met een interval van 30 Watt.

Tabel 7.3: Invultabel voor meting fuel cell

Geleverd vermogen (W)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Spanning (V)											
Stroom (I)											
H ₂ verbruik (nl/s)											
Vermogen secundair (W)											

7.4 Verschil analyse van de simulatie

Voordat de simulatie gebruikt kan worden om strategieën te toetsen moet het eerst worden geijkt. Dit kan worden gedaan door resultaten van de simulatie te vergelijken met meetresultaten van de werkelijkheid. Bij de Shell Eco-marathon 2011 in Lausitz is een meting gedaan tijdens een testrit. De simulatie kan aan de hand van Lausitz meetgegevens worden getoetst.

7.4.1 Gedrag

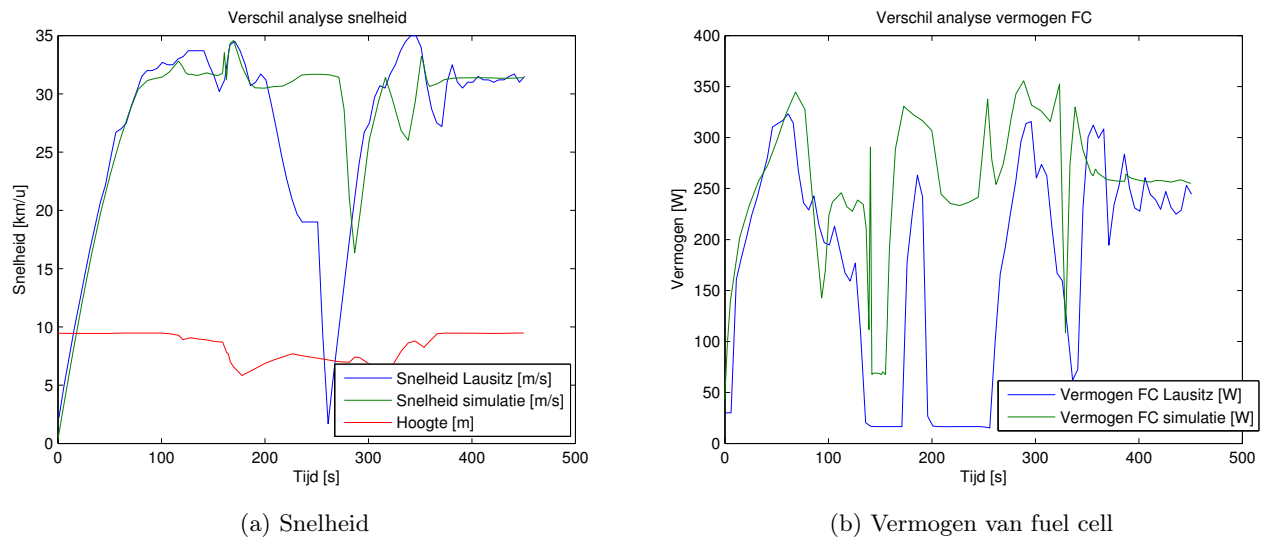
In figuur 7.8 zijn overeenkomsten en verschillen tussen gemeten waardes en gesimuleerde waardes te zien.

De vermogen grafieken zijn moeilijk met elkaar te vergelijken. De aansturing van het voertuig in de simulatie komt niet overeen met de aansturing tijdens de race in Lausitz. Dit komt doordat geen gegevens beschikbaar zijn over de aansturing van het voertuig tijdens de race in Lausitz. Toch zijn er gegevens uit figuur 7.8b op te maken.

De eerste 200 seconde hebben de meting en simulatie grotendeels het zelfde gedrag. Het maximum vermogen van de fuel cell uit de simulatie ligt hoger dan die van de gemeten fuel cell uit Lausitz. Dit is te verklaren, doordat de gegevens van de fuel cell fabrikant, waarop het simulatie model is gebaseerd, niet overeenkomen met de werkelijkheid.

Van 200 seconde tot 300 seconde liggen de waardes van de meting en simulatie erg uiteen. Dit komt omdat tijdens de race er toen een stop was. De stop zit niet in de simulatie. Hierdoor rijdt het voertuig in de simulatie door en tijdens de race wordt het toegevoerde vermogen gestopt.

7.4. VERSCHIL ANALYSE VAN DE SIMULATIE



Figuur 7.8: Meetgegevens uit Lausitz vergeleken met uitvoergegevens van de simulatie

Na 300 seconde vertonen de simulatie en de meting weer het zelfde gedrag.

De snelheidsgrafieken in figuur 7.8a zijn goed met elkaar te vergelijken. De snelheidsgrafieken kunnen net als de vermogengrafieken in drie delen worden gesplitst. Het eerste gedeelte tot 200 seconde is duidelijk te zien dat de versnelling van het voertuig in de simulatie gelijk is aan die van Lausitz. De maximale snelheid in de simulatie lijkt iets lager te liggen dan die in Lausitz. Van 200 seconde tot 300 seconde verschilt de snelheid van de meting en simulatie erg. Dit komt doordat de aansturing verschilt, dat ook duidelijk te zien is in figuur 7.8b. Na 300 seconde is het gedrag iets versprongen doordat het voertuig in de simulatie niet gestopt is. Hierdoor heeft het een voorsprong en rijdt eerder over de heuvels dan tijdens de meting.

7.4.2 Resultaten

In mei 2011 heeft the HydroCruisers in Lausitz een score gehaald van 104 km/kWh . De zelfde rondes zijn ingevoerd in de voertuig simulatie zonder stop en zonder weergegevens. In de simulatie behaalt het voertuig een score van 109 km/kWh .

De simulatie score komt dichtbij de score die in Lausitz is behaald. Door factoren zoals wind en aansturing is het niet mogelijk op precies de zelfde situatie te simuleren. Wel kan er met deze scores worden vastgesteld dat de simulatie een score levert in de zelfde orde van grote als de meting.

7.4. VERSCHIL ANALYSE VAN DE SIMULATIE

Hoofdstuk 8

Invoergegevens simulatie

De voertuigsimulatie moet worden aangevuld met parameters van de Innovator 1. Voor een nauwkeurige simulatie moeten de parameters zo betrouwbaar mogelijk zijn. In de gevallen dat de parameters niet gemeten zijn, zijn de waardes van parameters uit andere bronnen gehaald. In tabellen 8.1, 8.2 en 8.2 worden de gebruikte waardes voor de voertuigsimulatie weergegeven.

8.1 Invoerwaardes

Tabel 8.1: Overzicht van invoerwaardes van de simulatie

Symbool	Beschrijving	Waarde	eenheid	Bron
Natuurkundig				
g	Gravitatie constante	9,8	m/s^2	[6]
ρ	Soortelijke massa lucht	1,29	kg/m^3	[6]
LHV_{h2}	LHV-waarde waterstof	1,25	MJ/kg	[6]
Voertuig				
m_o	Massa voertuig onbeladen	70	kg	[12]
m_s	Massa driver	70	kg	[1]
A	Frontaal oppervlak	0,794	m^2	[12]
c_w	Cw waarde voertuig	0,166	—	§7.2.1
d_w	Wieldiameter	0,558	m	[12]
μ_r	Weerstandscoefficient	0,0038	—	§7.2.2
$wiel$	Aantal wielen	4	$wielen$	Gemeten
V_{h2tank}	Inhoud waterstoftank	0,0001	m^3	[1]
Fuel Cell				
Cel	Aantal cellen in stack	45	$cellen$	[4]
C_v	Cell voltage	0.9	V	[4]

Tabel 8.2: Vervolg van overzicht van invoerwaardes van de simulatie

Symbool	Beschrijving	Waarde	eenheid	Bron
Fuel Cell				
P_{sfc}	Vermogen secundair systeem	16	W	[4]
I_{fc}	Stroom-spanningkurve		—	[4]
P_{fc}	Vermogen-verbruikkurve		—	[4]
Motorcontroller				
η_{mc}	Motorcontroller rendement	0.97	%	[11]
P_{mc}	Motorcontroller verbruik	0.24	W	[11]
Elektromotor				
K_{lim}	Koppel-toerenkromme		—	§7.3.1
η_{em}	Elektromotor rendement		%	[8]
$C_{I/K}$	Koppel stroom constante	3	A/Nm	[8]
Overbrenging				
η_{ob}	Overbrenging rendement	0.96	%	[12]
$Ratio_{ob}$	Overbrenging ratio	3 : 1	—	[12]
Strategie				
$s_{circuit}$	Lengte van het circuit	1630	m	[2]
t_{race}	Tijd beschikbaar voor race	39	min	[2]
R_{race}	Aantal rondes de voor de race worden gereden	10	$rondes$	[2]
v_{wind}	Windsnelheid		m/s	
α_{wind}	Windrichting		°	

8.1. INVOERWAARDES

8.2 Uitvoer

Tabel 8.3: Overzicht van uitvoergegevens van de simulatie

Symbool	Beschrijving	Eenheid
Score		
$Score$	Score voor rijstrategie	km/kWh
$t_{gereden}$	Totaal gereden tijd	min
R	Rondes gereden	$rondes$
Verbruik		
E_{race}	Totaal verbruik race	kWh
E_{fc}	Energie verbruikt door fuel cell	kJ
E_{em}	Energie verbruikt door elektromotor	kJ
E_{mc}	Energie verbruikt door motorcontroller	kJ
E_{ob}	Energie verbruikt door overbrenging	kJ
E_{lw}	Energie verbruikt voor overwinning luchtweerstand	kJ
E_{bw}	Energie verbruikt voor overwinning bochtweerstand	kJ
E_{rw}	Energie verbruikt voor overwinning rolweerstand	kJ
E_{lw}	Energie verbruikt voor overwinning luchtweerstand	kJ

Hoofdstuk 9

Rijstrategie

Het doel van een goede rijstrategie voor de Shell Eco-marathon is om met zo weinig mogelijk brandstof een bepaalde afstand binnen een voorgeschreven tijd af te leggen. De score van de rijstrategie wordt uitgedrukt in km/kWh.

De belangrijkste factoren waarmee rekening moet worden gehouden voor een rijstrategie zijn: het circuit, de weersomstandigheden en de eigenschappen van het voertuig.

9.1 Circuit Rotterdam

Bij het circuit voor de Shell Eco-marathon in Rotterdam valt op dat de baan relatief kort is. Er worden 10 rondes gereden van 16.3 km binnen een tijd van 39 min. Bij iedere ronde moet er gestopt worden en vervolgens moet het voertuig weer op snelheid komen. De baan bevat een aantal scherpe bochten waarmee rekening moet worden gehouden.

9.1.1 Gemiddelde snelheid

Doordat de luchtweerstand kwadratisch hoger wordt met de rijsnelheid, is het belangrijk dat er zo langzaam mogelijk gereden wordt. De gemiddelde snelheid van het voertuig moet echter hoog genoeg zijn om binnen de voorgeschreven tijd de rondes uit te rijden. Deze gemiddelde snelheid is te bepalen aan de hand van de totale afstand van de race en de voorgeschreven tijd.

$$v_{gem} = \frac{s_{circuit} \cdot R_{race}}{t_{race}} \quad (9.1)$$

Waarin :

v_{gem}	Benodigde gemiddelde snelheid		[km/u]
$s_{circuit}$	Lengte circuit	16.3	km
R_{race}	Aantal rondes voor de race	10	rondes
t_{race}	Voorgeschreven tijd voor de race	0.65	u

Formule 9.1 ingevuld geeft:

$$v_{gem} = \frac{1.63 \cdot 10}{0.65} \quad (9.2)$$

$$= 25.4 km/u \quad (9.3)$$

9.1.2 Uitrijden

Het voertuig moet iedere ronde tot stilstand komen. Hierbij moet goed worden gekeken naar wanneer het voertuig begint met uitrijden, omdat wanneer het voertuig met hoge snelheid bij de stop aankomt moet er worden geremd. Remmen is energieverlies. Wanneer het voertuig zich volledig laat uitrijden gaat de gemiddelde snelheid omlaag en moet het de rest van de baan harder rijden dat resulteert in meer luchtweerstand.

Er moet worden gezocht naar een ideale middenweg tussen volledig uitrijden en niet uitrijden en stoppen.

9.1.3 Bochten

Het circuit bevat een aantal scherpe bochten. De snelheid en de manier waarmee de bocht wordt genomen heeft betrekking op de rijstrategie. Er is nog te weinig bekend over de bochtweerstand om hier verder op in te gaan.

9.2 Weersomstandigheden

Voor de rijstrategie moeten de weersomstandigheden worden meegenomen. De wind speelt een belangrijke rol in de luchtweerstand. Door met tegenwind langzamer te rijden en met meewind sneller te rijden kan er energie worden bespaard.

9.3 Voertuig

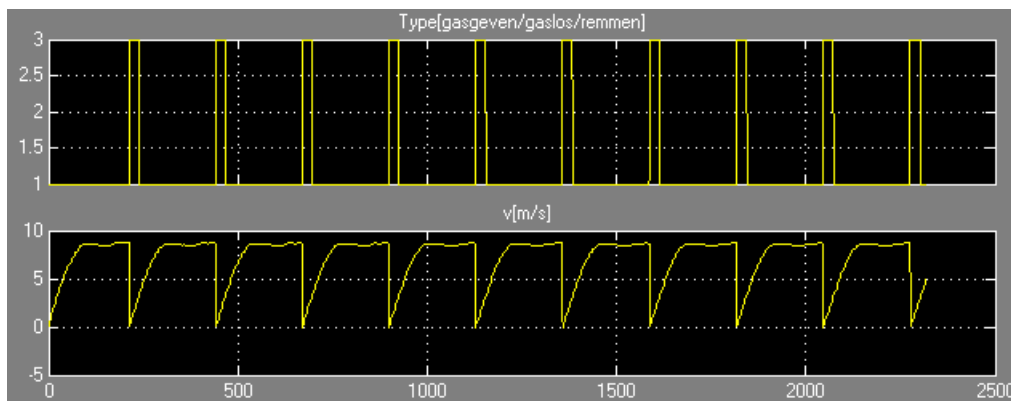
De elektromotor en de fuel cell in het voertuig hebben een efficiëntiekromme. Hiermee moet rekening worden gehouden met de rijstrategie. De elektromotor is het minst efficiënt bij lage rotatiesnelheden. Het voertuig moet dus zo snel mogelijk optrekken, zodat er niet lang wordt gereden met lage snelheid.

9.4 Voorbeelden

Ter illustratie worden drie voorbeelden van rijstrategieën getest. De strategieën in dit voorbeeld hebben betrekking tot het uitrijden tot de stop.

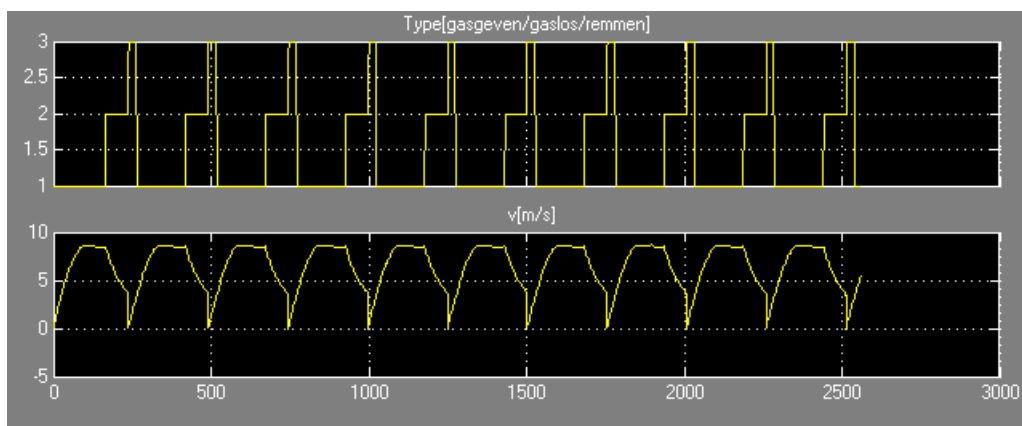
- Niet uitrijden, in deze strategie wordt er voor de stop niet uitgereden. Tot aan de stop wordt er gereden op de gewenste gemiddelde snelheid. Bij de stop wordt geremd, waarna het voertuig weer verder door rijdt.

9.2. WEERSOMSTANDIGHEDEN



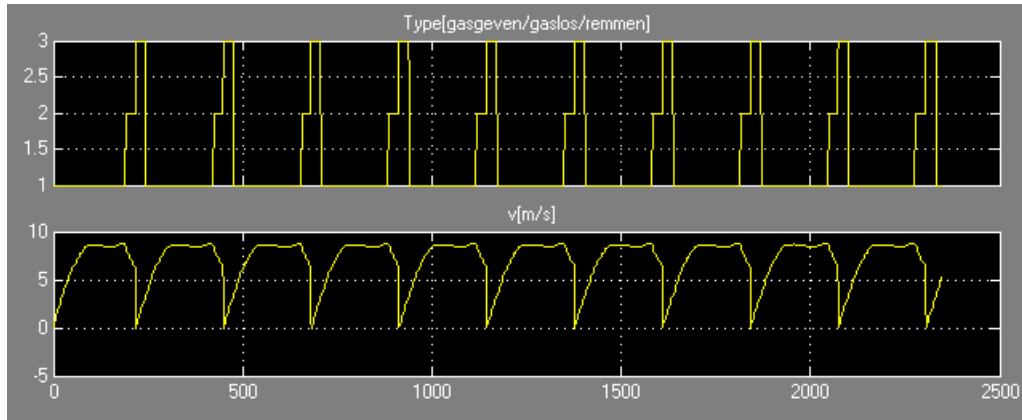
Figuur 9.1: De snelheid en strategie van het niet uitrijden

- Lang uitrijden, in deze strategie wordt 400 meter voor de stop gas losgelaten. Hierdoor rijdt het voertuig lang uit, maar moet de rest van de race harder rijden om tijdig de race uit te kunnen rijden.



Figuur 9.2: De snelheid en strategie van het lang uitrijden

- Middellang uitrijden, in deze strategie wordt 200 meter voor de stop gas losgelaten. Het voertuig rijdt wel uit, maar moet daarbij nog wel veel remmen. Hierdoor hoeft het voertuig de rest van de race veel harder te rijden.



Figuur 9.3: De snelheid en strategie van het middellang uitrijden

Tabel 9.1: Verschillende strategieën getest met de voertuigsimulatie.

Strategie	Gereden tijd [<i>min</i>]	Afgelegde afstand [<i>m</i>]	Score [<i>km/kWh</i>]
Niet uitrijden	38.7	16.3	91.4
Lang uitrijden	42.7	16.3	107.7
Middellang uitrijden	38.9	16.31	98.4

9.4. VOORBEELDEN

Hoofdstuk 10

Conclusie

- Het computermodel wordt door een aantal systemen en subsystemen gesimuleerd. Het model is in te delen in drie systemen:
 - * Aandrijving, op het voertuig werkende krachten en het circuit. De aandrijving is opgedeeld in de fuel cell, motor controller, elektromotor en overbrenging.
 - * De op het voertuig werkende krachten worden gesimuleerd in de subsystemen luchtweerstand, rolweerstand, bochtweerstand, kracht bij de helling en geleverde kracht door motor.
 - * Het circuit, deze wordt gesimuleerd door helling, orientatie en bochtstraal.
- De subsystemen moeten worden aangevuld met gegevens en waarden van de Innovator 1. Deze kunnen proefondervindelijk worden bepaald met behulp van de testritten en meetopstelling. Door tijdgebrek zijn niet alle proeven uitgevoerd en is het model deels aangevuld met gegevens verstrekt door de fabrikanten.
- Als uitvoer levert de simulatie de score in km/kWh , de gereden tijd en de totale afgelegde afstand. Daarnaast kunnen meerdere gegevens worden opgevraagd zoals het energieverbruik van de verschillende onderdelen, snelheid als functie van tijd en geleverde vermogen als functie van tijd.
- De simulatie is gecontroleerd door uitkomsten van de simulatie te vergelijken met meetgegevens van de Shell Eco-marathon van mei 2011. De simulatie toont grote overeenkomsten met de meetgegevens. Voor bewijs van de simulatie zou de simulatie meetgegevens moeten voorspellen die nog gegenereerd moeten worden.
- Voor de rijstrategie van de Shell Eco-marathon van 2012 zijn er punten opgesteld waar rekening mee moet worden gehouden. Uit deze punten en met behulp van de simulatie kan er een brandstofefficiënte rijstrategie worden opgesteld.

Hoofdstuk 11

Aanbevelingen

Aan de voertuigsimulatie kunnen nog veel verbeteringen worden gedaan. Door tijdgebrek zijn de volgende zaken belangrijke verbeter punten voor de simulatie en rijstrategie.

De bochtweerstandcoëfficiënt moet nog worden bepaald. De bochtweerstand zal een belangrijke factor worden tijdens de Shell Eco-marathon 2010. Dit komt door de scherpe bochten in het circuit van Rotterdam. In hoofdstuk 7 staat een beschrijving hoe deze bepaald kan worden.

De rolweerstand is nu bepaald aan de hand van de vertraging van het voertuig tijdens het uitrollen. Deze kan nauwkeuriger worden bepaald met een veerunster.

Met de meetopstelling zijn nog geen metingen gedaan. De meetopstelling kan gebruikt worden om voor de elektromotor de koppel-toerenkromme en het rendement te bepalen. Voor de fuel cell kan de meetopstelling worden gebruikt voor een spanning-stroomkromme en een rendement bepaling.

Technisch werkt de voertuigsimulatie, maar deze kan worden verbeterd door de simulatie gebruikersvriendelijk te maken. Daarnaast is een gebruiksaanwijzing nodig zodat mensen die minder bekwaam zijn met simulink, de voertuigsimulatie toch kunnen gebruiken.

De beste rijstrategie moet nog worden bepaald. In mijn afstudeerstage is de meeste tijd besteed aan de ontwikkeling van de voertuigsimulatie. Dit middel kan in de toekomst worden gebruikt om de beste rijstrategie te bepalen.

Bibliografie

- [1] Shell Eco-marathon,
Official rules 2012
Chapter I
- [2] Shell Eco-marathon website,
competitionstructure
- [3] James Larmini, Andrew Dicks,
Fuel Cell Systems Explained
- [4] MES
DEA 1.0 Fuel Cell Systems, Installation, Operation & Maintenance Manual
- [5] Wikipedia
nl.wikipedia.org/brandstofcell
- [6] NVON
BiNaS
- [7] JJ Santin, CH Onder, J Bernard, Dominik Isler, Pius Kobler, F Kolb, N Weidmann, Lino Guzella,
The World's Most Fuel Efficient Vehicle
- [8] Magnatic Innovations,
Information about custom build Electric motor
- [9] Michelin,
URBAN CONCEPT TYRES AND RIMS CHARACTERISTICS
- [10] Pim van den Berg, Arjan van Diemen, Tjeerd Wijers,
EPRO7 Eindverslag the HydroCruisers 2011 Secundair systeem & Fuel Cell
- [11] Raish Jarmohamed, Mark Buitendijk,
Eindverslag the HydroCruisers 2011 Primair systeem
- [12] Justin Sjaak,
Eindverslag the HydroCruisers 2011 Technisch overdrachtverslag
- [13] Mark Cornet,
Shell Eco-marathon 2011 Carrosserieontwerp

Bijlage A

Versnelling, snelheid en afstand

A.1 Berekeningen

A.1.1 Versnelling

De versnelling van het voertuig kan worden bepaald aan de hand van de massa en de som van de krachten die op het voertuig werken.

$$a = \frac{\sum F}{m} \quad (\text{A.1})$$

Waarin:

a	Versnelling van het voertuig	$[m/s^2]$
$\sum F$	Som van de krachten die op het voertuig werken	$[N]$
m	Massa van beladen voertuig	$140kg$

In de som van de krachten worden de volgende krachten meegenomen.

$$\sum F = F_m - F_{lw} - F_{rw} - F_{bw} - F_h \quad (\text{A.2})$$

Waarin:

F_m	Kracht die elektromotor levert	$[N]$
F_{lw}	Kracht door luchtweerstand	$[N]$
F_{rw}	Kracht door rolweerstand	$[N]$
F_{bw}	Kracht door bochtweerstand	$[N]$
F_h	Kracht door helling	$[N]$

Kracht die motor levert wordt bepaald door wielstraal en koppel.

$$F_m = \frac{K}{r_{\text{straal}}} \quad (\text{A.3})$$

Waarin:

K	Koppel geleverd door elektromotor	$[Nm]$
r_{straal}	Straal van het wiel	$0.28m$

A.1.2 Snelheid

De snelheid kan worden bepaald door de acceleratie over de tijd te integreren.

$$v = \int a(t) dt \quad (\text{A.4})$$

A.1.3 Afstand

De afgelegde afstand kan worden bepaald door de snelheid over de tijd te integreren.

$$s = \int v(t) dt \quad (\text{A.5})$$

A.2 Model

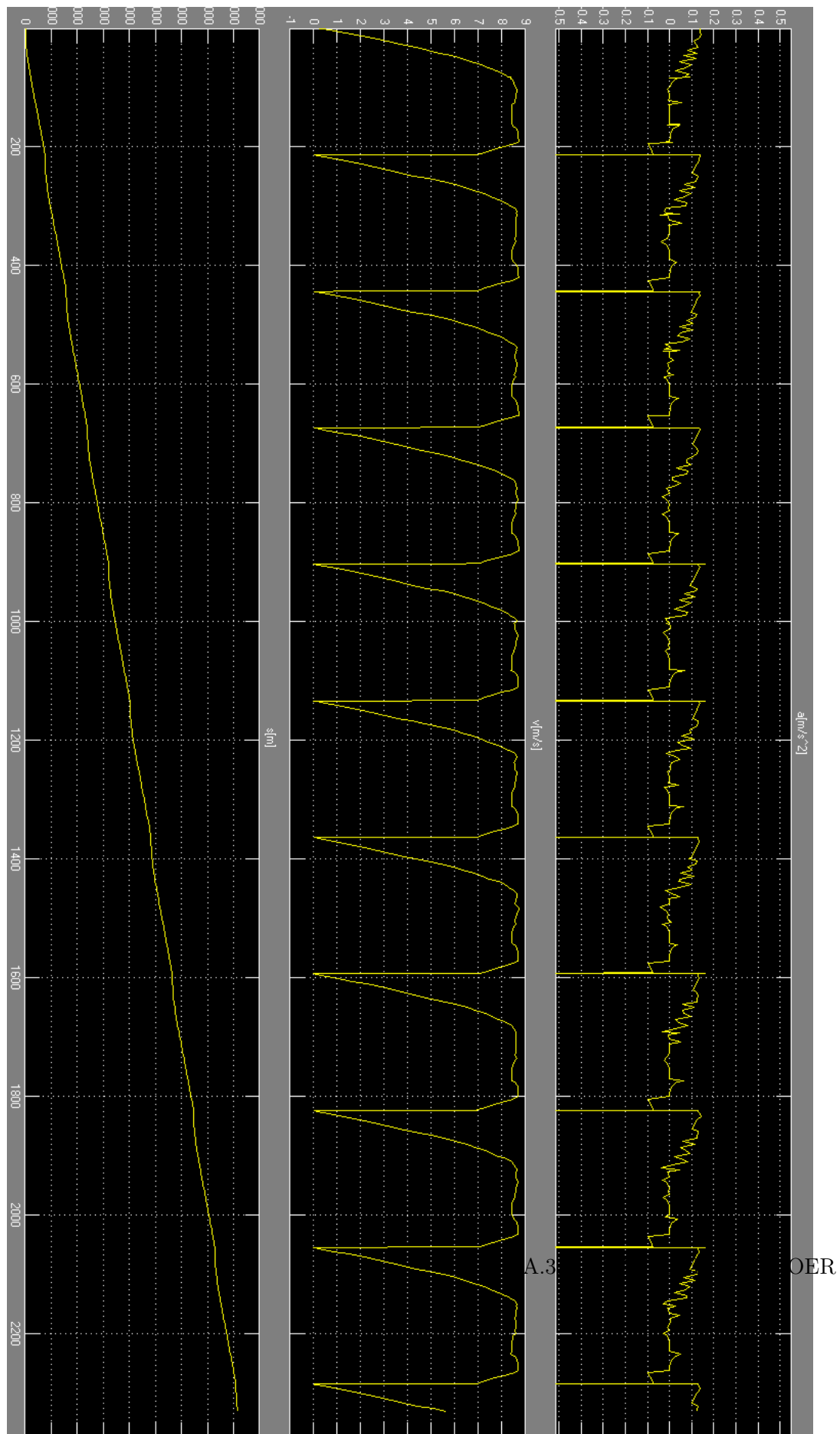
Met bovenstaande berekeningen kan er een simulatie model, zie figuur A.1, worden gemaakt van de versnelling, snelheid en afgelegde afstand.

A.3 Voorbeeld uitvoer

Deze voorbeeld uitvoer is een uitvoer die gegenereerd wordt op de baan van Rotterdam met iedere ronde een stop. Er staat een westen wind met een snelheid van 2m/s. Het voertuig rijdt 10 rondjes binnen 39 minuten.



Figuur A.1: Model in simulink van de versnelling, snelheid en afgelegde afstand.



Figuur A.2: Uitvoerwaarden van simulink.

Bijlage B

Luchtweerstand

B.1 Berekeningen

De luchtweerstand is afhankelijk van de luchtweerstandcoëfficiënt, dichtheid van lucht, frontale oppervlakte van het voertuig en de snelheid waarmee het voertuig zich ten opzichte van de lucht beweegt.

$$F_{lw} = \rho \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 \quad (\text{B.1})$$

Waarin:

ρ	Soortelijk massa van lucht	1.29 kg/m^3
c_w	Luchtweerstandcoëfficiënt	0.166
A	Frontaal oppervlak voertuig	0.794 m^2
v	Snelheid waarmee het voertuig zich voortbeweegt t.o.v. de lucht	$[\text{m/s}]$

In formule B.1 wordt geen rekening gehouden met de windsnelheid. Indien er rekening moet worden gehouden met de windsnelheid moet de formule worden aangevuld.

$$v_{wt}(\alpha) = \sqrt{(v_v + v_w \cdot \cos(\alpha))^2 + (v_w \cdot \sin(\alpha))^2} \quad (\text{B.2})$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_w \cdot \sin(\alpha)}{v_v + v_w \cdot \cos(\alpha)}\right) \quad (\text{B.3})$$

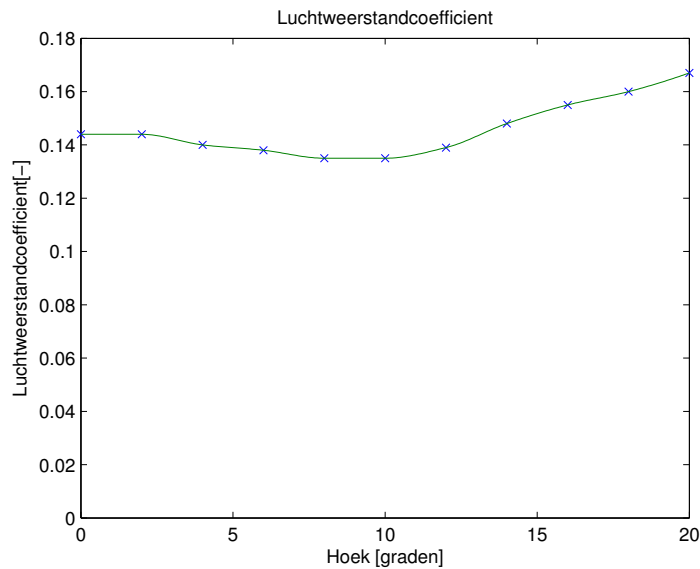
$$F_{lw} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{wt}(\alpha)^2 \cdot c_w(\theta) \cdot A \quad (\text{B.4})$$

$$P_{lw} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{wt}(\alpha)^2 \cdot c_w(\theta) \cdot A \cdot v_v \quad (\text{B.5})$$

Waarin:

v_{wt}	Windsnelheid totaal	$[m/s]$
v_w	Windsnelheid wind	$[m/s]$
v_v	Windsnelheid voertuig	$[m/s]$
α	Absolute windrichting ten opzichte van het voertuig	$[^\circ]$
θ	Relatieve windrichting ten opzichte van het voertuig	$[^\circ]$

De luchtweerstandcoëfficiënt kan worden bepaald aan de hand van figuur B.1.



Figuur B.1: Luchtweerstandcoëfficiënt als functie van relatieve windrichting

Het totale energieverlies door luchtweerstand is te bepalen door berekening B.5 naar de tijd te integreren.

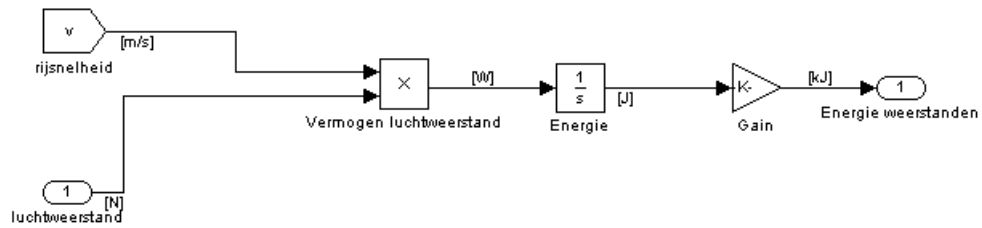
$$E_{lw} = \int P_{lw} dt. \quad (B.6)$$

B.2 Model

Met bovenstaande berekeningen kan er een simulatie model worden gemaakt van de luchtweerstand. Zie figuren B.3 en B.2

B.3 Voorbeeld uitvoer

Deze voorbeeld uitvoer is een uitvoer die gegenereerd wordt op de baan van Rotterdam met iedere ronde een stop. Er staat een westen wind met een snelheid van 2m/s. Het voertuig rijdt 10 rondjes binnen 39 minuten.



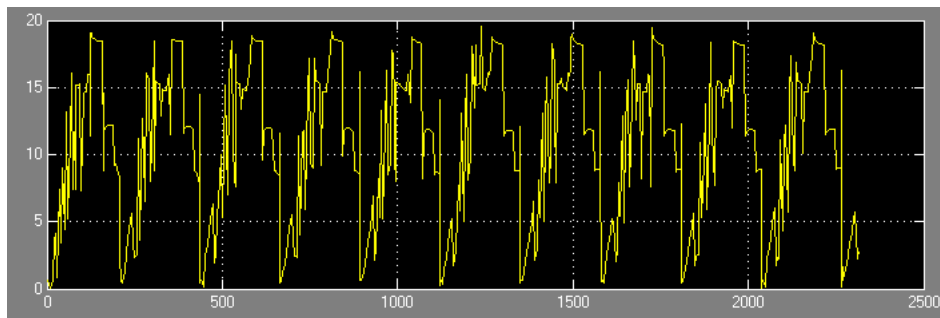
Figuur B.2: Model in simulink van de energieverlies t.g.v. luchtweerstand

In figuur B.4 wordt de luchtweerstand in N uitgedrukt tegen de tijd. De luchtweerstand verspringt steeds wanneer het voertuig door een bocht gaat.

B.3. VOORBEELD UITVOER



Figuur B.3: Model in simulink van de luchtweerstand



Figuur B.4: Uitvoerwaardes van simulink.

B.3. VOORBEELD UITVOER

Bijlage C

Rolweerstand

C.1 Berekeningen

De rolweerstand is de weerstand die de banden ondervinden als ze rollen over asfalt. De rolweerstand is afhankelijk van de normaalkracht loodrecht op het afvalt, de gravitatie constante en rolweerstandcoëfficiënt.

$$F_{rw} = m \cdot g \cdot \mu_r \cdot \tan \alpha_{baan} \quad (C.1)$$

$$P_{rw} = F_{rw} \cdot v \quad (C.2)$$

Waarin:

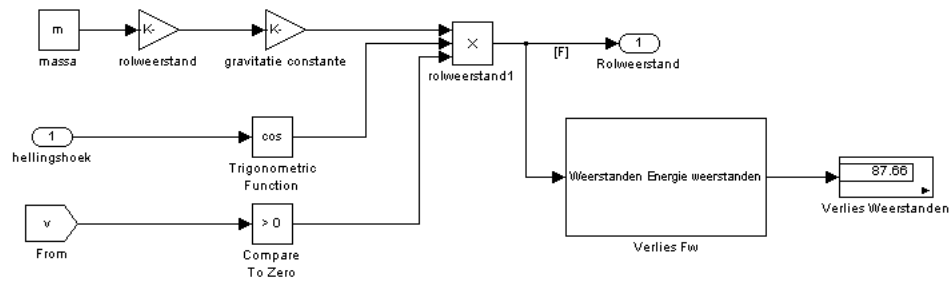
F_{rw}	Rolweerstand	$[N]$
m	Massa van beladen voertuig	$130kg$
g	Gravitatieconstante	$9.81m/s^2$
μ_r	Rolweerstandcoëfficiënt	0.0015
α_{baan}	Hellingshoek van de baan	$[rad]$

Het totale energieverlies door rolweerstand is te bepalen door berekening C.2 naar de tijd te integreren.

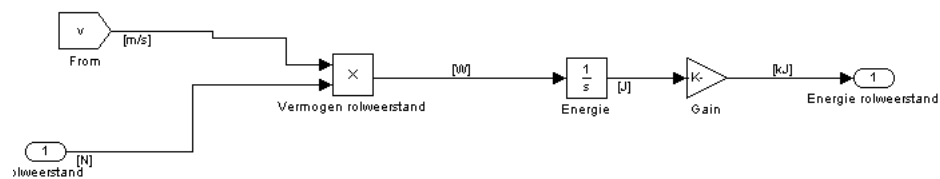
$$E_{rw} = \int P_{rw} dt. \quad (C.3)$$

C.2 Model

Met bovenstaande berekeningen kan er een simulatie model worden gemaakt van de rolweerstand.



Figuur C.1: Model in simulink van de rolweerstand



Figuur C.2: Model in simulink van de energieverlies t.g.v. de rolweerstand

C.2. MODEL

Bijlage D

Bochtweerstand

D.1 Berekeningen

De bochtweerstand is de weerstand die ontstaat door de middelpuntvliedende kracht in de bochten. Deze kracht zorgt voor extra wringing in de banen.

$$F_{bw} = \mu_{bw} \cdot \frac{m \cdot v^2}{r_{bocht}} P_{rw} = F_{bw} \cdot v \quad (\text{D.1})$$

Waarin:

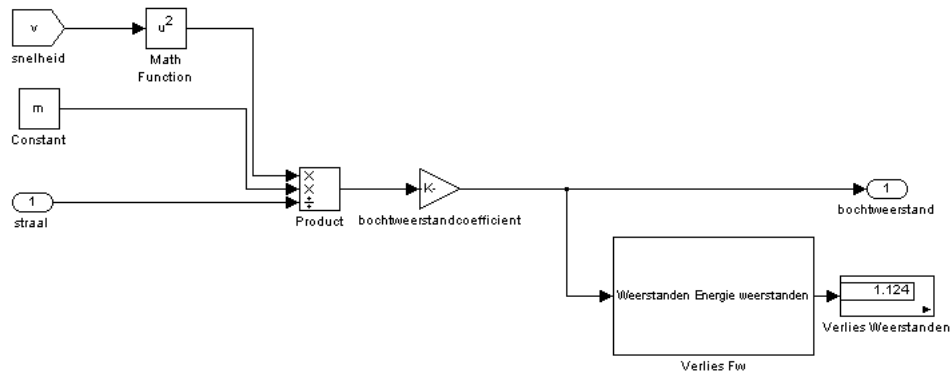
F_{bw}	Bochtweerstand	$[N]$
μ_{bw}	Bochtweerstandcoëfficiënt	—
r_{bocht}	Straal van de bocht	$[m]$

Het totale energieverlies door bochtweerstand is te bepalen door berekening D.1 naar de tijd te integreren.

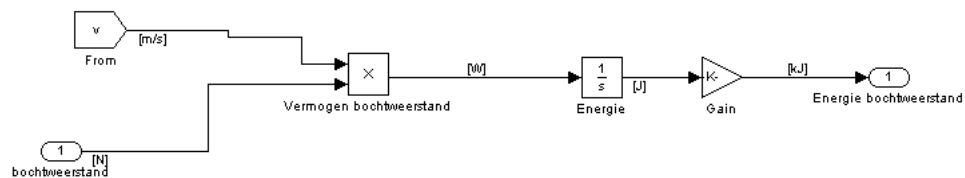
$$E_{bw} = \int P_{rw} dt. \quad (\text{D.2})$$

D.2 Model

Met bovenstaande berekeningen kan er een simulatie model worden gemaakt van de bochtweerstand.



Figuur D.1: Model in simulink van de bochtweerstand

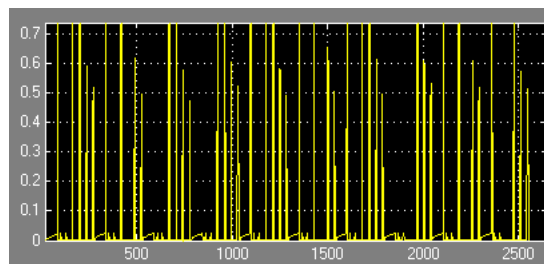


Figuur D.2: Model in simulink van de energieverlies t.g.v. de bochtweerstand

D.3 Voorbeeld uitvoer

Deze voorbeeld uitvoer is een uitvoer die gegenereerd wordt op de baan van Rotterdam met iedere ronde een stop. Er staat een westen wind met een snelheid van 2m/s. Het voertuig rijdt 10 rondjes binnen 39 minuten.

In figuur D.3 wordt de bochtweerstand in N uitgedrukt tegen de tijd. De bochtweerstand verspringt steeds wanneer het voertuig door een bocht gaat. De bochtweerstandcoëfficiënt is nog net bepaald. Hiervoor is nu een lage waarde aangenomen zodat de bochtweerstand geen grote rol speelt in de uitkomsten van de voertuigsimulatie.



Figuur D.3: Uitvoerwaardes van simulink.

Bijlage E

Motor controller en elektromotor

E.1 Motor controller

Een deel van de stroom wordt gebruikt voor het logische gedeelte van de motorcontroller. De verliezen zijn hiervan in de dc/dc converter en in de logica zelf. Deze verliezen uitten zich in de vorm van warmte.

$$P_{mc} = P_{fc} \cdot (1 - \eta_{mc}) + \frac{P_{mclogica}}{\mu_{dc/dc}} \quad (E.1)$$

Waarin:

P_{mc}	Vermogen verbruikt door motor controller	[W]
η_{mc}	Rendement motorcontroller	0.97
P_{fc}	Vermogen geleverd door Fuel Cell	[W]
$P_{mclogica}$	Vermogen verbruikt door logica in motorcontroller	0.24W
$\eta_{dc/dc}$	Rendement van dc/dc converter	0.85

$$P_{mclogica} = U_{mclogica} \cdot I_{mclogica} \quad (E.2)$$

Waarin:

$U_{mclogica}$	Spanning voor logica in motorcontroller	24V
$I_{mclogica}$	Stroomsterkte voor logica in motorcontroller	100mA

E.2 Elektromotor

Het rendement van de elektromotor is afhankelijk van het koppel en het toerental. Het toerental wordt afgeleid van de voertuigsnelheid.

$$\omega_{rotor} = \frac{v}{r_{wiel}} \cdot \text{overbrengingratio} \quad (E.3)$$

Waarin:

ω_{rotor}	Rotatiesnelheid rotor	$[rad/s]$
v	Voertuigsnelheid	$[m/s]$
r_{wiel}	Straal van het wiel	$0.28m$
$Overbrengingratio$		$1 : 3$

Het verbruikte vermogen wordt vervolgens berekend met koppel, rendement en toerental.

$$P_{motor} = \eta_{motor} \cdot \omega_{rotor} \cdot \frac{K}{overbrengingratio} \quad (E.4)$$

Waarin:

P_{motor}	Verbruikt vermogen elektromotor	$[W]$
η_{motor}	Rendement elektromotor	—
K	Koppel elektromotor	$[Nm]$

Voor berekening E.4 is de koppel-toerenrendementen diagram nodig uit figuur E.1

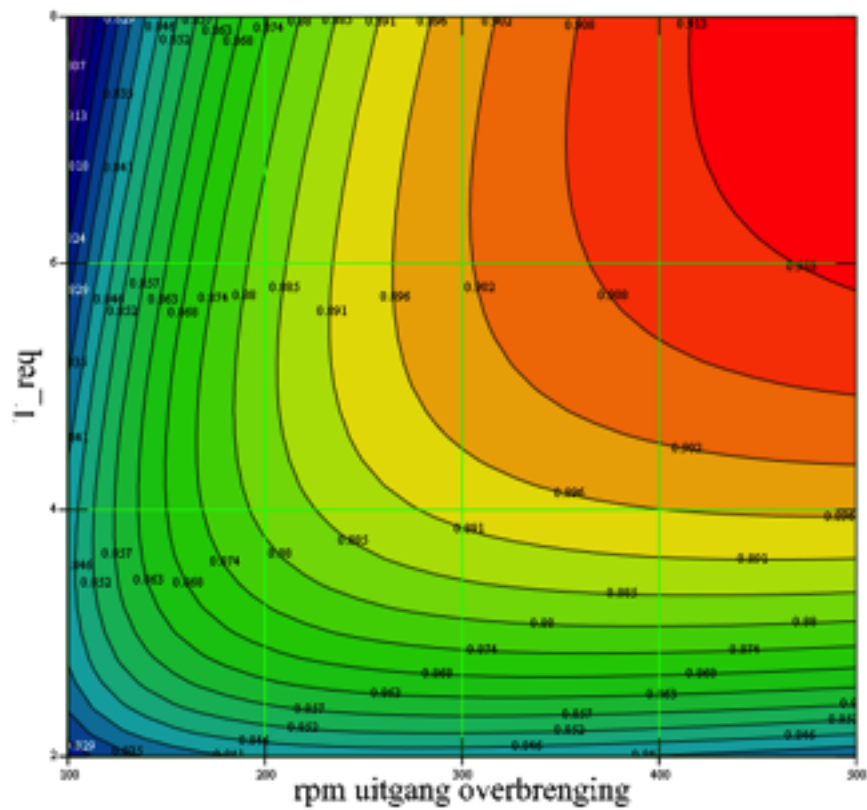
E.3 Model

Met bovenstaande berekeningen kan er een simulatie model worden gemaakt van de elektromotor.

E.4 Voorbeeld uitvoer elektromotor en motorcontroller

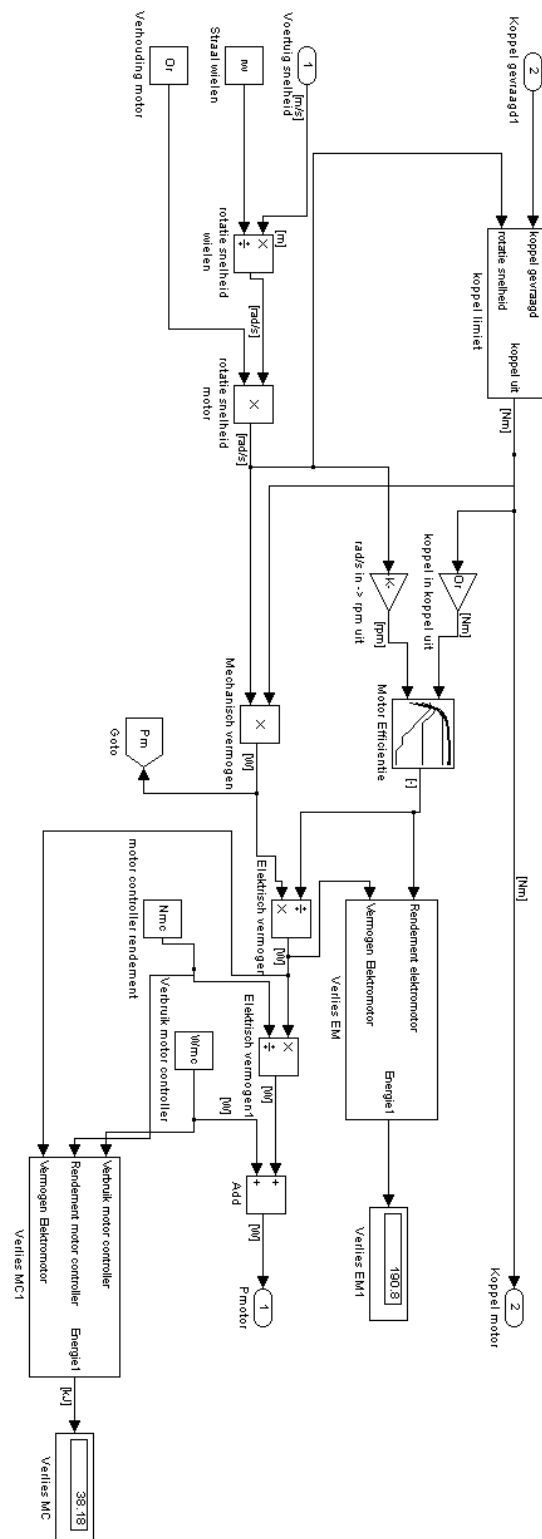
Deze voorbeeld uitvoer is een uitvoer die gegenereerd wordt op de baan van Rotterdam met iedere ronde een stop. Er staat een westen wind met een snelheid van 2m/s. Het voertuig rijdt 10 rondjes binnen 39 minuten.

In figuur E.3 wordt de luchtweerstand in N uitgedrukt tegen de tijd. De luchtweerstand verspringt steeds wanneer het voertuig door een bocht gaat.



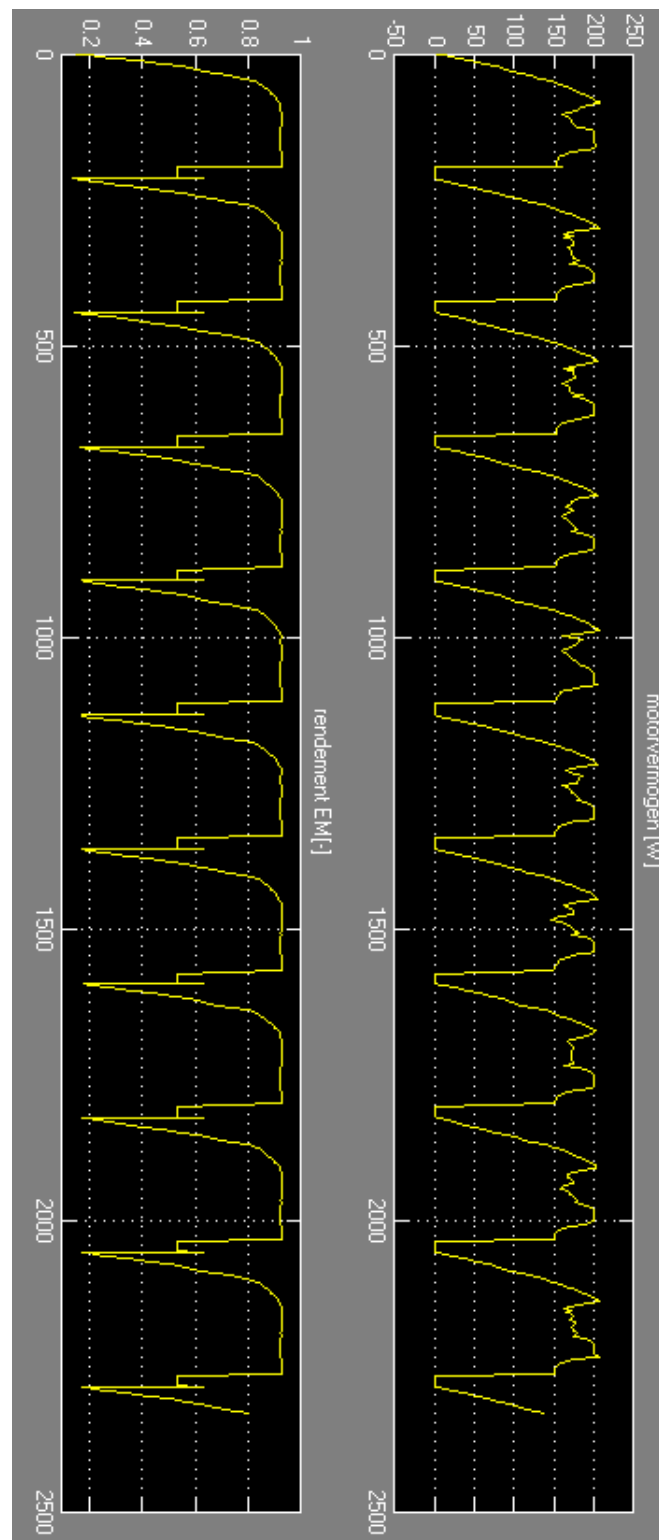
Figuur E.1: Rendement elektromotor

E.4. VOORBEELD UITVOER ELEKTROMOTOR EN MOTORCONTROLLER



Figuur E.2: Model in simulink van de elektromotor en motor controller

E.4. VOORBEELD UITVOER ELEKTROMOTOR EN MOTORCONTROLLER



Figuur E.3: Uitvoer van de Elektromotor rendement en het motor vermogen als functie van de tijd.

E.4. VOORBEELD UITVOER ELEKTROMOTOR EN MOTORCONTROLLER

Bijlage F

Fuel Cell

F.1 Waterstoftank

De hoeveelheid energie in de waterstoftank kan worden berekend met de algemene gaswet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{F.1})$$

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad (\text{F.2})$$

Waarin:

n	Hoeveelheid gas	$[mol]$
p	Druk van de waterstof in de tank	$200bar$
V	Volume van de waterstoftank	$0.001m^3$
R	Gasconstante	$8.31J/(K \cdot mol)$
T	Absolute temperatuur	$293K$

$$m = n \cdot M_{h2} \quad (\text{F.3})$$

$$E_{tank} = m \cdot LHV \quad (\text{F.4})$$

Waarin:

E_{tank}	Totale energie in waterstoftank	$[J]$
M_{h2}	Molaire massa	$2g/mol$
LHV	Lage verbrandingswaarde waterstof	$1,25kJ/g$

F.2 Fuel Cell

F.2.1 Verliezen

Warmte verliezen stack

$$Cellrendement = \frac{V_c}{LHV} \quad (F.5)$$

Waarin

V_c Voltage van enkele cell $0.9V$

De brandstofgebruikcoëfficiënt (μ_f) is de verhouding tussen de brandstof die in het systeem gaat en het brandstof dat verbruikt wordt.

$$\mu_f = \frac{h2_{gereageerd}}{h2_{toegevoerd}} \quad (F.6)$$

Waarin:

$h2_{gereageerd}$	Totaal in de stack gereageerde waterstof	$[nl]$
$h2_{toegevoerd}$	Totaal aan de stack toegevoerde waterstof	$[nl]$
μ_f	Brandstofgebruikcoëfficiënt	$[-]$

Het totale rendement is een product van deze twee verliezen.[3]

$$\eta_{fuelcell} = \mu_f \cdot \frac{V_c}{LHV} \cdot 100\% \quad (F.7)$$

F.2.2 Verbruik

Het verbruik van de fuel cell is afhankelijk van de geleverde stroom en de stroom die de fuel cell zelf gebruikt. Deze wordt bepaald vanuit het geleverde vermogen en gebruikte vermogen gedeeld door de spanning. [7]

$$I_{fc} = \frac{P_{geleverd} + P_{verbruikt}}{U_{fc}} \quad (F.8)$$

$$(F.9)$$

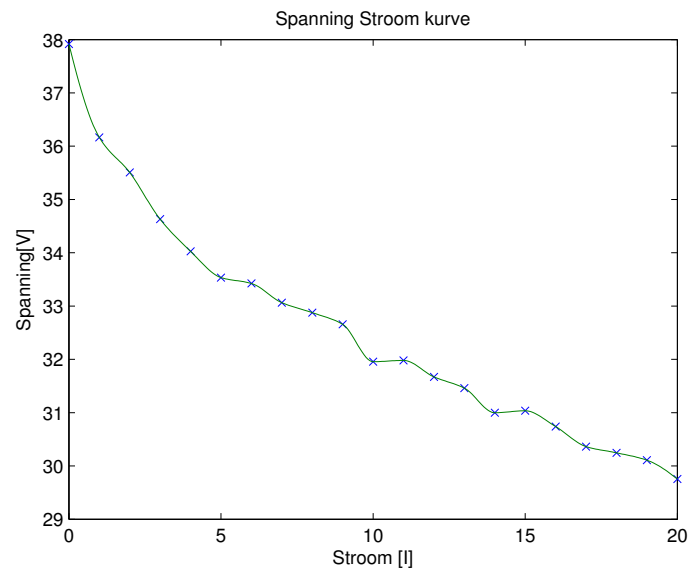
$$\dot{V}_{h2} = I_{h2} \cdot C_{Ih2kurve} \quad (F.10)$$

Waarin:

I_{fc}	Stroom door fuel cell	$[A]$
U_{fc}	Spanning over fuel cell	$[V]$
$\dot{V}_{h2}$	Volumestroom waterstof	$[nl/s]$

Voor berekening F.9 is de spanning-stroomkurve [4] nodig uit figuur F.1

Voor berekening F.10 is de stroom-verbruikkurve [4] nodig uit figuur F.2



Figuur F.1: Spanning stroom curve van de fuel cell

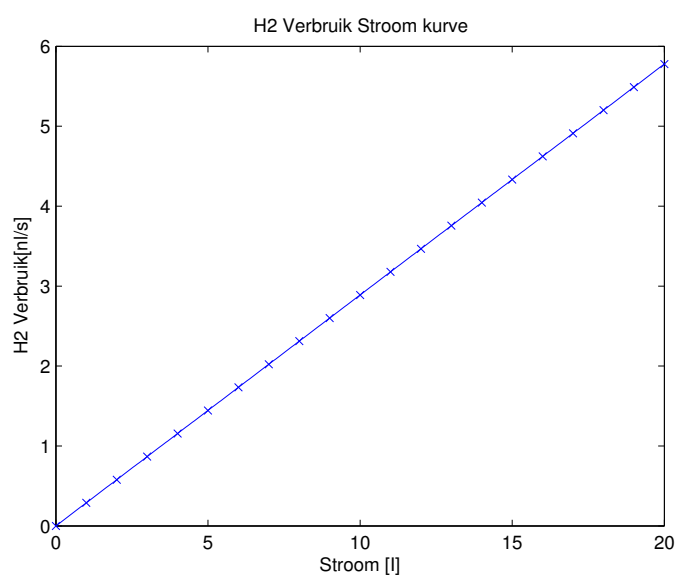
F.3 Model

Met de beschreven formules kan een model in simulink worden gemaakt.

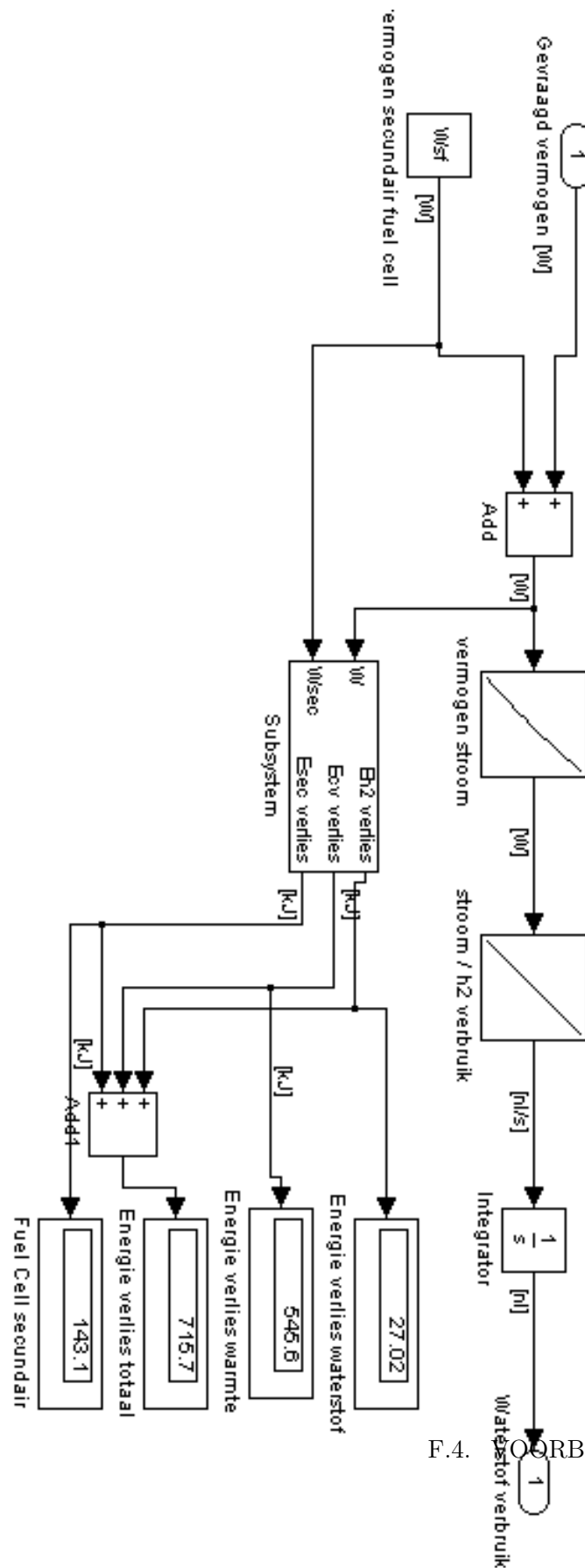
F.4 Voorbeeld uitvoer

Deze voorbeeld uitvoer is een uitvoer die gegenereerd wordt op de baan van Rotterdam met iedere ronde een stop. Er staat een westen wind met een snelheid van 2m/s. Het voertuig rijdt 10 rondjes binnen 39 minuten.

In figuur F.5 wordt de luchtweerstand in N uitgedrukt tegen de tijd. De luchtweerstand verspringt steeds wanneer het voertuig door een bocht gaat.

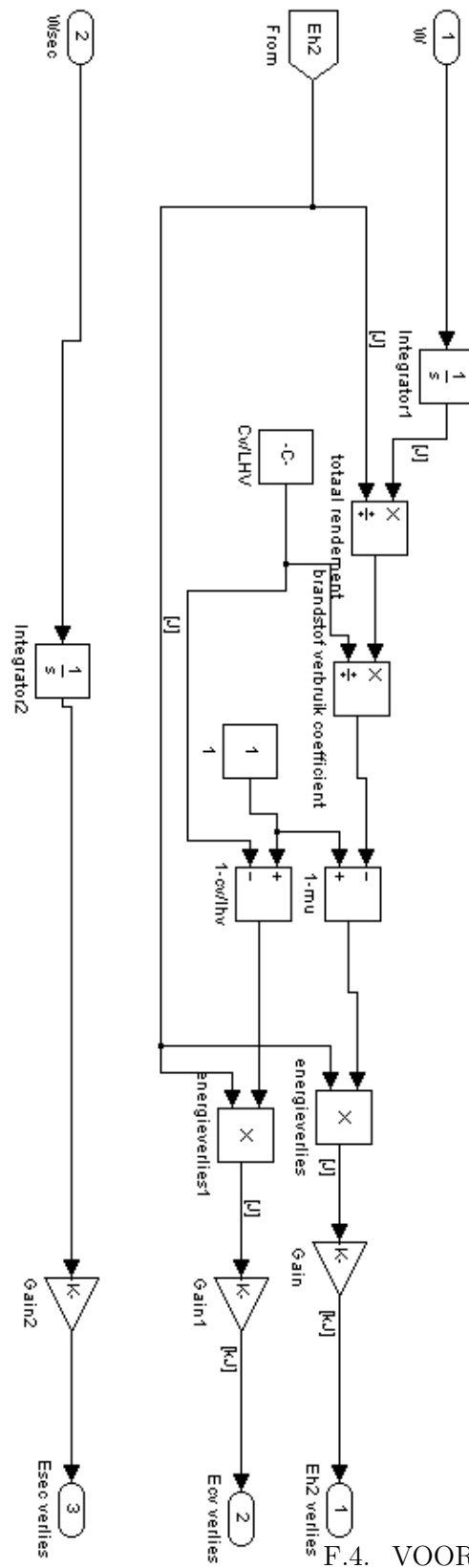


Figuur F.2: Verbruik Stroom curve van de fuel cell



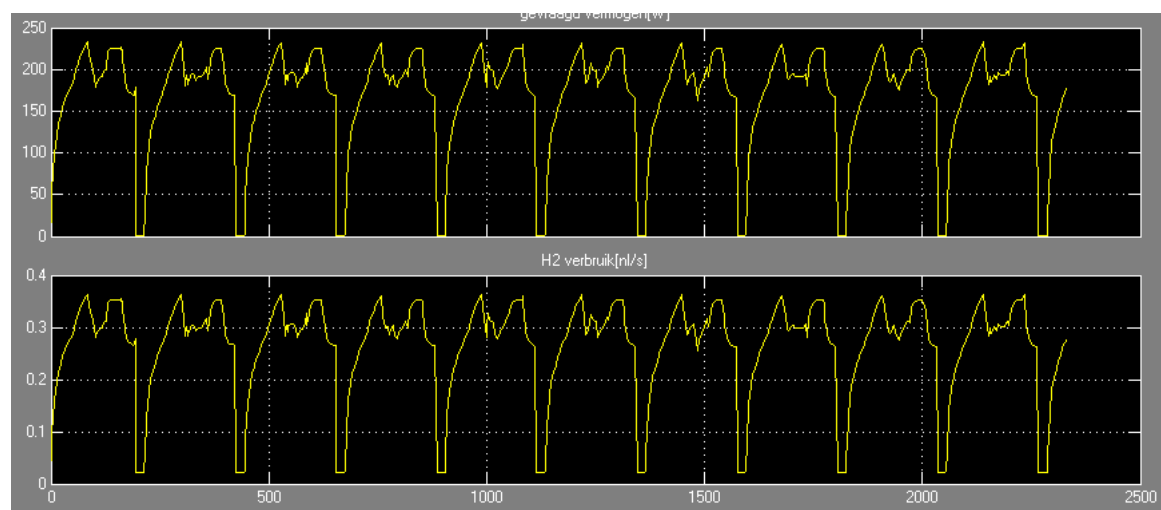
F.4. OORBEELD UITVOER

Figuur F.3: Model in simulink van de fuel cell



F.4. VOORBEELD UITVOER

Figuur F.4: Model in simulink van de verliezen van de fuel cell

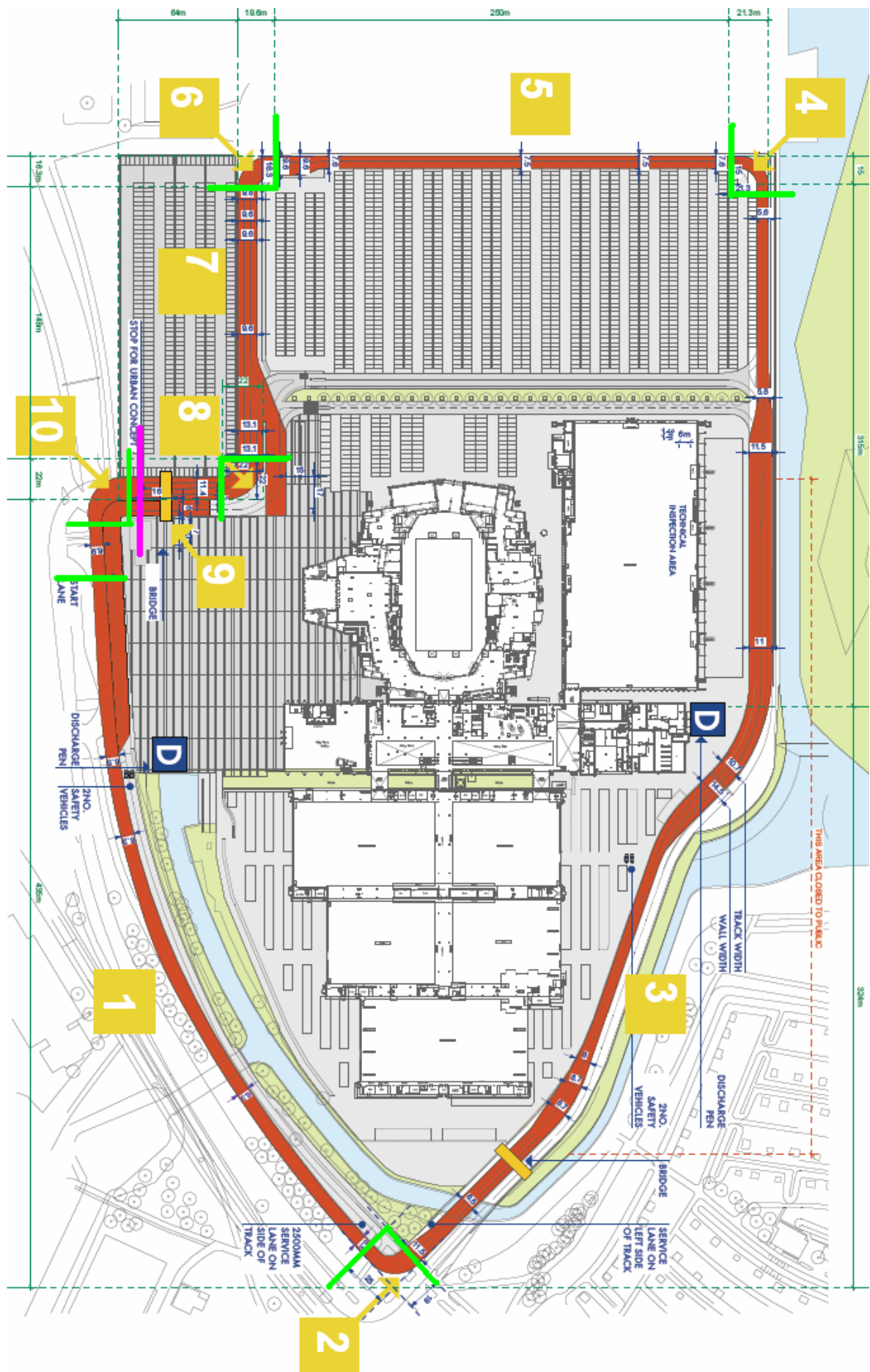


Figuur F.5: Uitvoerwaarden van simulink.

F.4. VOORBEELD UITVOER

Bijlage G

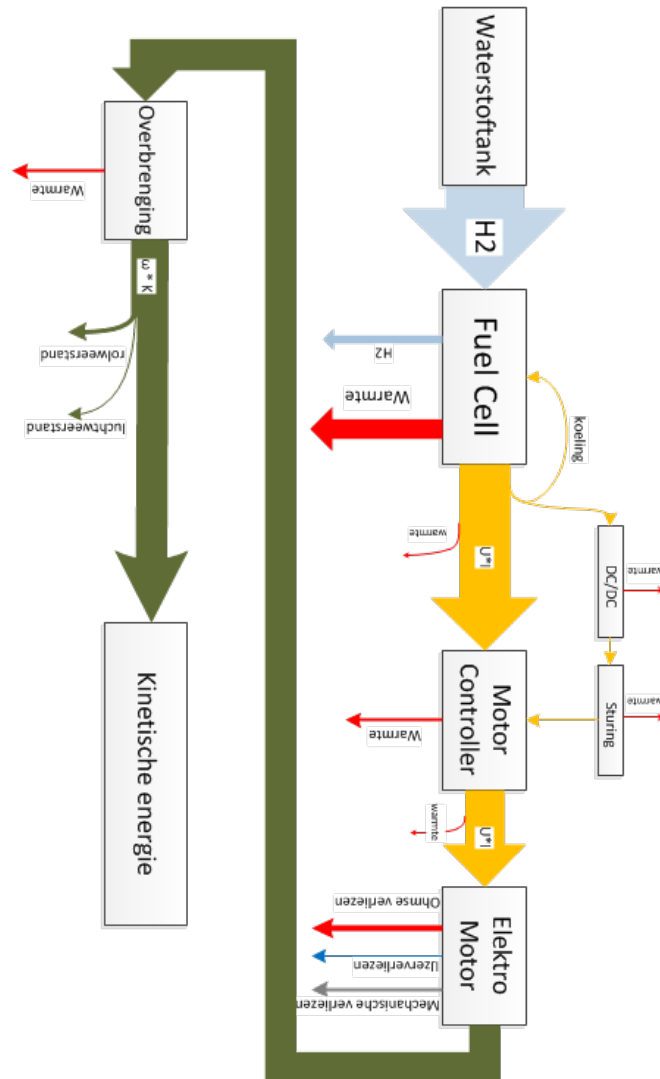
Kaart Shell Eco-marathon 2012



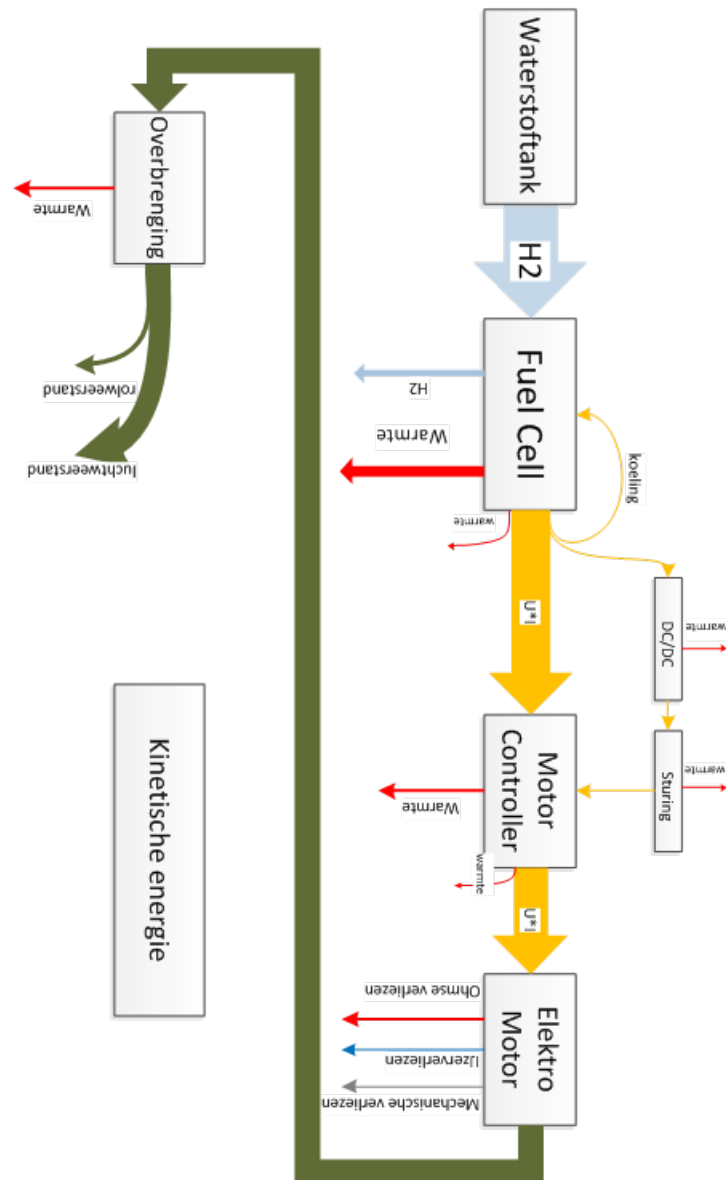
Figuur G.1: Kaart van het circuit in Rotterdam rond de Ahoy

Bijlage H

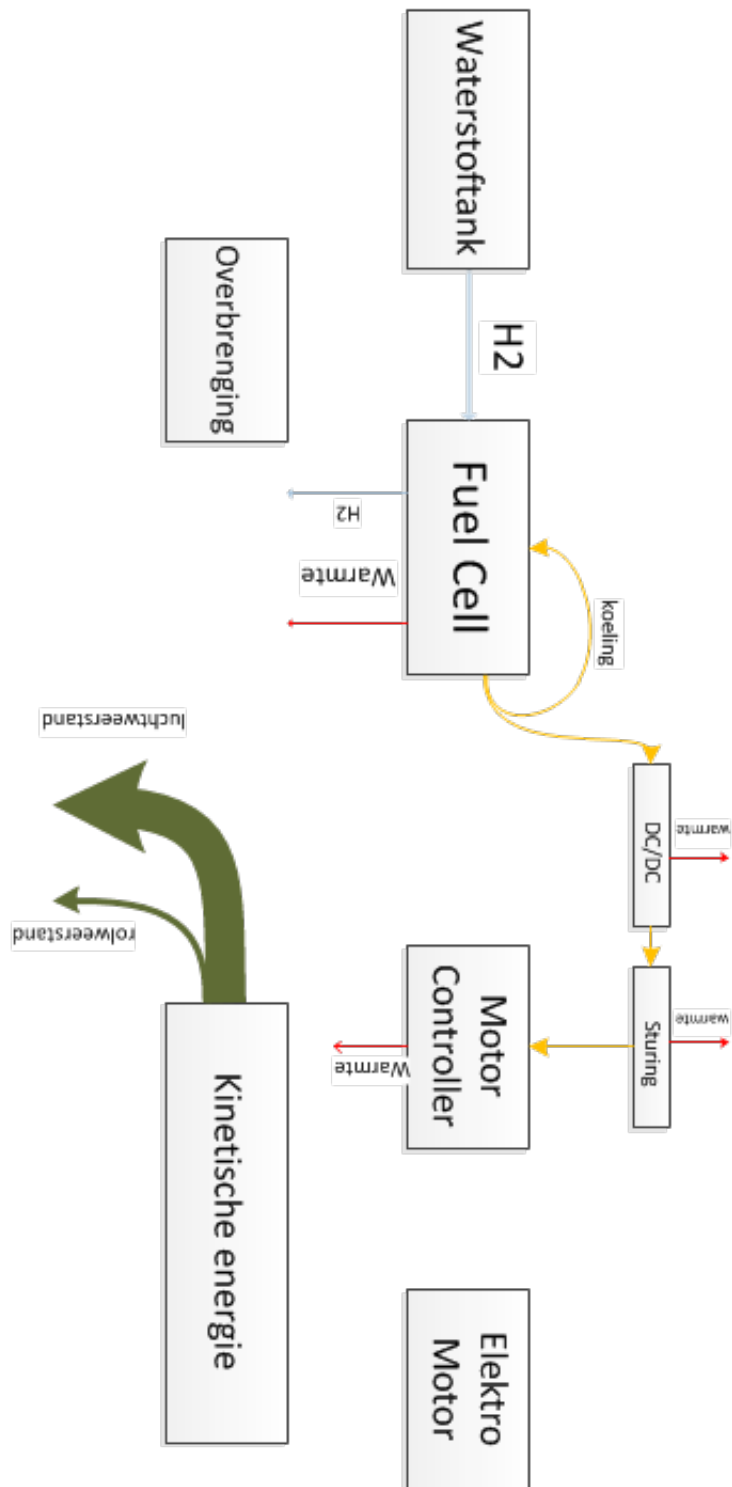
Circuit Energiebalans



Figuur H.1: Energiebalans tijdens het optrekken



Figuur H.2: Energiebalans tijdens het cruisen



Figuur H.3: Energiebalans tijdens het uitrollen