

Faculteit Ingenieurswetenschappen Vakgroep Elektrische Energie, Systemen en Automatisering Voorzitter: Prof. dr. ir. J. Melkebeek Vakgroep Mechanica van Stroming, Warmte en Verbranding Voorzitter: Prof. dr. ir. R. Sierens

### Ontwerp en constructie van een elektrisch aangedreven tweepersoonswagen

Johan Van Gaeveren en Davy Van Rossem

Promotoren: Prof. dr. ir. J Melkebeek en Prof. dr. ir. J Vierendeels Begeleiders: ir. F. De Belie en ir. Koen De Gussemé

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk Werktuigkundig-Elektrotechnisch Ingenieur

Academiejaar 2006-2007

De auteurs en promotoren geven de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.

The authors and promotors give the permission to make this thesis available for consultation and copy parts of the thesis for personal use. Every other use is subject to the copyright laws, especially with respect to the obligation to explicitly mention the source when citing results of this thesis.

Gent, 4 Juni 2007

De auteurs

Van Gaeveren Johan

Van Rossem Davy

De promotoren

Prof. dr. ir. J. Melkebeek

Prof. dr. ir. J. Vierendeels

### Dankwoord

We danken natuurlijk onze promotoren, Prof. dr. ir. J. Melkebeek en Prof. dr. ir. J. Vierendeels. Dankzij hen werd ons voorstel om een studie te maken rondom een elektrische wagen een echt thesisonderwerp. We richten ook een bijzonder woordje dank aan Prof. dr. ir. A. Van Den Bossche. Hij heeft ons steeds uit de nood geholpen toen we in de problemen kwamen te zitten. Hij gaf de nodige theoretische ondersteuning en heeft verschillende praktische tips aangebracht, waarvoor bijzondere dank. En ook Prof. S. Hoste verdient een vermelding, omdat we met zijn Twike mochten testrijden.

Iedereen in onze directe omgeving danken we voor de morele steun, die zij ons gedurende dit voorbije hectische jaar hebben gegeven, en de vele tips die onze thesis mee tot een goed einde gebracht hebben. Hierbij denken we vooral aan medestudenten, personeel van de universiteit Gent, ouders en familie. Voor de praktische realisatie van het mechanische deel van de wagen hebben we gebruik gemaakt van de infrastructuur van Van Gaeveren Landbouwmechanisatie, dit is het landbouwmechanisatie bedrijf van de vader van Johan. We bedanken daarom Ing. Van Gaeveren Frans, die met zijn jarenlange ervaring in de mechanische sector, dit voor ons allemaal mogelijk heeft gemaakt.

De techniekers van EELAB verdienen ook een speciale vermelding. Ondanks dat we veel zelf hebben uitgewerkt, hebben we hen toch regelmatig belast met technische problemen, die zij steeds tot een goed einde wisten te brengen. Zo hebben zij alle printplaten geëtst en draaiwerk verricht voor de aandrijving. En niet te vergeten onze begeleiders ir. F. De Belie en ir. Koen De Gussemé. Zij waren steeds bereid ons te helpen met problemen van elektrische aard, hebben ons geleerd hoe we op een snelle en efficiënte manier elektronische schakelingen konden maken, zorgden er voor dat we altijd al het nodige materiaal ter beschikking hadden in het labo, enz...

Tot slot bedanken we ook elkaar voor de constructieve samenwerking. Wij hopen jullie niet teleur gesteld te hebben, maar voldoening te geven met onze prestatie. Veel leesplezier bij het evalueren en bestuderen van deze thesis.

> Van Gaeveren Johan en Van Rossem Davy Gent, 4 juni 2007

### Ontwerp van een elektrische tweepersoonswagen

door

Van Gaeveren Johan en Van Rossem Davy

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk werktuigkundig-elektrotechnisch ingenieur

Academiejaar: 2006-2007

Promotoren: Prof. J. Melkebeek & Prof. J. Vierendeels Faculteit Ingenieurswetenschappen Universiteit Gent

Vakgroepen:

Elektrische Energie, Systemen & Automatisering (Prof. dr. ir. J. Melkebeek) Mechanica van Stroming, Warmte en Verbranding (Prof. dr. ir. R. Sierens)

### Samenvatting

Eén van de oplossingen om ons energieverbruik in het transport te beperken, zijn elektrische wagens. Aan de ontwikkeling daarvan proberen wij met deze thesis ons steentje bij te dragen. In de inleiding bespreken we kort de problematiek en de huidige stand van zaken op vlak van elektrische voertuigen. Ook wordt een kort voorontwerp van onze wagen geschetst.

In hoofdstuk 2 vervolgens gaan we dieper in op het frame van de wagen, dat volledig 'from scratch' door ons uitgewerkt is. Hierbij opteren we voor een buizenframe omwille van de eenvoud in constructie. Ook de ophanging wordt besproken.

Hoofdstuk 3 dan, focust op de mechanische kant van de aandrijving, zijnde in hoofdzaak de keuze en dimensionering van motoren en koppelingen. Ook het remsysteem en de sturing komen hier aan bod. In hoofdstuk 4 bekijken we de elektrische kant. De motor moet kunnen bestuurd worden en moet zich comfortabel en stabiel gedragen. Ook zijn er systemen nodig om de koppeling te sturen, energie te recupereren bij het remmen, de batterijen te laden, enzovoort.

In hoofdstuk 5 volgt dan de optimalisatie van de aërodynamische vorm. Dit is van groot belang om het energieverbruik te beperken, aangezien luchtweerstand bij hogere snelheden de belangrijkste weerstand wordt. We schrijven hiervoor een bijna volledig geautomatiseerde optimaliseringslus. We lichten deze toe en analyseren de resultaten.

Hoofdstuk 6 tenslotte bundelt enkele besluiten en verbeteringspunten.

trefwoorden: Autotechniek, Elektrische aandrijving, Externe aërodynamica

# Design and construction of a two-person electrical vehicle

Johan Van Gaeveren and Davy Van Rossem

Supervisor(s): J. Melkebeek and J. Vierendeels

*Abstract*— This article explains how we designed and built a two-person electrical car, with the emphasis on the electrical drive system and the aero-dynamic shape of the car.

### I. INTRODUCTION

THE problem of energy consumption is one of the toughest ones to handle. The transport sector is a big contributor in this matter, and one of the possible solutions is to use more and more electrically driven cars. There especially is a market for people who almost always drive alone, since they don't need a large car. That's why we set the goal for ourselves to design a small electrical vehicle for two persons, that should be as light and energy-efficient as possible.

### II. FRAME OF THE CAR

We built the car using a frame of steel tubes that were welded together. Considering all advantages we chose to build a three-weeled car instead of a four-wheeled one (one front wheel and two rear wheels). The front suspension is originally from a motorcycle, the Yamaha GTS1000. We wanted this particular type because it makes it possible to give the car a very low height in the front part (this has aerodynamical advantages). The rear suspension is based on the suspension of the DAF30 car. Figure 1 shows this principle, and in figure 2 you can see the frame of our car.







Fig. 2. Frame of the car

As for the other mechanical parts:

• The braking circuit is an oil-circuit, without servo, coming from an old VW Golf. We use disc brakes on all three wheels.

• The steering mechanism is a self-built system that's quite simple because of the single front wheel. We used the steering bar from the Yamaha motorcycle.

• All the wheels come from motorcycles, since these are light and relatively cheap (second-hand).

### III. MECHANICAL DRIVE PARTS

#### A. Motors

The motors should be standard parts, to keep the cost down, and we use one of them on each rear wheel. The front wheel is not driven. We based our selection upon the following criteria:

• The motors should provide enough power to reach a maximum speed of 100 km/h.

• The maximum speed should preferably be low enough to minimize the reduction in our belt-system. Here we had no option, we had to use a 3000rpm motor given all the other constraints.

• The motors should also be short enough since they will be built in sideways and we don't want the car to become too wide, for aerodynamic purposes.

We eventually found an interesting motor with *AXOR*, an Italian company (www.axorindustries.com). The type we chose is the SSAX1140S, mainly because of its small size. It has a maximum power of 3.6kW.

### B. Improvised gearbox

With the motor we chose it's possible to drive at maximum speed and go up a slope of 10%, but we can't reach both goals with the same speed reduction. This means we need at least two gears. We stuck with this number because more gears would become too complicated. The gears are created using a selfdesigned system with poly-V belt pulleys, a freewheel bearing, and and electromagnetic clutch. This principle is illustrated in figure 3. The clutch switches gears electronically.



Fig. 3. Improvised gearbox

### IV. ELECTRICAL DRIVE SYSTEM

### A. Batteries

For the batteries we have many choices. Important in our case are energy contents per weight, maximum current, and of course the price. And optimum should be found in NiMH cells but because of the price we had to stick with NiCd. We built 2 parallel packs of 168 cells in series. These are charged using a self designed system which provides a constant current of 450mA and have an energy content of 900Wh per pack.

We also needed a 24V, 15V and 5V circuit (for the clutch and electronics). These are provided using a smaller 24V battery pack and two DC/DC converters. This was way cheaper than converting the 200 Volts. This pack is charged with a MAX713 charger.

#### B. Engine drive system

The heart of the whole drive system is the *Axor* Micro B Plus, a drive that can can control this engine in torque or speed mode. We had to build a system around this drive that can:

• switch between torque and speed control

• convert the movement of the gas and brake pedal into the right signals for the drive, dependent on the setting (forward, neutral, reverse)

• control the clutch so that it only engages and disengages when it has to (this means going to second gear at maximum engine speed and returning to first gear at 40 km/h)

One particular problem is that the maximum engine speed is dependent of the battery voltage. To overcome this, we designed a system that uses a PWM-signal from the Micro B Plus drive combined with an electrical circuit with a certain time constant, to detect if the engine is at maximum speed.

#### C. Driver controls

The driver has the following controls and feedback:

- A switch to turn on the drive
- A switch to choose between forward, neutral and reverse
- A gas and brake pedal with potentiometers attached to it
- Displays which show the battery voltage and engine torque
- A speedometer from a cycling shop to indicate the speed

#### V. AERODYNAMICS

In order to consume as few energy as possible, we have to keep the drag forces on the car as low as possible. To reach this goal, we designed a loop that automatically optimizes the shape of the body of the car. We chose 7 variable parameters which determine the shape and optimized them in the loop you can see in figure 4. The used software packages are Maple (to create the car and wheel surface from mathematical functions), Gambit (to create a flow volume and mesh it), Fluent (to solve the flow equations) and Optimus (to find the optimal set of parameters). All of these are connected using Java classes we wrote ourselves.

This resulted in a significantly lower drag force while increasing the overall downforce, in comparison with our original design. A summary can be found in table I. An impression of the final geometry can be seen in figures 5 and 6.



Fig. 4. Aerodynamic optimization loop

force	original	optimal	difference
drag	43.6N	38.2N	-12.4%
drag coefficient	0.173	0.1515	-12.4%
downforce overall	17.8N	30.8N	+73%
downforce front	39.2Nm	42.7Nm	+9%

TABLE I Comparison aerodynamic forces

#### VI. CONCLUSION

In our eventual design we only had one motor and no aerodynamic body around the car, because of cost reasons (see figure 2). This means we could only reach a speed of 55 km/h instead of 100 km/h, but given the circumstances this is quite normal. For the rest everything seemed to work out fine. All the driver controls worked well, the clutch engaged and disengaged when it had to, and the road-holding of the car was quite good. We did some tests in sharp turns and it stuck to its track.

One problem though: due to inaccuracy in the assembling of the car, our clutch plates were too far from each other and didn't provide enough grip. And since the assembly is quite inaccurate by design, we couldn't get this any better.

To round off, we would like to remark that this article gives only a very brief overview of our work. It was quite comprehensive and the space here is limited. More information and results can be found in our thesis.



Fig. 5. Aerodynamic body shape



Fig. 6. View from below

## Inhoudsopgave

1	Inle	iding	1
	1.1	Probleemstelling	1
	1.2	Huidige ontwikkelingen	2
	1.3	Werkwijze	5
	1.4	Aandrijving	6
	1.5	Voorontwerp	7
<b>2</b>	Frar	ne	9
	2.1	Inleiding	9
	2.2	Beschrijving	9
	2.3	Ophanging voorwiel	1
	2.4	Ophanging achterwielen	4
3	Mec	hanische aandrijflijn 1	6
	3.1	Inleiding	6
	3.2	Algemene constructieve gegevens	6
	3.3	Motoren	8
		3.3.1 Geselecteerde motor	9
		3.3.2 Snelheidseis	0
		3.3.3 Klimcapaciteiten	1
		3.3.4 Versnellingscapaciteiten $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 2$	3
	3.4	Principiële werking overbrenging	4
	3.5	Schakelbare koppeling	7
	3.6	Riemoverbrengingen	9
	3.7	Elastische koppeling 3	3
	3.8	Vrijloopkoppeling	5
	3.9	CAD tekeningen	6
	3.10	Aandrijfassen	9
	3.11	Lagers	0
	3.12	Achterwielophanging	1

	3.13	Hydra	ulisch remsysteem	42
	3.14	Stuuri	nrichting	47
	3.15	Prakti	sche realisatie	50
4	Elek	trisch	e aandrijflijn 5	53
	4.1	Inleidi	$\operatorname{ng}$	53
	4.2	Beschr	ijving	53
	4.3	Vermo	gensbatterijen	55
		4.3.1	Probleemstelling	55
		4.3.2	Energieinhoud	56
		4.3.3	Lood-accu	56
		4.3.4	Nikkel-metaalhydride	57
		4.3.5	Nikkel-cadmium	57
		4.3.6	Praktische realisatie	59
		4.3.7	Lader	62
		4.3.8	Ontlading en energierecuperatie	65
		4.3.9	Praktische realisatie en schema's	<u> </u>
	4.4	Hulpba	atterijen	73
		4.4.1	Energieinhoud	73
		4.4.2	Lader voor de hulpbatterijen	73
	4.5	DC/D	C convertor $\ldots \ldots \ldots$	32
		4.5.1	24V - 15V DC/DC convertor	32
		4.5.2	15V - 5V DC/DC convertor	32
	4.6	Micro	B Plus drive & motor	32
	4.7	Snelhe	idsdetecties	36
	4.8	Sturing	g elektromagnetische koppeling	97
	4.9	Signal	en van en naar de bestuurder	01
	4.10	Algem	ene sturing $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $10$	94
<b>5</b>	Aër	odynai	mica 11	13
	5.1	Inleidi	ng	13
		5.1.1	Wrijvingsweerstand	13
		5.1.2	Vormweerstand	15
	5.2	3D Mo	odel	18
		5.2.1	Zijaanzicht	19
		5.2.2	Bovenaanzicht	21
		5.2.3	3D-zichten	22
		5.2.4	Wielen	24
		5.2.5	Parameters	24

		5.2.6	Maple code
	5.3	Gambi	it
		5.3.1	Deel 1: Definiëren parameters & inlezen data 127
		5.3.2	Deel 2: Aanmaken vlakken & uitbreiden naar volumes 127
		5.3.3	Deel 3: Afwerken wagenmodel
		5.3.4	Deel 4: Creëren van het doorstroomde volume
		5.3.5	Deel 5: Randvoorwaarden
		5.3.6	Deel 6: Genereren rekenrooster (mesh)
		5.3.7	Resultaat
	5.4	Fluent	138
		5.4.1	Randvoorwaarden 139
		5.4.2	Instellingen
		5.4.3	Turbulentiemodellen
		5.4.4	Parallel maken van de berekeningen 143
		5.4.5	Convergentie
	5.5	Optim	us
		5.5.1	Optimalisatiestrategieën
		5.5.2	Instellingen Optimus
	5.6	Java p	rogramma's en shell scripts
		5.6.1	Runall.c
		5.6.2	runshelltemp
		5.6.3	runshell.sh
		5.6.4	Java programma's
	5.7	Result	aten
		5.7.1	Algemene aandachtspunten
		5.7.2	$1^e$ 3 Level Full Factorial op hoeken achteraan $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 153$
		5.7.3	$1^e$ Box Behnken op voorparameters
		5.7.4	$2^e$ 3 Level Full Factorial op hoeken achteraan
		5.7.5	$2^e$ Box Behnken op voorparameters
		5.7.6	$3^e$ Box Behnken op voorparameters
		5.7.7	Simulaties van het optimum met hogere <i>bultenschaal</i> 156
		5.7.8	Invloed parameters op de stroming
		5.7.9	Uiteindelijk optimum 165
_	_		
6	Bes	luit	173
	6.1	Testen	$1 \dots 173$
	6.2	Pluspu	inten
	6.3	Minpu	inten
	6.4	Verand	deringen of extra's

Bibliografie	176
Lijst van figuren	179
Lijst van tabellen	184

### Hoofdstuk 1

### Inleiding

### 1.1 Probleemstelling

De oliereserves zijn eindig. Dit betekent dat alternatieve oplossingen moeten gevonden worden voor het vele transport dat gebruik maakt van verbrandingsmotoren op fossiele brandstoffen. Eén van de mogelijkheden is het ontwikkelen van een elektrisch aangedreven tweepersoonswagen. Vele huidige personenwagens vervoeren gedurende een groot deel van de rijtijd slechts één persoon, terwijl zulke wagens veel meer plaats bieden. Dit betekent dat deze voertuigen onnodig veel gewicht vervoeren. Bovendien resulteert een grotere wagen in meer energieverlies (denk aan luchtweerstand). Zulke energieverspillingen kunnen gereduceerd worden door het gebruik van een tweepersoonswagen.

Daarnaast dient men ook oog te hebben voor het materiaalverbruik bij de productie van wagens. Dit heeft immers een belangrijke impact op het milieu. Ook hier kan de productie van tweepersoonswagens een oplossing bieden. Verder geven de veel gebruikte verbrandingsmotoren geluidsoverlast, luchtvervuiling (smog, NOx, SO2, enz...), en een versterking van het broeikaseffect. Met een elektrische wagen kunnen we deze ongewenste neveneffecten sterk reduceren. De nodige elektrische energie kan hetzij groene energie zijn, hetzij in elektriciteitscentrales geproduceerd worden waar de verwerking van mogelijke verbrandingsgassen efficiënt kan aangepakt worden. Een derde groot voordeel van de elektrische aandrijving is dat het globale rendement van zulke wagens veel hoger kan liggen dan wagens op fossiele brandstoffen.

Uiteraard is het moeilijk om het hele wagenpark hierop plots te laten overschakelen. Het is tenslotte een tweepersoonswagen, welke de vraag naar gezinswagens niet invult. Maar er is zeker een markt voor dit soort wagens, waarbij in hoofdzaak wordt gedacht aan de vele pendelaars. De toekomst voor het vele transport op onze wegen is naar onze mening te zoeken in elektrisch aangedreven voertuigen. Zoals bij veel toekomstplannen zal deze oplossing er niet plots zijn, maar zal ze geleidelijk aan meer en meer terrein winnen. Kijk maar naar de huidige ontwikkelingen in de autosector.

### 1.2 Huidige ontwikkelingen

De hybride wagens zijn niet meer uit de reclame weg te denken: Toyota Prius, Honda Civic Hybrid, Honda Insight Hybid, Mercedez-Benz M-Class HyPer, Ford Escape Hybrid, Lexus RX 400h,... Hybrides zijn strikt genomen auto's die gebruik maken van twee verschillende aandrijftechnologieën. Meestal wordt echter een auto bedoeld die behalve door een verbrandingsmotor aangedreven wordt dmv een elektromotor en een accu van aanzienlijke capaciteit. De accu wordt tijdens het rijden opgeladen door de elektromotor die als generator gaat werken. Door de bufferende werking van de accu die energieoverschotten op kan slaan en bij kan springen bij vermogenstekort, kan de verbrandingsmotor draaien bij optimaal toerental en rendement en met optimale uitstootwaarden voor milieuvervuilende stoffen. Als de accu vol is, kan de verbrandingsmotor zelfs af en toe even helemaal uitgezet worden. Moet er snel gereden of geaccelereerd worden, dan kan de accu een tijdje bijspringen. Bij afremmen kan op de motor geremd worden, die dan als generator gaat functioneren, waardoor energie in de accu terugstroomt. De hybride techniek is vooral nuttig als er tijdens het gebruik veel variatie in de snelheid is, zoals bij stadsverkeer.



Figuur 1.1: Hybride wagen

Vervolgens hebben we voertuigen die aangedreven worden door een elektrische motor, maar waar de omzetting van brandstof naar elektrische energie gebeurt in **brandstofcellen**. Deze voertuigen zijn nog niet voor de consument beschikbaar, volgens DaimlerChrysler zullen ze ten vroegste tegen 2020 op de mark komen. Brandstofcellen zijn elektrochemische toestellen die chemische energie van een doorgaande reactie direct omzetten in elektrische energie. Daarbij kunnen, anders dan bij een batterij, voortdurend nieuwe reagentia van buitenaf worden aangevoerd. De principiële opzet van een brandstofcel bestaat uit een poreuze anode en kathode met daartussen een elektrolytlaag. Een schematische opzet is getekend in de figuur op de volgende pagina.



Figuur 1.2: Brandstofcel

Er zijn betere rendementen mogelijk dan in gewone verbrandingsmotoren omdat de omzetting niet verloopt volgens een Carnot-cyclus. In de Carnot-cyclus wordt de chemische energie namelijk eerst in warmte omgezet, en pas daarna in by elektrische energie.

Als laatste hebben we dan de voertuigen die volledig elektrisch zijn, waar er dus geen brandstoffen worden aangewend voor de vermogensopwekking. De energiebron is hier een batterij van een aanzienlijke capaciteit, welke bepalend is voor de autonomie van het voertuig. Het voertuig kan pas gebruikt worden als de batterij opgeladen is, dit gebeurt meestal 's nachts door de wagen aan het elektriciteitsnet te hangen. De omzetting van elektrische energie (gelijkspanning) naar kinetische energie wordt bekomen door gebruik te maken van een elektrische gelijkstroom- of wisselstroommotor met DC/AC-convertor.

Ook van dit type zijn er recent modellen op de markt gekomen. De Venturi Fetish, een tweepersoons sportwagen, bewijst dat een elektrische auto niet traag en log is. Hiervoor is de auto uitgerust met 31 accu's, goed voor 180kW en een koppel van 220Nm, die de wagen in 5 seconden naar 100 km/h trekken en een top van 160 km/h mogelijk maken.



Figuur 1.3: Venturi Fetish

Op bijgevoegde DVD's vindt u een presentatie over de verschillen tussen alle types elektrische voertuigen, samen met alle andere gebruikte en aangemaakte bestanden. Voor de inhoudstafel ervan verwijzen we naar bijlage Q. Hier zijn trouwens ook alle afbeeldingen uit deze thesis te vinden zodat u kan inzoomen op bepaalde onderdelen.

Wij hopen met deze thesis een steentje te kunnen bijdragen aan de ontwikkeling en uitbouw van de elektrische voertuigen. We richten ons daarbij vooral op het laatste type: de volledig elektrisch aangedreven wagen. Bij het ontwerp hebben we een deel van onze inspiratie gehaald bij een Twike, waarvan u hiernaast een afbeelding ziet. Dit zijn tweepersoons autootjes die zeer klein en licht zijn. Hun ophanging bestaat uit 3 wielen. (1 wiel vooraan) Het is zeker niet de bedoeling om een kopij van een



Figuur 1.4: Twike

Twike te maken, we willen juist een alternatieve aandrijving en ophanging uit te werken. Ook de aërodynamica zal volledig geoptimaliseerd worden via het programma OPTIMUS, met de bedoeling een zo laag mogelijke luchtweerstand te bekomen. Meer daarover kan u lezen in hoofdstuk 5.

Voor de volledigheid geven we de technische specificaties van een Twike:

Length x Width x Height	2650 x 1200x 1200 mm		
Unloaded Weight	220-250 kg, including battery		
Maximum speed	85  km/h		
Energy Consumption	4-6 kwh per 100 km		
Steering	control tiller with adjustable damping, turning circle radius 3.5m		
Chassis	aluminum frame construction (space frame with roll bar)		
Electric Drive	AC synchronous motor, rated 5 kWh		
Battery	Ni-Cd, 2 kWh (2 battery blocks) or 3 kWh (3 battery blocks)		
Battery Charger	2  kW (charge time approx. 2 hours)		
Range	40-80 km (depending upon driving style and battery)		

Tabel 1.1: Technische specificaties Twike

The designers chose a 336 Volt AC Synchronous propulsion system, powered by 2 (or optionally 3) battery modules, each consisting of 280 C-size NiCd cells. Each module is further broken down into seven sections, and each of these has its own battery monitoring

electronics, sensing voltage, current in and out, temperature, and state of charge. A central processing unit collects information from each section of each module, and software processes the information for display to the pilot and for controlling performance and charging characteristics. An inverter takes the 336 Volts of stored DC power and converts it to AC for the motor. AC motors easily lend themselves to regenerative braking.

De laatste jaren zien we steeds meer de opkomst van wielmotoren. Dit zijn direct drive motoren, die rechtstreeks op de wielas gemonteerd worden. Meestal nemen ze de plaats in van het remsysteem, en wordt er voor dit systeem een alternatief gezocht. Een inbouwvoorbeeld van een wielmotor vindt u in figuur 1.5.



(a) Inbouw op een kleine wagen

(b) Detail van de wielmotor

Figuur 1.5: Wielmotoren

### 1.3 Werkwijze

Bij aanvang van de thesis hebben we de volgende eis tot doelstelling genomen: ontwerp een elektrische éénpersoonswagen<sup>1</sup> met een zo groot mogelijke autonomie & snelheid en hou rekening met de low budget eis. (de vakgroep moet ons nog kunnen financieren) Dit laatste heeft vooral tot gevolg dat we aangewezen zijn op standaard industrie-onderdelen, wat op zijn beurt betekent dat we onmogelijk gebruik kunnen maken van een wielmotor. Dit omdat dit systeem nog zeer duur is. Om een idee te geven: één wielmotor voor ons ontwerp zou op €4408.27 komen en één drive kost €3069.61. Gegeven dat we er van

 $<sup>^{1}</sup>$ Later is er beslist dat, gezien de breedte die we minimaal nodig hebben, we de ruimte in de wagen beter konden benutten door er een tweepersoonswagen van te maken.

beiden twee nodig hebben, zou de totale kostprijs van de aandrijving alleen  $\in 14955.76$ bedragen. Het is dan ook duidelijk dat dit geen optie is.

Het ontwerp omvat voornamelijk het optimaliseren van het elektrisch aandrijfsysteem en de aërodynamica van de wagen. Op elektrisch vlak onderscheiden we meerdere delen. Onder andere de keuze van de batterijen (spanning, gewicht, ...) en motor (AC/DC, vermogen, ...) met inbegrip van de vermogenselektronica. Een vierkwadrantswerking van de convertor is nodig om remenergie te recupereren en de wagen achteruit te laten rijden. Op aërodynamisch vlak moet een gestroomlijnde carrosserie uitgetekend worden. Het ontwerp wordt geoptimaliseerd met CFD pakketten op computer. Op mechanisch vlak tenslotte moet een chassis ontworpen worden waarbij we afstappen van traditionele ontwerpen van auto's. We willen hierbij een perfecte combinatie nastreven van elektrische en mechanische oplossingen, en dus kiezen we voor een volledig nieuw ontwerp dat optimaal rekening houdt met de bijzondere eigenschappen van de elektrische aandrijving. Zo kan bv de indeling van de auto anders zijn omdat de elektromotor weinig ruimte inneemt.

### 1.4 Aandrijving

Het aandrijfsysteem bestaat uit de volgende elementen: oplaadsysteem, batterijen, convertor, elektromotor en overbrenging op de wielen. Hierbij is er met opzet niet gesproken over de schakelkast, omdat dit in onze wagen anders zal opgelost worden. Vroeger werd veel gebruik gemaakt van een DC-motor aangezien dit type motor een eenvoudige stuur-Maar deze motor heeft ing heeft. twee grote nadelen tov een BLDCmotor (Brushless DC motor), hij heeft een lager rendement en hogere onderhoudskosten. Daarom hebben wij geopteerd om een BLDCmotor te gebruiken in ons ontwerp. Dit type motor heeft een koppel-



Figuur 1.6: Voorbeeld van een koppelcurve voor een BLDC

snelheidskarakteristiek zoals als op de figuur hiernaast. We kunnen dit sterk vergelijken met de koppelcurve van een gewone DC-motor.

### 1.5 Voorontwerp

Voordat we aan de eerste berekeningen kunnen beginnen, moeten we eerst tot een algemene vorm van de wagen komen.

We wensen dus een wagen te ontwerpen voor 2 personen. De positie van die 2 personen is vrij te kiezen, men zou ze bv. achter elkaar kunnen plaatsen, zoals men in het ontwerp van Cree-Sam heeft gedaan:



Figuur 1.7: Cree-Sam

Wij hebben er echter voor gekozen om onze wielen binnen de carrosserie te plaatsen, zodat de auto een gestroomlijnde vorm krijgt.<sup>2</sup> Het gevolg hiervan is dat we binnenin meer ruimte in de breedte krijgen, waardoor we snel tot het besluit waren gekomen om de twee personen naast elkaar te plaatsen. Bovendien heeft een iets bredere wielbasis ook zijn voordelen op vlak van stabiliteit van de wagen. Dit leek ons dus de beste oplossing te zijn. De wagen zal dan ongeveer een uiterste breedte hebben van 110cm.

Na deze beslissing dienen we nog te bepalen welke as we stuurbaar maken. Het is namelijk mogelijk om vooraan of achteraan te sturen, waarbij dit laatste het systeem van een vorkheftruck is. Hier is de keuze snel gemaakt: bij het ingaan van een bocht met sturing achteraan zal het achterste deel van de wagen weg worden gestuurd van de richting waar men naar toe wil en bij hoge snelheden werkt dit onstabiliteit in de hand. Daarom werd besloten om het sturen vooraan te laten plaatsvinden.

Een bijkomende vrijheid die we nu nog hebben is het aantal wielen. Men zou 3 of 4 wielen kunnen nemen. Indien men 3 wielen neemt, kan men één wiel vooraan centraal

 $<sup>^{2}</sup>$ Achteraf bekeken stonden onze wielen iets te ver naar buiten, wat eigenlijk kon opgelost worden door een andere plaatsing van de motoren. Hiervoor verwijzen we naar hoofdstuk 6.

stellen, zodat de stuurinrichting redelijk eenvoudig wordt. We hebben dus voor 3 wielen gekozen. De aandrijving gebeurt achteraan, aangezien we daar twee wielen hebben om op aan te drijven én de beste grip bij het accelereren (zie bijlage F). Het resultaat is dat we uiteindelijk dezelfde topologie verkrijgen van de eerder besproken Twike.

### Hoofdstuk 2

### Frame

### 2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk is eerder beschrijvend van aard. We geven enkel de belangrijkste punten van het frame-design weer. Het hele frame is niet berekend op sterkte, zodat er voldoende tijd overbleef om andere, belangrijker onderdelen uit te rekenen. Het ontwerp van het frame is parallel gegaan aan de uitwerking ervan. Er is voor een dergelijke strategie gekozen omdat deze meestal op een zo kort mogelijke tijd toch een aanvaardbaar resultaat aflevert.

### 2.2 Beschrijving

Om het frame te ontwikkelen hebben we een algemene structuur en vorm van de wagen nodig. Als we de resultaten uit het voorontwerp samenvoegen in één figuur, bekomen we:



Figuur 2.1: Algemene indeling wagen

We kunnen drie grote delen in de wagen onderscheiden:

- het compartiment dat het voorwiel bevat
- de ruimte voor de personen
- het compartiment voor de aandrijving (elektrisch en mechanisch)

De afmetingen op de figuur zijn richtwaarden, die we aangenomen hebben bij het begin van het ontwerp. Verdere details van de vorm van de carrosserie komen aan bod bij de bespreking van de aërodynamica van de wagen.

Om een nog beter beeld te kunnen geven aan een buitenstaander, hebben we ook een lego-model gebouwd:



Figuur 2.2: Lego-model

We hebben besloten om net zoals in de Twike voor een buizenframe te kiezen. Dit is misschien niet de meest ideale manier om maximale benuttiging te krijgen van het beschikbare materiaal in het frame, maar het is wel redelijk eenvoudig zelf te berekenen en te construeren, binnen de korte tijd die we beschikbaar hebben. Als materiaal hebben we staal genomen in plaats van aluminium. Aluminium heeft hier weinig voordelen, omdat het 3 keer lichter is dan staal, maar ook ongeveer 3 keer minder sterk. Bovendien heeft aluminium geen endurance limiet, zodat het veel gevoeliger is voor vermoeiing, en vergt het meer aandacht en precisie bij het lassen. Aluminium heeft slechts een concurrentieel voordeel indien we afstappen van het idee van een buizenframe en we meer neigen naar een frame zoals in de huidige wagens, waar het zijn voordeel haalt wegens de gemakkelijke bewerkbaarheid en vormgeving.

Zoals elke auto, dient ook deze wagen enige veiligheid te garanderen bij een aanrijding. Daarom zal er een valbeugel voorzien worden. Op de auto kunnen we natuurlijk wel geen crashtests uitvoeren, waardoor veiligheid in zekere zin een vraagteken blijft.

### 2.3 Ophanging voorwiel

Laten we beginnen met het eenvoudigste, namelijk het voorwiel. Als je naar de afmetingen en het gewicht van de wagen kijkt, valt al snel op dat het om een redelijk kleine auto gaat. Wij hebben dan ook vlug de link tussen onze auto en een moto gelegd. Een moto heeft net zoals onze wagen één voorwiel dat stuurt. De vraag die wij ons dan stelden was: is het mogelijk om een voorwiel met ophanging van een moto over te bouwen op onze wagen? Indien dit mogelijk zou zijn, zouden we veel tijd en studiewerk uitsparen. Maar zoals steeds stuit je op een probleem: om een zo laag mogelijke wagen te verkrijgen moet de inbouwhoogte van het wiel met ophanging zeer laag zijn.<sup>1</sup> Bij de meeste moto's heb je echter een geveerde voorvork zoals op de figuur hiernaast als ophanging, waarvan de inbouwhoogte gemakkelijk het dubbele van de diameter van het voorwiel



Figuur 2.3: Standaard geveerde voorvork

bedraagt. Het is dan ook direct duidelijk dat dit geen optie is, en dat we naar een alternatief op zoek moeten gaan.

Na wat zoekwerk op internet en bezoeken bij moto-sloophandels zijn we op het volgende type gestuit:



Figuur 2.4: Yamaha GTS 1000

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Zie figuur 2.1 onderaan: de voorkant van de wagen mag niet te hoog worden

GTS1000(A) TECHNICAL SPECIFICATIONS				
ENGINE		CHASSIS		
Туре	Liquid-cooled, 4-stroke, DOHC	Overall length	2170 mm	
Cylinder arrangement	Forward inclined Parallel	Overall width	700 mm	
	4-Cylinder	Overall height	1320 mm	
	Displacement 1002 cc	Wheelbase	1495 mm	
Bore and stroke	75.5 x 56.0 mm	Min. ground clearance	135 mm	
Compression ratio	10.8 :1	Dry weight	246/251 kg	
Max. power (DIN)	100.6 Ps (74 kW)	Frame type	Double Cradle	
	@ 9000 rpm	Caster angle	24'	
(ISO)	96.6 PS (71 kW)	Trail	100 mm	
	@ 9000 rpm	Fuel tank capacity	20 Litre	
Max. torque	10. 8 kg.m (1 05.8 Nm)	Front suspension	Swing Axle	
	@ 6500 rpm	Front shock absorber	Coil Spring/Oil Damper	
Starting system	Electric	Rear suspension	Swingarm (Link Suspension)	
lubrication	Wet sump	Rear shock absorber	coil Spring/Oil damper	
Primary reduction ratio	68/41 (1.659)	Pivot shaft bearing-type	Needle Bearing	
Secondary reduction ratio	47/17 (2.765)	Front wheel	MT3.50 x 17, Aluminum	
Clutch type Wet.	Multiple-disc	Wheel travel	116mm	
Transmission	5-Speed	Rear wheel	MT5.50 x 17,Aluminum	
Gear ratio 1 st	36/14 (2.571)	wheel travel	130 mm	
Gear ratio 2nd	32/1 8 (1.778)	Front tyre size	130/60 ZR1 7	
Gear ratio 3rd	29/21 (1.381)	Rear tyre size	170/60 ZR1 7	
Gear ratio 4th	27/23 (1.174)	Front brake	Single Disc, 320 mm diam.	
Gear ratio 5th	28/27 (1.037)	Rear brake	Single Disc, 267 mm diam.	
Ignition sytem	T.C.I. (digital)			
Final transmission	Chain drive			

Figuur 2.5: Technische specificaties GTS 1000

Dit type moto is de enige in zijn soort, uniek wegens zijn voorophanging. Die bestaat uit een parallellogram-systeem, zodat de totale inbouwhoogte beperkt is tot iets meer dan de hoogte van het voorwiel. Het totale gewicht van deze moto (incl. bestuurder) bedraagt  $\pm 340$ kg. Als we dus onderstellen dat  $1/3^e$  van het totale gewicht van deze moto op het voorwiel komt (onderschatting), dan mag in ons ontwerp ook maar 110kg op het voorwiel rusten. Aan deze eis zullen we kunnen voldoen omdat alle 'zware onderdelen' op de achteras komen te zitten. Ook het zwaartepunt van de te vervoeren personen ligt redelijk ver naar achter. Deze ophanging zou dus kunnen voldoen in ons ontwerp. Toevallig hebben we het frame van zo een moto kunnen bemachtigen, waarvan u op de volgende pagina twee foto's vindt.



Figuur 2.6: Frame van een GTS 1000



Figuur 2.7: Ophanging van een GTS 1000

Vervolgens hebben we de voorste ophanging losgemaakt (doorgeslepen) van zijn frame. Na wat slijp- en laswerk zijn we tot het volgende begin van een frame gekomen:



Figuur 2.8: Eerste beeld van ons frame

De hoogte van het frame tov de grond is instelbaar door de veer aan te passen.

### 2.4 Ophanging achterwielen

We gebruiken een elektromotor als aandrijving. Men zou hiervoor één grote motor kunnen nemen met een differentieel, maar men kan ook opteren om twee kleinere motoren te gebruiken (één linkse en één rechtse) en géén differentieel. De differentieelwerking gebeurt dan elektrisch. Het voordeel hierbij is dat we steeds twee onafhankelijke aandrijvingen gebruiken: als er één uitvalt heb je nog steeds een andere in redundantie. We zijn om kostprijsredenen verplicht om standaard onderdelen te gebruiken, dus kiezen we een motor die veelvuldig in de industrie wordt gebruikt.

Het grote probleem bij de integratie in een elektrische auto is dat deze motor een redelijk hoog toerental heeft (3000tpm) en bijgevolg een laag koppel. Dit heeft tot gevolg dat de motor niet rechtstreeks op het wiel kan aangesloten worden, maar dat er een vertragende overbrenging nodig is tussen motor en wiel. We moeten er ook voor zorgen dat de motor niet meetrilt met het wiel. Dit om de motor te beschermen tegen trillingen en te vermijden dat de trillende massa (wiel+motor+overbrenging) te groot zou worden. Dat laatste heeft erg negatieve gevolgen voor de wegligging. Natuurlijk mag ook de compactheid van het hele systeem niet uit het oog worden verloren. Hoe kleiner het geprojecteerd frontaal oppervlak van de wagen is, hoe lager de luchtweerstand zal zijn.

Om de ophanging achteraan te verwezenlijken hebben we nu verschillende mogelijkheden. We kunnen te werk gaan zoals bij een klassieke ophanging van een wagen of door gebruik te maken van bladveren of naar analogie van de ophanging van kleine aanhangwagens (<500 kg) of zoals bij een moto. Een overzicht vindt u in deze figuur:



**Figuur 2.9:** a: conventionele ophanging; b: bladveren; c: rubbergeveerde torsieas; d: dubbele draagarm ophanging<sup>[31]</sup>

We bespreken de voor- en nadelen toegepast op onze situatie. Bij de conventionele ophanging en bladveren hebben we steeds een cardanas nodig, wat de compactheid van het hele systeem sterk tegenwerkt. Bij de rubbergeveerde torsieas en de dubbbele

draagarm ophanging kunnen we het gebruik van een cardanas uitsluiten, door gebruik te maken van een riemoverbrenging. Die riemoverbrenging zorgt dan ook voor de vertragende overbrenging die nodig was tussen motor en wiel. Een schematische voorstelling daarvan vindt u in de figuur hiernaast.

De ophanging bestaat uit een horizontale stang, die tov het frame kan verdraaien door mid-



Figuur 2.10: Aandrijflijn en ophanging achteraan

del van een scharnier. Dit scharnier is tevens het centrum van de motoras en de drijvende riemschijf van de riemoverbrenging. Het hele systeem lijkt een beetje op het principe dat DAF heeft gebruikt in de jaren '60 in de achterwielaandrijving van de DAF30.



(a) De wagen zelf

(b) De Variomatic a andrijving

Figuur 2.11: De DAF 30 uit 1961

Het concept ligt nu vast, maar dit kan nog niet uitgewerkt worden omdat het sterk gerelateerd is aan de elektrische motor en de aandrijflijn. Hier komen we meer in detail op terug in het volgende hoofdstuk.

### Hoofdstuk 3

### Mechanische aandrijflijn

### 3.1 Inleiding

In dit deel wordt de mechanische aandrijflijn volledig ontworpen, uitgelegd en berekend. Dit deel maakt de overgang tussen het frame en de elektrische aandrijflijn. Vele afmetingen die gebruikt worden in de berekeningen zijn bekomen uit het 3D design van de aandrijving. Voor deze afmetingen verwijzen we dus naar de elektronische versie van onze thesis op DVD, waar u het 3D ontwerp terug kan vinden in Solidworks formaat.

### 3.2 Algemene constructieve gegevens

Vooraleer we enige berekening kunnen uitvoeren om de aandrijving te dimensioneren, geven we enkele constructief bepaalde gegevens van de wagen.

Aangezien we een redelijk kleine wagen gaan bouwen, naar analogie met de Twike, nemen we 90/90-18 banden achteraan. Dit zijn banden afkomstig van een lichte motorfiets. (hiernaast ziet u een afbeelding) De buitendiameter van hun loopvlak is 61cm en een goede schatting van de rolweerstandscoëfficiënt van zulke wielen is  $f_{\rm ro} = 0.009$ . Ter info: een gewone autoband heeft gemiddeld 0.012, een goede fietsband heeft gemiddeld 0.004.



Figuur 3.1: Achterband

De luchtweerstandscoëfficiënt van de wagen nemen we in eerste instantie op  $C_d = 0.25$ , maar deze dient dus nog geoptimaliseerd worden (<0.20 moet zeker haalbaar zijn). We schatten de oppervlakte van de wagen loodrecht op de rijrichting, zowel breedte als hoogte, op 110cm. De gecorrigeerde<sup>1</sup> frontale oppervlakte is dan:

$$F_{opp} = 0.7 \cdot 1.1 \cdot 1.1 = 0.847 \tag{3.1}$$

Deze wagen zal voornamelijk voor stadsverkeer worden gebruikt, waardoor zijn maximale snelheid niet zeer hoog moet zijn. We hebben als snelheid 100km/h vooropgesteld, zodat ook de mogelijkheid open blijft om vlot met het verkeer mee te kunnen op de snelweg.

Op welke hellingswaarde moeten we de wagen voorzien? Om hier een idee van te krijgen zijn we op zoek gegaan naar de meest steile hellingen van Vlaanderen. De resultaten zijn samengevat in onderstaande grafiek.



### Hellingspercentages van de meeste hellingen in vlaanderen

Figuur 3.2: Hellingen in Vlaanderen

We zullen de wagen niet designen op de grootste helling, maar eerder op een aanvaardbaar hellingspercentage van 12%. Bovendien zullen de motoren toch kortstondig overbelast kunnen worden, waardoor gedurende een korte periode grotere hellingen kunnen genomen worden. De snelheid waarbij de wagen deze 12% moet kunnen bestijgen, nemen we op 10km/h.

Het totale gewicht van het ontwerp is ook niet onbelangrijk. We beginnen met een schatting van de onderdelen die hier een belangrijke rol zullen in spelen:

 $<sup>^{1}</sup>$ Correctiefactor 0.7 omdat de wagen geen rechthoek is en het frontaal oppervlak dus wat kleiner is

- Gewicht bestuurders: 2 \* 80 kg
- Massa frame excl. elektrische onderdelen: 120kg
- Massa batterij: 80kg
- Massa motoren: 20kg
- Massa convertors: 4kg

De totale maximale geschatte massa komt neer op: 384kg

We merken onmiddellijk op dat de massa van het frame een groot deel voor zich neemt. Dit gewicht zou zeker nog een stuk gereduceerd kunnen worden indien het hele frame uitgerekend wordt op sterkte, maar dit is al een thesis op zich. Dus hebben wij het frame gebouwd uitgaande van enkele schattingen 'met de natte vinger'. Waarschijnlijk hebben we op heel wat plaatsen een te grote veiligheidsfactor, maar beter dat dan achteraf breuk te moeten vaststellen.

### 3.3 Motoren

Bij de selectie van de motoren dienden we met enkele zaken rekening te houden:

- vermogen
- koppel
- spanning van de motor
- sturing van de motor (convertor)
- spanning van de convertor (liefst DC-spanning wegens voeding uit batterijen)
- flexibiliteit van de convertor
- afmetingen en gewicht van de motor
- kostprijs van het geheel

Zoals u merkt hangt deze selectie eigenlijk van de hele wagen af. We moeten rekening houden met de elektrische kant en de mechanische kant. Maar geen van beiden staat al op punt, want ze hangen op hun beurt af van het type motor. Daarom is deze selectie niet stap voor stap kunnen verlopen, maar heeft deze eerder een iteratieve weg ondergaan. We schrijven deze iteratieve wijze hier niet volledig neer. We vinden het nuttiger om eerst de gegevens van de geselecteerde motor te geven, en daarna na te gaan of deze motor aan al onze eisen voldoet.

### 3.3.1 Geselecteerde motor

We zijn dus op zoek gegaan naar een bedrijf dat BLDC motoren in zijn productgamma heeft. Bovendien dienden deze motoren aangestuurd te worden door een convertor die rechtstreeks gevoed wordt met gelijkspanning. Anders moesten we nog een extra DC/AC convertor voorzien die alleen maar meer verlies met zich meebrengt. Dit zou er namelijk voor zorgen dat de DC spanning eerst in AC omgezet wordt, dan inwendig in de convertor weer in DC, en dan opnieuw in AC met een andere frequentie. Dit is natuurlijk totaal nutteloos en moeten we zeker vermijden.

Het resultaat van ons zoekwerk was AXOR (www.axorindustries.com). Dit is een Italiaans bedrijf dat gespecialiseerd is in servodrives en servomotoren. AXOR heeft een reeks BLDC servomotoren genaamd SuperSax 1000, die aangestuurd kunnen worden door een gelijkspanningsgevoede (60VDC  $\rightarrow$  200VDC) convertor (de Micro B plus). De motor is IP54 uitgevoerd. Voor de datasheets hiervan verwijzen we naar bijlage A. Hier is het voldoende op te merken dat we de SSAX 1140S hebben geselecteerd, zijnde de kortste motor van de 1140 reeks. Deze korte inbouwlengte is zéér belangrijk, omdat de wagen beperkt is in breedte en de motoren beiden dwars komen te liggen in elkaars verlengde. Bovendien is deze motor nog net aan te sturen met de Micro B plus, bij een drive spanning van 220 / 380VAC. Een figuur en koppelcurve van de gekozen motor vindt u hieronder.



(a) SuperSax 1000 reeks van AXOR

(b) Koppelcurve SSAX 1140S

Figuur 3.3: SuperSax motoren

Om straks de berekeningen vlot te laten verlopen, vatten we de nominale koppelcurve van de motor samen in één formule:

$$M_{continu}(\omega) = 13.5 - \frac{(13.5 - 11.45)\,60\,\omega}{3000 \cdot 2\pi} \tag{3.2}$$

### 3.3.2 Snelheidseis

De trekkracht die de motoren moeten leveren om de wagen aan een continue snelheid v([v]=m/s) op een windstille vlakke weg te laten rijden, wordt gegeven door de volgende formule:

$$F_{trek} = m_{tot} f_{ro} g + \frac{\rho_{lucht} C_w F_{opp} v^2}{2}$$
(3.3a)

Hierin is de eerste term een maat voor de rolweerstand van de banden, en geeft de tweede term een benadering van de luchtweerstandskracht. Het nodige vermogen van de motoren is dan:

$$P_{nuttig} = F_{trek} v = m_{tot} f_{ro} g v + \frac{\rho_{lucht} C_w F_{opp} v^3}{2}$$
(3.3b)

Indien we alle gegevens invullen:

$$F_{trek} = 136N \& P_{nuttig} = 3780W$$
 (3.3c)

We hebben dus een nuttig vermogen nodig van ongeveer 3.8kW. De elektrische motoren hebben echter elk een nominaal vermogen van 3.6kW, waardoor het totale geïnstalleerde vermogen 7.2kW bedraagt.

De maximale snelheid, het maximale toerental van de motor en de wieldiameter zijn gekend, hieruit kunnen we dan de overbrengingsverhouding bepalen die nodig is tussen een motor en een wiel.

$$i_{riem_2} = \frac{n_{motor} \,\pi \, d_{wiel}}{60 \, v_{max}} = \frac{3000\pi \cdot 0.61}{60 \cdot \frac{100}{3.6}} = 3.45 \tag{3.4}$$

Het koppel dat op een wiel beschikbaar is bij maximale snelheid is dan:

$$M_{wiel} = M_{continu} \left(3000 \cdot \frac{2\pi}{60}\right) i_{riem_2} = 11.45 \cdot 3.45 = 39.5Nm$$
(3.5)

Hieruit volgt de te ontwikkelen trekkracht op de 2 wielen:

$$F_{trekmotor} = \frac{2M_{wiel}}{d_{wiel}/2} = \frac{2 \cdot 39.5}{0.61/2} = 259N > 136N \tag{3.6}$$

We zien dus dat de motoren gemakkelijk de trekkracht kunnen leveren. Aan de snelheidseis is dus ruim voldaan.

### 3.3.3 Klimcapaciteiten

Opnieuw vertrekken we van een formule die de trekkracht bepaalt die de motoren dienen te overwinnen, maar nu moet er een helling in rekening worden genomen. Let er hierbij op dat  $\alpha$  de hoek in radialen voorstelt tussen de helling en de horizontale. Voor een helling van 12% is deze hoek 0.1194 rad. De snelheid waarbij de wagen deze helling moet nemen is 10km/h, dit komt overeen met een toerental op de motor van 87tpm.

$$F_{trek} = m_{tot} g f_{ro} \cos(\alpha) + \frac{\rho_{lucht} C_w F_{opp} v^2}{2} + m_{tot} g \sin(\alpha)$$
(3.7a)

De laatste term slaat op de kracht die nodig is om de wagen de helling op te trekken. Het nodige vermogen:

$$P_{nuttig} = F_{trek} v = m_{tot} g f_{ro} \cos(\alpha) v + \frac{\rho_{lucht} C_w F_{opp} v^3}{2} + m_{tot} g \sin(\alpha) v \qquad (3.7b)$$

$$F_{trek} = 484N \& P_{nuttig} = 1343W$$
 (3.7c)

We zien dus duidelijk dat het vermogen geen beperkende factor zal zijn om de helling te kunnen bestijgen. We controleren nu de trekkracht:

$$F_{trekmotor} = \frac{2M_{continu}(87 \cdot 2\pi/60)i_{riem_2}}{d_{wiel}/2} = \frac{2 \cdot 13.44 \cdot 3.45}{0.61/2} = 304N > 259N$$
(3.8)

De motoren kunnen de vereiste trekkracht niet leveren, we dienen dus op zoek te gaan naar een oplossing.

We zetten een paar mogelijkheden op een rij:

- Een grotere motor, zodat we een hoger startkoppel hebben
- De overbrengingsverhouding aanpassen
- Werken met twee overbrengingen per motor

Die hebben elk hun voor- en nadelen:

1. Een grotere motor

#### voordeel

• eenvoudig systeem

### nadeel

- grotere aankoopkost motor
- grotere aankoopkost convertor

- motor wordt nooit op zijn maximaal vermogen belast
- motor wordt veel gebruikt in een werkingsgebied van laag rendement
- groter gewicht
- 2. De overbrengingsverhouding aanpassen

### voordeel

- eenvoudig systeem
- laag gewicht

### nadeel

- de eis voor maximale snelheid wordt niet meer gehaald
- 3. Werken met twee overbrengingen per motor

### voordeel

- alle mogelijke hellingen zijn haalbaar (bepaald door eerste overbrenging)
- de eis voor maximale snelheid haalbaar (bepaald door tweede overbrenging)
- motor wordt in het totale snelheidsbereik tweemaal optimaal belast (maximaal continu vermogen / maximaal rendement)
- betere benadering van de ideale koppelcurve (vermogen = cste)
- mogelijkheid tot onderzoek in deze thesis

### nadeel

- complexiteit
- kostprijs

Na overleg hebben we besloten dat de voordelen bij het werken met twee overbrengingen de overhand halen. Hoe dit technisch opgelost wordt zal verderop nog uitgewerkt worden. Het enige dat we nu dienen te weten is welke overbrengingsverhouding we nemen in de tweede overbrenging.

We rekenen nu omgekeerd, we vertrekken van de kracht die nodig is om de helling te kunnen nemen en halen hier dan de nodige overbrengingsverhouding uit.

$$2M_{continu}\left(\frac{2\,i_{riem_1}\,v}{d_{wiel}}\right)\,i_{riem_1} = \frac{F_{trek}\,d_{wiel}}{2} \tag{3.9a}$$

$$2M_{continu}\left(\frac{2\,i_{riem_1}\,\frac{10}{3.6}}{0.61}\right)i_{riem_1} = 484N \cdot 0.61/2\tag{3.9b}$$

Als we Maple op deze vergelijking loslaten vinden we:

$$i_{riem_1} = 6 \tag{3.10}$$

We kunnen dus aan de eis voldoen dmv twee verschillende overbrengingen per motor.

### 3.3.4 Versnellingscapaciteiten

De tijd die de wagen nodig heeft om te versnellen vanuit stilstand tot een bepaalde snelheid, zal grotendeels afhangen van het vermogen dat beschikbaar is uit de motoren. Om vlot met het verkeer mee te kunnen rijden in de stad, moet de wagen toch binnen een redelijke tijd op snelheid kunnen komen.

Om dit na te gaan stellen we eerst een equivalente koppelcurve op, gerefereerd op de wielas.

$$M_{wiel}(\Omega) = \begin{cases} M_{continu}(\Omega) \, i_{riem_1} \, , \, 0 < \Omega < \omega_{motormax}/i_{riem_1} \\ M_{continu}(\Omega) \, i_{riem_2} \, , \, \omega_{motormax}/i_{riem_1} < \Omega < \omega_{motormax}/i_{riem_2} \end{cases}$$
(3.11)

In grafiekvorm geeft dit:



Figuur 3.4: Koppelcurve gerefereerd tov de wielas

De kracht die op elk moment beschikbaar is om de wagen te versnellen is gelijk aan het verschil tussen de maximale kracht die de motoren kunnen leveren en de kracht die nodig is om de wagen tegen zijn actuele snelheid te laten rijden. In formulevorm:

$$F_{versnelling}(v) = 2 \frac{2 M_{wiel} \left(\frac{2v}{d_{wiel}}\right)}{d_{wiel}} - F_{trek}(v)$$
(3.12a)

Schrijven we nu de tweede wet van Newton uit, toegepast op deze situatie:

$$F_{versnelling}(v) = m_{tot} \frac{d v(t)}{d t} , \quad v(0) = 0$$
(3.12b)

We merken op dat we de inertie van de wielen, aandrijving en motor verwaarloosd hebben tov de massa van de wagen. Het resultaat van deze vergelijking is hieronder links gegeven. We bereiken de snelheid van 50km/h na ongeveer 12s, dit is niet erg snel. In principe is de motor wel kortstondig overbelastbaar maar dit is té kort om nuttig te zijn voor ons. We kunnen wél vermelden dat deze berekening gebaseerd is op de aanwezigheid van 2 personen in de wagen, en er meestal maar één persoon in zal zitten, en dat de in rekening gebrachte luchtweerstand waarschijnlijk lager zal uitvallen. Daardoor zal de wagen waarschijnlijk iets sneller optrekken. (zie figuur rechts voor het verschil 2 personen / 1 persoon)



Figuur 3.5: Snelheid ifv de tijd, a: 2 personen; b: 1 persoon

### 3.4 Principiële werking overbrenging

In dit deel zullen we meer uitleg geven over de werking en opbouw van het overbrengingsmechanisme. Uit het vorige deel weten we dat we twee verschillende overbrengingsverhoudingen moeten kunnen realiseren. Bovendien zijn we ook al tot het besluit gekomen om de overbrenging via riemen te realiseren. Hoe lossen we dit probleem op? We zijn eerst op zoek gegaan naar bestaand soortgelijk systeem, maar al snel bleek dat dit een hopeloze zoektocht was. We waren dus aangewezen op onze inventiviteit...

### 1. Eerste oplossing

Om de twee overbrengingsverhoudingen te realiseren, gebruiken we twee motoren per wiel (4 motoren in totaal), die als volgt gekoppeld zijn:



**Figuur 3.6:** Overbrenging: 1<sup>e</sup> oplossing

Schijf 2.1 zit vast gekoppeld op motor 2 en drijft riem 2 aan. Schijf 1.1 zit vast gekoppeld op motor 1 en drijft riem 1 aan. Maar schijf 1.2 zit met een vrijloop gekoppeld aan schijf 2.1. De werking is als volgt. De wagen staat stil en vertrekt voorwaarts, motor 1 en motor 2 drijven aan met een koppelsturing op beiden. Motor 1 zal wel sneller draaien dan motor 2. Van zodra motor 1 zijn maximaal toerental heeft bereikt (en de wagen een bepaalde snelheid heeft behaald), zal de vrijloop werking in actie treden en wordt motor 1 ontkoppeld. Motor 1 dient nu niet meer aangedreven te worden. De wagen rijdt nu volledig op motor 2. Met deze opstelling hebben we dus twee overbrengingsverhoudingen gerealiseerd. Maar dit systeem heeft wel redelijk wat nadelen:

- 4 motoren en convertors nodig  $\rightarrow$  zeer duur
- bij hoge snelheid worden er maar 2 van de 4 motoren gebruikt
- geen compacte oplossing
- achteruit rijden & elektrisch remmen enkel mogelijk in de hoogste overbrenging

Door deze grote nadelen hebben we deze oplossing een beetje verfijnd.
### 2. Tweede oplossing

De 2de motor kan geëlimineerd worden dmv een schakelbare koppeling.



Figuur 3.7: Overbrenging:  $2^e$  oplossing

Overbrenging 1 bestaat uit: schijf 1 / riem 1 / schijf 3 Overbrenging 2 bestaat uit: schijf 2 / riem 2 / schijf 4

Schijf 1 zit vast gekoppeld op de motoras en schijf 3 zit via een vrijloop gekoppeld op de wielas. Schijf 2 wordt gekoppeld met de motoras via een schakelbare koppeling. Schijf 4 wordt vast gemonteerd op de wielas. De werking van het geheel is als volgt: als de wagen stilstaat en voorwaarts vertrekt, zal de motor via schijf 1 en schijf 3 de wielas aandrijven. De vrijloop op schijf 3 staat nu geblokkeerd. Als de wagen een bepaalde snelheid bereikt heeft (bij maximaal toerental van de motor) zal de schakelbare koppeling ingeschakeld worden. Hierdoor verkrijgen we dat de overbrenging 2 de taak heeft over genomen en de vrijloop in vrijloopwerking treedt. De voordelen van deze oplossing zijn:

- goedkopere oplossing: één koppeling in plaats van een motor met convertor
- compactheid van het geheel

We hebben echter nog steeds het nadeel dat we enkel achteruit kunnen rijden en elektrisch remmen in de hoogste overbrenging.

### 3.5 Schakelbare koppeling

De eisen die we aan de schakelbare koppeling stellen zijn:

- zachte schakelovergang  $\rightarrow$  mogelijkheid tot korstondige slip in de koppeling
- elektrisch inschakelbaar, zodat we volledige vrijheid hebben qua sturing van het hele aandrijfsysteem
- compactheid

De enige soort koppeling die hieraan voldoet is een elektromagnetische schijvenkoppeling.

Het maximale koppel dat de koppeling ooit dient over te dragen is het maximale koppel dat de motor kan leveren. (aangezien de koppeling op de motoras komt en dus voor de overbrenging) Als we de koppeling op het piekkoppel van de motor moeten dimensioneren, dan zou ze overbemeten zijn. Bovendien is dit piekkoppel slechts gedurende een zeer beperkte tijd mogelijk, en hangt de grootte van het piekkoppel vooral af van de maximale stroom die de convertor kan leveren. Aangezien we de convertor niet sterk overbemeten (omwille van de kostprijs), zal het werkelijke piekkoppel veel lager zijn. Voor de eenvoud rekenen we op een piekkoppel dat 130% is van het stall koppel:  $1.3 \cdot 13.5Nm \approx 18Nm$ 

*Telcomec* is een bedrijf dat gespecialiseerd is in elektromagnetische koppelingen. De SSM 100 koppeling van Telcomec is een éénschijfs-elektromagnetische koppeling, die voldoet aan onze eisen. De technische gegevens van deze koppeling zijn hieronder weergegeven.



Figuur 3.8: Elektromagnetische koppeling



						8-1		
SSM100	15/18	24	20	6000	75	15	11,8	26,5

Figuur 3.9: Technische gegevens SSM 100



Figuur 3.10: Doorsnede van een elektromagnetische koppeling

1,9

### 3.6 Riemoverbrengingen

In dit deel zullen we het type riem bepalen. We hebben keuze uit:

- Een V-riem
- Een poly-V-riem / micro-V-riem / ribbenband
- Een tandriem



Figuur 3.11: Soorten riemen

Tandriemen kunnen onmogelijk slippen, en uit oogpunt van veiligheid hebben we liever dat dit kan als het nodig zou zijn. Bovendien zijn de riemschijven voor tandriemen zeer duur als we grote diameters nodig hebben. Tandriemen zijn dus uitgesloten. V-riemen vervolgens hebben als nadeel dat ze niet zeer buigzaam zijn, waardoor kleinere schijfdiameters niet vanzelfsprekend zijn. En aangezien we een vrij grote overbrengingsverhouding nodig hebben en we de grootte van de grootste schijf willen beperken, moeten we de kleinste riemshijf zo klein mogelijk maken. Poly-V-riemen zijn veel minder hoog dan gewone V-riemen, en zijn bijgevolg ook veel buigzamer. Het aantal ribben op deze riemen hangt van het vermogen af dat overgedragen dient te worden. We maken een selectie voor de twee overbrengingen aan de hand van het Roloff-Matek machine-onderdelen boek.<sup>[17][28]</sup>

We dimensioneren de riem op 150% van het vermogen van de motoren, dit is meer dan de 130% van de koppelingen. De reden daarvoor is dat we bij het inkoppelen van de elektromagnetische koppeling kortstondig een hogere belasting krijgen op de riemen en de koppeling. Aangezien de koppeling lichter is gedimensioneerd dan de riemen, zal de koppeling kortstondig doorslippen op de wrijvingsplaten en zullen de riemen niet slippen. Het vermogen waarop de riemen dus gedimensioneerd worden is 5.4kW.

Uit tabel 16-11 C van de tabellenboek van Roloff-Matek, halen we dat we met een type PJ of PK te maken hebben. Maar PK riemschijven zijn niet te vinden als standaard onderdelen, daarom hebben we voor een PJ-riem gekozen. De minimale diameter voor een riemschijf is 20mm, we nemen echter als kleinste diameter voor schijf 1 45mm. Deze waarde is op iteratieve wijze bekomen. Nemen we de waarde kleiner, dan zullen de krachten in de riem toenemen, alsook de krachten op de assen en lagers. Als deze waarde groter genomen wordt, zal de diameter van de grootste schijf te groot worden. Er is dus naar een compromis gestreefd. De asafstand is 445mm en volgt uit de CAD tekeningen. (zie hoofdstuk 3.9)

Voor de details van deze berekeningen verwijzen we naar de Maple printout in bijlage B en [37]. Het besluit van de berekeningen is hier in een tabel weergegeven:

schijf 1	8 PJ	$45 \mathrm{mm}$
schijf 2	vlak	$275\mathrm{mm}$
riem 1	8PJ	$1428 \mathrm{mm}$
schijf $3$	$12 \mathrm{PJ}$	$80 \mathrm{mm}$
schijf $4$	vlak	$275\mathrm{mm}$
riem 2	12PJ	$1473 \mathrm{mm}$

Tabel 3.1: Besluit riemoverbrengingen

Wat opvalt is dat we zeer grote riemschijven nodig hebben, om de overbrengingsverhouding te kunnen realiseren. Dit kan u zien in figuren 3.12 en 3.13.



Figuur 3.12: Afmetingen riemoverbrenging 1



Figuur 3.13: Afmetingen riemoverbrenging 2

Indien we het PJ profiel moeten voorzien op deze grote riemschijven, zal dit de nodige problemen met zich meebrengen. Daarom hebben we besloten om de grote riemschijven vlak uit te voeren (in de praktijk licht gebombeerd). Dit is mogelijk als we voldoende voorspanning hebben op de riemen. Dit hele systeem is naar analogie met de aandrijving in oude wasmachines. De voorspanningen worden berekend in een Maple printout die in bijlage B zit. De resultaten van deze berekening zijn hieronder weergegeven.

$$voorspankracht \ riem \ 1: \ F_{v1} = 510N \tag{3.13a}$$

$$voorspankracht \ riem \ 2: \ F_{v2} = 293N \tag{3.13b}$$

De kracht die nodig is om bij overbrenging 1 de spanrol tegen de riem te drukken, wordt gegeven in deze formule:

$$F_{spanrol} = 2F_{v1}sin(\frac{\alpha}{2}) = 2 \cdot 510N \cdot sin(\frac{12.12^{\circ}}{2}) = 108N$$
(3.14)

Hierdoor kunnen we het spanelement selecteren, waarop de spanrol gemonteerd wordt. Een tabel met de gegevens van verschillende spanelementen:



Figuur 3.14: Gegevens van een spanelement (www.kramp.com)

Een spanelement van het type US 15 voldoet, om de kracht van 108N aan te brengen op de riem.

## 3.7 Elastische koppeling

Als elastische koppeling tussen de motor en de drijfas, nemen we een klauwkoppeling. Er is echter één probleem, zoals later zal blijken uit de CAD tekeningen in hoofdstuk 3.9: wegens plaatsgebrek is het niet mogelijk om de koppeling te monteren en te demonteren op een normale manier. Onder normale manier verstaan we: demontage door de twee aluminiumen koppelingshelften axiaal uiteen te schuiven, waardoor het elastische kunststofkussen vrij komt.



Figuur 3.15: Standaard klauwkoppelingen

We zijn zijn dus op zoek gegaan naar een alternatief van deze standaard klauwkoppeling. Een geschikt alternatief hebben we gevonden bij *Lovejoy*, dit is een onderneming die gespecialiseerd is in elastische koppelingen. In de figuur op de volgende pagina vindt u de gegevens van deze speciale klauwkoppeling. De maximale grootte van het koppel dat hiermee overgedragen kan worden is 38Nm. Dat is ruimschoots voldoende aangezien wij slechts 18Nm nodig hebben.

Een dealer die ons deze koppelingen kan leveren is Caldic. (www.caldic.com)



**Step 1** Remove element and align hubs.



Step 2 Insert new element.



**Step 3** Slide locking ring over element.



**Step 4** Twist locking ring to secure.



Figuur 3.16: Nieuw design klauwkoppeling van Lovejoy (www.lovejoy-inc.com)

## 3.8 Vrijloopkoppeling

We starten opnieuw met de eisen die we stellen aan de vrijloop. De vrijloop moet een blokkeerkoppel kunnen overdragen dat 130% is van het nominale koppel op de wielas:  $1.3 \cdot 80Nm = 104Nm$ . Het maximale toerental in vrijloopwerking:

$$3000tpm \begin{cases} \stackrel{i=3.45}{\longleftrightarrow} 869.5tpm \\ \stackrel{i=5.90}{\longleftrightarrow} 508.5tpm \end{cases} \longrightarrow 361tpm$$
(3.15)

Bovendien zou het handig zijn dat de vrijloop ook de radiale kracht kan opnemen die op riemschijf 3 aanwezig is. Dit is mogelijk door gebruik te maken van een vrijlooplager. (zie foto hieronder) De kracht op dit vrijlooplager is gelijk aan de totale asreactiekracht op riemschijf 3 van overbrenging 1. Bij benadering is deze gelijk aan twee maal de voorspankracht in riem 1:  $2 \cdot 411N = 822N$ . Stieber heeft een assortiment aan vrijlooplagers, de gegevens zijn te vinden in de datasheet van figuur 3.18.



Figuur 3.17: Vrijlooplager



Bauart Type Modèle	Größe Size Taille	Kugellagergröße Bearing series Roulement série					Tragz Bearing Charges r	ahlen g loads oulements	Gewicht Weight Masse	Schleppmoment Resistance torque Couple résiduel
							ayn.	stat.		
CSK2RS	d [mm]		T <sub>KN</sub> 1) [Nm]	n <sub>max.</sub> [min <sup>-1</sup> ]	D (mm)	L (mm)	C [kN]	C <sub>o</sub> [kN]	[kg]	T <sub>R</sub> [Nom]
	8.,		2,5	15000	22	9	3,28	0,86	0,015	0,8
	12	-	9,3	10000	32	14	6,1	2,77	0,05	3,0
	15		16,9	8400	35	16	7,4	3,42	0,070	4,0
	17		30,6	7350	40	17	7,9	3,8	0,09	5,6
	20		50	6000	47	19	9,4	4,46	0,145	6,0
	25		85	5200	52	20	10,7	5,46	0,175	6,0
	30		138	4200	62	21	11,7	6,45	0,270	7,5
	35		175	3600	72	22	12,6	7,28	0,400	8,2
	40	-	325	3000	80	27	15,54	12,25	0,6	10

Figuur 3.18: Datasheet Stieber vrijlooplager (www.stieber.be)

Als we een selectie maken aan de hand van het blokkeerkoppel, dan zou een CSK 30 2RS volstaan. We gaan nu na of dit vrijlooplager de radiale kracht kan weerstaan. De bekende levensduurformule voor lagers is hier van toepassing:

$$L_{10h} = \frac{10^6 (\frac{C}{P})^p}{60n} \tag{3.16a}$$

met:

$$C = 11.7kN$$
  $p = 3$   $n = 361tpm$   $X = 1 \Rightarrow P = F_r = 1020N$  (3.16b)

$$L_{10h} = 69700h \tag{3.16c}$$

Deze levensduur is meer dan voldoende, dit vrijlooplager CSK 30 2RS is dus geschikt. Om constructieve redenen plaatsen we net naast dit lager een gewoon diepgroefkogellager met dezelde buitenafmetingen, dit verandert niets aan de voorgaande berekening. Voor verdere details over het constructieve aspect hierrond verwijzen we naar deel 3.9.

### 3.9 CAD tekeningen

Voordat we de laatste constructieve berekeningen (op assen en lagers) kunnen uitvoeren dienen we eerst de CAD tekeningen te geven. Hieruit zijn dan nuttige afmetingen te halen, voor de verdere berekeningen. Om tot deze CAD tekeningen te komen, zijn we opnieuw op een iteratieve manier te werk gegaan.

Een totaalbeeld van de hele aandrijving en ophanging in CAD:



Figuur 3.19: Totaalbeeld van de aandrijving en ophanging



We zoomen nu in op een paar onderdelen.

Figuur 3.20: Detail van de aandrijving



Figuur 3.21: Detail van de drijfas



Figuur 3.22: Illustratie van de ophanging

Het uiteindelijke resultaat van de 3D tekening waar het frame, ophanging, aandrijving en batterijen allen tesamen staan in één tekening vindt u hieronder.



Figuur 3.23: 3D resultaat

Voor verdere details en tekeningen verwijzen we naar de elektronische versie van onze thesis, die u achteraan op een dvd kan terugvinden.

### 3.10 Aandrijfassen

We kennen alle krachten en momenten die op de aandrijfassen werken. We hebben twee assen: één tussenas en één wielas. Hieronder een figuur van beide assen.



(a) Drijfas

(b) Wielas

Figuur 3.24: 3D-modellen van de assen

Adhv MITCalc hebben we nagegaan of de assen de belasting kunnen dragen. De volledige berekening is terug te vinden in bijlage C. Uit de resultaten van de drijfas volgt dat we een veiligheidsfactor van 7 hebben. Om hier zeker van te zijn hebben we een grove berekening manueel uitgevoerd, welke bij benadering ook tot hetzelfde besluit kwam. De berekeningen zijn uitgevoerd uitgaande van een minderwaardig constructiestaal met als eigenschappen:  $\sigma_{\text{trek}} = 600MPa$   $\sigma_{\text{vl}} = 350MPa$ . In de werkelijkheid zal de as uit assenstaal vervaardigd worden, wat een hogere vloeigrens heeft. De berekeningen in MITCalc houden ook rekening met de spanningsconcentraties ten gevolge van de aanwezige groeven en uitsparingen. Gezien de kleine waarden die hieruit volgen is er dus geen gevaar voor vermoeiing. Om constructieve redenen (afmetingen koppeling, lagers) hebben we dan toch geen kleinere as genomen. Analoog aan de vorige redenering hebben we ook de wielas op sterkte en vermoeiing getest. De resultaten zijn samengevat in figuren 3.25 en 3.26.



Figuur 3.25: Equivalente spanning en veiligheidsfactor in de drijfas



Figuur 3.26: Equivalente spanning en veiligheidsfactor in de wielas

## 3.11 Lagers

We hebben in totaal 5 verschillende lagers die begroot moeten worden: 2 steunlagers van de drijfas, 2 van de wielas en één lager dat schijf 2 steunt.



Figuur 3.27: Overzicht lagers

Het toerental van lagers 1 & 2 nemen we op 3000tpm, dat van de andere twee (3 & 4) op 870tpm. Het lager dat riemschijf 2 ondersteunt draait maximaal tegen 1246tpm. We gebruiken éénmalig zelfinstellende lagers, om de statische uitlijningsfouten op te nemen. De resulterende radiale kracht in elk lager en de gekozen types lagers vindt u in volgende tabel, de eigenschappen ervan in bijlage D.

	as diameter	$F_{res_r}$	type lager
lager 1	$25\mathrm{mm}$	1174,5N	$\rm PF~25~RM$
lager 2	$25\mathrm{mm}$	425N	$\rm PF~25~RM$
lager 3	$25\mathrm{mm}$	1259N	FYTB $25 \text{ TF}$
lager 4	$30\mathrm{mm}$	2541N	FYTB $30 \text{ TF}$
lager schijf 2	$25\mathrm{mm}$	586N	$6005 \ 2RSL$

Tabel 3.2: Krachten in de lagers

Aan de hand van de tabellen uit de bijlage kunnen we de levensduur van de lagers bepalen:

$$L_{10h\ lager\ 1} = 9400h$$
 (3.17a)

$$L_{10h \ lager \ 2} = 199000h \tag{3.17b}$$

$$L_{10h \ lager \ 3} = 26000h \tag{3.17c}$$

$$L_{10h \ lager \ 4} = 8660h \tag{3.17d}$$

$$L_{10h \ lager \ schijf \ 2} = 112000h$$
 (3.17e)

De levensduur van de lagers is bepaald op het maximale toerental, wat overeen komt met de maximale snelheid van 100km/h. Dit houdt in dat lager 1 940000km zal meegaan, wat dus volstaat voor de volledige levensduur van de wagen.

## 3.12 Achterwielophanging

Het enige dat nog niet specifiek bepaald is in de ophanging, is de plaatsing van de veer en demper. We hebben een veer-dempersysteem gebruikt dat afkomstig is van een moto. Hieronder ziet u een beeld van deze suspensie-eenheid. De mechanische eigenschappen ervan hebben we experimenteel opgemeten. De gemeten veerkarakteristiek ziet u hier:



Figuur 3.28: Achterophanging

Deze karakteristiek komt overeen met de berekende theoretische karakteristiek. Voor de berekening verwijzen we naar bijlage E. De experimenteel bepaalde dempingsconstante is 3320Ns/m. De totale massa op één wiel nemen we op 150kg, en de gewenste slag voor het wiel op ongeveer 15cm. Aangezien we slechts een slag van ongeveer 5cm hebben in de veer moet die dus geplaatst worden op 1/3 van de afstand wielas-scharnier. De kracht op de veer is dan 3 keer de verticale kracht op het wiel:  $3 \cdot 1500$ N = 4500N. Bij statische belasting van de veer is de doorbuiging iets meer dan de helft van de slag. De gekozen veer voldoet dus. De eigenfrequentie van de koets met deze veer is 2.4Hz. De relatieve demping is 0.7 en dus kleiner dan 1, het systeem is onderkritisch gedempt.

### 3.13 Hydraulisch remsysteem

De definitie van 'remsysteem' is: het geheel van organen, ten doel hebbende de geleidelijke vermindering van de snelheid van een bewegend voertuig, het tot stilstand brengen daarvan of het onbeweeglijk houden van een reeds stilstaand voertuig. Het systeem bestaat uit het bedieningsorgaan, de overbrenging en de eigenlijke rem.

We zullen de wagen voorzien van een elektrische rem, zodat we kunnen remmen met energierecuperatie. De remenergie wordt dan gedeeltelijk terug opgeslagen in de batterijen. Dit principe is erg gunstig, maar het is onmogelijk om zo een noodstop te maken. Het elektrisch remvermogen is maximaal gelijk aan het vermogen dat we beschikbaar hebben om te versnellen, en dat is veel te weinig om snel te stoppen. Bovendien dient men uit oogpunt van veiligheid steeds en hydraulisch remsysteem te hebben, dat wel in staat is om kortstondig hoge vermogens op te nemen. Een parkeerrem voorzien we voorlopig niet op deze wagen, omdat dit niet echt nodig is voor ons prototype.

Omdat het remmen betrekkelijk lang kan duren, moet in het bijzonder op de omzetting van de kinetische energie door wrijving in warmte-energie en het afvoeren daarvan worden gelet. Om het geheel eenvoudig te houden van contructie hebben we voor schijfremmen gekozen, waarvan het principe hieronder te zien is:



Figuur 3.29: Principe van een schijfrem

Voordeel van de schijfrem is dat de remkracht evenredig is met de drukkracht van de blokken, en dat de dosering dus erg makkelijk is. Nadeel is dat de drukkrachten vrij groot moeten zijn om enige vertraging van betekenis te hebben, zodat in auto's met schijfremmen meestal een rembekrachtiger zit. Aangezien de uitvoering van een rembekrachtiging te complex zou worden, hebben wij deze achterwege gelaten. Het is ook niet echt nodig, zoals zal blijken uit de berekeningen.

Voor het ontwerp van het remsysteem steunen we op *RICHTLIJN 98/12/EG VAN DE COMMISSIE van 27 januari 1998 tot aanpassing aan de technische vooruitgang van Richtlijn 71/320/EEG van de Raad inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de lidstaten betreffende de reminrichtingen van bepaalde categorieën motorvoertuigen en aanhangwagens daarvan.* Deze richtlijn is downloadbaar op http://eur-lex.europa. eu/LexUriServ/site/nl/oj/1998/1\_081/1\_08119980318n100010146.pdf.

Bij het onwerp van het remsysteem dienen we eerst enkele relevante voertuiggegevens te vermelden:

- de maximum massa, wij nemen een kleine overmaat en rekenen met 450kg
- de statische verdeling van de massa over de assen, een realistische aanname is dat elk achterwiel 35% draagt en het voorwiel 30% van de totale massa.
- de maximum ontwerpsnelheid is 100km/h.
- het aantal en de plaats van de assen
- de bandenmaat

Deze gegevens leiden er toe dat we een remvertraging van minimum  $4m/s^2$  moeten kunnen realiseren bij een beginsnelheid van 100km/h en de kracht uitgeoefend door de bestuurder moet kleiner blijven dan 700N.

We gaan er van uit dat elk wiel statisch ongeveer evenveel gewicht draagt van de wagen. Het totale gewicht met passagiers en belasting schatten we op 450kg. Hierdoor zal elk wiel ongeveer 150kg dragen. Doordat we remmen krijgen we achteraan een asontlasting en wordt het voorwiel meer belast. Hierdoor zal de asbelasting bij het remmen anders verdeeld zijn dan in statische toestand. Via figuur 3.30 berekenen we de aslast bij afremming. Hierbij dienen we wel op te merken dat deze nog zal beïnvloed worden door de aërodynamische krachten, die een extra downforce geven op het voorwiel. Deze zijn echter relatief klein en worden hier niet in rekening gebracht.



Figuur 3.30: Asontlasting

We schrijven enkele vergelijkingen uit:

- Horizontaal evenwicht
- Verticaal evenwicht
- Momentenevenwicht rond het contactpunt van het voorwiel met de grond
- Coulombwrijving van de wielen op beton ( $\mu=0.7$ ), we veronderstellen geen slip<sup>[38]</sup>

Voor de volledige oplossing verwijzen we naar bijlage F Als oplossing krijgen we:

- $R_a = 1340N$
- $R_v = 1735N$
- $T_v \leq 1214N$
- $T_a \leq 938N$

Om een vertraging te bekomen van  $4m/s^2$  hebben we dus maar een totale vertragingskracht van 1800N nodig, terwijl we 3000N remkracht kunnen leveren op een droog wegdek.

Voor de verdere berekeningen gaan we uit van de gebruikte remblokken en remschijven, omdat de afmetingen van het remsysteem belangrijk zijn in deze berekeningen. We controleren of dit remsysteem de vereiste remkracht kan leveren. We lijsten hier enkele belangrijke gegevens op:

- werkzame diameter remschijf achteraan: 22cm
- werkzame diameter remschijf vooraan: 30cm
- wieldiameter achteraan: 60cm

- wieldiameter vooraan: 57cm
- remcilinder achteraan: 2 x 30mm
- $\bullet\,$  remcilinder vooraan: 3 x 30mm
- pompcilinder: 20mm

Een realistische schatting voor de wrijvingscoëfficiënt tussen de pads (van de remblokken) en een remschijf is 0.5. Hiermee kunnen we de drukkracht bepalen waarmee de remblokken dienen dichtgedrukt te worden om de vereiste afremming te kunnen geven.

$$D_v = T_v \cdot \frac{57}{30} \cdot \frac{1}{0.5} = 4164N \tag{3.18a}$$

$$D_a = T_a \cdot \frac{60}{22} \cdot \frac{1}{0.5} = 4502N \tag{3.18b}$$

De totale remcilinderoppervlakte is:

$$A_v = \frac{\Pi \cdot 30^2}{4} \cdot 3 = 2120mm^2 \tag{3.19a}$$

$$A_a = \frac{\Pi \cdot 30^2}{4} \cdot 2 = 1414mm^2 \tag{3.19b}$$

Uit de drukkracht en de werkzame oppervlakte vinden we de nodige hydraulische druk:

$$P_v = \frac{D_v}{A_v} \cdot 10 = 20bar \tag{3.20a}$$

$$P_a = \frac{D_a}{A_a} \cdot 10 = 32bar \tag{3.20b}$$

Het grote verschil tussen deze drukken is zeker niet optimaal te noemen. Bij een goed ontworpen remsysteem zouden deze drukken ongeveer gelijk moeten zijn, zodat op elk wiel optimaal geremd kan worden. Wij stellen ons voorlopig tevreden met de wetenschap dat het voorwiel al zal slippen bij een druk van 20 bar. Als de remblokken achteraan op het hydraulisch circuit worden aangesloten van de voorste remblok, dan zien alle remblokken op elk moment dezelfde druk. In bijlage F berekenen we de totale remkracht die de wagen heeft bij een remdruk van 20 bar (we willen remmen zonder dat er één wiel slipt). De totale haalbare remkracht zonder slippen is 2370N, en komt overeen met een vertraging van  $5.3m/s^2$ . Met dit systeem is dus voldaan aan de eis opgelegd door de norm.

De remdruk wordt bekomen met een rempomp die manueel wordt bediend. De kracht in de pomp is ongeveer het dubbele van de kracht op het rempedaal door de hefboomwerking. In de norm schrijft men dat we maar een kracht van 700N mogen uitoefen op het rempedaal. Om een remdruk van 20 bar te bekomen, dienen we het pedaal met een kracht van 314N in te drukken. We voldoen dus aan de norm. We geven nog enkele detailfotos van het het gerealiseerd remsysteem. We hebben in totaal 3 verschillende ontwerpen uitgewerkt voor de rempomp. Bij het eerste ontwerp had de rempomp te weinig debiet. Het tweede ontwerp werd afgekeurd omdat de gebruikte pomp teveel inwendige verliezen had. Bij het derde ontwerp hebben we een rempomp gebruikt van de alom bekende Volkswagen Golf. Met dit laatste remsysteem kunnen we de wagen doen stoppen met een slippend voorwiel.



Figuur 3.31: Ontwerp 1





Figuur 3.32: Ontwerp 2



Figuur 3.33: Ontwerp 3

Let bij alle ontwerpen op de vrije slag die de pedaal heeft vooraleer in contact te komen met de hydraulische pomp. Deze is nodig om de wagen eerst elektrisch te laten remmen. Bij verdere indrukking zal de wagen dan hydraulisch beginnen remmen.

## 3.14 Stuurinrichting

Een wagen is geen wagen als hij niet stuurbaar is. We hebben het onszelf gemakkelijk gemaakt door maar één voorwiel te kiezen, wat een relatief eenvoudige stuurinrichting oplevert. De ingenieurs die de Twike ontworpen hebben hadden hetzelfde probleem: ontwerp een eenvoudige maar stabiele stuurinrichting. Daarom leek het ons interessant om het principe van de Twike over te nemen, aangezien het daar zijn doeltreffendheid al had bewezen. Hieronder ziet u hun stuurinrichting met daarnaast onze  $1^e$  uitvoering.



(a) Stuurinrichting van de Twike

(b) Eerste ontwerp van onze stuurinrichting

Figuur 3.34: Stuurinrichtingen



Figuur 3.35: Foto genomen op 17-12-2006

Na enige tests op de openbare weg bleek dat deze oplossing verre van ideaal was. Het was niet echt handig om te sturen, de wagen had meer weg van een boot dan van een auto. Bovendien kon je moeilijk kracht op je stuur zetten en werd de stuurinrichting instabiel bij snelheden boven 55km/h. Er was dus duidelijk iets mis. De eerste oorzaak die we konden aanduiden was het feit dat het gehele systeem wel sterk genoeg was, maar niet stijf genoeg. Hierdoor konden trillingen die zich ontwikkelden op het niveau van het wiel zich gemakkelijk in stand houden zonder dat je dat als bestuurder merkte aan het handvat. Een tweede probleem was dat de as waarrond het voorwiel scharniert in een bocht iets te plat lag. Hierdoor zakte de wagen enkele centimeters bij het ingaan van een bocht. Om dan na de bocht de wagen weer recht te krijgen moest je dan als bestuurder eigenlijk het voorste stuk van de wagen weer omhoog heffen over die enkele centimeters. Dit fenomeen bevordert het comfort niet voor de bestuurder. Ten derde was er ook nog een oorzaak van de trillingen, namelijk een onbalans in de band (ongelijkmatig afgesleten). Dit is iets dat typisch problemen geeft vanaf 55-60km/h en vandaar zijn we op het idee gekomen van er naar te kijken. We hebben deze problemen dan aangepakt in het tweede ontwerp. Dit ontwerp hebben we zelf volledig uitgedacht. We hebben nu vooral rekening gehouden met de stijfheid in de overbrenging. De plaatsing van de scharnieren diende ook oordeelkundig worden bepaald, want het voorwiel kan inveren ten opzichte van het vast frame waar het stuur op gemonteerd staat. Het resultaat kan u zien in figuur 3.36 en 3.37.



Figuur 3.36: Tweede ontwerp van de stuurinrichting



Figuur 3.37: Detail van de tweede stuurinrichting

Dit ontwerp was veel beter, we hebben de stabiliteit zonder problemen getest tot 70km/h. Sneller durfden we niet, want we werden toen nog vooruit geduwd met de bumper van een auto.

### 3.15 Praktische realisatie

Bij alle ontwerpberekeningen is zeer nauw gelet op het feit dat het gehele systeem ook in de praktijk redelijk eenvoudig uitgewerkt kan worden. We hebben in de mate van het mogelijke met alle veiligheidsaspecten rekening gehouden. Zo hebben we de wielassen gemonteerd dwars door een koker, en niet enkel gelagerd. Indien nu een gietijzeren lagerhuis het zou begeven, dan kunnen we toch geen wiel verliezen aangezien de as nog wordt opgevangen in de koker. We hebben ook een valbeugel voorzien op de wagen, zodat je toch niet zou geplet raken onder je eigen wagen bij een aanrijding. Voor de plaatsing van de batterijen (lees: zwaar gewicht) hebben wij geopteerd om deze zo laag mogelijk in het midden tussen de twee achterwielen te plaatsen. Hierdoor wordt de wagen stabieler in bochten en heeft hij minder neiging tot kantelen. Bovendien wordt hierdoor het zware gewicht van de batterijen enkel door de achterwielen gedragen, en ondervinden we geen enkele invloed op het stuurgedrag van de wagen. Hieronder ziet u enkele beelden van het resultaat, chronologisch weergegeven.



(a) 2-07-06

(b) 11-11-06 (1)



(c) 11-11-06 (2)

(d) 17-12-06

Figuur 3.38: Chronologische reeks foto's: deel 1



(a) 13-01-07 (1)

(b) 13-01-07 (2)



(c) 15-01-07





(e) 19-02-07



Figuur 3.39: Chronologische reeks foto's: deel 2



(a) 7-05-07 (1)



(b) 7-05-07 (2)

Figuur 3.40: Chronologische reeks foto's: deel 3

## Hoofdstuk 4

# Elektrische aandrijflijn

## 4.1 Inleiding

De doelstelling van dit hoofdstuk is de lezer een beeld te geven van wat er bij een elektrische aandrijving van een voertuig allemaal komt kijken. Aan de hand van enkele praktische realisaties staven we de theorie. Veel van de systemen die in dit hoofdstuk aan bod komen zijn bekomen na enkele praktische iteraties. Niet al deze iteraties zijn in dit hoofdstuk uitgelegd, we geven enkel het finale resultaat. De werking en het principe van alle systemen wordt zo goed mogelijk uitgelegd aan de hand van vele grafieken en figuren. We starten dit hoofdstuk met een beschrijving van alle onderdelen.

## 4.2 Beschrijving

We geven eerst een algemeen overzicht van de nodige onderdelen in deze aandrijflijn. De energie die we nodig hebben om de motoren te voeden is afkomstig uit batterijpacks. Om deze batterijen op te laden hebben we een batterijlader nodig die gevoed wordt uit het elektriciteitsnet (230VAC - 50Hz). Uit hoofdstuk 3 is reeds geweten dat we een BLDC motor gebruiken van het volgende type: SSAX 1140S. Deze motor is compatibel met een door AXOR ontwikkelde gelijkspanningsgevoede convertor, de Micro B Plus. Die heeft een optimale voedingsspanning nodig van 200VDC. Zijn algemeen werkingsprincipe vindt u in figuur 4.1. De Micro B plus bevat de Signal Processor, Torque Angle Controller, Command Current Generator, Current Controller en Invertor. Wij dienen hem dus voeding en een wenswaarde voor het koppel te geven.



Figuur 4.1: Werkingsprincipe van de drive

Hierbij treedt onmiddellijk het volgende probleem op: Aangezien wij de convertor voeden met batterijen, zal de voedingsspanning van de convertor variabel zijn. De spanning zal lager zijn naarmate de batterijcellen meer ontladen zijn. Wij hebben daarom de totale batterijspanning zodanig gekozen dat we bij een nominale celspanning van 1.2V we ongeveer 200V totale spanning bekomen. Indien de cellen volgeladen zijn, dus bij een celspanning van 1.4V hebben we dan een voedingsspanning die groter is dan 200V. Bij cellen die sterk ontladen zijn, zullen we een totale spanning bekomen die lager is dan 200V. Het optimum is dus zoveel mogelijk nagestreefd.

We merken hier ook nog op dat het maximale toerental van de motor sterk gerelateerd is aan deze batterijspanning. Want bij het maximale toerental zal de convertor de batterijspanning volledig doorsturen naar de motor. De convertor chopt de spanning dan niet meer, waardoor de maximale beschikbare spanning volledig op de motorklemmen komt. Bij volle batterijen hebben we achteraf gemerkt dat het maximale toerental (3000tr/min) net gehaald werd, maar naarmate de batterijen meer ontladen werden, zakte het toerental tot wel 2250tr/min. De reden hiervoor is te vinden in de EMK van de motor, deze wordt bij maximale uitsturing van de convertor enkel beperkt door de batterijspanning. Indien we het ontwerp opnieuw zouden doen, dan zouden we 250V in plaats van 200V nominale batterijspanning gebruiken. Het optimum van de convertor zal dan niet meer volledig gehaald worden, maar dan is het wel mogelijk om met sterk ontladen batterijen toch nog het maximale toerental te halen.

Zoals we dus eerst vermeld hadden, hebben we de nominale batterijspanning 200V genomen. Er is echter ook nog een lagere gelijkspanning nodig die als voeding dient voor de stuurcircuits en hulpapparatuur, zoals de elektromagnetische koppeling (24VDC) en eventuele verlichting. Het is mogelijk om deze lagere gelijkspanning te bekomen door een DC/DC convertor te gebruiken die als ingang 200VDC aangeboden krijgt en 24VDC als uitgang heeft. Maar na enig zoekwerk werd duidelijk dat dit een zeer dure oplossing zou zijn, daarom hebben we besloten om een extra batterijpack van 24VDC te voorzien met als enig doel het voeden van de randapparatuur. Ook hiervoor is een batterijlader nodig.

Om de elektromagnetische koppeling aan te sturen hebben we een elektronische sturing nodig, die rekening houdt met de snelheid van de wagen. Stellen we dit hele systeem visueel voor, dan krijgen we het algemeen schema dat u kan zien in figuur 4.2.



Figuur 4.2: Algemeen schema van de elektrische aandrijving

### 4.3 Vermogensbatterijen

### 4.3.1 Probleemstelling

Onze elektrische auto dient voorzien te worden van een accu. Om de wagen enigzins toepasbaar te maken voor dagelijkse verplaatsingen in de stad moet de autonomie van deze wagen lieftst 100km zijn met één herlaadbeurt. Maar aangezien wij een prototype maken, mag de autonomie beperkt zijn tot bijvoorbeeld 40km. Dit heeft als voordeel dat we minder investeringskosten hebben in de batterijen. Er is echter ook een nadeel aan verbonden: hoe lager we de autonomie nemen, hoe sneller de aanwezige cellen ontladen moeten worden, bij éénzelfde vermogenafname. Dit heeft tot gevolg dat de cellen zwaarder belast worden, minder capaciteit bezitten en ook moeten inboeten aan levensduur. De totale nominale vermogensbatterijspanning moet 200VDC bedragen. Een bijkomende eis is het gewicht van de cellen: om constructieve redenen nemen we aan dat we niet boven de 60kg aan cellen willen gaan. Er zijn verschillende types batterijen op de markt. De voornaamste zijn Lood-accu, Ni-Cd en NiMh. De Li-ion, Li-polymeer en NaS-batterij hebben in deze thesis niet echt een praktische betekenis, omdat de kostprijs ervan nog veel te hoog ligt. Vooreerst bepalen we hoe groot de energieinhoud van het batterijpack dient te zijn, om een autonomie van 40km te behalen, en daarna wordt berekend welk type cellen het voordeligst zijn en toch nog aan zoveel mogelijk eisen voldoen.

### 4.3.2 Energieinhoud

In deze paragraaf zullen we bepalen hoe groot de totale energieinhoud van de batterijen moet zijn. De autonomie van 40km veronderstellen we aan de maximale snelheid van de wagen (100km/h). Het nuttige vermogen afgenomen aan de wielen dat hiermee gepaard gaat is 3800W. We rekenen de mechanische verliezen in de lagers en de trillingsverliezen mee door te zeggen dat we een mechanisch rendement hebben van 95%. Het totale elektrische rendement van het hele systeem (batterij / invertor / motor) schatten we op 80%. Hieruit kunnen we dan eenvoudig het vermogen bepalen dat de batterijen dienen te leveren, wat afgerond neerkomt op 5000W. De tijd dat dit vermogen moet geleverd worden is 0.4h, wat resulteert in een **nodige energieopslag van 2000Wh**.

In de volgende paragrafen bepalen we voor enkele types cellen hoeveel er nodig zijn, het totale gewicht van het batterijpack en de exacte capaciteit van de gebruikte cellen. Bovendien moeten we rekening houden met het feit dat de batterijpacks achteraf gemakkelijk uitbreidbaar moeten zijn om de autonomie te vergroten, door een extra pack in parallel bij te schakelen. Het voordeel van het parallel bijschakelen is de toenemende bedrijfszekerheid, doordat er per pack een kleinere stroom moet geleverd worden.

### 4.3.3 Lood-accu

Het grote probleem bij onze batterijpacks is dat we een relatief grote gelijkspanning moeten realiseren bij een kleine capaciteit. Hierdoor zijn we sowieso genoodzaakt om heel veel kleine celletjes in serie te zetten. Een voorbeeld van een kleine lood-zuurcel is de Gates lead-acid Hawker BC. Eén lood-zuurcel heeft een nominale spanning van 2V, waardoor we ongeveer 100 cellen in serie zouden moeten zetten per pack. We nemen cellen van 12Ah, wat een standaard product is bij Gates. De totale capaciteit is dan 2400Wh. Om een idee te geven van de kostprijs, deze zou rond  $\in$ 1000 schommelen. Het gewicht van één cel is 840gr, wat het totale gewicht van dit pack op 84kg brengt. Dat is erg veel, zeker als je rekening houdt met het feit dat dit



Figuur 4.3: Gates Lead-acid Hawker

berekend is voor een autonomie van slechts 40km. Lood-accu's voldoen dus niet aan de gewichtseis, we dienen dan ook op zoek te gaan naar een geschiktere oplossing.

### 4.3.4 Nikkel-metaalhydride

Het volgende type batterij dat we bekijken zijn de nikkel metaalhydrides (NiMh). De nominale spanning voor één NiMh cel is 1.2V. Om een totale batterijspanning van 200V te bekomen dienen we dus per parallelle tak 167 cellen in serie te zetten. Om een hogere bedrijfszekerheid te hebben, nemen we een aantal parallelle takken. Stel, we nemen als capaciteit 3.5Ah per cel<sup>[6]</sup>. De energieinhoud van één tak is dan:



Figuur 4.4:

 $E_{tak} = 167 \cdot 3.5Ah \cdot 1.2V = 700Wh \tag{4.1}$  Saft NiMh cel

De totale energieinhoud diende 2000Wh te zijn, waardoor we 3 parallelle takken nodig hebben. In totaal hebben we dus  $3 \cdot 167 = 501$  cellen nodig. Een cel van 3.5Ah weegt 58 gram. Het totale gewicht van dit batterijpack zou dus op 29kg komen. Dit is een zeer mooi resultaat, maar er is één groot nadeel aan verbonden: deze oplossing is ontzettend duur. Eén cel kost al snel €5.5, waardoor de totale kost voor deze oplossing rond €2750 zou schommelen. We hebben dus besloten om deze oplossing niet te gebruiken, maar ze moet zeker in het achterhoofd gehouden worden naar de toekomst toe.

### 4.3.5 Nikkel-cadmium

Bij het zoeken naar een evenwicht tussen kostprijs en gewicht, zijn we aanbeland bij de Nikkel-cadmium cellen (NiCd). Analoog aan de NiMh cellen, hebben ook de NiCd cellen een nominale celspanning van 1.2V. We kunnen dezelfde topologie aanhouden als bij de NiMh cellen. *GP batteries* levert NiCd cellen met een capaciteit van 4.5Ah (450DKT).

CPSYLVA-CHA 4600rt 12V 4500m4



Data Sheet	Model No.: 450DKT					
Туре	: High Temperature Rechargeable Nickel Cadmium Cylindrical Cell	High Rate Discharge				
Nominal Dimension (with Sleeve)	: Ø = 33.0 mm H = 60.5 mm					
Application	: Recommended discharge current 450mA to 13.5A	1.4 Charge: 450mA X 16hrs at 20°C				
Nominal Voltage	: 1.2V					
Nominal Capacity	: Min.: 4500mAh	1.2				
Charging Condition	: 450mA for 16 hrs at 20°C					
Service Life	: >500 cycle (IEC60285 standard)	1 12500mA 0000mA 4500mA				
Weight	: 120g	0.9				
Internal Resistance	: Average $12m\Omega$ upon fully charged	0 10 20 30 40 50 60 70 Disch. Time (min.)				
Max. Charging Voltage	: 1.5V at 450mA charging					
Temperature Range	: Standard charging : 0 to 70°C Discharging : -20 to 70°C					

Figuur 4.6: Datasheet GP NiCd cel

Voor één tak hebben we dan een energie inhoud van:

$$E_{tak} = 167 \cdot 4.5Ah \cdot 1.2V = 900Wh \tag{4.2}$$

In principe hebben we nu voldoende met twee parallelle takken om met de wagen testritten te rijden. We hebben dan een totale energieinhoud van 1800Wh. Eén cel weegt slechts 120 gram, wat het totale gewicht beperkt tot slechts 40kg. De prijs voor één cel is  $\in 3.11$  bij het Nederlandse bedrijf *ELFA*. De totale investering in batterijen blijft dan beperkt tot ongeveer  $\in 1500$ . Deze oplossing geeft een goed compromis tussen gewicht en prijs.

Wij hebben dus in ons ontwerp voor NiCd cellen gekozen. Het is aan te raden om iets dieper op de werking van deze cellen in te gaan, zodat we enig idee hebben wat er precies allemaal kan mislopen bij het gebruik ervan.

#### Werking:

De positieve elektrode is gemaakt van Nikkelhydroxide en de negatieve elektrode van metallisch cadmium. Het elektrolyt is een KOH oplossing. De (vereenvoudigde) chemische reactie is de volgende:

$$Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 \xrightarrow[discharge]{charge} Cd + 2NiOOH + 2H_2O$$

De potentiaalspanning bij deze reactie is ongeveer 1.3V. NiCd batterijen kunnen niet beschadigd raken door een te diepe ontlading. Wel moet er specifieke aandacht bij het laden besteed worden aan cellen die een te grote ontlading hebben gehad, waardoor de celspanning onder 0.4V gezakt is. Men dient deze dan eerst te laden met een zeer kleine stroom, en pas wanneer voldoende spanning aanwezig is kan men overgaan op fastcharge. Door de lage inwendige weerstand van de cellen kunnen ze heel snel opgeladen worden.

Wanneer de cellen zwaar belast worden, wordt er warmte gegenereerd, de temperatuur moet dan zeker gecontroleerd worden. De batterij is zeer robuust, ze kan een levensduur halen van wel 10 jaar en 2000 cycli. NiCd accus hebben wel last van het geheugeneffect. De zelfontladingsnelheid van de NiCd cellen bereikt zijn grootste waarde in de eerste 24h na een volledige oplading. NiCd cellen ondervinden bovendien geen nadelige gevolgen als ze maar gedeeltelijk of zelfs niet geladen worden. Het is zelfs gunstiger om de batterij volledig te ontladen indien men ze voor langere tijd opbergt. Er is wel een belangrijk aandachtspunt bij het gebruik: als het omhulsel door een incident wordt beschadigd, kan er KOH weglekken. Dit kan gevaarlijke verwondingen veroorzaken.

Als besluit geven we nog de invloed van de keuze van het type batterij op de autonomie van de wagen. In deze grafiek spreekt men ook van NaS. Dit type batterij hebben wij niet in overweging genomen omdat deze bijzondere eisen stelt aan de omgevingstemperatuur, wat de complexiteit van ons ontwerp sterk de hoogte zou in duwen.



Figuur 4.7: Autonomie in functie van het type batterij<sup>[43]</sup>

### 4.3.6 Praktische realisatie

Bij de praktische realisatie van deze batterijpacks, dienen we rekening te houden met enkele zaken:

- Licht gewicht
- Opladen van de batterijen
- Veiligheid
- Maximale stroom door de batterijen
- Symmetrische ontlading van de batterijen
- Vermijden van kringstromen
- Koeling van de batterijen

De cellen waar wij mee werken, NiCd's dus, dienen opgeladen te worden volgens de laadcurve uit figuur 4.8.



Figuur 4.8: Oplaadkarakteristiek NiCd cel

Om de cellen te laden volgens deze curve, moeten we gebruik maken van een elektronisch circuit dat in hoofdzaak bestaat uit de MAX 713. Dit is een IC die ontworpen is om NiCd batterijen snel op te la-Hiernaast vindt u den. een schema van zo een schakeling. Bij gebruik van dit circuit kan men maximaal 16 NiCd cellen tegelijk opladen (in serie). Wij moeten echter 167 cellen tegelijk opladen. Dit euvel kan vermeden worden door de configuratie toe te passen die u kan zien in figuur 4.10.



Figuur 4.9: Elektronisch schema van een laadcircuit voor NiCd cellen



Figuur 4.10: Topologie batterijen

Deze configuratie maakt gebruik van 168 cellen, welke we verdelen in 12 groepen van 14 stuks. Elke groep wordt afzonderlijk geladen, en bezit dus een eigen lader (MAX713). Bij ontlading worden de gele schakelaars gesloten en komen alle groepen in serie te staan, waardoor we op de uitgangsklemmen een gelijkspanning van  $\pm 200V$  krijgen. Deze oplossing is vrij duur, want we moeten dus 24 laders (2 batterijpacks met telkens 12 laders per pack) maken. Er bestaat echter een goedkopere oplossing: het is ook mogelijk om alle cellen tegelijk te laden met een continue stroom van 450mA. Het duurt dan wel langer vooraleer de cellen opgeladen zijn. Het voordeel van deze laatste werkwijze is, dat dit een zeer eenvoudige en goedkope oplossing is. Bovendien is het niet mogelijk dat de cellen overladen worden, want indien de cellen volledig volgeladen zijn, zal de extra energie die er bij komt gewoon in warmte worden gedissipeerd. Per cel wordt er dan een vermogen van  $1.5V \cdot 450mA = 0.6W$  verbruikt, wat gemakkelijk via convectie kan worden afgevoerd.

Voorlopig onthouden we dat er dus twee manieren zijn om de batterijen op te laden, en dat de eerste manier vereist dat de cellen in 12 groepen gegroepeerd moeten worden. Dit heeft geleid tot de realisatie van een batterijpack dat er als volgt uit ziet (3D tekening).



Figuur 4.11: Batterijpack (1)



Figuur 4.12: Batterijpack (2)
Het omhulsel is in plexiglas gemaakt. Dit geeft goede isolatie mogelijkheden en het oogt mooi. Men kan bovendien ten allen tijde de batterijen zien. Bij het ontwerp hebben we ook rekening gehouden met de thermische uitzetting en inkrimping van de cellen. Dit hebben we opgevangen door gebruik te maken van schroefveren, zoals u hieronder ziet. De cellen worden gemonteerd langs boven, door het deksel van de box te openen.



Figuur 4.13: Detail van de flexibele inklemming

### 4.3.7 Lader

Zoals uit vorige sectie is gebleken, weet u dat er twee manieren zijn om de batterijen op te laden. Wij hebben besloten om de goedkoopste oplossing te gebruiken. Het principe is zeer eenvoudig: we transformeren de netspanning naar een welbepaalde spanning, en deze getransformeerde spanning wordt vervolgens gelijkgericht en afgevlakt. Door de waarde van de condensatoren goed te kiezen kunnen we de laadstroom bepalen. Het schema van deze eenvoudige lader vindt u in figuur 4.14.

D1 tot D4 zijn de gelijkrichtdiodes. Met C1 en C2 kunnen we de gemiddelde waarde van de laadstroom door de batterijen instellen. Hoe groter C1 en C2 hoe groter de laadstroom zal zijn. Uit de datasheet van de gebruikte NiCd cellen, weten we dat we de cellen mogen laden met een constante stroomsterkte van 450mA. Indien C1 en C2 gelijk aan  $100\mu$ F gekozen worden, is hieraan voldaan. D5 en D6 zijn nodig om kringstromen tussen de twee parallelle takken te vermijden. C3 en C4 zijn condensatoren om de stroomrimpel te beper-



Figuur 4.14: Lader voor de vermogensbatterijen

ken door de batterijen. R4 en R5 stellen de inwendige weerstanden voor van de batterijen. De transformator dient een nominale effectieve spanning van 96VAC te geven. Praktisch realiseren we dit door 4 transformatoren in serie te plaatsen, elk met een nominale secundaire spanning van 24VAC (4 kleine transformatoren zijn gemakkelijker op te bergen dan één grote). Hieronder ziet u enkele gesimuleerde resultaten van deze schakeling. Eerst wordt de stroom gegeven door de batterijen voor verschillende celspanningen.



Figuur 4.15: Stroom door de batterijen bij een celspanning van 1V



Figuur 4.16: Stroom door de batterijen bij een celspanning van 1.2V



Figuur 4.17: Stroom door de batterijen bij een celspanning van 1.4V

Hieruit blijkt dus duidelijk dat de gemiddelde stroom rond de 450mA zit bij de nominale celspanning van 1.2V. Bij lege cellen (1V) zal de stroom iets hoger zijn, indien de cellen volgeladen zijn zakt de gemiddelde stroom terug tot 200mA.

Om een idee te krijgen van hoe zwaar de transformatoren belast worden, geven we de stroom en het ogenblikkelijk vermogen weer in functie van de tijd, bij een celspanning van 1V. Dit omdat dan de belasting het zwaarst is.



Figuur 4.18: Ogenblikkelijk vermogen en secundaire stroom door de transformator bij een celspanning van 1V

Deze simulaties zijn uitgevoerd met een ideale spanningsbron, de transformator zal echter niet ideaal zijn en krijgt te kampen met verzadigingsverschijnselen indien de piekstroom door de secundaire boven de nominale stroom stijgt, waardoor we een soort afvlakking krijgen van de piekverschijnselen. In principe zouden we dus kunnen volstaan met een totaal geïnstalleerd vermogen van 400VA, of dus 100VA per transformator (24VAC). De batterijen kunnen nu dus opgeladen worden tegen een ongeveer constante stroom van 450mA. Ondanks dat het geen kwaad kan dat volle batterijen nog opgeladen worden, zullen we toch een timer voorzien die het laadproces stopt na een manueel instelbare tijd. Wij hebben gebruik gemaakt van een mechanische timer, waarvan we de contacten omgewisseld hebben, zodat de timer stopt met tellen indien zijn uitgang op nul komt. De timer kan dan alleen maar manueel weer ingeschakeld worden. Een afbeelding ervan ziet u in figuur 4.19 hiernaast.



Figuur 4.19: Mechanische timer

#### 4.3.8 Ontlading en energierecuperatie

Bij het ontladen van de batterijen moeten we kringstromen vermijden. Dit kan eenvoudigweg opgelost worden door twee diodes te plaatsen, voor elke batterijtak één. Het probleem dat hierbij komt kijken is dat de convertor 4-kwadrants is uitgevoerd, en het hierdoor mogelijk is om de batterijen op te laden bij elektrische remwerking. Er zal dus stroom van de convertor moeten terugvloeien naar de batterijen, wat dan niet mogelijk zou zijn door de diodes. Hiervoor dient nog een oplossing bedacht te worden. We geven eerst het schema van de oplossing, en verklaren daarna de werking.



Figuur 4.20: Schema energierecuperatie

De batterijen kunnen elk ontladen via diodes D1 en D2, hierdoor worden dus kringstromen vermeden van de ene batterij naar de andere. Indien we nu elektrisch remmen, zal de spanning aan de klemmen van de convertor stijgen. Deze spanning stijgt dan tot ze groter wordt dan één van de batterijspanningen. De drain en basis komen dan op een positieve spanning te staan ten opzichte van de source, waardoor de transistor in geleiding gaat. Er onstaat op deze manier een verbinding tussen de convertor en de batterijen, waardoor deze laatste opgeladen kunnen worden, zonder dat er kans is op enige kringstromen. In principe moet er nog een beveiliging ingebouwd worden tegen het overladen van de batterijen. Want het zou bijvoorbeeld kunnen gebeuren dat men de batterijen volledig vol laadt, daarna met de wagen vertrekt van een helling, en recuperatieremming toepast. Hierdoor zal men op een korte tijd veel energie in de volle batterijen proberen opslaan, wat uiteindelijk tot explosies van de cellen kan leiden. Wij hebben hier echter wegens tijdsgebrek geen systeem meer voor ontwikkeld.

Bovendien zijn we nog één groot probleem uit de weg gegaan. Bij het parallel schakelen van twee grote batterijgroepen heeft men steeds kans op asymmetrische ontlading en oplading van de cellen. Hiervoor hebben we een theoretisch model opgesteld, waarmee eenvoudig de invloed kan nagegaan worden van een eventueel verschil in inwendige weerstand tussen de twee groepen. We tonen dit enkel voor de ontlading, het opladen is analoog.

We vertrekken van de 9A ontlaadcurve van de gebruikte NiCd (GP 450DKT) cellen. Deze is te zien in figuur 4.21. Ze is wel opgesteld bij een constante stroomafname, wat in de praktijk nooit het geval is. We moeten deze curve dus omzetten naar een ontlaadcurve in functie van de geleverde energie. Voor meer gedetailleerde berekeningen verwijzen we naar bijlage G. Het resultaat is te zien in figuur 4.22.



Figuur 4.21: Ontlaadcurve 9A ifv de tijd

In formulevorm:

$$V_{cel}(E) = -.137311 \cdot 10^{-19} E^5 + .496088 \cdot 10^{-15} E^4 - .701315 \cdot 10^{-11} E^3 + .48727 \cdot 10^{-7} E^2 - .172906 \cdot 10^{-3} E + 1.40151 \quad (4.3)$$

De geleverde energie is te bepalen uit de volgende betrekking:

$$E(t) = \int_0^t I_{cel}(t) \cdot V_{cel}(E(t))dt$$
(4.4)



Figuur 4.22: Ontlaadcurve ifv de geleverde energie

Deze betrekking leidt tot een differentiaalvergelijking van de vorm:

$$\frac{dE(t)}{dt} = I_{cel}(t) \cdot V_{cel}(E(t)) \quad , \quad E(0) = 0$$
(4.5)

We hebben 2 parallelle groepen van elk 168 cellen in serie. De stroom die de eerste groep levert  $(I_1)$  samen met de stroom van de tweede groep  $(I_2)$  is de totale stroom  $(I_{conv})$  die de convertor opneemt. De inwendige weerstand van één cel is nominaal  $12m\Omega$ . We rekenen dus op een totale nominale inwendige weerstand voor één groep van  $R_{i,1} = R_{i,2} = 2\Omega$ .

Indien de inwendige weerstanden van beide groepen gelijk zijn, dan kunnen we geen asymmetrie krijgen in de ontlading. Stel dat we dit toch krijgen, dan zou bijvoorbeeld groep 1 meer ontladen zijn dan groep 2, waardoor hij een lagere nullast spanning heeft dan de andere groep. Indien echter beide groepen stroom leveren aan de verbruiker, staan ze dus op dezelfde klemspanning. Hierdoor zal groep 2 dus een hogere interne spanningsval moeten hebben dan groep 1, wat inhoudt dat bij een gelijke inwendige weerstand, 2 meer stroom levert dan 1. Hierdoor zal 2 sneller ontladen worden dan 1, totdat beiden weer dezelfde nullastspanning krijgen en het evenwicht weer hersteld is.

De asymmetrie in ontlading is dus wel mogelijk bij verschil in inwendige weerstand. Stel dat  $R_{i,1} = 2\Omega$  en  $R_{i,2} = 5\Omega$ . De stroomafname door de convertor veronderstellen we constant en gelijk aan 20A. De stroom in elke groep moet door een voorwaarts gepolariseerde diode lopen, waarover dus een drempelspanning van 0.7V staat. De systeemvergelijking wordt nu:

$$168V[E1(t)] - R1 \cdot I_1(t) - V_{drempel} = 168V[E2(t)] - R2[20 - I_1(t)] - V_{drempel}$$
(4.6)

Hieruit kan men  $I_1(t)$  bepalen. Deze uitdrukking voor  $I_1$  gebruiken we dan in de voorgaande differentiaal vergelijking, waaruit dan de oplossing kan bekomen worden door deze numeriek op te lossen. Het resultaat kan u zien in figuur 4.23.

We merken op dat er duidelijk verschil is tussen de ontlading van beide groepen. Het nadeel hierbij is dat er steeds één groep is die meer stroom levert dan wat hij normaal zou moeten leveren. De stroom die één cel maximaal mag leveren is 13.5A (volgt uit de datasheet). We zien dus dat groep 2 niet voldoet aan deze eis na ongeveer 1000s, omdat groep 1 op dat moment al volledig ontladen is. Deze maat van asymmetrie is niet meer tolereerbaar. Indien dit in de praktijk zou voorkomen is men genoodzaakt om te zoeken naar de oorzaak ervan. Meestal is dat dan één of meerdere cellen die vroegtijdig falen.

In het extreme geval waarbij bijvoorbeeld groep 2 gewoon losgekoppeld wordt (door een interne fout), krijgen we  $R_{i2} = \infty$ . Dan zal de totale stroom dus geleverd worden door groep 1. Dit is echter absoluut te vermijden, omdat de maximale ontlaadstroom van de cellen 13.5A is. Er moet dan ook een beveiliging voorzien worden zodat men nooit kan rijden op één groep batterijen. Deze beveiliging hebben wij niet uitgewerkt.

Als laatste vermelden we nog dat onze tests hebben uitgewezen dat wij (met nieuwe cellen) geen asymmetrie hebben tussen beide groepen, noch bij het laden, noch bij het ontladen.



Figuur 4.23: Ontlading bij asymmetrie

#### 4.3.9 Praktische realisatie en schema's

Tot slot geven we nog enkele foto's van het gerealiseerd eindresultaat. We zijn begonnen met de batterijpacks, welke dus volledig uit plexiglas gemaakt zijn. We hebben de mogelijkheid open gehouden om de cellen op te laden per sectie, door het batterijpack in te delen in verschillende groepjes van 14 cellen.



Figuur 4.24: Bovenaanzicht van een batterijpack



Figuur 4.25: Schuin aanzicht van een batterijpack

De praktische realisatie van de batterijlader, energierecuperatie systeem en de zekeringen zijn samengebracht in één box. De zekeringen schakelen de batterijen los van de lader en de verdere circuits. Op bepaalde plaatsen zijn ventilators voorzien die de koeling verzorgen van beide laders (vermogens- en hulpbatterijen) en het energierecuperatiesysteem.



Figuur 4.26: Praktische realisatie van de laders en voedingen



Figuur 4.27: Vooraanzicht van de laderbox



Figuur 4.28: Zijaanzicht van de laderbox



Figuur 4.29: Totaal van batterijpacks en laderbox

Hieronder ziet u ook nog het bedradingsschema van deze hele schakeling. Er valt op te merken dat er een aantal componenten in staan die we nog niet besproken hebben. Meer uitleg hierover volgt in de komende paragrafen.



Figuur 4.30: Bedradingsschema laders en voedingen

# 4.4 Hulpbatterijen

Om dezelfde redenen als bij de vermogensbatterijen, hebben we ook hier gekozen voor NiCd cellen. We zullen echter een iets ander type gebruiken dan bij de vermogensbatterijen. Dit volgt uit de nodige energieinhoud.

### 4.4.1 Energieinhoud

De hulpbatterijen staan in voor de voeding van de:

- elektromagnetische koppeling (20W)
- ventilator voor de koeling van de convertor (2 x 2W)
- DC/DC (15V) convertor

De DC/DC convertor (15V) staat op zijn beurt in voor de voeding van:

- het relais  $(6 \ge 140 \text{mW})$
- de ventilator voor de koeling van het recuperatie remsysteem (2W)
- de opamps  $(10 \ge 400 \text{mW})$
- de logische IC's uit de 74 reeks (5 x 25mW)
- de spanningsdelers (weerstanden) (2W)

Het totale te leveren vermogen is dus ongeveer 33W. We bouwen een zekere veiligheid in, en rekenen op 40W. De hulpbatterijen moeten wel gedurende langere tijd vermogen kunnen leveren dan de vermogensbatterijen. Normaal gezien zullen deze laatste niet langer dan 1u vermogen kunnen leveren, waardoor wij de hulpbatterijen dus dimensioneren op 1u autonomie. Dat geeft ons een nodige energieinhoud van 40Wh. Bij een nominale spanning van 24V komt dit overeen met een capaciteit van 1.7Ah. GP batteries levert NiCd cellen (type: 200SCK) met een nominale capaciteit van 2Ah. De datasheet is in bijlage H bijgevoegd. Om een spanning van 24V te bekomen dienen we dus 20 cellen in serie te plaatsen, wat ons net de nodige energieinhoud geeft.

#### 4.4.2 Lader voor de hulpbatterijen

Uit de paragraaf van de vermogensbatterijen weten we dat er twee mogelijkheden zijn om de batterijen te laden. We hebben hier, itt bij de vermogensbatterijen, voor de duurste en beste oplossing gekozen. Zo hebben we beide principes, wat didactisch gezien waarschijnlijk een goede keuze is voor in een thesis. Deze manier van opladen maakt dus gebruik van een elektronisch circuit welk in hoofdzaak bestaat uit de MAX 713 (voor de datasheet, zie bijlage I). Deze IC meet en reageert als de laadspanning tijdens het laadproces terug begint te dalen. Op dat moment schakelt de IC het laadproces uit en gaat hij over op druppelladen.



Figuur 4.31: Elektronisch schema van het laadcircuit met de MAX 713



Figuur 4.32: Oplaadkarakteristieken van de MAX 713

In de specificaties van de MAX 713 vinden we terug dat deze IC slechts 16 NiCd cellen tegelijk kan opladen. Wij hebben er 20, we kunnen dus de lader niet zomaar aansluiten op de batterijen. We dienen de groep van 20 cellen te splitsen in twee groepen van 10 cellen, welke we afzonderlijk zullen laden met twee aparte laders. Tijdens het laden splitsen we dus de groep van 20 cellen op en bij het ontladen plaatsen we de twee groepen in serie. We moeten de laders maw dimensioneren op 10 cellen (nominale spanning van 12V). Een schema van de gehele configuratie kan u zien in figuur 4.33 hiernaast.



Figuur 4.33: Schema van hulpbatterij / lader

We overlopen hier kort de stappen die

we gevolgd hebben om tot het finale ontwerp te komen van deze lader ( $\rightarrow$  zie getting started in de datasheet van MAX713).

De MAX713 kan gebruikt worden in lineaire of in switch mode. Bij lineaire mode zullen de batterijen sneller volgeladen zijn, omdat ze continu stroom krijgen. Bij switch mode echter wordt de transistor (die de stroom door de cellen regelt) aan / uit geschakeld, om zo inwendig minder vermogen te dissiperen. Aangezien wij toch koeling kunnen voorzien werken we in lineaire mode, dit geeft ook het eenvoudigste ontwerp.

De traagste laadtijd voorzien we op 4h, dit is de maximale tijd die instelbaar is op de MAX713. We hebben deze maximale tijd gekozen zodat we een zo klein mogelijk geïnstalleerd vermogen nodig hadden voor de transformator en de transistor. De nominale laadstroom is dan:

$$I_{nom} = \frac{capacity \ of \ battery \ in \ mAh}{charge \ time \ in \ hours} = \frac{2000mAh}{4h} = 500mA \tag{4.7}$$

We dienen 10 cellen tegelijk te laden, waardoor uit Table 2 in de datasheet volgt dat PGM0 verbonden dient te worden met REF en PGM1 open moet blijven.

We kiezen nu de DC voedingsspanning, deze dient minimaal 1.5V hoger te zijn dan de maximale batterijspanning tijdens het laden. Een veilige design regel is de volgende:

min. input voltage 
$$DC = 1.5V + (1.9V \cdot number of cells to be charged)$$
  
=  $1.5V + (1.9V \cdot 10)$  (4.8)  
=  $20.5V$ 

We hebben een transformator gekozen die die een nominale secundaire effectieve spanning van 20VAC heeft (wat overeenkomt met een piekspanning van 28V). Deze dient dus nog gelijk gericht te worden en afgevlakt door een condensator. De gemiddelde gelijkgerichte uitgangspanning wordt hierdoor ongeveer 25V. Als gelijkrichterbrug hebben we een CP600 gebruikt, een brug die een stroom mag voeren tot 6A. Om de rimpel zo klein mogelijk te houden hebben we een redelijk grote condensator genomen: capaciteit van  $3300\mu$ F. Het nadeel hiervan is dat de grootte van de piekstromen door de transformator sterk toeneemt. Bovendien moeten we een gemiddeld vermogen leveren van ongeveer:

$$P_{qem} = 25V \cdot 500mA \cdot 2 = 25W \tag{4.9}$$

Het nominale vermogen van de transformator is 40VA, maar dit is gerekend bij een last die gelijkmatig is gedurende de tijd. De manier waarop wij de transformator belasten is verre van ideaal. De transformator ziet slechts op discrete punten een last, door de werking van de gelijkrichterbrug. Hierdoor moeten we meer rekening houden met de piekbelasting van de transformator dan met de continue belasting. We hebben dit geheel dan ook gesimuleerd in PSPice. Een schema ervan is te vinden in figuur 4.34(a).

In figuur 4.35 vindt u een simulatieresultaat terug. Daarin ziet u dat we initieel een grote piekstroom krijgen om de condensator op te laden. In regime krijgen we nog piekstromen die tot 9A gaan, terwijl nominaal de piekstroom door de transformator maar  $2\sqrt{2}A = 2.8A$  bedraagt. Deze continue piekstromen kunnen we beperken door gebruik te maken van een zelfgewikkelde smoorspoel. Een schema hiervan is te vinden in figuur 4.34(b).

In figuur 4.36 staat het resultaat. De initiële piekstroom is nu nog iets groter, maar we merken op dat dit simulaties zijn. In de praktijk krijgen we te kampen met verzadigingsverschijnselen in de transformator, waardoor de initiële piekstroom toch enigszins beperkt blijft. Het belangrijkste is dat de smoorspoel de piekstromen in regime toch vermindert tot 6A. In regime krijgen we dus een iets betere belasting van de transformator met de smoorspoel dan zonder smoorspoel, waardoor de transformator minder sterk thermisch belast wordt.



Figuur 4.34: Schema van de voeding voor de hulplader



Figuur 4.35: Spannings- en stroomvormen in de voeding, zonder smoorspoel



Figuur 4.36: Spannings- en stroomvormen in de voeding met smoorspoel

Voor linear mode designs dienen we de worst-case vermogensdissipatie te berekenen van de PNP transistor Q1 en de diode D1:

$$PD_{Q1} = (max. \ voedingsspanning - min. \ batterijspanning) \cdot (laadstroom)$$
$$= (25V - 10V) \cdot 0.5A$$
$$= 7.5W$$
(4.10)

We kiezen als transistor een 2N6109. Deze mag een collectorstroom voeren van 7A (DC) en kan een vermogen dissiperen tot 40W. De transistor dient dus gekoeld te worden met een koelvin en eventueel met een ventilator om er voor te zorgen de case temperatuur niet boven de 120°C gaat, want bij deze temperatuur mogen we nog net een vermogen dissiperen van 10W.

40 PD, POWER DISSIPATION (WATTS) 30 20 10 0 20 100 120 140 0 40 60 80 160 T<sub>C</sub>, CASE TEMPERATURE (°C)

2N6107 2N6109 2N6111 2N6288 2N6292



De diode D1 moet maximaal een stroom van 500mA voeren, we kiezen daarom voor D1 een 1N4006 diode. Deze mag een continue stroom van 1A voeren. Voor hoge DC voedingsspanningen en voor de reductie van de vermogensdissipatie in lineaire mode van de MAX713 is het aan te raden om een cascade connectie te maken van twee transistoren. Een voorstelling daarvan ziet u in de figuur hiernaast.



Figuur 4.38: Cascade verbinding van Q1 met 2N3904

De stroom in de V+ klem moet tussen de 5 en 20mA liggen. Dit is eenvoudig instelbaar door de waarde van R1 aan te passen.

$$R1 \le \frac{\text{minimale voedingsspanning} - 5V}{5mA} = \frac{25V - 5V}{5mA} = 4k\Omega \tag{4.11}$$

Wij hebben R1 gelijk aan  $3.3k\Omega$  genomen.

Rsense wordt gebruikt door de MAX713 om een maat te hebben voor de laadstroom (terugkoppeling). Deze weerstandswaarde moet vrij nauwkeurig gekozen worden.

$$Rsense = \frac{0.25V}{I_{nom}} = \frac{0.25V}{500mA} = 0.5\Omega$$
(4.12)

Om deze waarde te bekomen hebben we twee weerstandjes van 1 $\Omega$  parallel geplaatst.

We hebben nu alle componenten geselecteerd, het totale schema kan u zien in figuur 4.39. De FO's op het bordje zijn fast-on's (vlakstekkers), zodat we een verbinding kunnen maken tussen het PCB en een externe component. FO5 en FO6 zijn afkomstig van de transformator. FO3 en FO2 maken de verbinding met de smoorspoel. FO1 en FO2 die met de afvlakcondensator. FO7, FO8, FO12 en FO13 verzorgen de verbinding met het relais die de batterijgroepen schakelt naargelang ze in gebruik zijn of geladen worden. De volledige partlist vindt u in tabel 4.1.

$IC_1$	MAX713CPE	$R_2$	$120\Omega$	$R_6$	$3,3\mathrm{k}\Omega$	$R_{10}$	$1\Omega$
$IC_2$	MAX713CPE	$R_3$	$68 \mathrm{k}\Omega$	$R_7$	$120\Omega$	$R_{11}$	$1\Omega$
$B_1$	test	$R_4$	$22 \mathrm{k}\Omega$	$R_8$	$68 \mathrm{k}\Omega$	$R_{12}$	$1\Omega$
$R_1$	$_{3,3\mathrm{k}\Omega}$	$R_5$	$1\Omega$	$R_9$	$22 \mathrm{k}\Omega$	$C_1$	680 nF
$C_2$	330nF	$C_6$	680 nF	$C_{10}$	10nF	$Q_2$	2N3904
$C_3$	10nF	$C_7$	330 nF	$D_1$	1N4006	$Q_3$	2N6109
$C_4$	$330 \mu F$	$C_8$	10 nF	$D_2$	1N4006	$Q_4$	2N3904
$C_5$	10 nF	$C_9$	$330 \mu F$	$Q_1$	2N6109		

Tabel 4.1: Partlist hulplader

De PCB printplaat van de hulplader is weergegeven in figuur 4.41. In bijlage J vindt u de top en bottom layer van deze plaat in aparte figuren. De totale uitwerking tenslotte is te zien in figuur 4.40.



Figuur 4.39: Schema van de hulplader met MAX713



Figuur 4.40: Praktische realisatie van de hulplader



Figuur 4.41: PCB plaat van de hulplader

We hebben nu dus reeds een voeding van 24VDC, afkomstig van een batterijpack dat we kunnen opladen. Deze 24VDC moet echter nog omgezet worden naar 15VDC en 5VDC voor de voeding van IC's in de sturing van de wagen. Dit is het volgende punt van onze behandeling.

# 4.5 DC/DC convertor

#### 4.5.1 24V - 15V DC/DC convertor

Na een beetje zoekwerk hebben we een gebruikte DC/DC convertor gevonden op een machine die voor afbraak bestemd was. Het is een convertor van het merk *PolyAmp AB* sweden. Er staat geen type op en ook geen nominaal vermogen. Dus wij hebben deze convertor gebruikt in de hoop dat hij voldoende stroom kan leveren voor onze toepassing. Na verscheidene tests konden we concluderen dat hij geschikt is.

#### 4.5.2 15V - 5V DC/DC convertor

Om op een eenvoudige manier een 5VDC te bekomen, kunnen we eveneens een DC/DC convertor gebruiken. Deze keer hadden we echter minder geluk bij onze zoektocht naar een gebruikte convertor. Bovendien hebben we maar een heel klein vermogen nodig op 5V, want deze voeding zal enkel gebruikt worden voor de voeding van enkele logische IC's. We hebben dus al meer dan genoeg met 100mA. Om prijsredenen was de aankoop van een nieuwe convertor uitgesloten. Er is echter nog een andere en vooral goedkope mogelijkheid, door gebruik te maken van een spanningsstabilisator van 5V. Een heel frequent gebruikt type is de LM7805, die stromen tot 1A mag



Figuur 4.42: Spanningsstabilisator LM7805

leveren. Hiernaast ziet u een figuur ervan. We plaatsen parallel aan de ingang en uitgang twee condensatoren van elk 100nF, om ruis te onderdrukken.

# 4.6 Micro B Plus drive & motor

BLDC motoren bestaan uit twee delen: de motor en de bijhorende drive (sturing). In de figuur 4.44 ziet u de interne opbouw van een BLDC motor. Er wordt inwendig een draaiveld gecreëerd door de juiste 2 windingen, afhankelijk van de rotorpositie, te bekrachtigen. Ingebouwde Hall-sensoren detecteren die rotorpositie. In figuur 4.45 vindt u een schematisch diagram van een BLDC motor met drive. Die drive is in ons geval de Micro B plus 200 20/40, een full DC four quadrant servo drive. De vermogenstrap is gerealiseerd met MOSFETs en gestuurd met een 22khz PWM signaal. De Micro B plus heeft enkel één power supply nodig. De nodige stuurspanningen maakt hij zelf inwendig aan. In bijlage K is de handleiding te vinden, en hiernaast ziet u een foto ervan.



Figuur 4.43: Micro B plus drive



Figuur 4.44: Interne opbouw van een BLDC<sup>[14]</sup>



Figuur 4.45: Schematisch diagram  $BLDC^{[14]}$ 

We krijgen positie- en snelheidsfeedback van de motor via Hall-sensoren en een encoder. De encoder geeft 2048 pulsen per omwenteling. Het is ook mogelijk om de dynamische constanten in de sturing van de drive aan te passen. En uiteraard is de drive ook uitgerust met elektronische beveiligingen, waardoor hij zichzelf kan uitschakelen. Deze beveiligingen beschermen drive en motor. Bij eventuele tussenkomst van de beveiligingen, krijg je een indicatie aan de hand van LED's. De bedrijfstemperatuur moet tussen 0 en 40°C liggen. In ons geval zijn we verplicht van extra koeling te voorzien met behulp van twee ventilatoren.

De motor dan is 6 polig en sinusoïdaal. Het verloop van de inductie over de omtrek van de rotor heeft een overgangsvorm gelegen tussen een sinus en een blokgolf (zie figuur 4.46). De geïnduceerde emk in één fase ziet er uit als een soort trapezoïdale golf.  $(e_p = 2 B v l)$ 



Figuur 4.46: Inductie over de omtrek

Om een effectieve energieomzetting te krijgen, dient het tijdsverloop van de stroom eveneens trapezoïdaal te zijn. Een trapezoïdale stroomvorm is niet mogelijk, omdat de som van alle stromen in de drie fasen gelijk moet zijn aan nul. Wat wel mogelijk is, is een blokvorm. We hebben met andere woorden te maken met een CSI invertor, die stroomblokken uitstuurt van 120° geleidingsduur. Om een zo hoog mogelijk uitgangsvermogen te krijgen dienen emk en stroom in fase te zijn met elkaar. Het moment om de stroomblokken te sturen hangt bijgevolg af van de rotorpositie.

Het ontwikkelde vermogen in één fase is bijgevolg ook blokvormig. Indien we dit vermogen uitmiddelen over de drie fasen, krijgen we een constant vermogen dat gelijk is aan het dubbele van het maximale vermogen in één fase. Dit alles kan u zien in figuur 4.47.



Figuur 4.47: Golfvormen in één fase

Wat gebeurt er nu als de emk en de stroom van één fase niet in fase zijn? Er zijn dan momenten waarop de voedingspanning aangelegd is aan de wikkeling, terwijl in de wikkeling zelf een emk aanwezig is die lager is dan de normale emk. Hierdoor zal de stroom door de wikkeling groter zijn dan normaal. Dit effect is duidelijk waarneembaar in onze motor. In de volgende figuur ziet u de stroomvorm door één fase van de motor terwijl hij in gebruik is.



Figuur 4.48: De stroomvorm in één fase van onze motor

U ziet twee piekjes per geleidingsblok. Dit komt omdat de motor in ster geschakeld is<sup>[23]</sup>. De stroom in één fase is dan gedurende de helft van de tijd gelijk aan de afzonderlijke stroom door elke andere fase, omdat er steeds één fase onbelast is. Het eerste piekje is afkomstig van de laattijdige uitschakeling van de andere fase, terwijl het laatste piekje komt door de laattijdige uitschakeling van de eigen fase. Deze stroompiekjes zullen wel aanleiding geven tot koppelrimpel, maar dat heeft voor ons amper gevolgen aangezien de inertie van de aandrijving en de wagen enorm groot zijn.

De stroomregeling (koppelregeling) wordt bekomen door de voedingsspanning al choppend op de fase van de motor aan te brengen, zodat de emk ongeveer gelijk wordt aan de gemiddelde aangelegde spanning. Met die emk stemt een bepaald toerental overeen, het koppel (stroom) dat hierbij hoort hangt af van de last. Via een terugkoppeling van de stroom in de toevoerleiding, kunnen we op deze manier een stroomregeling bekomen.

Naarmate de snelheid van de motor stijgt, zal de emk mee toenemen, tot de emk de voedingsspanning benadert. Dan komt de stroomregeling in het gedrang waardoor de koppelwenswaarde niet meer gehaald wordt bij hoge snelheden. De CSI omvormer gaat dan tenslotte over naar een VSI omvormer met 120° geleidingsduur, de chopfunctie vervalt volledig.

# 4.7 Snelheidsdetecties

Uit hoofdstuk 3 is bekend dat we werken met een schakelbare elektromagnetische koppeling om mechanisch over te gaan naar een hogere gang. Het punt waarop we de koppeling inschakelen kan vrij bepaald worden. We beogen echter een grote acceleratie van de wagen, waardoor het voordeligste is dat we zo lang mogelijk in de eerste gang blijven. Met andere woorden, het punt waarop we de koppeling zullen inschakelen is het punt waarop de motor zijn maximaal haalbaar toerental bereikt heeft in eerste gang. Theoretisch is dit toerental gelijk aan 3000tr/min.

In het begin van dit hoofdstuk werd reeds vermeld dat dit toerental niet altijd gehaald wordt, en dat het maximaal haalbare toerental sterk afhangt van de batterijspanning. Daarom kunnen we geen absolute sensor gebruiken die een stuursignaal geeft aan de koppeling van zodra we 3000 tr/min halen, omdat we dan niet altijd in staat zouden zijn om over te schakelen naar de hoogste gang. Wat wel mogelijk zou zijn, is dat we bijvoorbeeld steeds overschakelen op 2250 tr/min (dit is het kleinste maximaal haalbare toerental), maar dan is de acceleratie niet meer optimaal bij volle batterijen.

We dienen dus een systeem te ontwikkelen dat bepaalt wanneer we het maximale toerental van de motor bereikt hebben, bij een bepaalde toestand van de batterijen. Hiervoor is een geschikt signaal nodig, dat een welbepaalde eigenschap heeft bij het bereiken van dat maximaal toerental. Na enig zoekwerk, hebben we op de drive een punt gevonden dat een signaal geeft dat sterk afhankelijk is van het toerental van de motor. Het verloop van dat signaal in functie van het toerental ziet er als volgt uit:



(c) Signaal bij maximaal toerental

(d) Meetpunt op de drive

Figuur 4.49: Signalen snelheidsdetectie

Het signaal varieert tussen 0V en +5V en heeft een frequentie die mee varieert met het toerental. Bij lage toerentallen dient er steeds gechopt te worden bij een PWM sturing, naarmate het toerental stijgt moet er minder gechopt worden, om uiteindelijk over te gaan in een blokgolf bij maximaal toerental. Dit fenomeen is ook merkbaar in het signaal dat wij gebruiken.

We moeten dus een systeem ontwerpen met als enige output een logisch signaal, dat detecteert of we al dan niet een chopsignaal hebben. Indien er gechopt wordt, mag de koppeling niet worden aangestuurd en is het logische signaal dus 0.



We geven eerst het schema van het ontworpen systeem, en zullen aan de hand van het schema de werking uitleggen.

Figuur 4.50: Schema van de maximale-snelheidsdetectie

Het signaal dat afkomstig is van de drive bevat piekspanningen. Om er zeker van te zijn dat deze piekspanningen onze elektronica niet kunnen beschadigen, plaatsen we aan de ingang een weerstandje van  $1k\Omega$  en een Zener-diode van 5.1V. Om een éénduidig spanningsniveau te krijgen plaatsen we ook een Schmitt-trigger invertor op deze ingang. Als het ingangssignaal nu een chopfunctie bevat, dan krijgen we dit ook op de uitgang van deze invertor. Als op de uitgang van de invertor +5V staat, dan laadt C3 zich op via diode D1 en condensator C1. Condensator C3 is echter een heel stuk kleiner dan C1, waardoor C3 de meeste spanning opneemt. C1 laadt maar heel weinig op. Als de spanning terug naar 0V zakt op de uitgang van de invertor, dan zal condensator C3 zich volledig ontladen over diode D3. Condensator C1 zal zich ook ontladen, maar echter over een heel grote weerstand R7. Als het uitgangssignaal van de invertor dus een chopfunctie bevat, zullen we dus heel snel C3 opladen en ontladen. En bijgevolg zal de spanning over C1 relatief hoog zijn, want hij ontlaadt zich niet zo snel als dat hij wordt opgeladen. Als het chopsignaal nu wegvalt (bijvoorbeeld bij maximaal toerental van de motor), dan zal C1 minder worden opgeladen, terwijl de snelheid van ontlading gelijk blijft. De spanning over C1 zal dan relatief laag zijn.



Figuur 4.51: Signalen van de maximale-snelheidsdetectie bij chopfunctie

Weerstand R10 zal praktisch geen invloed hebben op de werking die hiervoor is uitgelegd, maar hij is wel noodzakelijk. Als de motor niet draait, dan is het signaal dat we van de drive krijgen een constante spanning gelijk aan de groundspanning. De uitgang van de invertor wordt dan continu +5V. Bij afwezigheid van R10, zal over C3 de volledige 5V komen te staan, omdat C1 zich volledig ontlaadt over R7. Hierdoor zouden we dus niet alleen bij maximaal toerental maar ook bij stilstand een lage spanning over C1 krijgen. Dit is natuurlijk niet gewenst, en kan eenvoudig vermeden worden door de plaatsing van R10. Bij stilstand hebben we dan het effect dat de uitgangsspanning zich mooi verdeelt over C1 en C3, waardoor de spanning over C1 dus toch hoog blijft bij stilstand.

We hebben echter nog een redelijke rimpel op de spanning van C1. Om deze spanningsrimpel weg te werken maken we gebruik van een RC filter (R5, C2). Deze filter kunnen we onmogelijk direct aansluiten op de condensator C1, aangezien hij de spanning op C1 volledig zou verstoren. Daarom moeten we dat signaal eerst versterken (factor 2) met een opamp schakeling (U2A). Vervolgens wordt het afgevlakte signaal vergeleken met een ingestelde spanning in een comparatorschakeling. Indien de spanning over C1 hoog is (chopfunctie), dan zal de comparator een hoge spanning geven aan de uitgang. De uitgang van de comparator sturen we met een spanningsdeler in nog een Schmitt-trigger invertor. Deze spanningsdeler was nodig omdat de lage uitgangspanning van de opamp nog als een hoge spanning werd gezien door de invertor. Het logische signaal uit de invertor geven we de naam D0 in onze verdere behandeling.



Figuur 4.52: Signalen van de maximale-snelheidsdetectie zonder chopfunctie

Deze schakeling werd eerst getest op een breadboard. In figuur 4.54 ziet u een foto hiervan. De opgemeten signalen bij deze test vindt u terug in figuur 4.53. Daar ziet u onderaan (blauw) het ingangssignaal afkomstig van de drive en bovenaan (geel) het uitgangsignaal. De linkse foto is genomen bij een gemiddelde snelheid, terwijl de rechtse foto genomen is bij maximale snelheid. Deze schakeling werd samen met nog twee volgende schakelingen geïntegreerd op één PCB plaat.



Figuur 4.53: Opgemeten signalen van de snelheidsdetectie



Figuur 4.54: Foto van het snelheidsdetectiecircuit op een breadboard

We hebben nu al een signaal dat zegt wanneer we moeten schakelen naar een hogere versnelling, maar we weten nog steeds niet wanneer we moeten terug schakelen naar de eerste gang. Hetzelfde signaal kunnen we niet nemen. Van zodra de koppeling geschakeld wordt, zakt het toerental van de motor sterk, en valt het signaal om te schakelen volledig weg. Bovendien moet er enigszins een hysteresis-effect zijn, zodat de koppeling niet constant aan en uit zou schakelen als we rond een bepaalde snelheid rijden (de schakelsnelheid is afhankelijk van de batterijspanning).

Bij het terugschakelen naar de eerste gang is het ook niet nodig om direct te schakelen bij de snelheid waarbij het toerental in de eerste gang onder het maximaal haalbare toerental ligt. Dit omdat we dan toch aan het vertragen zijn, en we in de meeste gevallen niet hoeven op te trekken. Daarom hebben we besloten om het terugschakelen naar de eerste gang te leggen op een vaste snelheid. Deze snelheid moet iets minder zijn dan de ondergrens van de haalbare maximale snelheid in eerste gang, die optreedt bij lege batterijen en dus bij een toerental van 2250tr/min. De snelheid die hiermee overeenstemt is 43km/h. We zullen dus terugschakelen bij 40km/h, wat overeen komt met een toerental van 1200tr/min in de hoogste gang.

Samengevat: we dienen dus een systeem te ontwikkelen dat detecteert of de motor trager draait dan 1200tr/min. Dit systeem noemen we de terugschakeldetectie. Analoog aan de

maximale-snelheidsdetectie, tonen we ook hier eerst het schema en verklaren we naderhand de werking. Aangezien we in dit geval een absolute detectie nodig hebben, en geen relatieve, werken we met een signaal dat afkomstig is van de encoder. Deze geeft 2048 pulsen per omwenteling, en levert zo dus een blokgolf waarvan de frequentie evenredig is met het toerental. De duty ratio is constant en gelijk aan 50%. De frequentie van dit signaal bij 1200tr/min is 41kHz wat een periode oplevert van  $24.4\mu$ s:

$$f = \frac{1200tr/min * 2048pulsen/tr}{60s/min} = 40960Hz$$
(4.13)

$$T = \frac{1}{2\pi f} = 24.4\mu s \tag{4.14}$$



Figuur 4.55: Schema van de terugschakeldetectie



Figuur 4.56: Signaal van de terugschakeldetectie bij een snelheid trager dan 40km/h



Figuur 4.57: Signaal van de terugschakeldetectie bij een snelheid sneller dan 40km/h

Het encodersignaal wordt afgetapt met een weerstand van  $10k\Omega$  en een coaxkabel, om het signaal zo weinig mogelijk te verstoren. Het komt dan uiteindelijk toe op de ingang (klem 4) van een monostabiele multivibrator type CD4538B. Deze IC krijgt dus een blokgolf met een bepaalde frequentie en een welbepaalde pulsbreedte aan zijn ingang. Op het moment dat de IC een stijgende flank waarneemt op zijn ingang, zal hij de uitgang hoog maken gedurende een instelbare tijd (pulsbreedte). Wij hebben deze pulsbreedte op  $9\mu$ s ingesteld omdat dit rond het schakelpunt een mooie verdeling geeft tussen aan- en uittijd van het signaal. Deze pulsbreedte is aanpasbaar door de potentiometer R21 te verdraaien. Op de uitgang vinden we dus opnieuw een blokgolf terug, maar de blokken van deze golf hebben allemaal dezelfde ingestelde lengte, ongeacht de frequentie. We krijgen dus nu een signaal waarvan de duty ratio evenredig is met de frequentie van het ingangssignaal. Bij hoge ingangfrequenties krijgen we uit de monostabiele multivibrator hoge uitgangfrequenties en een hoge duty ratio. Hierdoor zal de spanning over condensator C6 een relatief hoge waarde aannemen, terwijl bij lage frequenties de spanning over C6 ook lager zal zijn. Het principe is verder analoog aan de maximale snelheidsdetectie. We krijgen dan aan de uitgang een signaal dat laag wordt als we sneller rijden dan 40km/h, dit signaal noemen we D1. Ook dit systeem werd op een breadboard eerst uitgewerkt en getest.

Een CD4538B heeft twee monostabiele multivibrators aan boord, en de tweede kan gebruikt worden in het volgende systeem. De gehele aandrijving van de wagen is namelijk voorzien om remenergie te recupereren in de batterijen. Dit is mogelijk door de motor aan te sturen met een tegengesteld koppel, zodat hij als generator begint te werken. Maar hier schuilt een groot probleem: Indien we bij lage snelheden of zelfs bij stilstand toch nog elektrisch zouden remmen, dan kan de wagen van richting veranderen omdat de motor een tegengesteld gericht koppel blijft leveren. U ziet in dat dit tot totaal onverwachte en gevaarlijke situatie kan leiden. Wij hebben hier twee oplossingen voor uitgewerkt:

- Een systeem analoog aan de terugschakel detectie, maar dan met het detectiepunt rond 5km/h in plaats van 40km/h. Als uitgang hebben we geen logisch signaal nodig, maar wel een relais die schakelt als we elektrisch mogen remmen.
- Pas later hebben we gezien dat het ook eenvoudiger kon. Op de drive is er een optie aanwezig waarmee je kan instellen in welke richting de motor mag draaien en in welke niet. Hierdoor was het probleem onmiddellijk van de baan. Als de wagen in vooruit staat sturen we een signaal naar de overeenkomstige klem van de drive, zodat die de motor enkel in de juiste zin laat draaien. Voor verdere details verwijzen we naar de algemene sturing. Deze oplossing verdient uiteraard de voorkeur omwille van haar eenvoud en stabiliteit.

In figuur 4.58 vindt u het totale schema van de snelheidsdetectie, waarvan een derde dus niet meer gebruikt wordt. Door zijn grootte is het vrij klein afgedrukt maar u kan dit altijd ingezoomd bekijken op bijgevoegde DVD's. Deze circuits zijn allemaal samengebracht op één PCB. In figuren 4.59 en 4.60 vindt u een totaal beeld en een foto van dit PCB.



Figuur 4.58: Totaal schema snelheidsdetectie



Figuur 4.59: PCB voor de snelheidsdetectie



Figuur 4.60: Foto van het PCB voor de snelheidsdetectie

## 4.8 Sturing elektromagnetische koppeling

De elektromagnetische koppeling kan om verscheidene redenen moeten worden geschakeld. We zetten ze hier even op een rijtje:

- eerste gang  $\leftrightarrow$  tweede gang
- elektrisch remmen
- achteruit rijden
- manuele bediening van de koppeling (test-situatie)

We beginnen met de sturing van de koppeling voor de overgang tussen eerste en tweede gang. Uit paragraaf 4.7 weten we dat we twee logische signalen D0 en D1 krijgen die zullen bepalen in welke stand de koppeling moet staan. D0 wordt hoog op het moment dat we moeten schakelen naar de hoogste gang. D1 wordt hoog als we moeten terugschakelen van de hoogste gang naar de laagste gang. Q0 noemen we de stand van de koppeling, waarbij Q0=1 overeen komt met een ingeschakelde koppeling. We hebben echter ook een geheugenfunctie nodig, aangezien de koppeling in het hysteresisgebied (tussen 40km/h en de schakelsnelheid bij  $1\rightarrow 2$ ) zijn vorige toestand moet behouden.  $Q0_{oud}$  stelt de vorige toestand voor van de koppeling, terwijl Q0 de nieuwe toestand weergeeft. De waarheidstabel die hierbij hoort:

D0	D1	$Q0_{oud}$	$\mathbf{Q0}$
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	DC
1	1	1	DC

Tabel 4.2: Waarheidstabel sturing koppeling

De volgende logische uitdrukking voldoet hieraan:

$$\overline{Q0} = \overline{D0}.D1 + \overline{D0}.\overline{Q0}_{oud}$$

Wanneer we deze omzetten in een logische schakeling krijgen we het schema dat u kan zien op figuur 4.61. Let hierbij op keuze van de logische componenten. In principe kan men deze schakeling nog vereenvoudigen, maar NAND poorten zijn couranter dan AND


Figuur 4.61: Logische schakeling voor de sturing van de koppeling

Nu hebben we een signaal waarmee we de koppeling kunnen aansturen bij de overgang tussen de twee versnellingen. Ze kan echter ook gestuurd worden door een signaal afkomstig van de rem, achteruit en een testsignaal. Bovendien schakelen we de koppeling in via een relais. Dat relais kan onmogelijk rechtstreeks gestuurd worden met een logische IC. Het type dat wij gebruiken neemt een stroom op van 60mA bij 15VDC. Hierdoor zijn we verplicht het relais aan te sturen met een transistor. Een mogelijke oplossing om deze transistor op zijn beurt aan te sturen vindt u in het schema van figuur 4.62.

We hebben daarbij gebruik gemaakt van 3 opamps, die we zodanig schakelen dat ze als comparator werken en dat hun uitgangen zodanig verbonden zijn dat we een soort OF poort creëren. Afhankelijk van de reden waarom de koppeling ingeschakeld dient te worden zal één van de opamps nu de transistor (2N3904) van 7mA stroom voorzien. Diode D5 is nodig omdat het mogelijk is dat we -10V kunnen krijgen op die ingang. Deze negatieve spanning mag zeker niet op de ingangsklem van de opamp komen, want zij valt buiten de common-mode spanning van de opamp.

Op figuur 4.62 staat ook de eigenlijke voeding van de koppeling, die u iets duidelijker kan zien op het schema van figuur 4.63. De manier waarop we de koppeling inschakelen willen we regelbaar maken, zodat we zelf kunnen instellen hoe agressief de koppeling precies inschakelt. De stroom door de koppeling is een maat voor de kracht waarmee de koppelingshelften tegen elkaar worden gedrukt. Deze kracht is dan weer recht evenredig met het overdraagbaar koppel. Door dus de vorm van de stroom door de koppeling in functie van de tijd te manipuleren, zijn we ook in staat het koppel in functie van de tijd in te stellen. Met een eenvoudig RC-netwerk kun je elektrisch een signaal krijgen dat varieert in de tijd. De tijdsconstante van dit RC netwerk is dan een maat voor de agressiviteit van de koppeling. De stroom die er door loopt sturen we met een Darlingtontransistor. De basisstroom daarvan wordt bepaald door het RC netwerkje, dat bestaat uit een potentiometer van  $10k\Omega$  en een condensator van  $200\mu$ F.



Figuur 4.62: Totaal schema van de sturing van de koppeling



Figuur 4.63: Voeding van de koppeling



Hier ziet u enkele simulaties van het gebruikte systeem:

Figuur 4.64: Stroom in de koppeling ifv de stand van de potentiometer

In welke stand we de potentiometer moeten plaatsen zullen praktijktests moeten uitwijzen. We merken hier nog op dat een koppeling die heel zacht inkoppelt, een koppelingstijd heeft die redelijk groot is. De gedissipeerde warmte en slijtage in de koppeling zullen bijgevolg dan ook veel groter zijn dan bij een redelijk agressieve inkoppeling. En bovendien zal de vlotte versnelling van de wagen in het gedrang komen. Hier dient dus een compromis gezocht te worden tussen comfort en techniek.

## 4.9 Signalen van en naar de bestuurder

Om de wagen de nodige acties te laten uitvoeren, moet de gebruiker in staat zijn deze op een eenvoudige manier kenbaar te maken. Wij hebben dan ook de standaard bedieningen geïnstalleerd.

- Vooruit / neutraal / achteruit
- Contact (aan / uit)
- Versnellen / Vertragen

De eerste twee worden ingesteld door de bestuurder aan de hand van twee elektrische schakelaars. Hier wordt verder op ingegaan in paragraaf 4.10. Het versnellen en vertragen van de wagen gebeurt zoals bij een gewone auto met twee pedalen. Het is de bedoeling dat de stuurkast een proportioneel signaal krijgt van de bestuurder. Naarmate



Figuur 4.65: Gebruikte schuifpotentiometer

het pedaal verder ingedrukt wordt dient dus de signaalspanning mee te stijgen. De eenvoudigste oplossing hiervoor zijn twee schuifpotentiometers. Eén om te versnellen en één om te vertragen. We nemen potentiometers van  $10k\Omega$ . Zoals zal blijken uit het hoofdstuk algemene sturing is de voedingsspanning van deze potentiometers maximaal 10V in absolute waarde. Hierdoor is het stroomverbruik beperkt tot 1mA per potentiometer.



Figuur 4.66: Verloop van de signaalspanning ifv de pedaalindrukking

Het verloop van de signaalspanning is dus duidelijk niet lineair, maar eerder kwadratisch oplopend. Deze karakteristiek is ongeveer gelijkvormig met de weerstandscurve op vlakke baan. Naarmate we sneller rijden zal de weerstand kwadratisch toenemen. Hierdoor kunnen we bij benadering zeggen dat de indrukking van het versnellingspedaal ongeveer recht evenredig is met de snelheid op vlakke weg.

De potentiometers worden met veertjes aan de pedalen gekoppeld. Deze hebben een beveiligingsfunctie. Indien de pedaal door de bestuurder verder ingedrukt wordt dan het bereik van de potentiometer, zullen de veertjes uitrekken en zo de potentiometer beveiligen tegen breuk. In de volgende foto's ziet u de realisaties hiervan.



(a) Versnellingspedaal met potentiometer stand halfweg



(c) Rempedaal met combinatie hydraulische rem en elektrische potentiometer

(b) Versnellingspedaal met potentiometer in uiterste stand



De bestuurder wil natuurlijk ook signalen ontvangen van de wagen:

- Alles OK
- Koppeling ingeschakeld

- Toestand van de batterijen
- Koppel dat de motor levert
- Snelheid van de wagen

De eerste twee kunnen we aangeven dmv een LED. De laatste drie vereisen een display. Dat levert volgende besturingsconsole op:



Figuur 4.68: Besturingsconsole

We beginnen met de eenvoudigste, namelijk de weergave van de snelheid. Het zou eventueel mogelijk zijn om uitgaande van het toerental van de motor en de stand van de koppeling een schatting te maken van de snelheid van de wagen, maar dit zou redelijk omslachtig en ingewikkeld worden. We opteerden dus om het zo eenvoudig mogelijk te houden, wat meestal ook de hoogste bedrijfszekerheid geeft. Aangezien wij met onze wagen snelheden zullen halen die lager zijn dan 100km/h, kunnen we gebruik maken van standaard fietscomputers. Het magneet-reed-contactsysteem plaatsen we op het voorwiel van de wagen, dan is er ook geen probleem met de effectieve snelheid van de wagen in bochten.

Voor de procentuele weergave van de batterijstand en het koppel maken we gebruik van twee kleine voltmetertjes, zoals u in de figuur hiernaast kan zien. Deze kunnen een verschilspanning tot 200mV meten. Voor de koppelmeting gebruiken we een signaal dat afkomstig is van de drive van de motor. Deze geeft een signaalspanning van 0 tot 7V evenredig met het koppel van de motor. Bij een onbelaste motor krijgen we 0V, 3.5V komt overeen met het nominale koppel, 7V is het dubbele (piekkoppel). We kiezen voor een procentuele uitlezing.



Figuur 4.69: Voltmeter SP 200

Het getal dat op de voltmeter komt is de procentuele waarde van het koppel: 100% is het nominale koppel. Aangezien de voltmeter maar verschilspanningen tot 200mV kan meten moeten we gebruik maken van een spanningsdeler, die u op de figuur hiernaast kan zien. We kiezen R1 gelijk aan 100k $\Omega$ , R2 moet dan 2.94k $\Omega$  groot zijn. We gebruiken daarom voor R2 een regelbare weerstand van 5k $\Omega$ . De middenaftakking in de spanningsdeler is de plus klem van het signaal op de voltmeter, de min klem hangen we gewoon aan de ground.

Voor de batterijstand is het iets ingewikkelder aangezien we de energieinhoud procentueel willen weergeven. Bij lege batterijen hebben we nog een spanning van 168V over de cellen. Bij volledig opgeladen batterijen krijgen we 230V over de cellen. We kunnen nu dus de minklem niet aan de ground hangen, omdat we een soort offset-spanning hebben. We hebben dan ook een dubbele spanningsdeler nodig.

De grootte van de offsetspanning kan bepaald worden uitgaande van volgende vergelijkingen:

$$V_{offset} = 168V * \frac{R6}{R5 + R6}$$
$$V_{offset} + 0.1V = 230V * \frac{R6}{R5 + R6}$$
$$\Rightarrow V_{offset} = 0.27V$$



Figuur 4.70: Spanningsdeler



Figuur 4.71: Dubbele spanningsdeler

R3 kiezen we gelijk aan  $100k\Omega$ . R4 moet ingesteld worden op  $5.7k\Omega$ . R5 kunnen we opnieuw kiezen, we stellen deze gelijk aan  $820k\Omega$ . R6 moet dan gelijk zijn aan  $1324\Omega$ .

#### 4.10 Algemene sturing

Met de algemene sturing maken we de link tussen de drive, besturingen, snelheidsdetecties en koppeling. De algemene sturing is het laatste element dat de hele elektrische aandrijving compleet maakt.

De drive geeft de mogelijkheid om de motor koppelgestuurd of snelheidsgestuurd te bedienen. De meest natuurlijke vorm om een wagen aan te sturen is koppelsturing, dit is analoog met het gaspedaal in een gewone auto. Snelheidssturing heeft ook echter enkele voordelen. Stel dat de wagen met één wiel in een losse berm rijdt en dat het wiel doorslipt. Bij koppelsturing zou het wiel op hol slaan, maar bij snelheidsturing zal het toerental van het wiel een voorgeschreven waarde proberen volgen, ongeacht het tegenwerkend koppel. Een volgende stap is dan dat er een detectie zou zijn om eventuele buitensporige slip van een wiel te detecteren. Deze zou dan een signaal moeten geven naar de drive van het wiel dat doorslipt om over te gaan op snelheidsregeling, met een snelheidswenswaarde gelijk aan het toerental van het andere (niet doorslippende) wiel.

Omdat wij slechts één motor beschikbaar hadden en een tekort aan tijd, hebben we deze detectie niet uitgewerkt. Maar we hebben wel een systeem voorzien dat mogelijk maakt dat we zelf manueel kunnen schakelen tussen koppelsturing en snelheidsturing. Het is daarbij niet zo eenvoudig dat er een schakelaartje op de drive staat waarmee we kunnen schakelen tussen koppelregeling en snelheidsregeling. Er moeten enkele aanpassingen gebeuren wil men eenvoudig kunnen overschakelen. We geven eerst een voorbeeld van beiden, waarbij we beginnen met de snelheidsregeling:



Figuur 4.72: Voorbeeld van een configuratie met snelheidsregeling

De drive OK is een open-collectoruitgang van 50mA. Hij is normaal gesloten en opent wanneer de drive in beveiliging gaat. Van zodra we dus 24V extern toevoegen op het relais en wanneer de drive in normale werking is, zal de enable-ingang van de drive 10V krijgen en kan de drive de motor aansturen. Om hem in snelheidsregeling te bedrijven, moeten we op de printplaat van de drive enkele soldeerpinnen in de juiste stand zetten. De signalen voor de snelheidsregeling komen toe op +REF en -REF. Door de potentiometer op een bepaalde waarde in te stellen, kunnen we de snelheid van de motor regelen. Om de motor van richting te doen wijzigen moeten we gewoon het teken van de spanning omdraaien. De maximale snelheid die hoort bij 10V verschilspanning op de REF klemmen, dient nog ingesteld te worden. Dit gebeurt door de weerstand RENC op de drive te kiezen volgens het procédé uitgelegd in bijlage K p58. RENC nemen wij dan gelijk aan  $6.8k\Omega$ . CHA en CHB zijn de signalen afkomstig van de encoder, terwijl Hall A, Hall B en HallC de signalen zijn van de Hallsensoren die ingebouwd zijn in de motor.

De configuratie voor koppelregeling ziet er als volgt uit:



Figuur 4.73: Voorbeeld van een koppelregeling configuratie

Het enige verschil met de snelheidsregeling is dat het signaal van de potentiometer toekomt op de TPRC klem van de drive en dat we enkele soldeerpinnen moeten herverbinden. RENC is niet nodig in deze configuratie. De drive zal nu pogen om een stroom door de motor te sturen die evenredig is met de signaalspanning op TPRC. Een spanning van 5V komt overeen met de nominale stroom van de drive (20ADC). Bij 10V gaan we over naar een piekbelasting van wel 40ADC. Volgens de datasheets zou de drive deze piekbelasting maar gedurende enkele seconden mogen aanhouden, maar wij hebben de drive al continu in piekbelasting laten werken, zonder dat de drive in beveiliging gaat. Waarschijnlijk is deze tijdslimiet bedoeld om de wikkelingen in de motor niet te hoog in temperatuur te laten gaan. Wij hebben echter een motor die overgedimensioneerd is voor deze drive, zodat we hier geen rekening moeten mee houden.

We lijsten hier nog even kort de aanpassingen op die moeten gebeuren bij de overschakeling tussen snelheidssturing en koppelsturing. Deze omschakeling is eenvoudig uit te voeren met één of twee relais.

- signaal potentiometer van +REF naar TPRC
- RENC verbinden bij snelheidsregeling
- De soldeerpunten van klem 15 en 16 naar buiten brengen en zo verbinden dat één van beide kortgesloten staat

In voorgaande uiteenzetting hebben we enkel gesproken over één potentiometer. Wij hebben echter twee potentiometers (versnellen en remmen), zodat we op elk moment de juiste dienen te verbinden met de drive. Hiervoor gebruiken we opnieuw een relais. Dit relais wordt bediend door een drukcontact dat op het rempedaal geplaatst is. Van zodra we remmen wordt dit relais bekrachtigd en zal het spanningsignaal afkomstig van de rempotentiometer doorgeschakeld worden naar de drive. Indien we niet remmen heeft de potentiometer van het versnellingspedaal verbinding met de drive.

Tot nu toe hebben we enkel rekening gehouden met een wagen die vooruit rijdt, maar wat als we nu achteruit rijden? Dan willen we dat het rempedaal nog steeds tot doel heeft de wagen te vertragen en dat het versnellingspedaal nog steeds de wagen sneller zal laten rijden. Maar bij het achteruit rijden keren alle koppels om van teken, dus moeten we ook de stuursignalen omkeren van teken indien we een consistente besturing willen behouden. Dit impliceert dus dat we het versnellingspedaal met -10V zullen moeten voeden in plaats van de +10V van de stand 'vooruit'. Door een tweepolige keuzeschakelaar te gebruiken kunnen we dit bekomen. Met deze keuzeschakelaar kunnen we kiezen tussen vooruit, neutraal en achteruit. In de neutrale stand krijgt geen enkele potentiometer een voedingsspanning, hierdoor zijn alle signalen gelijk aan nul.

Op pagina 94 is al aangehaald dat we de motor telkens blokkeren in 1 richting om problemen bij het remmen tegen te gaan. Hiernaast ziet u een figuur uit de handleiding die een mogelijke uitvoering daarvan weergeeft. Door één van de twee schakelaars te openen kunnen we de motor in de overeenkomstige zin laten draaien. Of nog, door een positieve spanning op één van de klemmen aan te leggen kunnen we zo die richting blokkeren.



Figuur 4.74: Richtingsblokkering op de drive

Wij verbinden deze klemmen 17 en 18 met signalen afkomstig van de keuzeschakelaar (V / N / A). Aangezien deze signalen negatieve waarden kunnen aannemen (tot -10V), verbinden we de signalen niet rechtstreeks, maar wel met een diode, zodat enkel de positieve spanningen worden doorgelaten. Bij negatieve spanning zal de overeenkomstige klem met de ground worden verbonden via een weerstand van  $100k\Omega$ .

De motor is ook voorzien van een thermisch contact in de wikkelingen. Dit is een normaal gesloten contact, dat we in serie plaatsen met de drive-OK klem. Zo wordt bij een eventuele oververhitting van de motor, de drive meteen uitgeschakeld.

We hebben nu de hele sturing overlopen. Het totale schema van de stuurkast op zich vindt u in figuur 4.75, waar onderaan een link gemaakt wordt via een parallelle connector naar de besturingen vooraan in de wagen. Een bedradingsschema daarvan is te vinden in figuur 4.76. Op figuur 4.75 staan wel nog een aantal "black boxes":

- De drive, Micro B Plus, waarvan u details kan vinden in K
- Het bord "snelheidsdetectie", waarvan u een schema vindt in figuur 4.58
- Het bord "status + sturing koppeling", dat uitgewerkt staat in figuur 4.62
- En tenslotte het bord "algemene sturing", dat te zien is in meer detail in figuur 4.77

Op het schema van de algemene sturing staan twee 25-pinsconnectoren waar nog niet over gesproken is. De meest linkse connector zorgt voor de interface met de bestuurder, en de bovenste connector maakt de connectie met andere componenten in de stuurkast. Deze bevat de snelheidsdetecties, de sturing van de koppeling, de algemene sturing en de drive.



Figuur 4.75: Bedradingschema van de stuurkast



Figuur 4.76: Bedradingschema van de interface met de bestuurder



Figuur 4.77: Algemene sturing



Tot slot van dit hoofdstuk geven we nog een foto van het resultaat van de stuurkast:

Figuur 4.78: Stuurkast

## Hoofdstuk 5

# Aërodynamica

## 5.1 Inleiding

Aangezien het de bedoeling is van een energiezuinige wagen te ontwerpen, is het uiteraard van groot belang dat hij zo weinig mogelijk weerstand ondervindt. De weerstandskrachten op de wagen zijn van verschillende oorsprong, maar de belangrijkste is de luchtweerstand, zeker naarmate de snelheden hoger worden. Om deze dus te beperken moet de wagen zo aërodynamisch mogelijk ontworpen worden, gegeven de beperkingen van de constructie en een aantal praktische constraints. Nu is deze luchtweerstand afkomstig van twee effecten<sup>[32]</sup>.

#### 5.1.1 Wrijvingsweerstand

Een eerste belangrijk effect is de wrijvingsweerstand. Die wordt veroorzaakt door de viscositeit van de vloeistof en wordt gegeven door volgende formule:

Daarin is  $\mu$  de dynamische viscositeitscoëfficiënt,  $\overleftarrow{\tau}$  de viscositeitsspanningstensor en  $\overleftarrow{\gamma}$  het symmetrisch en spoorloos deel van de vervormingssnelheidstensor: ( $\delta$  is de Kronecker delta, dus gelijk aan 1 voor i = j en anders gelijk aan 0)

$$\overset{\leftrightarrow}{\gamma}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \nabla . v$$
(5.2)

Wij zijn echter alleen maar geïnteresseerd in de spanningen aan de wand, aangezien die als reactie een kracht op de wagen geven. In het geval van aangehechte stroming vereenvoudigt de vergelijking zich tot:

$$\tau_s = \mu \frac{\partial u}{\partial n}(0) \tag{5.3}$$

Met s de richting tangentiaal aan het lokale oppervlak, n de normaal op dat oppervlak, en u de snelheidscomponent tangentiaal aan het oppervlak. Het is dus de de partiële afgeleide van de tangentiale snelheid, berekend aan de wand, die bepalend is. Het snelheidsbeeld wordt dan gegeven door de figuur hiernaast. Is de stroming niet meer aangehecht, dan wordt het beeld een stuk ingewikkelder, maar dat komt verderop terug. De CFD software berekent deze spanningen voor ons in elke volumecel en sommeert ze over het oppervlak. Ook wordt het ingewikkelder bij een oppervlak met een zekere ruwheid. Als namelijk het Reynodsgetal zo groot is dat de grenslaag dunner wordt dan de hoogte van de ruwheidspieken, dan beginnen die de wrijvingsweerstand te beïnvloeden. Een voorstelling daarvan ziet u op onderstaande



Figuur 5.1: Snelheidsprofiel boundary layer

grafiek van de wrijvingscoëfficiënt voor een stroming over een ruwe wand:



Figuur 5.2: Wrijvingscoëfficiënt ifv Reynoldsgetal

Nu is deze component voor onze berekening van weinig belang. Sowieso is hij al een stuk kleiner dan de vormweerstand. En gezien de vrij hoge Reynoldsgetallen die bij een wagen optreden moeten we uiteraard kiezen voor een oppervlak met een zo laag mogelijke ruwheid, maar die waarde kan op voorhand moeilijk bepaald worden. Bovendien heeft dit geen effect op het verloop van de stroming, buiten dan het feit dat de overgang naar een turbulente grenslaag iets vroeger zou kunnen optreden. Maar aangezien de huidige numerieke modellen die overgang sowieso al erg moeilijk kunnen voorspellen is dit eigenlijk van weinig belang. Er is dan ook voor gekozen om het oppervlak volkomen glad te

veronderstellen. Daarnaast is ook het totale oppervlak van belang hierin als parameter maar ook dat verandert amper met onze parameters. Het is min of meer opgelegd door de constraints op de vorm van de wagen. Enkel de snelheidsniveaus over het oppervlak zullen een zekere invloed geven die verschilt naargelang het berekende model.

#### 5.1.2 Vormweerstand

Aan de voorkant van de wagen ontstaat er een stuwpunt waar de lucht tot stilstand komt, en de statische druk stijgt tot de totale druk van de aankomende stroming. Deze is uiteraard hoger dan de statische druk in de vrije stroming. Dat volgt uit volgende formule (met  $p_0$  de totale druk en p de statische druk):

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{5.4}$$

Aan de achterkant daarentegen krijgen we een probleem van afscheiding. Dit kan beredeneerd worden door de impulsvergelijkingen uit te schrijven in de grenslaag, die te vereenvoudigen door enkel de termen van grootste orde over te houden, en daaruit volgende conclusies te trekken:

- $\frac{\partial p}{\partial n} \approx 0$ , dus de drukgradiënt in de tangentiale richting is dezelfde voor elke stroomlijn
- Aan de achterkant krijgen we een divergerend kanaal door het smaller worden van de wagen dus stijgt de druk daar in de tangentiale richting
- Gezien het drukverloop op elke stroomlijn dezelfde is volgt uit de impulsvergelijking in tangentiale richting, bij negeren van de viscositeitsterm, dat de snelheid op elke stroomlijn even veel moet zakken in absolute waarde. Dat betekent dus, gezien het snelheidsverloop in de grenslaag, dat er onmiddellijk stromingsomkering optreedt vlakbij de wand (aangezien de snelheid daar al bijna nul was).
- Door de viscositeit echter zal deze omkering niet optreden zolang de diffusie voldoende beperkt blijft. Bovendien is het zo dat als de stroming turbulent is, we wat meer reserve hebben door impulsoverdracht van de hoofdstroming naar de grenslaag die stabiliserend werkt. Het zou ons evenwel te ver leiden dat volledig uit te leggen, het volgt eveneens uit de impulsvergelijkingen. Het komt er dus op neer dat we de diffusie moeten beperken.

Waarom is dit nu nodig? Wel, als de stroming aan de achterkant in afscheiding gaat ontstaat er vanaf dat punt een zog met wervels, waarin de snelheden dus erg hoog liggen, en de statische druk bijgevolg erg laag. Dat heeft tot gevolg dat er een drukverschil is tussen de voorkant en de achterkant van de wagen, waarbij de druk aan de voorkant hoger is, en als we de component van die druk, gelegen volgens de aankomende stroming, integreren over het wagenoppervlak, geeft dit een weerstandskracht. Die wordt dus de vormweerstand genoemd, aangezien hij afhangt van de vorm van het object, en het is dan ook vooral deze component die kan beïnvloed worden door de vormgeving van de wagen aan te passen.

Het probleem bij onze auto is nu dat er in het midden van de wagen voldoende doorsnedeoppervlakte moet zijn om twee mensen te plaatsen, om de motoren en batterijpacks te plaatsen, enzovoort, maar dat de versmalling in het deel daarachter beperkt is door het gevaar op afscheiding. We zouden dus een onrealistisch lange wagen krijgen indien we dit fenomeen compleet zouden willen vermijden. Bovendien kan de ruimte op het einde van de wagen dan totaal niet meer nuttig gebruikt worden vanwege veel te smal, en extra wagenopperlvak betekent meer wrijvingsweerstand. Vandaar wordt er voor gekozen om de wagen vrij sterk te laten versmallen over een beperkte afstand, zonder evenwel in afscheiding te gaan, en dan op het einde gewoon af te snijden. Zo is er een compromis tussen beperken van de vormweerstand en beperken van nutteloze lengte achteraan.

Op de volgende pagina, in figuur 5.3, ziet u een voorstelling van een vereenvoudigd model van een wagen die deze concepten illustreert. Het model in kwestie is een "Ahmed Body", genoemd naar de eerste wetenschapper die stromingsexperimenten op een dergelijk model uitgevoerd heeft. Het is gevormd door een rechthoek waaraan vooraan een afronding gegeven is en achteraan een schuin stuk afgesneden is, en het is dus eenvoudig te construeren in 3D. Dé parameter van belang bij dit model is de hoek waarmee de achterkant van het model afgesneden wordt:

- Wordt die te klein genomen, dan blijft er een groot zog over achter de wagen met wervels en hebben we dus een grote vormweerstand
- Wordt die te groot genomen, dan scheidt de stroming af op het afgeschuind deel en hebben we dus eigenlijk niets gewonnen, want dan krijgen we vanaf dat punt evengoed een zog.

Er is dus een optimum bij een bepaalde hoek, zoals te zien in de grafiek. Ook is de bijdrage te zien van de verschillende oppervlakken op de wagen tot die vormweerstand. En tenslotte is links het wervelpatroon voorgesteld bij aanvalshoeken van 25° en 35°.



Figuur 5.3: Stroming over Ahmed Body (Bron: [39])

Het komt er nu op aan van een model te construeren in 3D op basis van een aantal parameters, via dewelke de vorm van de wagen kan aangepast worden. Deze parameters dienen uiteraard zorgvuldig gekozen te worden op basis van voorkennis over welke aanpassingen de stroming rond de wagen het meest zullen beïnvloeden. Ideaal ware dat men er oneindig veel kan inbouwen en zo alle nodige functies samenstellen uit een Fourierreeks. Zo kan men alle mogelijk functies en dus vormen uitproberen. Maar het spreekt voor zich dat dit praktisch onmogelijk is. We moeten ons dus beperken tot maximaal 5 parameters.

In de eerstvolgende paragraaf zal dit 3D model met zijn parameters besproken worden. In paragraaf 5.3 vervolgens, wordt besproken hoe er op basis van dit model een rekenrooster opgebouwd wordt in Gambit. Hier is het van groot belang voor de nauwkeurigheid en stabiliteit van de berekeningen, dat dit rooster voor alle mogelijke parameters correct opgebouwd wordt en kwalitatief goed is. Daarna moet dan de stroming effectief uitgerekend wor-



Figuur 5.4: Rekenlus

den met Fluent. Ook daar zijn er heel wat instellingen van belang om de convergentie

en correctheid van de berekeningen te verzekeren, en die worden in paragraaf 5.4 verder toegelicht. De laatste stap dan in de rekenlus is het programma Optimus, die de berekeningen coördineert en automatiseert, en het optimum zoekt in de parameterruimte. Een overzicht van het programma en de mogelijke numerieke methoden wordt gegeven in paragraaf 5.5. In paragraaf 5.6 overlopen we nog even de gebruikte programma's in Java en C++, en ten slotte worden natuurlijk de resultaten van de berekeningen besproken, met het optimale model. Dit vint u terug in paragraaf 5.7. Een schema van de volledige rekenlus ziet u in figuur 5.4

## 5.2 3D Model

Het model van de wagen is opgebouwd uit een aantal parameteroppervlakken die aan mekaar aansluiten. Een aantal ervan zijn gewoon vlakken, andere zijn een middenweg tussen een parabool en een ellips, loodrecht op een ellips. Vooraleer in detail in te gaan op de verschillende onderdelen ziet u hier een algemeen beeld van het model in Maple. Let hierbij niet op de gaten achter het voorwiel, die ontstaan door numerieke problemen in Maple bij het plotten. In het uiteindelijke model in Gambit zijn ze niet aanwezig.



Figuur 5.5: Algemeen beeld 3D model in Maple

De wagen is opgedeeld in een voorstuk een middenstuk, en 2 achterste stukken. Elk stuk bevat nog eens een onderste deel, 2 zijdelen, en een bovenste deel. Al deze delen kunnen beschreven worden dmv een zijaanzicht, een bovenaanzicht en 2 3D-zichten.

#### 5.2.1 Zijaanzicht



Figuur 5.6: Profiel wagen

- De hoogte van de tip van de neus boven de grond is gegeven door de parameter *neutralehoogte* en wordt in ons geval vastgelegd op 40cm.
- De hoogte van de wagen boven de grond op posities 0cm en 150cm is gegeven door respectievelijk  $p_1$  en  $p_2$ . Deze zijn variabel en worden geoptimaliseerd.
- Het gedeelte van de onderkant van de wagen, tussen het voorste punt en x-waarde 0, is gevormd door een gewogen gemiddelde tussen een ellips en een parabool. De ellips is in het geel weergegeven en is eigenlijk een kwart van een volledige ellips. Deze bevat 2 variabelen (de lange as en de korte as) en wordt dus bepaald door 2 vergelijkingen. Deze worden gegeven door de 2 punten waar hij door moet lopen. (op hun beurt bepaald door *neutralehoogte* en  $p_1$ )

De parabool staat in het groen en heeft 3 vergelijkingen nodig om hem volledig te bepalen. De eerste 2 geven aan dat hij dezelfde eindpunten als de ellips moet hebben en de  $3^e$  bepaalt dat er voldoende ruimte is voor variatie tussen parabool en ellips. De parameter waarmee tussen deze twee gevarieerd wordt is  $\omega_3$  (variabel, wordt geoptimaliseerd) en de gewogen curve staat in het rood. Als  $\omega_3$  vergroot, neigt de rode curve naar de parabool.

• Het verloop van de onderkant tussen 0cm en 150cm is gewoon een rechte waarvan de eindpunten gegeven zijn door  $p_1$  en  $p_2$ , en het deel tussen 150cm en de achterkant is

eveneens een rechte, bepaald door de hoek  $\theta_{onder}$  (variabel, wordt geoptimaliseerd). De achterkant van de wagen is ook bepaald door een parameter genaamd *maxlengte* maar die is in onze berekeningen vast gehouden op 240cm (250 op de tekening, maar deze is nog gewijzigd achteraf).

Het voorstuk aan de bovenkant wordt, net als de onderkant, gevormd door een weging tussen een parabool en een ellips, waarbij de parabool opnieuw in het groen staan en de ellips in het geel. De vergelijkingen worden op dezelfde wijze opgesteld. Hierbij is het hoogste punt van de wagen (gelegen op x=150cm) zo laag mogelijk gekozen maar met toch nog voldoende hoofdruimte voor de bestuurder en passagier. De wegingsfactor is hier ω<sub>2</sub> (variabel, wordt geoptimaliseerd) en de gewogen curve staat in het blauw. Opnieuw betekent een stijgende ω<sub>2</sub> een neiging richting parabool. De eigenlijke vorm is dan een superpositie van deze gewogen curve met de volgende 'bultenfunctie':

$$\begin{cases} -\sin\left(\frac{x-midden}{bultenrek+\pi}\right)e^{\frac{x-midden}{bultenrek+\pi}\cdot bultenschaal}, \ x < midden\\ \sin\left(\frac{midden-x}{bultenrek+\pi}\right)e^{\frac{midden-x}{bultenrek+\pi}\cdot bultenschaal}, \ x > midden \end{cases}$$
(5.5)

Deze wordt dus bepaald door de parameters *bultenrek* en *bultenschaal* die respectievelijk de breedte en hoogte van de bulten aangeven, en het resultaat daarvan staat in het rood op bovenstaande figuur. De reden waarom deze er aan toegevoegd is, is om een drukzone op de voorkant te kunnen creëren en zo voor voldoende downforce op de voorkant van de wagen te zorgen. *Bultenrek* zal constant worden gehouden omdat die al 'op zicht' geoptimaliseerd is (zodat alles net nog mooi aan elkaar aansluit). *Bultenschaal* daarentegen wordt geoptimaliseerd in de Optimus-lus.

• Tenslotte is de bovenkant achteraan een rechte bepaald door de hoek  $\theta_{boven}$  en zijn beginpunt, zijnde het hoogste punt van de wagen. Deze  $\theta_{boven}$  is ook een parameter die geoptimaliseerd wordt.

#### 5.2.2 Bovenaanzicht



Figuur 5.7: Bovenaanzicht wagen

• De breedtes  $b_1$ ,  $b_2$  en  $b_3$  zijn vastgelegd door de constructie van de wagen. Hierbij is  $b_2$  de minimaal nodige breedte om de motoren nog te kunnen onderbrengen (die liggen volgens de breedterichting van de wagen) en is  $b_1$  zo gekozen dat de zijkanten tussen  $b_1$  en  $b_2$  nog met een kleine hoek voor een verbreding zorgen. Dit verzekert een versnellende en dus aangehechte stroming.

In feite zou  $b_1$  ook geoptimaliseerd kunnen worden, maar gezien we door tijdsgebrek niet konden wachten op de resultaten van de berekeningen vooraleer het frame te bouwen is deze vast genomen.  $b_3$  tenslotte is zo bepaald dat de riemschijven nog net binnen de behuizing zitten, en dat bepaalt dan op zijn beurt ook de hoek  $\theta_{zij,1}$ .

- De achterkant van de wagen dan versmalt lineair volgens een hoek  $\theta_{zij,2}$ , die verschillend kan gekozen worden van  $\theta_{zij,1}$ . Deze hoek wordt ook geoptimaliseerd.
- De voorkant is, net als het profiel, opgebouwd uit een weging tussen een parabool en een ellips. Opnieuw zijn er voor elk 2 vergelijkingen die stellen dat ze door de eindpunten moeten gaan, en de derde vergelijking van de parabool bepaalt hier dat de behuizing van de wagen voldoende ruimte moet laten voor de beweging van het voorwiel. Moest de parabool te smal worden dan zou dit voorwiel bij het nemen van een bocht buiten de behuizing komen.

Nu is er in dit geval nog een extraatje toegevoegd: de wegingsfactor is variabel gemaakt. Hij varieert lineair tussen een parameterwaarde aan de voorkant van de wagen,  $\omega_1$ , en een berekende waarde,  $\omega_{neutraal}$ , aan de overgang naar het lineair gedeelte. Deze  $\omega_{neutraal}$  is zo berekend dat de overgang tussen de neus en het lineair deel  $C_1$ -continu is, maw dat de afgeleide daar continu is. Dit om de overgang zo vloeiend mogelijk te maken.  $\omega_1$  stelt ook hier de neiging naar de parabool voor.

### 5.2.3 3D-zichten



Figuur 5.8: 3D-zicht nr 1



Figuur 5.9: 3D-zicht nr 2

Zoals op bovenstaande figuren te zien valt, is de zijkant van de wagen gevormd door een aantal aan elkaar sluitende vlakken, en zijn de bovenkant en onderkant gevormd door halve ellipsen. De reden waarom hier voor ellipsen gekozen is, is opnieuw om de overgang tussen boven- en onderkant en de zijvlakken  $C_1$ -continu te maken. En een ellips is de meest voor de hand liggende vorm om dat te bereiken.

#### Zijvlakken

• Voorste zijvlak: Vanaf de bovenkant bekeken volgen de zijvlakken gewoon het eerder getoonde bovenaanzicht van de wagen (zie figuur 5.7). Het voorste zijvlak

volgt dus de  $\omega_1$ -kromme. Daarbij vertrekt het vooraan op een punt, op hoogte neutralehoogte, en evolueert het naar een rechte die op de figuur aangegeven is als 'bepaald door het voorwiel'. Het onderste punt van deze rechte ligt 3cm boven  $p_1$ , waarbij 3cm de hoogte van de ellips onderaan is, en het bovenste punt is bepaald door de constructie van het stuk frame waar het voorwiel aan bevestigd is.

- Middenste zijvlak: Dit vlak vertrekt vanop de rechte waar het vorige gestopt is en evolueert naar de rechte die aangegeven is als *'bepaald door bestuurder'*. Het is namelijk zo dat wanneer dit zijvlak te laag wordt bij een zelfde maximale hoogte van de wagen, dat dan de ellipsen erboven aan de zijkanten lager komen te liggen, en dat dus de plaats voor het hoofd van de bestuurder en passagier in het gedrang komt.
- Achterste zijvlakken: Deze bestaan eigenlijk uit 2 delen met een verschillende  $\theta_{zij}$ , maar op het zijaanzicht valt dit niet op aangezien de  $\theta_{boven}$  en  $\theta_{onder}$  voor beide delen gelijk zijn. De onderkant van de achterste zijvlakken start 3cm boven de onderkant van de wagen, opnieuw omwille van de ellips met korte as van 3cm die er nog onder zit. De bovenkant vertrekt vanop de bovenkant van de lijn 'bepaald door bestuurder' en zakt met een hoek die zo berekend wordt in de Maple-worksheet dat er op het einde nog een ellips aan de bovenkant overschiet met een korte as van 5cm. (zie figuur 5.9 waar dit aangegeven is)

#### **Onderkant** wagen

De onderkant van de wagen is, behalve het voorste stuk, gevormd uit halve ellipsen met een korte as van 3cm en een lange as gelijk aan de halve breedte van de wagen op die plaats. (hierbij is uitgegaan van lange as a en korte as b, zoals aangegeven op de figuur hiernaast, deze conventie wordt ook consistent zo verder gebruikt) Voor de lange as geldt trouwens altijd dat ze gelijk is aan de halve breedte van de wagen op die plaats, aangezien de ellipsen de verbinding vormen tussen het profiel (zie



Figuur 5.10: Ellips

figuur 5.6) en de zijvlakken (zie vorige paragraaf). De korte as van het voorste deel is bepaald door de afstand tussen de onderkant van het voorste zijvlak en de  $\omega_3$ -kromme.

#### Bovenkant wagen

Ook hier geldt hetzelfde voor de lange as en is de korte as overal gelijk aan het verschil tussen het profiel en de bovenkant van de zijvlakken.

#### 5.2.4 Wielen

Ook de wielen zijn in Maple gedefinieerd. Dit omdat de banden eigenlijk sneden van ellipsoïden zijn, en deze kunnen niet aangemaakt worden in Gambit. De invloed zal uiteraard klein zijn, en waarschijnlijk kon dit zonder probleem door bolsneden benaderd worden, maar aangezien het toch snel te implementeren viel hebben we er voor gekozen de banden op te meten en op basis daarvan ellipsoïden te bepalen. Een beeld van deze wielen vindt u in paragraaf 5.3.2.

#### 5.2.5 Parameters

Er zijn uiteindelijk 11 nuttige<sup>1</sup> parameters die kunnen gevarieerd worden zonder problemen te geven met het meshing schema. Dat zijn de volgende:

- 1.  $\omega_1$ : variabel, tussen 0.65 en 0.90, nominaal 0.75. Een te lage waarde geeft numerieke problemen in Maple en is sowieso niet interessant aangezien dit een meer afgeplatte en dus minder gestroomlijnde vorm betekent.
- 2.  $\omega_2$ : variabel, tussen 0.10 en 0.90, nominaal 0.50.
- 3.  $\omega_3$ : variabel, tussen 0.10 en 0.90, nominaal 0.50.
- 4. bultenrek: vast gehouden op waarde 40, via trial & error bepaald
- 5. bultenschaal: variabel, tussen 0 en 1.2, nominaal 0.6. Een waarde boven 1.2 geeft een punt bovenaan de bult dat hoger ligt dan het punt op x=150cm (zie figuur 5.6) en dus een groter frontaal oppervlak en meer diffusie, wat zeker niet voordelig kan zijn. Een negatieve waarde geeft problemen met de hoofdruimte van de inzittenden.
- 6.  $p_1$ : variabel, tussen 16 en 22 cm, nominaal 18cm. Gewoon op basis van het onderstel bepaald, er mee rekening houdend dat de wagen voldoende hoog boven de grond moet blijven.
- 7.  $p_2$ : variabel, tussen 16 en 23 cm, nominaal 20cm. De nominale waarde is hier hoger aangezien we normaal gezien de laagste druk onder de voorkant van de wagen willen krijgen en dus diffusie naar achter toe. Dit om vooraan voldoende downforce over te houden.
- 8. *maxlengte*: vast gehouden op 240 cm, bepaald op basis van gangbare wagenlengtes en de eis dat de wagen nog voldoende breed moet zijn achteraan. (mag niet op een punt eindigen zoals al eerder aangehaald)

 $<sup>{}^{1}</sup>$ Er zijn er nog heel wat die zonder problemen kunnen aangepast worden, maar die zijn al vastgelegd door de constructie van het onderstel

- 9.  $\theta_{onder}$ : vast gehouden op 6°. Een hogere waarde is onmogelijk aangezien de achteras dan buiten de wagen komt te liggen, en een lagere waarde is zeker niet interessant omdat er dan minder onderdruk onder de wagen gecreëerd wordt.
- 10.  $\theta_{boven}$ : variabel, tussen 10° en 25°, nominaal 20°. Apart van de rest geoptimaliseerd, samen met  $\theta_{zij,2}$ , in de veronderstelling dat de optimale waarde hiervan zo goad als onafhankelijk is van de rest van de parameters. Dit zal niet 100% kloppen aangezien de stroming vooraan de wagen invloed heeft op het afscheidingsgedrag achteraan, en de diffusie achteraan op zijn beurt de maximale snelheidsniveaus vooraan bepaalt. Maar 8 parameters tegelijk optimaliseren is een te zware berekenig voor deze thesis, dus nemen we deze twee apart.
- 11.  $\theta_{zij,2}$ : variabel, tussen 5° en 20°, nominaal 15°. Wordt mee geoptimaliseerd met  $\theta_{boven}$ .

Er blijven dus 6 variabele parameters over (uitgezonderd de 2 hoeken) en dat is er nog steeds één te veel om een betrouwbare Box-Behnken analyse op te doen (zie verder). We kiezen er dan ook voor om de hoogte achteraan  $(p_2)$  vast te nemen op 20cm en enkel de hoogte vooraan te veranderen. Het zal toch vooral het verschil tussen de twee zijn die de weerstand bepaalt. Zo blijven er dus 5 parameters over om te optimaliseren.

#### 5.2.6 Maple code

In bijlage L vindt u de volledige code in Maple waarmee de wagen opgebouwd wordt. Eerst is er een deel waarin de parameters gedefinieerd worden, dan een deel waarin de functies opgebouwd worden die het profiel vormen van de wagen (samen met een omwentelingslichaam dat de draaicirkel van het wiel voorstelt) en dan een deel waarin de parametervergelijkingen van alle oppervlakken opgesteld worden. Al wat hier nog achter komt dient om tekstbestanden aan te maken met daarin de coördinaten van een vooraf bepaald<sup>2</sup> aantal punten die het wagenoppervlak zullen vormen in Gambit. Dit is nodig omdat Gambit een dergelijke ingewikkelde vorm niet zelf kan genereren en dus moet werken met een oppervlak door een aantal gegeven punten.

Een probleem hierbij is de verdeling van de punten over het oppervlak. Die moet in eerste benadering vrij gelijkmatig zijn, zodat we het oppervlak overal goed volgen, maar hier en daar moet daar van afgeweken worden:

• Aan de onderranden van de wagen is de kromming vrij groot, dus hebben we daar de puntenrijen dichter op elkaar gelegd

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>door middel van de resolutieparameters reslang<sup>\*</sup> en resbreed<sup>\*</sup>

- Ook de overgang van het voorstuk in het profiel dat gekromd is, naar het rechte achterstuk, was niet altijd in orde. Soms werd die een hoge bult door de neiging van Gambit van het oppervlak zo vloeiend mogelijk te houden, zelfs al moest dat een scherpe overgang worden. Ook daar hebben we dus de puntenverdeling wat moeten aanpassen om een goeie vorm te verzekeren.
- De voorkant van de wagen kan vrij scherp worden en we zouden daar dus een aantal punten té kort bij mekaar kunnen krijgen. Dat moet vermeden worden en dus voorzien we een afsnijding van de vorm daar.
- De zijkant van de wagen had de neiging in het midden in te deuken, opnieuw door de neiging van Gambit om zo weinig mogelijk sterke krommingen in het oppervlak te steken en ook een beetje vanwege een gebrek aan resolutie. Nóg meer punten zou echter een beetje overkill geweest zijn en door aanpassing van de verdeling hebben we dit grotendeels kunnen weg krijgen.
- En zo zijn er nog wel een aantal kleine puntjes ge-fine-tuned om een zo goed mogelijke set punten te krijgen.

Een ander probleem dat zich voordeed is dat de output van Maple niet rechtstreeks in te lezen valt in Gambit. Maple creëert namelijk een tekstbestand met een coördinaat om de twee lijnen en met te veel spaties tussen. (zie figuur 5.11) Nu, Gambit vereist een tekstbestand met op elke lijn 3 coördinaten van een punt, telkens gescheiden door 1 spatie. Het was dus nodig een programma te schrijven om deze bestanden een beetje 'op te kuisen'. Dit is gebeurd met Java, aangezien de modulaire werking daarvan handig is en snel werkt om kleine programma's mee te schrijven en uiteraard ook omdat we deze taal leren kennen hebben in onze  $1^e$  kandidatuur. De programma's heten KuisOp en KuisOpVoorpunt en de code ervan vindt u in bijlage O.

1	250., 0, 82.36923417	
2		
3	250., 5.100150754,	82.26821366
4		
5	250., 10.20030151,	81.95180986
6		
7	250., 15.30045226,	81.36923417
8		
9	250., 20.40060302,	80.36923417
10		
11	250., 24.08654021,	75.95502061
12		
13	250., 26.50075377,	67.40453151
14		
15	250., 26.50075377,	57.43982884

Figuur 5.11: Output Maple

## 5.3 Gambit

In Gambit wordt de geometrie van de wagen volledig gegenereerd en wordt op basis daarvan een rekenrooster opgebouwd waarin de stroming met een eindige-differenzenmethode wordt uitgerekend. Ook dit is volledig geautomatiseerd adhv een journal-bestand waarvan u de broncode vindt in bijlage  $M^3$ . De gebruikte versie is 2.3.16, de laatst beschikbare versie, aangezien er een aantal functies gebruikt zijn die pas vanaf deze versie beschikbaar waren. Er kunnen een aantal onderdelen in de journalfile onderscheiden worden:

#### 5.3.1 Deel 1: Definiëren parameters & inlezen data

De eerste lijnen van de journal file dienen om eventuele vorige geometrie en meshdefinities te verwijderen. Normaal kan dit nooit nodig zijn maar voor de zekerheid zijn ze toch toegevoegd. Vervolgens worden alle nodige parameters gedefinieerd. Dit is zo gedaan om het genereren van de journal eenvoudiger te maken. Enkel de waarde bovenaan moet aangepast worden en in de rest van de journal wordt telkens de parameternaam gebruikt. Daarna worden dan de punten ingelezen uit de tekstbestanden met coördinaten. Dat geeft een beeld zoals u kan zien in figuur 5.12.



Figuur 5.12: Beeld Gambit na inlezen punten

#### 5.3.2 Deel 2: Aanmaken vlakken & uitbreiden naar volumes

De eerste stap in dit deel is het hernoemen van een deel van de vertices naar een kortere naam. Dit omdat het commando voor het aanmaken van het vlak dat de omhulling van de

 $<sup>^{3}</sup>$ de gebruikte kleuren in de tekst die hierna volgt komen overeen met de gekleurde kaders in de bijlage

wagen voorstelt, anders te lang wordt. (en dan is het niet meer uitvoerbaar door Gambit) Daarna worden volgende vlakken aangemaakt:

1. Omhulling wagen



Figuur 5.13: Vlak omhulling wagen

2. Voor- en achterwiel



Figuur 5.14: Vlakken wielen

3. Bak onderaan (zie verder)



Figuur 5.15: Vlak bak onderaan

Vervolgens is er een deeltje waarin het vlak van de wagenomhulling geometrisch 'opgekuist' wordt via algoritmes die in Gambit ingebouwd zitten. Dit om problemen bij het meshen te voorkomen.

In de paragraaf daarna worden een aantal extra vlakken aangemaakt die nodig zijn om gesloten volumes te krijgen. Dit zijn de achterkant van de wagen, zijn symmetrievlak, en de zijkanten van de wielen. Paragraaf 5 dan maakt dan 3 volumes aan, zijnde de wagen zelf en zijn 2 wielen. En paragraaf 6 tenslotte maakt op basis van de onderplaat een volume aan dat de afscherming van de riemschijven voorstelt. Dit hebben we toegevoegd omdat anders de riemschijven onderaan buiten de wagen komen te zitten, en zo beschadigd zouden kunnen worden.

#### 5.3.3 Deel 3: Afwerken wagenmodel

In de eerste paragraaf hier worden een aantal volumes gecreëerd:

- 1. De achteras
- 2. Een cilinder die een stuk uit de zijkant van de wagen zal snijden. Dit is nodig omdat er anders niet voldoende plaats is voor het achterwiel. (zie figuur 5.16(a))
- 3. Een tweede cilinder die vooraan een gat maakt in de onderkant van de wagen ter hoogte van het voorwiel. Dit zal er ook in realiteit zijn aangezien het voorwiel moet kunnen draaien, en vandaar wordt het in dit model ook toegevoegd. (zie figuur 5.16(b))

4. Een box met één van zijn vlakken in het xy-vlak waarmee onderaan een klein stukje van de banden gesneden wordt. Dit om slecht gevormde cellen te vermijden en het model iets nauwer bij de realiteit te laten aanleunen (in werkelijkheid is er ook een zeker contactvlak van de band met de grond). Deze laatste reden is hier minder toepasselijk aangezien de hoeken die door deze afsnijding ontstaan in werkelijkheid afgerond zullen zijn, maar we hebben er voor gekozen dit te verwaarlozen. De slecht gevormde cellen zouden ontstaan omdat er zonder afsnijding een nauwe spleet ontstaat tussen de band en de grond, vlakbij het contactpunt. U kan de afsnijding zien in figuur 5.16(b).



(a) Snede zijkant

(b) Snede vooraan

Figuur 5.16: Weggesneden stukken dmv cilinders

De tweede paragraaf brengt een afronding aan aan de cilinder die het stuk achteraan wegsnijdt, en voert de nodige uitsnijdingen uit. Het resultaat van dit alles ziet u in de figuur hieronder.



Figuur 5.17: Wagen na de uitsnijdingen

De derde paragraaf uit dit deel voegt eerst alle huidige volumes samen en brengt dan een paar afrondingen aan:

- Aan de achterkant van de wagen
- Aan de "bak" die de riemschijven beschermt
- Aan de rand van het gat voor het voorwiel
- Aan de uitsnijding voor het achterwiel

Het resultaat hiervan ziet u in figuur 5.18.





(a) Achteraan

(b) Beschermbak



(c) Voorwiel

(d) Achterwiel



Tenslotte worden in de laatste paragraaf de vertices onzichtbaar gemaakt om de tekening wat overzichtelijker te maken en worden alle vlakken die de omhulling van de wagen uitmaken samengevoegd tot 1 vlak. (idem voor de vlakken die de beschermbak vormen) De reden hiervoor is dat de mesh dan niet meer gebonden is aan de scheidingslijnen tussen die vlakken en zich dus beter egaal kan verdelen over het gehele oppervlak van de wagen. De bak en omhulling samenvoegen is echter onmogelijk vanwege de te grote hoeken tussen de vlakken. Dit zou ook weinig nut hebben, het zijn twee afzonderlijke delen. Een nadeel van dit samenvoegen is wel dat er geen geometrische operaties meer kunnen uitgevoerd worden op de volumes, zoals een unie of verschil. Vandaar moest dus alles in orde gebracht worden qua vorm vooraleer deze stap uit te voeren.

#### 5.3.4 Deel 4: Creëren van het doorstroomde volume

#### Eigenschappen doorstroomde volume

Het volume rond de wagen, waarin de stroming uitgerekend zal worden, bestaat uit twee balkvormige volumes binnen mekaar. De kleinste balk heeft de volgende eigenschappen:

- Halve wagenlengte voor, naast en boven de wagen
- Anderhalve wagenlengte achter de wagen

En de grotere balk daarrond:

- 3 wagenlengtes voor de wagen
- 5 wagenlengtes achter de wagen
- 5 wagenlengtes naast en boven de wagen, zodat het frontaal oppervlak van de wagen amper 0.5% bedraagt van het frontaal oppervlak van de grootste balk.

Deze richtwaarden zijn overgenomen uit een paper geschreven door Marco Lanfrit<sup>[27]</sup>. Dit is een paper dat uiteindelijk voortgevloeid is uit een Europees onderzoek, genaamd het MOVA project (MOdels for Vehicle Aerodynamics)<sup>[12]</sup>. Dit project liep van 1998 tot 2001 en had als doel om:

- Zo nauwkeurig mogelijke experimentele data te verzamelen over de stroming rond wagenmodellen op reële grootte, waaronder in de eerste plaats het "Ahmed Model".
- Op zoek te gaan naar een (al dan niet reeds bestaand) turbulentiemodel, met eventuele aanpassingen, dat deze stroming zo nauwkeurig mogelijk voorspelt.

Het belang hiervan is vrij groot, aangezien momenteel nog veel aërodynamisch design dmv windtunnels gebeurt, en dat is enorm duur. Er was dan ook nogal wat interesse voor, onder andere van de TU Delft en PSA Peugeot Citroën. Meer informatie over het project kan u vinden op [1] en [2]. Resultaten zijn te vinden in [10], [12] en [16]. Hier bleef het echter niet bij. Onmiddellijk na dit project organiseerde het CFD-subcomité van de de EADE (European Automotive Data Exchange) een benchmarkstudie. Geometrische modellen van 5 verschillende bestaande wagens werden ter beschikking gesteld, samen met van elk model nog een gewijzigde versie (ofwel in geometrie ofwel in randvoorwaarden). Deze moesten door de fabrikanten gratis geprepareerd worden en samen met experimentele data ter beschikking gesteld worden van geïnteresseerde softwarebedrijven die CFD-software op de markt brengen. Eén van de bedrijven die hier op ingegaan is is Fluent Inc. Daar heeft men zich toegespitst op 1 bepaald model, de ware geometrie van de Ford Ka, en heeft men uitgezocht hoe nauwkeurig allerlei methoden waren in het voorspellen van de luchtweerstand hiervan.

De resultaten hiervan waren vrij positief: de weerstand kon voorspeld worden tot op 0,3% nauwkeurig<sup>[13]</sup>. Minpunt is dan wel dat dit enkel te bereiken was met een Reynolds-Stress-Model op een fijn grid, en dus met erg veel rekenkracht (zie ook paragraaf 5.4). Wat nu echter voor ons van belang is, is het in het begin vermelde paper dat later in 2005 verschenen is<sup>[27]</sup>. Dit bundelt de ervaringen binnen Fluent in de Automotive CFD wereld en geeft richtlijnen over hoe men best de mesh rond een wagen construeert en welke modellen men best gebruikt voor de stromingsberekening. Hier hebben we dan ook veel nuttige informatie uit gehaald.

Dan is het misschien ook opgevallen dat er 2 balkvormige volumes aangemaakt worden. Een groot met daarbinnen een kleiner. De reden hiervoor is dat dat een betere controle geeft over de mesh binnen die kleinste balk. Zo kan die ook desgewenst aangepast worden zonder de mesh in het grotere volume te beïnvloeden, en kan in het grootste volume een hexcore mesh aangemaakt worden zonder dit in het kleinere volume vlakbij de wagen te moeten doen. Een hexcore mesh is namelijk numeriek stabieler in die zone omwille van het feit dat de cellen dan volgens de stroming gericht zijn (tov een tetrahedrale mesh waar de cellen willekeurig gericht zijn). Achteraf bekeken was dit onnodig aangezien de groeifactor in het kleine en grote volume gelijk zijn en een hexcore niet gebruikt kan worden omwille van problemen bij het partitioneren (zie puntje 5.4.4). Maar omdat het nogal wat werk vraagt om de journals hieraan aan te passen en het ook geen kwaad kan om twee balken te behouden, hebben we de volumes gelaten zoals ze zijn.
#### Code voor de aanmaak van de volumes

In de eerste 2 paragrafen van dit deel wordt de kleinste balk aangemaakt en wordt er via een aantal operaties een doorstromingsvolume aangemaakt in de box rond de wagen. Dat is dus in essentie de balk met daar het wagenvolume van afgetrokken, maar aangezien er op dit moment in Gambit al gebruik gemaakt is van virtuele geometrie kan dit niet meer via een subtract commando (zoals eerder al vermeld) en moet de operatie handmatig uitgevoerd worden.

De volgende 2 paragrafen doen iets gelijkaardigs met de tweede balk: de balk eerst creëren en vervolgens een volume aanmaken gevormd door de grote balk min de kleinere balk.

## 5.3.5 Deel 5: Randvoorwaarden

Zoals de titel al aangeeft worden in dit deel de randvoorwaarden van het stromingsprobleem ingesteld voor elk van de vlakken en volumes binnen de tekening. Deze worden hier kort toegelicht.

- PRESSURE\_OUTLET: aan de uitlaat wordt gewoon een homogeen drukveld opgelegd met een standaard turbulentieverdeling, de snelheidsverdeling daar volgt uit de berekeningen
- SYMMETRY: deze wordt uiteraard gebruikt voor het symmetrievlak van de wagen, maar ook voor de bovenkant en zijkant van de "tunnel".
- WALL: alles wat een harde wand vormt
- INTERIOR: vlakken die er enkel zijn voor meshingdoeleinden en geen invloed op de stroming mogen hebben
- VELOCITY\_INLET: aan de inlaat worden de druk, de snelheid, en het turbulentieniveau opgegeven

## 5.3.6 Deel 6: Genereren rekenrooster (mesh)

Dit deel wordt commando per commando besproken:

```
sfunction create sourcefaces "v_face.73" "v_face.75" normalangle 20 \
growthrate 1.20 sizelimit 2 minsize 1.2 attachfaces "v_face.73" "v_face.75"
curvature
```

Hier wordt een sizing functie gedefinieerd die het wagenoppervlak en de beschermbak zal meshen op basis van de lokale kromming. Hoe sterker gekromd, hoe fijner de mesh, zodat de hoek tussen twee aanliggende vlakjes (waar mogelijk) kleiner blijft dan 20°. Waar mogelijk weliswaar, want de groeifactor is beperkt tot  $1.20^4$  en de grootte van een vlakje is minimaal  $1.2 \text{cm}^5$ . De maximale grootte van een cel is 2 cm en deze waarde is afgelezen uit een grafiek die te vinden is in figuur 5.20.

```
sfunction bgrid attachfaces "v_face.73" "v_face.75"
```

Hiermee wordt een background grid gegenereerd voor de sizing functie. Dit is een grid dat zal bepalen waar de cellen welke grootte moeten hebben later bij het meshen.

face mesh "v\_face.73" "v\_face.75" triangle size 1

Het wagenoppervlak en de bak worden gemesht met driehoekjes volgens de sizing functie. De optie "size 1" doet hier niet ter zake en wordt genegeerd.

```
undo begingroup
blayer create first 0.40 growth 1.25 total 3.28281 rows 5 transition 1 \
  trows 0 continuous wedge uniform
blayer attach "b_layer.1" volume "v_volume.5" "v_volume.5" face "v_face.75" \
  "v_face.73" add
undo endgroup
```

Deze groep commando's creëert een boundary layer vanop de twee eerder gemeshte oppervlakken. Hierbij is er keuze tussen een aantal schema's, maar om bij een ingewikkelde geometrie als deze een goed resultaat te krijgen bleek het noodzakelijk een uniform schema aan te houden. Dat betekent dat elke laag over heel het oppervlak even hoog is, onafhankelijk van de grootte van de cellen waarop ze op die plaats gebouwd wordt. Andere meshing schema's zijn gebaseerd op aspect ratio. De vergelijking tussen deze types, net als een verduidelijking van de opties wedge en continuous, kan u zien in figuur 5.19. Meer informatie is te vinden in de handleiding van Gambit<sup>[4]</sup>. Opnieuw volgens de richtlijnen uit [27] is er voor gekozen de eerste laag 0.4cm dik te maken en de volgende lagen met een groeifactor van 1.25 in dikte te laten toenemen. In totaal zijn er 5 lagen. Dit is niet helemaal in overeenstemming met de gevonden optimale waarden in [27], maar vanwege de geometrie hier moesten we daar van af wijken.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>verhouding van de oppervlakte van 2 aangrenzende vlakjes

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>lengte kortste zijde, later zal blijken dat moeilijk vast te houden is



Figuur 5.19: Vergelijking meshing schema's (Bron: [4] & [10])



Figuur 5.20: Grafiek voor bepaling celgrootte<sup>[27]</sup>

Een belangrijke opmerking is dat de overgang tussen boundary layer en volumemesh geen te grote sprong mag veroorzaken in celgrootte. Anders krijgen we numerieke problemen. Met de gegeven instellingen uit [27] is daar uiteraard rekening mee gehouden, en we krijgen dan ook een vloeiende overgang. Enkel in gebieden waar de boundary layer sterk vervormd wordt door kromming van de wagen, kunnen er zich op dit vlak problemen voordoen.



Figuur 5.21: Overgang Boundary Layer<sup>[27]</sup>

```
volume mesh "v_volume.5" tetrahedral sizelimit 30 growthrate 1.25 size 1 window modify volume "v_volume.5" shade
```

Hiermee wordt het volume in de kleinste box rond de wagen uiteindelijk gemeshed met een groeifactor van 1.25 en een maximumgrootte van 30cm. Hierbij wordt deze groeifunctie gedefinieerd vanop het oppervlak van de eerder gecreëerde boundary layer. Het tweede commando staat er gewoon voor de visuele voorstelling.

```
sfunction create sourcefaces "face.78" "face.79" "face.80" "face.81" \
growthrate 1.3 sizelimit 75 attachvolumes "v_volume.6" meshed
sfunction bgrid attachvolumes "v_volume.6"
```

volume mesh "v\_volume.6" tetrahedral sizelimit 75 growthrate 1.3 size 30

De eerste twee commando's creëren een sizing function die, startend vanop de gemeenschappelijke vlakken met de kleine kubus, de mesh laat groeien met groeifactor 1.3 tot een maximumgrootte van 75cm (beiden nogal op het gevoel gekozen, maar deze waarden zijn toch van weinig belang). De laatste lijn mesht dan het grote volume, waarbij de parameters genegeerd worden aangezien die al bepaald zijn door de size functie.

## 5.3.7 Resultaat

Gezien de nogal moeilijk te meshen zones rond de contactoppervlakken van de wielen met de grond en rond de riemschijfafscherming, bevat de mesh nogal wat "slechte" cellen. Er zijn gemiddeld zo'n twintigtal volumecellen met een skewness<sup>6</sup> groter dan 0.95 en een veertigtal tussen 0.90 en 0.95. Dit is echter het beste resultaat dat we kunnen bereiken hebben en op vlak van convergentie gaf het geen problemen. Vandaar hebben we het daar dan ook bij gehouden.

## 5.4 Fluent

Een volgende stap in de ketting is het oplossen van een stelsel stromingsvergelijkingen in het gegenereerde rekenrooster, dmv Fluent. Hiervoor is eveneens de laatste versie op het moment van schrijven gebruikt, zijnde versie 6.3.26, en er is ook gewerkt met journal files. Een eerste journal voor de berekening van de eerste 750 iteraties, en een tweede file om eventueel verdere iteraties uit te voeren (moest de convergentie op basis van de dragcoëfficiënt nog niet voldoende zijn). Deze zijn te vinden in bijlage N. In de eerste file kunnen volgende stappen onderscheiden worden:

- 1. Het inlezen van de mesh
- 2. Het inlezen van een tekstbestand met randvoorwaarden en allerlei instellingen, die hieronder toegelicht worden
- 3. Het herinlezen van de mesh nu bovenstaande instellingen juist staan (dit is nodig wanneer Fluent in parallelle modus werkt om een goed resultaat te krijgen)
- 4. Het herinlezen van het tekstbestand met randvoorwaarden en dergelijke, om zeker te zijn dat deze nog juist staan
- 5. Het schalen van de mesh, aangezien die in centimeters is aangemaakt in Gambit en hier in meters moet staan

 $<sup>^{6}\</sup>mathrm{1}$ min de verhouding tussen de lengte van de korste zijde en de langste zijde van een cel

- 6. Het instellen van de metingen van de drag- en momentcoëfficiënt (moment rond de achteras), zodat die naar de juiste tekstbestanden weggeschreven worden
- 7. Het initialiseren op basis van de inlaatvoorwaarden (in alle cellen de snelheden, drukken, enz op een bepaalde startwaarde instellen van waaruit geïtereerd wordt)
- 8. Het uitvoeren van de iteraties

Twee puntjes worden verder toegelicht: de randvoorwaarden en de instellingen van Fluent.

## 5.4.1 Randvoorwaarden

- Inlaat
  - Inlaatsnelheid: 22 m/s. We hebben er voor gekozen de wagen op deze snelheid te optimaliseren, dit komt overeen met ongeveer 80 km/h
  - -Turbulentie: intensiteit van 1 en ratio<br/>7 van 0.1
  - -Druk: 0 bar gauge pressure, dus druk gelijk aan de referentiedruk van 101325 Pa
- Uitlaat: alles op standaardwaarden
- Vloer: translationele snelheid van 22 m/s en no-slip voorwaarde
- Banden
  - Rotatie met hoeksnelheid v/r met v de snelheid aan het oppervlak, zijnde 22 m/s, en r de afstand van het midden van het wiel tot de grond. (dit is dus iets kleiner dan de straal van de band, vanwege de indrukking ervan)
  - Rotatie-as met oorsprong in het midden van het wiel en richting (0,1,0), dus loodrecht op het symmetrievlak.
  - No-slip voorwaarde
- Achteras: zelfde hoeksnelheid en rotatie-as dan het achterwiel, eveneens no-slip
- Zijkanten wielen: stationair verondersteld, aangezien deze wand er in werkelijkheid niet is (buiten een paar spaken) maar wel met slip
- Binnenplaat voorwiel: plaat die het voorwiel horizontaal snijdt (zie figuur 5.18c), deze zal er in realiteit niet zijn maar moeten wij wel toevoegen om de geometrie niet te complex te laten worden → no-slip stationary wall

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>verhouding van turbulente tov moleculaire viscositeit:  $\frac{\mu_t}{\mu}$ 

## 5.4.2 Instellingen

Voor de instellingen van Fluent hebben we ons gebaseerd op het artikel met de Best Practices<sup>[27]</sup> en de handleiding van Fluent<sup>[3]</sup>.

- Segregated solver, aangezien een coupled solver enkel nodig is bij hoge Machgetallen of stromingen die sterke krachten ondervinden zoals by in een radiale compressor
- Steady aangezien een unsteady berekening veel te veel tijd zou vergen. Die laatste zou echter wel een veel beter resultaat geven, aangezien het fenomeen van afscheidende stroming rond een wagen in essentie niet steady-state is.
- Node-based gradients, aangezien deze beter werken in ongestructureerde meshes. (tetrahedrale meshes dus)
- Realizable k- $\epsilon$  model, wat voor deze situatie het beste presteert (zie paragraaf 5.4.3)
- Non-equilibrium wall functions ipv gewone wall functions. Deze hebben als eigenschap dat ze beter werken in stromingen waar productie en dissipatie van turbulente kinetische energie niet lokaal in evenwicht zijn met elkaar, of stromingen met sterke drukgradiënten aan de wand. Stromingen die afscheiden en heraanhechten, zoals in ons geval, zijn daar een voorbeeld van, en er wordt dan ook in [27] aangeraden om non-equilibrium wall functions te gebruiken.
- Operating pressure van 101325Pa
- PISO Pressure-Velocity Coupling met skewness correction en neighbour correction, waarbij beide onderrelaxatiefactoren op 1 staan. Dit is aangeraden door de Fluent Manual bij sterk vervormde meshes, en onze mesh is dat in ieder geval.
- Geen Skewness-Neighbour coupling in het PISO schema aangezien de oplossing anders divergeert (dit kan de convergentie wel iets vertragen)
- Standard Pressure scheme, de rest Second Order Upwind aangezien we een tetrahedrale mesh hebben. First Order geeft daar namelijk een grotere numerieke diffusie vanwege het niet gealigneerd zijn van de stroming met de meshelementen. Soms is het wel nodig van te beginnen met First Order en nadien op Second Order over te schakelen, om divergentie tegen te gaan, maar dat bleek in ons geval niet nodig.
- Residual monitors op 2.5 · 10<sup>-4</sup> aangezien dit proefondervindelijk een waarde bleek te zijn waarop de drag- en momentcoëfficiënten voldoende geconvergeerd zijn. (binnen 2% van de eindwaarde, en aangezien de nauwkeurigheid van onze berekening volgens [27] maar 4% bedraagt is dat voldoende)

• Frontaal wagenoppervlak geschat op  $0.85m^2$  (met F-factor ingerekend) voor het berekenen van de dragcoëfficiënt. Dit is echter van geen belang aangezien deze geen invloed heeft op de eigenlijke optimalisatie. (het is gewoon een factor waar elke berekende dragforce door gedeeld wordt, en hij blijft constant)

## 5.4.3 Turbulentiemodellen

Een belangrijk punt in het instellen van Fluent is het te kiezen turbulentiemodel. Bij stroming over een wagen op reële grootte en aan reële snelheden krijgen we een Reynoldsgetal in de orde van een paar miljoen, en is de stroming dus zeker turbulent. Bovendien hebben we te maken met afscheiding en heraanhechting, en complexe wervelsystemen. Figuur 5.22 geeft een idee van hoe deze er uit zien in het zog achter een wagen. Meer detail hierover kan u vinden in [25] en [26].



Figuur 5.22: Zog achter een wagen

Nu, bij deze thesis was het niet echt de bedoeling om een vergelijkende studie te maken tussen turbulentiemodellen, maar gewoon om met bestaande methoden en beperkte middelen een optimale vorm voor de carrosserie te bekomen. Bovendien kunnen we, zoals aangehaald op pagina 132, voortgaan op eerder onderzoek. We hebben ons dan ook gebaseerd op aanbevelingen uit [27], waarin de tabel te vinden is die u in figuur 5.23 kan zien. Daaruit blijkt dat we eigenlijk naar een RSM (Reynolds-Stress Model) met een fijn grid  $(y^+ \approx 30-50)$  zouden moeten overstappen om een goed resultaat te bekomen. Dit vraagt echter veel te veel rekentijd en was voor deze thesis niet haalbaar. We hebben ons dus tevreden gesteld met simulaties op een grover grid  $(y^+ \approx 100 - 300)$  en met een realizable  $k - \epsilon$  model<sup>8</sup>. Volgens de tabel zou dit ons een nauwkeurigheid in de orde van 5% moeten opleveren. Meer details over de vergelijking tussen de modellen in deze toepassing is te vinden in [10] en [13]. Uitleg bij de modellen zelf kan u vinden in [41].

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>met alle modelparameters op hun standaardwaarden

mesh size & turbulence model	CD	$\Delta c_D$	CPUhs
wind-tunnel experiment	0.321	-	-
coarse mesh (5.5 M cells) realizable k-ε	0.336	4.7 %	450
fine mesh (11 M cells) realizable k-ε	0.328	2.1 %	750
fine mesh (11 M cells) RSM	0.322	0.3 %	1200

Figuur 5.23: Vergelijking turbulentiemodellen<sup>[27]</sup>

Wat nog enige verduidelijking vraagt is het begrip  $y^+$ -waarde. Het zou ons te ver leiden om tot in de diepte in te gaan op de oorsprong en exacte betekenis van dit begrip. U kan er uitgebreide informatie over terugvinden in [32] en [41]. Maar voor een goed begrip kunnen we wel aanhalen dat dit eigenlijk een dimensieloze hoogte is van de eerste laag cellen in de boundary layer. De formule is de volgende:

$$y^{+} = \frac{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \, y_P}{\nu} \tag{5.6}$$

Daarin is  $\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  de wrijvingssnelheid aan de wand (spanning gedeeld door massadichtheid),  $y_P$  de niet-dimensieloze afstand van het eerste roosterpunt tot de wand, en  $\nu$  de kinematische wrijvingscoëfficiënt. Deze waarde is van belang omdat het model dat gebruikt wordt in de wandzone maar geldig is tussen bepaalde grenzen van deze waarde, nl. ongeveer  $30 < y^+ < 300$ .

Een plot van de bekomen  $y^+$ -waarden kan u in figuur 5.24 zien. Daarbij valt op te merken dat we inderdaad bijna overal onder de 300 blijven, op een paar uitschieters na, en dat het grote merendeel van de waarden tussen 30 en 300 ligt zoals gewenst. Het valt wel op dat er een heel aantal cellen zijn waar we waarden onder de 30 krijgen, door stagnatiepunten en dergelijke, maar dat is eigenlijk onvermijdelijk. Enkel een boundary layer die varieert in dikte over de omtrek zou hier iets kunnen aan doen, maar ten eerste geeft dat dan weer slechter gevormde cellen en ten tweede krijgen we dan doorsnijding van boundary layers op plaatsen waar weinig plaats beschikbaar is (bijvoorbeeld tussen het voorwiel en de behuizing). Dit lijkt ons dus het beste resultaat dat we konden bereiken.



Figuur 5.24: Plot Y-plus waarden ifv lengtecoördinaat

## 5.4.4 Parallel maken van de berekeningen

Het uitrekenen van de stromingsvergelijkingen in Fluent is het deel van de lus dat het meeste tijd vraagt, en dat dus ook de totale tijd per simulatie in hoofdzaak bepaalt. Het is dan ook interessant als we deze tijd naar beneden kunnen krijgen. En hiertoe zit er een funnctie ingebouwd die het mogelijk maakt om op verschillende CPU's tegelijk te rekenen. Hier hebben we bij onze thesis gebruik kunnen van maken aangezien we 4 CPU's toegewezen kregen waar wij alleen toegang toe hadden. Dit bracht de rekentijd in Fluent per simulatie terug van 6 uur naar anderhalf uur. Het commando om Fluent in parallelle modus op te starten vindt u terug in paragraaf 5.6. Daarbij is *hostsfile* een tekstbestand met de netwerknamen van de 2 servers erin (met elk 2 CPU's) waar onze berekeningen op draaien. Fluent verdeelt de 4 processen automatisch over de 2 servers.

Nu moet de mesh daarvoor opgedeeld worden in een aantal stukken, die door de verschillende processen parallel uitgerekend worden. En zoals eerder aangehaald geeft dat problemen bij een hexcore mesh. Proberen we een dergelijke mesh in parallel uit te rekenen, dan geeft Fluent de volgende foutmelding:

```
##Warning: hexcore mesh should be processed by utility tool 'tpoly' before
reading in parallel!
```

In de handleiding van Fluent<sup>[3]</sup> vinden we hierover het volgende:

If you generate meshes using the GAMBIT Hex Core meshing scheme or the TGrid Mesh/Hexcore menu option (hexcore meshes), you often have features that can interfere with partitioning. Such features include hanging nodes and overlapping parent-child faces, and are located at the transition between the core of hexahedral cells and the surrounding body-fitted mesh. To remove these features before you partition your hexcore meshes, you must convert the transitional hexahedral cells into polyhedra. The dimensions of each of these transitional cells remains the same after conversion, but these transitional cells will have more than the original 6 faces. The conversion to polyhedra must take place prior to reading the mesh into FLUENT, and can be done using either the tpoly utility or TGrid.

Dit zou dus wel kunnen gedaan worden, indien we het programma tpoly ter beschikking hebben, maar heeft dan tot gevolg dat we geen smoothing of face swapping meer kunnen uitvoeren<sup>[3]</sup>. Aangezien de hexcore mesh achteraf bekeken toch niet echt veel nut had in die zone van het domein, hebben we dan ook beslist om hem achterwege te laten en te vervangen door een gewone tetrahedrale ongestructureerde mesh.

## 5.4.5 Convergentie

Het aantal iteraties is vastgelegd op 750, aangezien dit het aantal is dat normaal zou moeten volstaan om de gewenste convergentie te bereiken. Moest de oplossing sneller convergeren dan stopt de residual monitor de iteraties eerder. Is er nog niet voldoende convergentie bereikt dan worden er maximaal 200 iteraties extra uitgerekend via een controle met een Java-programma, genaamd *ConvergentieCheck* (zie 5.6).

# 5.5 Optimus

Optimus zorgt voor de koppeling tussen de verschillende onderdelen en het zoeken van de optimale set parameters. Hiervoor is versie 5.2 gebruikt. Wat Optimus eigenlijk doet is op basis van een optimalisatie- of DOE-algoritme bepaalde parametersets bepalen, deze doorsturen naar een rekenlus die op basis daarvan zekere outputs uitrekent, en dan op basis hiervan correlaties berekent of één of meerdere van deze outputs optimaliseert. In ons geval worden dus de dragcoëfficiënt en momentcoëfficiënt rond de achteras berekend, en wordt de eerste geminimaliseerd. De momentcoëfficiënt wordt er gewoon bij berekend om te kunnen controleren of we nog voldoende downforce over houden op het voorwiel. Nu zijn er verschillende aanpakken mogelijk om dit probleem op te lossen, die in wat volgt kort besproken worden. Voor meer informatie verwijzen we naar [5], [19] en [29].

#### 5.5.1 Optimalisatiestrategieën

## **DOE** methoden

DOE methoden, of voluit Design Of Experiments, zijn technieken waarbij in de parameterruimte (n-dimensionaal voor n parameters) een aantal parametervectoren gekozen worden waarvoor het resultaat berekend of op andere wijze gezocht wordt (via experimenten bv). Hierbij is er een onderscheid tussen methoden die met kwantitatieve<sup>9</sup> en kwalitatieve<sup>10</sup> methoden werken. Wij blijven beperkt tot kwantitatieve parameters en outputs, dus bekijken we enkel die methoden. Een eerste soort die veel gebruikt wordt is een 2- of 3-level full factorial. Dit betekent dat aan elke parameterwaarde een waarde 'laag' en een waarde 'hoog' wordt toegekend, en bij 3-level ook nog een waarde 'midden', en dat dan alle mogelijk combinaties tussen al deze waarden uitgerekend worden. Het hoeft geen betoog dat dit al snel tot een enorm aantal berekeningen leidt. Een 3level full factorial op 7 parameters by geeft  $3^7 = 2187$  berekeningen. En daarmee zijn nog maar enkel lineaire en kwadratische effecten in rekening gebracht<sup>11</sup>, wat vaak niet volstaat wanneer de parameters over een relatief groot bereik moeten gevarieerd worden.

We zullen ons dus moeten beperken tot een iets doordachter keuze van vectoren, en dit op zo'n manier dat uit zo weinig mogelijk punten (en dus berekeningen) zo veel mogelijk informatie kan gehaald worden met betrekking tot onderlinge correlaties tussen de parameters. Er zijn hiertoe al verschillende methoden uitgewerkt maar Box-Behnken en Central Composite Design zijn zowat de belangrijkste. Daarbij heeft de CCD een voorkeur wat betreft efficiëntie, aangezien hij minder simulaties moet uitvoeren, en voorspelt die ook beter de hoeken van het domein (vectoren waarbij geen enkele parameter een middenwaarde aanneemt). Van de andere kant kan de Box-Behnken methode dan wel beter kwadratische effecten achterhalen, en maakt die enkel gebruik van 3 waarden per parameter. Dit zal belangrijk blijken te zijn aangezien ons model bij bepaalde parameterwaarden problemen geeft in het meshen. Een gedetailleerde vergelijking tussen beide zou ons te ver leiden, maar die kan u altijd vinden in [29] op pagina 3-40 en volgende.

Een extra aspect dat men normaal terugvindt bij DOE is een statistische analyse. Deze methoden zijn er namelijk op gericht om resultaten van experimenten te verwerken, en daar kan een zekere variantie op zitten. Maw: als men twee keer hetzelfde experiment uitvoert met dezelfde set parameterwaarden kan het resultaat verschillen. Hier moet men uiteraard rekening mee houden door de distributie ervan te bepalen. Bij aanname van een normale verdeling betekent dat het bepalen van het gemiddelde en de variantie voor elk experiment. Hierbij kan men by aannemen dat de variantie overal gelijk is in absolute

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>meetbaar, men kan er een getalwaarde op plakken

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>niet meetbaar, beoordeeld dmv woorden zoals 'goed', 'middelmatig', enz...

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>een 2-level geeft zelfs enkel lineaire afhankelijkheid weer

waarde of relatief tov het gemiddelde. Nu, in ons geval is dit niet nodig, aangezien de stromingsvergelijkingen met hun beginvoorwaarden 100% deterministisch zijn en twee berekeningen dus dezelfde resultaten zullen geven. Het enige wat eventueel licht kan verschillen is het resultaat van de face healing in gambit, al zijn we hier ook niet zeker van. En hoe dan ook kan dit normaal geen noemenswaardig effect hebben op het resultaat.

## Genetische algoritmen

Dit is een klasse algoritmen die in de parameterruimte start met een aantal simulaties in lukraak gekozen vectoren en dan hierop een soort van "survival-of-the-fittest"-wet toepast. Daarbij worden enkel de simulaties met het beste resultaat behouden en worden op basis daarvan, via kruisbestuiving, nieuwe vectoren bijgemaakt die dan weer gesimuleerd worden. Kruisbestuiving betekent hier dat men parameterwaarden uit de gekozen goeie simulaties combineert tot een nieuwe vector in de parameterruimte. Het is ook mogelijk om mutaties uit te voeren om te vermijden dat men vast komt te zitten in een lokaal optimum. Een voordeel van deze methoden is dat men, indien mutatie toegestaan wordt, altijd het absolute optimum kan vinden<sup>12</sup>. Maar dat heeft dan als keerzijde dat er een groot aantal simulaties nodig zijn om daar te geraken.

## Newtonalgoritmen

Dit is een klasse algoritmen die, startend vanaf een bepaald punt in de parameterruimte, als het ware hun weg zoeken naar het optimum. In elk punt worden namelijk de eerste en tweede afgeleide berekend in alle richtingen, en afhankelijk van het feit of men een maximum of minimum zoek zal het algoritme dan steeds evolueren in de richting van de steilste helling omhoog of omlaag. Probleem dat zich hier voordoet is dat het berekenen van die afgeleiden in een n-dimensionale ruimte heel wat simulaties vraagt, en hoe groter n hoe meer. Deze algoritmen zijn nogal geëvolueerd in de loop der jaren, en we willen er hier niet te diep op ingaan. Meer informatie over de verscheidene soorten is terug te vinden in [5] en [19]. We vernoemen enkel dat we bij onze testen gewerkt hebben met NLPQL (Nonlinear Programming Quadratic Line Search), een variant op SQP (Sequential Quadratic Programming). Van die laatste ziet u in figuur 5.25 de flowchart.

#### Kleinste kwadraten methode

Dit is eigenlijk geen optimalisatiemethode, maar wel een berekening die er in gebruikt wordt. Deze methode vertrekt vanaf een bepaald aantal berekende (n+1)-dimensionale vectoren, waarbij de eerste n dimensies de parameters zijn  $(x_1, ..., x_n)$  en de extra dimensie

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>op voorwaarde van een juiste instelling van de genetische parameters



Figuur 5.25: Schema Newtonmethode (SQP)

de variabele is die moet geoptimaliseerd worden (y). Vervolgens wordt er een (n+1)dimensionaal oppervlak door deze 'punten' getrokken, zodat de som van de kwadraten van de verschillen tussen de echte functiewaarden en de berekende functiewaarden uit het oppervlak, in alle gegeven punten, minimaal is. Daarbij dient dan enkel wel nog bepaald te worden hoe onze voorgestelde functie er moet uit zien. Hiervoor zijn er een aantal mogelijkheden, maar aangezien bij Box-Behnken eigenlijk maar termen tot de 2de orde kunnen voorspeld worden, hebben wij de oppervlakken late maken op basis van lineaire en kwadratische termen in de gegeven parameters. Alle gecreëerde oppervlakken zijn dus kwadratisch.

#### Onze strategie

Gezien het aantal parameters en de beperkte tijd zijn onze keuzes nogal beperkt. We hebben dus besloten om een opeenvolging van volgende stappen te doen:

- DOE simulatie op een bepaald aantal parameters
- Berekenen van een oppervlak door deze punten via kleinste-kwadratenmethode
- Zoeken van het optimum van dit oppervlak met behulp van de NLPQL-methode

## 5.5.2 Instellingen Optimus

In Optimus zelf moet er eigenlijk niet veel ingesteld worden. Eerst en vooral moet er een flowpath opgebouwd worden in het hoofdvenster, dat er als volgt uit ziet:



Figuur 5.26: Flowchart Optimus

Hierin zijn volgende onderdelen te onderscheiden:

- Inputs: deze bevatten de verschillende parameters, hun minimum- en maximumwaarde, en hun nominale waarde. Het is ook mogelijk statistische distributies te gebruiken, maar dat was in ons geval niet nuttig aangezien de berekening volledig deterministisch is. De gebruikte parameters en hun bereiken vindt u eerder in deze thesis, in paragraaf (5.2.5).
- Inputfile: in dit tekstbestand schrijft Optimus alle parameters weg bij elke iteratie volgens een voorgedefinieerd patroon. Wij hebben er bijvoorbeeld voor gekozen om dit als floating point getallen te doen met 4 cijfers voor en 5 cijfers na de komma.
- Berekeningslus: dit is de kern van heel het optimalisatieproces, het berekenen van de coëfficiënten bij een gekozen set parameters. Dit bevat bij ons maar 1 regel, namelijk het opstarten van een programma geschreven in C. De eerste aanpak was van hier meerdere regels in te plaatsen die in een shell zouden uitgevoerd worden,

en dit werkte ook, maar met als probleem dat Optimus niet detecteerde wanneer de simulatie afgelopen was. Vandaar hebben we geprobeerd die regels in een shell script te plaatsen dat we aanroepen met een kort C programmaatje, en dat wordt hier dus opgestart. Nu heeft dit weliswaar het probleem niet opgelost maar we hebben het wel verder zo laten staan. Vermoedelijk is er ergens een java-programma die de iteratie tegenhoudt. De code van het gebruikte C programma vindt u terug in deel 5.6.

- Outputfiles: in deze bestanden worden door onze rekenlus (via een Java-programma) de drag- en momentcoëfficiënt weggeschreven en Optimus leest die dan in. Men dient ook voor te programmeren waar die coëfficiënten juist komen te staan in het tekstbestand, zodat ze ondubbelzinnig kunnen ingelezen worden.
- Outputs: deze zijn gewoon nodig om Optimus duidelijk te maken dat hij deze waarden moet inlezen

Vervolgens moeten er "methods" gekozen worden, zijnde berekeningsmodellen. De opeenvolging die wij aangenomen hebben wordt uit de doeken gedaan in paragraaf 5.7, aangezien elke volgende stap volgt uit de resultaten van de vorige.

# 5.6 Java programma's en shell scripts

In dit puntje worden alle programma's beschreven die de simulaties in goede banen leiden en opstarten. We beginnen hierbij met het C programma dat vanuit Optimus aangeroepen wordt en gaan zo verder via alle programma's die in volgorde gestart worden.

## 5.6.1 Runall.c

Dit programma start gewoon een shell script op:

```
#include <stdlib.h>
int main() {
   system("./runshelltemp");
}
```

## 5.6.2 runshelltemp

Dit script doet een paar "opkuisopdrachten", verhoogt de teller met 1 eenheid, genereert een tweede shell, en start die vervolgens op. De tweede shell bevat commando's die de teller bevatten en moet dus bij elke simulatie opnieuw gegenereerd worden, vandaar deze nogal omslachtige werkwijze.

```
#!/bin/bash
cd /cfdclu05/lusers/stud84b/Journals
rm -f default*
rm -r -f GAMBIT*
java ResetTextFiles
java UpdateTeller
java ShellGenerator runshell
chmod 777 runshell.sh
sh runshell.sh
exit
```

## 5.6.3 runshell.sh

Deze shell voert de eigenlijke simulaties uit, en bevat de volgende stappen:

- Genereren en uitvoeren Maple journal
- Output van Maple opkuisen om die leesbaar te maken voor Gambit
- Gambit journal genereren en uitvoeren
- Fluent journals genereren
- Fluent uitvoeren + checken op convergentie en eventueel uitvoeren van de "refluent" journals indien nodig, met telkens convergentiecontroles ertussen
- Rapport bijwerken (een soort log van alle gedane simulaties, dat u kan vinden op de DVD's onder de naam rapport.txt in de map 'Werkmap')

```
#!/bin/bash
cd /cfdclu05/lusers/stud84b/Journals
java MapleGenerator maplejournal
/cfdpc05/lusers/Maple10/bin/maple maplejournal16.map
java KuisOp coordinaten_auto
java KuisOp coordinaten_wielv
java KuisOp coordinaten_wiela
java KuisOp coordinaten_bak
java KuisOpVoorpunt verstevoorpunt
java GambitBoundaryGenerator gambitjournal gambitmesh
/cfdpope/lusers/Gambit2.3.16/Fluent.Inc/bin/gambit -inp gambitjournal16.jou
java FluentGenerator fluentjournal gambitmesh
java ReFluentGenerator refluentjournal
/cfdpope/lusers/Fluent6.3.26/Fluent.Inc/bin/fluent 3d -g -p -t4 -cnf=hostsfile
    < /cfdclu05/lusers/stud84b/Journals/fluentjournal16.jou >& /cfdclu05/
   lusers/stud84b/Journals/fluentlog16.log &
```

# 

## 5.6.4 Java programma's

Hier worden alle gebruikte Java programma's kort beschreven. De volledige code vindt u in bijlage O.

- ResetTextFiles: maakt alle tijdelijke tekstbestanden die moeten hergebruikt worden leeg, behalve ConvergentieBoolean.txt waarin "false" wordt weggeschreven
- UpdateTeller: verhoogt de teller in teller.txt met 1
- ShellGenerator: genereert het bestand runshell.sh
- MapleGenerator: genereert Maple Journal
- KuisOp & KuisOpVoorpunt: vormen de output van Maple om tot leesbare bestanden met coördinaten voor Gambit
- GambitBoundaryGenerator: genereert Gambit journal
- FluentGenerator: genereert Fluent hoofdjournal
- ReFluentGenerator: genereert secundaire Fluent journal
- ConvergentieCheck: maakt een gemiddelde van de laatste 20 dragcoëfficiënten die door Fluent berekend zijn en vergelijkt dit met het verschil tussen de minimum- en maximumwaarde. Indien daarbij een afwijking van meer dan 3 % vastgesteld wordt gebeurt er verder niets en wordt dus een volgende batch van 100 iteraties gestart door het shell script. Is de afwijking kleiner en is er dus voldoende convergentie, dan past dit programma de refluentjournal aan zodat die gewoon Fluent onmiddellijk weer afsluit na het opstarten en dus geen verdere iteraties meer uitvoert. Bovendien

wordt het gemiddelde van de laatste 20 drag- en momentcoëfficiënten dan berekend en weggeschreven in een tekstbestand om in te lezen in Optimus.

• WerkRapportBij: schrijft de teller, het tijdstip van bijwerking, de parameters, en de resulterende drag- en momentcoëfficiënt weg in het bestand rapport.txt

# 5.7 Resultaten

Eerst geven we twee algemene aandachtspunten die hun gevolgen hadden tijdens onze optimalisatielus. Vervolgens overlopen we één voor één de gebruikte methods en hun resultaten, en geven we een overzicht van de parameters met hun invloed op de stroming. Tenslotte bespreken we nog even kort het optimum en de stroming rond de wagen met die parameters.

## 5.7.1 Algemene aandachtspunten

- Het oppervlak dat Gambit trekt is niet opgebouwd door primitieven, maar als een zo nauw mogelijk aansluitend oppervlak bij een set punten. De verdeling van deze punten over de ruimte is bepaald door algoritmes in de Maple journal, en kan wat verschillen voor verscheidene sets parameterwaarden. Vooral in de omgeving van sterke krommingen in het oppervlak kan dit gevolgen hebben voor de exacte vorm. Daarop volgen dan nog wat uitsnijdingen met cilinders en nadien afrondingen, met als gevolg dat we riskeren fouten in het oppervlak te krijgen, lokaal sterk gekromde stukjes e.d., beïnvloed door de exacte ligging van de punten. Dit heeft zijn gevolgen bij het meshen van het wagenoppervlak, dat dan riskeert fout te lopen.
- Tussen de uitsnijding voor het achterwiel en de afschermbak voor de riemschijven zit er een smalle zone waarvan de breedte nogal beïnvloedt wordt door de lokale kromming van het oppervlak daar, en dus door de precieze parameterwaarden. En we denken dat hier het probleem optreedt van de parameter die de minimale celgrootte bepaalt. In sommige gevallen krijgen we een goed resultaat bij minimaal 1.2cm, in andere gevallen bij 1.3cm. Geen van beiden geeft echter altijd een goed resultaat.

Deze 2 problemen uitten zich in ofwel 2D-cellen met een zeer hoge skewness factor op het wagenoppervlak, die dan op hun beurt aanleiding gaven tot 3D-cellen met negatieve volumes, ofwel het falen van een 2D-mesh te leggen op het wagenoppervlak wat de rest van de journal in het water deed vallen.

## 5.7.2 1<sup>e</sup> 3 Level Full Factorial op hoeken achteraan

We beginnen met een optimalisatie van de 2 hoeken achteraan, zoals vermeld uit de veronderstelling dat ze relatief onafhankelijk zijn van de andere parameters vooraan. Aangezien we hier maar met 2 parameters te maken hebben is het geen probleem om een 3-level full factorial uit te voeren (dat levert maar 9 simulaties op). Daarbij is  $\theta_{boven}$  gevarieerd tussen 20 en 30 graden en  $\theta_{zij,2}$  tussen 15 en 25 graden. De optimale set die hieruit volgde was duidelijk allebei de hoeken op hun minimale waarde. De grenzen voor deze hoeken moesten dus nog verlagen. Bij  $\theta_{boven}$  gelijk aan 30° slaagden we er zelfs niet meer in een goeie mesh te construeren met onze instellingen. Aangezien deze toch duidelijk ver van het optimum lagen hebben we dan ook beslist om die simulaties niet meer uit te voeren. De resultaten van dit alles vindt u in rapport.txt op DVD nr 1, iteraties 1 tot en met 6 (7-9 waren met hoek van 30° en zijn dus niet gelukt).

We hebben er voor gekozen nu eerst een optimalisatie op de parameters vooraan uit te voeren, vooraleer de grenzen op  $\theta_{boven}$  en  $\theta_{zij,2}$  te verlagen. Daarbij zijn de hoeken achteraan op de hier bekomen minimale waarden van resp. 20° en 15° vastgehouden.

#### 5.7.3 $1^e$ Box Behnken op voorparameters

Hier hebben we te maken met 5 parameters, namelijk  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $p_1$  en bultenschaal. Een Box-Behnken analyse daarop levert 42 simulaties op. Hier begonnen we wel wat last te krijgen van slechte meshes bij bepaalde parametercombinaties. Eén keer hebben we de minimale celgrootte moeten wijzigen naar 1.3cm, en een andere keer was er een probleem vooraan waardoor we de grootte van de uitsnijding van het voorwiel hebben moeten aanpassen.

Dit laatste beïnvloedt natuurlijk een beetje het stromingsbeeld en maakt de vergelijking met de andere simulaties niet meer helemaal correct. En hetzelfde kan eigenlijk gezegd worden van het veranderen van de minimale celgrootte, aangezien we niet met zekerheid weten of de simulaties mesh-onafhankelijk zijn. Dit viel ook moeilijk te testen bij gebrek aan instellingen die überhaupt een bruikbare mesh opleverden. We hebben wel 1 simulatie op zowel 1.2 als 1.3 cm uitgevoerd en het verschil was miniem, maar als bewijs is dit eerder zwak. We zijn echter in dit stadium nog bezig met het variëren van de parameters over een vrij groot bereik, wat sowieso al verre van nauwkeurig is. We stellen ons dus tevreden met een indicatieve waarde van het optimum en verfijnen dit later.

Uiteindelijk is het toch gelukt alle 42 simulaties correct uit te voeren en een model aan te maken dat op basis hiervan een 6-dimensionaal oppervlak aanmaakt (5 parameters + de dragcoëfficiënt). De resultaten van de 42 simulaties kan u opnieuw vinden in rapport.txt, zijnde iteraties 28 tot 81, waarbij u kan zien waar het fout liep en wat herrekend is (dragcoeff = null betekent dat de berekening fout gelopen is). Vervolgens moeten we het optimum van dit oppervlak zoeken. Dit doen we via een Newton-methode die op basis van het oppervlak werkt ipv op basis van simulaties. De bekomen set is de volgende:

parameter	waarde	bereik	
$\omega_1$	0.85	0.65 - 0.85	
$\omega_2$	0.57686	0.3 - 0.7	
$\omega_3$	0.3	0.3 - 0.7	
$p_1$	22	18 - 22	
bultenschaal	0	0 - 1.2	

Tabel 5.1: Bekomen optimum uit 1e BB

Hieruit blijkt dat nogal wat waarden opnieuw op de rand van het parameterdomein liggen, en dat we dus onze grenzen opnieuw wat moeten verleggen om zeker te zijn dat we in een globaal optimum terechtkomen. We verfijnen echter eerst de parameterwaarden achteraan.

## 5.7.4 2<sup>e</sup> 3 Level Full Factorial op hoeken achteraan

Deze keer verleggen we de grenzen naar  $\theta_{boven}$  tussen 10° en 20° en  $\theta_{zij,2}$  tussen 5° en 15°. De optimale waarde voor  $\theta_{boven}$  blijkt daarbij op ongeveer 12.5° uit te komen, wat vrij goed overeen stemt met het gevonden optimum bij de eenvoudiger Ahmed-modellen (zie figuur 5.3). Het optimum voor  $\theta_{zij,2}$  ligt opnieuw op de grens, namelijk bij 5°. Dit is al veel kleiner dan  $\theta_{zij,1}$ , die in de orde van de 15° graden lag, en dat is natuurlijk niet de bedoeling. Dat wil eigenlijk zeggen dat we in het begin te sterk versmald hebben en dus niet optimaal bezig zijn.

Vermoedelijk is dit dan ook de reden waarom we bij een dergelijk lage waarde voor het optimum uitkomen. Moest  $\theta_{zij,1}$  gelijk geweest zijn aan  $\theta_{zij,2}$  dan was deze hoek in optimum misschien groter dan 5° uitgevallen in optimum. Dit hebben we niet meer kunnen testen aangezien dit een herschrijven van de Gambit-journal met zich meebracht en daar was geen tijd meer voor. Het aantal simulaties bedroeg hier uiteraard opnieuw 9 stuks, en deze zijn te vinden in rapport.txt onder de nummers 101 tot en met 109.

## 5.7.5 2<sup>e</sup> Box Behnken op voorparameters

Aangezien bij de eerste BB-run op de voorkant nogal wat parameters op hun grens lagen, voeren we nog een tweede run uit met andere parametergrenzen. Hierbij is *bultenschaal* constant gehouden op 0. Dit is intuïtief al de beste waarde op vlak van weerstand, want een hogere waarde zal enkel als nut hebben van extra downforce te creëren. En dat laatste bleek niet nodig en ook nog eens van weinig invloed. De extra downforce door *bultenschaal* te verhogen naar 1.2 (de maximale waarde) is namelijk in de orde van een paar procent. Er blijven dus 4 parameters over om te optimaliseren, wat ons 25 simulaties geeft. Ook hier is het wel eens fout gelopen met de parameter die de kleinste celgrootte op het wagenoppervlak instelt, maar uiteindelijk hebben we alle simulaties correct kunnen uitvoeren. De resultaten zijn te vinden in rapport.txt met nummers 123 tot en met 164. Dat geeft volgend optimum:

parameter	waarde	bereik	
$\omega_1$	0.9	0.75 - 0.90	
$\omega_2$	0.3	0.3 - 0.9	
$\omega_3$	0.37947	0.1 - 0.7	
$p_1$	22.66581	18 - 23	

Tabel 5.2: Bekomen optimum uit 2e BB

Om te testen in hoeverre dit zou kunnen kloppen voeren we nog een simulatie uit in dit optimum (nr 165 in rapport.txt). De dragcoëfficiënt was hier echter 3-4% hoger dan berekend uit het oppervlak via bovenstaande methode. Voegen we deze laatste simulatie toe aan de Box-Behnken set, dan kunnen we een nieuw oppervlak laten trekken en daar het nieuwe optimum uit halen. Maar dan blijkt dat de dragcoëfficiënt daar hoger ligt dan de bekomen dragcoëfficiënt bij 1 van de andere simulatiepunten (buiten dit optimum dus). Dit komt doordat het oppervlak niet door de gegeven punten gaat maar een benadering vormt die er zo dicht mogelijk bij aanleunt. Door het te kleine aantal simulaties en dus het gebrek aan nauwkeurigheid blijkt dat niet al te dicht te zijn. We besluiten dan ook om 'op het zicht' het beste resultaat uit de Box-Behnken set te kiezen, en rond dat punt een analyse in meer detail te doen. Het gevonden optimum uit het oppervlak laten we voor wat het is. De gekozen set is de volgende:

parameter	waarde	bereik	
$\omega_1$	0.9	0.75 - 0.90	
$\omega_2$	0.3	0.3 - 0.9	
$\omega_3$	0.4	0.1 - 0.7	
$p_1$	21	18 - 23	

Tabel 5.3: Bekomen optimum uit 2e BB, op zicht

### 5.7.6 3<sup>e</sup> Box Behnken op voorparameters

In deze run houden we naast *bultenschaal* ook  $\omega_1$  vast, namelijk op 0.9. Dit omdat vrij duidelijk blijkt dat dat de optimale waarde zal zijn, en we willen deze niet nóg hoger laten worden. We stellen ons hiermee tevreden. Er blijven dus 3 parameters over, wat 13 simulaties oplevert. Deze zijn genummerd van 166 tot en met 179 in rapport.txt. Halverwege is er opnieuw een fout opgetreden maar deze keer hebben we geen instellingen moeten wijzigen. Vermoedelijk was er een probleem met software die gecrasht is of iets dergelijks. Alle simulaties zijn dus met dezelfde instellingen uitgevoerd, wat het eerder besproken probleem van niet equivalente simulaties weg neemt. En het optimum is hier niet veranderd, het bleef gelijk aan hetgeen we eerder gevonden hadden. We geven dit nog even mee, voor alle parameters, en samen met de grenzen die in deze simulatie gehanteerd zijn:

parameter	waarde	bereik
$\omega_1$	0.9	0.9 - 0.9
$\omega_2$	0.3	0.2 - 0.4
$\omega_3$	0.4	0.3 - 0.5
$p_1$	21	20 - 22
bultenschaal	0	0 - 0
$ heta_{boven}$	12.73487	12.73487 - 12.73487
$\theta_{zij,2}$	5	5 - 5

Tabel 5.4: Bekomen optimum uit 3e BB

Hieruit kunnen we dus besluiten dat we alleszins in een lokaal optimum zitten, en afgaande op de vorige analyses misschien ook wel in een globaal optimum. Dit is voldoende voor wat deze thesis betreft en we houden het hier dan ook bij voor wat het zoeken van het optimum betreft.

#### 5.7.7 Simulaties van het optimum met hogere bultenschaal

Om nog eens te testen wat het effect van de parameter *bultenschaal* juist is hebben we nog 2 simulaties uitgevoerd met alle parameters op de optimale waarden, behalve *bultenschaal* die op 0.6 en 1.2 geplaatst is. Hieruit bleek dat het effect op zowel de drag- als momentcoëfficiënt bijna verwaarloosbaar is (resp. 1.5 en 2.5 %). Gezien de nauwkeurigheid van onze simulaties kunnen we er eigenlijk zelfs geen besluiten uit trekken, want die nauwkeurigheid is slechter dan 4%. Om hier echt een vernoemenswaardige verhoging van de downforce te krijgen zouden we dus een drastischere wijziging van de vormgeving moeten krijgen, met scherpere overgangen misschien. Maar dat zou ongetwijfeld zijn invloed hebben op de weerstand. De resultaten van deze 2 simulaties staan in rapport.txt als iteraties 180 en 181.

## 5.7.8 Invloed parameters op de stroming

In dit deel proberen we een idee te geven van de invloed die de parameters hebben op de stroming over onze wagen en dus de optredende krachten. Gezien het feit dat de geldigheid van onze kwadratische modellen sterk kan betwist worden is het wel de vraag in hoeverre men er juiste conclusies kan uit trekken, maar waar de resultaten overeen komen met wat zou kunnen verwacht worden hebben we toch gepoogd een verklaring neer te schrijven. Daarbij dient opgemerkt te worden dat deze eerder speculatief zijn, en dus in elk geval verder zouden moeten onderzocht worden vooraleer ze als waarheid aan te nemen.

## $\theta_{boven}$ & $\theta_{zij,2}$

In figuur 5.27 ziet u een 3D-plot van de dragcoëfficiënt ifv de hoeken achteraan. In figuur 5.28 is de bijdrage van alle termen te zien. Uit deze beide figuren valt duidelijk op te merken dat de hoek  $\theta_{boven}$  voor een kwadratische stijging van de weerstand zorgt, zoals verwacht uit figuur 5.3.  $\theta_{zij,2}$  daarentegen heeft een vrij lineair effect op de weerstand. We vermoeden dat de reden hiervoor te zoeken is in het feit dat de stroming al afscheidt op het einde van het eerste stuk, met hoek  $\theta_{zij,1}$ . Deze hoek is dus wel degelijk te groot gekozen. Welke mechanismen het verband dan juist lineair maken is moeilijker te zeggen.

Bovendien wordt de invloed van  $\theta_{zij,2}$ een stuk kleiner bij grote hoeken  $\theta_{boven}$ , ook in absolute waarde. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat, bij kleine  $\theta_{zij,2}$ , de stroming bovenaan de wagen beter aangehecht kan blijven aangezien de wervelsystemen aan de zijkant van de wagen beperkt blijven, terwijl dit bij grote  $\theta_{zij,2}$  niet meer het geval is. En bij grote  $\theta_{boven}$  valt deze invloed weg aangezien de stroming bovenaan de wagen dan sowieso in afscheiding gaat. Tenslotte is ook te zien dat de optimale waarde voor  $\theta_{boven}$  vergroot van  $\pm 12^{\circ}$  naar  $\pm 16^{\circ}$  wanneer  $\theta_{zij,2}$  to energet van 5 naar 25°. Dit valt wat moeilijker te verklaren aangezien



Figuur 5.27: 3D-plot  $C_D$  ifv  $\theta_{boven}$  &  $\theta_{zij,2}$ 

we eerder een omgekeerde evolutie zouden verwachten, maar de vraag is hoe correct ons model is uiteraard.



**Figuur 5.28:** Contributie termen in  $\theta_{boven}$  &  $\theta_{zij,2}$ 

 $\omega_1$ 

Deze parameter bepaalt de neiging van de voorkant van de wagen, als hij van bovenaf bekeken wordt, om richting een parabool te evolueren. Voor kleine waarden van  $\omega_1$  is het eerder een ellips. Nu, het feit dat deze in optimale omstandigheden groot moet zijn viel perfect te verwachten. Een paraboolvorm is iets scherper en heeft aan het stuwpunt een kleiner oppervlak, waardoor de stroming minder sterk moet ombuigen en er dus een minder hoge druk komt te staan aan de voorkant. Eigenlijk zou het dus nog beter zijn de wagen bijna spitsvormig te maken vooraan, maar opnieuw geldt dat, vanwege de plaats die nodig is voor het voorwiel, de wagen dan veel te lang zou worden. Vandaar ook dat we gekozen hebben voor de huidige situatie tussen ellips en parabool. In figuur 5.29 hieronder kan u zien dat, voor gelijk welke combinatie met andere parameters,  $\omega_1$  altijd best een hoge waarde heeft. Daarbij is de dragcoëfficiënt telkens uitgezet in functie van 2 parameters, waarbij de rest constant gehouden wordt op zijn gemiddelde waarde. Enkel bij hoge waarden van  $\omega_2$  lijkt het niet zo te zijn dat  $\omega_1$  hoog moet zijn, maar dit zou ook aan het model kunnen liggen van het oppervlak.



<sup>(</sup>c)  $C_D$  if  $\omega_1$  en  $p_1$ 

Figuur 5.29: Invloed  $\omega_1$ 

In figuur 5.30 is de invloed van  $\omega_2$  uitgezet. Daarop valt duidelijk te merken dat deze parameter ofwel hoog, ofwel laag moet zijn. Voor waarden daartussen krijgen we een te hoge dragcoëfficiënt. Ook is te zien dat, in het geheel bekeken,  $\omega_2$  beter laag gekozen wordt, wat ook volgt uit de uiteindelijke optimalisatie. Nu, dit is gerekend binnen het hier beschouwde bereik van 0.3 tot 0.9, en uit de detailanalyse op het eind weten we dat dit oppervlak in de omgeving van 0.3 niet meer klopt. Dat zou namelijk een minimum moeten zijn en hier zien we de oppervlakken daar nog sterk dalen. Dat was echter ergens te verwachten: een kwadratisch model over zo'n groot bereik is niet nauwkeurig genoeg. Het is dan ook de vraag in hoeverre valabele conclusies kunnen getrokken worden uit wat we hier zien.

Wat wél zou kunnen, is dat we een minimum hebben voor  $\omega_2$  rond de 0.40 en dat alles daarbuiten een slechter resultaat geeft. Neigt de vorm namelijk meer naar een ellips, dan krijg je een sterker stuwpunt vooraan en dus meer drukopbouw daar. Neigt het meer naar een parabool, dan wordt de druk die vooraan ontstaat langer aangehouden doordat de stroming minder sterk versnelt, en hoewel de maximum druk dan lager ligt treedt er wel een hogere druk op over een groter deel van het oppervlak<sup>13</sup>. Het is dus denkbaar dat daar ergens een optimum in te vinden is, maar waar het ligt lijkt ons moeilijk theoretisch te voorspellen.

#### $\omega_3$

Het effect van deze parameter is gelijkaardig aan dat van  $\omega_2$ . Het verschil in de simulaties is dat we hier wél krijgen wat we verwachten: een minimum rond een bepaalde waarde en slechter naar de grenzen van het domein toe. In figuur 5.31 ziet u een aantal 3Dplots die dit weergeven. Daarbij moet wel vermeld worden dat  $\omega_3$  hier een ander bereik heeft, nl. 0.1-0.7 tov 0.3-0.9 voor  $\omega_2$ . Wat daarbij nog op te merken valt is dat het minimum relatief onafhankelijk is van  $\omega_1$  en  $\omega_2$ , zoals ook te verwachten viel aangezien die de stroming onderaan de wagen niet echt beïnvloeden. Het hangt echter wel af van  $p_1$ , ook zoals verwacht, en zo dat de optimale  $\omega_3$  daalt bij stijgende  $p_1$ . Nu betekent een stijgende  $p_1$  hier een scherper worden van de auto aan de onderkant vooraan, en dus is het zo dat een geometrie met hogere  $p_1$  en lagere  $\omega_3$  (meer richting ellips) vergelijkbaar zullen zijn qua versnellingsprofiel onderaan. Dat verklaart dit fenomeen: als  $p_1$  stijgt moet  $\omega_3$ dalen om optimaal te blijven.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>Representatieve vergelijkingen hiervan kunnen we niet tonen: door het systeem van de Box-Behnken analyse hebben we geen 3 simulaties met bv. alle parameters op dezelfde waarde en enkel  $\omega_2$  die verandert



<sup>(</sup>c)  $C_D$  if  $p_1$  en  $\omega_2$ 

Figuur 5.30: Invloed  $\omega_2$ 



(c)  $C_D$  if<br/>v $\omega_3$  en  $p_1$ 

Figuur 5.31: Invloed  $\omega_3$ 

# 

Figuur 5.32: Invloed  $p_1$  in detailsimulatie

derdruk gaan meewerken ipv voor extra weerstand te zorgen (doordat we nu een convergent krijgen tussen  $p_1$  en  $p_2$ ). Bovendien blijft de stroming dan versnellen onderaan de wagen wat voor een betere aanhechting zorgt. Wordt  $p_1$  echter te groot, dan vermindert de versnelling van de stroming vooraan, en aangezien de stuwdruk daar ongeveer constant zal blijven, krijgen we dus een hogere druk op de voorkant onderaan. Vandaar is er ook hier een optimum.

#### bultenschaal

De invloed hiervan op de krachten op de wagen is vrij klein. Bij het verhogen van de parameter verhoogt de weerstand zoals verwacht, maar niet zo sterk: amper 1.5%. Dit valt dus eigenlijk zelfs binnen de nauwkeurigheidsgrenzen van onze simulaties. Ook de andere krachten blijven bijna gelijk. Deze parameter is dus in deze analyse van weinig belang. Het is wel intuïtief duidelijk wat hij doet: wanneer hij vergroot zorgt hij voor een minder grote versnelling, en dus een langer behouden van de druk en meer downforce op het voorwiel. Dit heeft echter ook tot gevolg dat de vormweerstand van de wagen stijgt door de iets hogere druk op de voorkant bovenaan.

#### $p_1$

In figuur 5.33 is de invloed van  $p_1$  op de dragcoëfficiënt te zien. Hieruit blijkt duidelijk dat  $p_1$  zo groot mogelijk gekozen moet worden. Kijken we echter naar de detailsimulaties rond  $p_1 = 21$ , dan merken we dat er toch een optimum bestaat (zie figuur 5.32). Dit kunnen we als volgt verklaren: Over de gehele lengte van de wagen (van net na het voorwiel) is er voor alle waarden van  $p_1$  een onderdruk aanwezig. Is  $p_1$  nu klein, dan zal deze onderdruk zorgen voor een extra weerstandcomponent, aangezien de wagen onderaan omhoog oploopt. Vergroten we  $p_1$  tot boven de vastgehouden waarde van  $p_2$  (20cm), dan zal deze on-



(c)  $C_D$  if  $p_1$  en  $\omega_3$ 

Figuur 5.33: Invloed  $p_1$ 

## 5.7.9 Uiteindelijk optimum

De parameterwaarden in dit optimum kan u vinden in tabel 5.4. De bekomen dragcoëfficiënt en momentcoëfficiënt rond het achterwiel zijn:

$$C_D = 0.151524$$
  
 $C_M = -0.169485$ 

 $C_D$  is daarbij gezakt van een waarde van ongeveer 0.173 bij de oorspronkelijke nominale parameterwaarden<sup>14</sup> tot ongeveer 0.152, een verbetering van 12% dus. En de downforce op het voorwiel is daarbij zelfs nog gestegen met 9%, we hebben dus zeker niet aan bestuurbaarheid ingeboet. Tenslotte is ook de algemene downforce op de wagen gestegen in absolute waarde, en dat met maar liefst 73%. Een klein overzichtje ziet u in de tabel hieronder. Meer detail is te vinden in bijlage P. Daabij kan u ook zien dat de downforce wel vrij klein is, in de orde van 1 kilogram per wiel, maar voor deze wagen denken we dat dit moet volstaan. Het belangrijkste was dat we geen netto lift kregen. Of dit nu effectief volstaan zou moeten blijken uit wegtesten, en dan kan het model eventueel nog aangepast worden rekening houdende hiermee.

kracht	origineel	optimaal	verschil
weerstand	43.6N	38.2N	-12.4%
downforce	17.8N	30.8N	+73%
downforce voorwiel	$39.2 \mathrm{Nm}$	42.7Nm	+9%

Tabel 5.5: Vergelijking krachten & momenten

In figuren 5.34 en 5.35 zijn respectievelijk een snelheidsbeeld (waarbij enkel de x-component van de snelheid in rekening is gebracht) en drukbeeld te zien rond een doorsnede van de wagen in profiel (in het symmetrievlak). In figuren 5.36 en 5.37 is hetzelfde weergegeven in een doorsnede evenwijdig met de grond, op 40cm hoogte (= neutralehoogte). Deze beelden zijn grotendeels zoals verwacht.

 $<sup>{}^{14}\</sup>omega_1 = 0.75, \omega_2 = 0.5, \omega_3 = 0.5, bultenschaal = 0.6, p_1 = 18, \theta_{boven} = 25, \theta_{zij,2} = 20$ 



Figuur 5.34: Snelheidsbeeld (x-component) profieldoorsnede



Figuur 5.35: Drukbeeld profieldoorsnede



Figuur 5.36: Snelheidsbeeld (x-component) platte doorsnede



Figuur 5.37: Drukbeeld platte doorsnede

Volgende zaken vallen nog op te merken:

- Net na de uitsparing voor het voorwiel krijgen we een dwarse wervel, door de plotse ombuiging daar. De stroming hecht echter al snel terug aan doordat ze daar nog steeds versnellend is.
- Achteraan de wagen is onderaan het effect van de diffusie vrij sterk en daalt het snelheidsniveau tegen de wand meer dan bovenaan, hoewel de hoek waarmee versmald wordt kleiner is. Dit kan te maken hebben met het feit dat, doordat de stroming bovenaan een vrij grote neerwaartse component heeft, het wervelsysteem naar onder wordt geduwd, en zo de stroming die van onder de wagen komt beïnvloedt. Daarnaast speelt ook het effect van de beschermbakken voor de riemschijven een rol uiteraard. Deze zorgen voor sterk afgescheiden stroming er net achter. Het is dus nog de vraag of die hoek onderaan niet beter een andere waarde zou hebben. Een beeld van de wervels achteraan kan u zien in figuren 5.38 en 5.39. De eerste figuur is daarbij een doorsnede in het symmetrievlak, de tweede een horizontale op hoogte *neutralehoogte*.
- Achter de beschermbakken voor de riemschijven krijgen we een vrij sterke terugstroming. De snelheidsniveau's errond zijn al een stuk hoger dan in de vrije stroming, door de werking van het vernauwend kanaal onder de wagen daar, en de bakken stoppen plots met een verticaal vlak. Misschien is er nog een iets betere vormgeving te bedenken, waarbij ze eventueel wat verder doorlopen, al kan men zich afvragen of dat voldoende gaat opbrengen.
- De stroming tussen het achterwiel en de wagen is grotendeels afgescheiden, zoals ook te verwachten was bij dergelijke geometrie. Hier zou het alleszins een verbetering geweest zijn moesten we het achterwiel binnen de behuizing kunnen plaatsen hebben, zoals ook vermeld in hoofdstuk 6.
- Achteraan de wagen is er nergens afscheiding buiten in de omgeving van de achterwieluitsparingen en achter de beschermbakken. Na deze laatste krijgen we ook vrij snel terug aangehechte stroming. Het zog blijft zo relatief beperkt.
- Ondanks de erg gestroomlijnde vorm van de wagen houden we dus toch nog voldoende downforce over op de wagen. We vermoeden dat dit in hoofdzaak te maken heeft met de creatie van onderdruk onderaan, aangezien de zone van overdruk bovenaan op de neus erg beperkt is.



Figuur 5.38: Wervels achteraan (1)



Figuur 5.39: Wervels achteraan (2)
Hiermee besluiten we dit hoofdstuk. We hebben er bewust voor gekozen om geen karrevracht aan figuren mee te geven. Uiteindelijk zijn er vele mogelijke interessante beelden te maken van de stroming rond de wagen, waarmee men kan uitzoeken welke wervels er precies allemaal gevormd worden, en noem maar op. Maar het leek ons niet de bedoeling van deze thesis om daar zo diep op in te gaan. Dit zou hoe dan ook te veel tijd vragen. Op bijgevoegde DVD's vindt u wel alle simulatiebestanden terug, en als u daar fluentcase173.cas<sup>15</sup> opent kan u alle mogelijk plots zelf construeren. Wat we wel nog meegeven is een aantal beelden van de uiteindelijke optimale geometrie. Deze zijn gemaakt in Solidworks 2006, en het model daarvan kan u ook terug vinden in de map Aerodynamica op DVD Nr 1. U kan ze terugvinden in figuren 5.40 en 5.41.

Tot slot wensen we nog op te merken dat we het idee hadden om deze geometrie ook in realiteit uit te voeren. Dit dachten we te doen door aluminium profielen in de juiste vorm te buigen en te monteren rond de wagen, waarop we dan flexibel plastic zouden bevestigen dat de vorm uiteindelijk maakt. Dit idee was min of meer afkomstig van de Twike die we gaan bezichtigen zijn, waarvoor dank aan Prof. Serge Hoste. Daar was ook een type flexibele plastic gebruikt om het dak te vormen en dit leek goed te werken. Door tijdsgebrek is dit echter niet meer gelukt en is de wagen dan ook gebleven bij een 'buggy' gemaakt uit een buizenframe. Dit kan echter een idee zijn naar de toekomst toe om de wagen toe te laten hogere snelheden te halen (voor zover het extra gewicht dan het voordeel niet teniet doet).

 $<sup>^{15}\</sup>mathrm{de}$  case file met de optimale set parameters



(c) Onderaanzicht

Figuur 5.40: Beelden optimaal wagenmodel: deel 1



(a) Detail zonder achterwiel

Figuur 5.41: Beelden optimaal wagenmodel: deel 2

### Hoofdstuk 6

### Besluit

#### 6.1 Testen

Na de totale samenbouw van de elektronica en de motor hebben we een eerste testrit gemaakt op de openbare weg. Hierbij zijn we tot een snelheid van 55km/h geraakt. We konden niet sneller omdat het geïnstalleerde vermogen te laag was. Volgens theoretische berekeningen zouden we toch 70km/h moeten kunnen halen met één motor, maar bij deze theoretische berekening hebben we waarschijnlijk de weerstanden (luchtweerstand, rolweerstand, wrijvingsverlies in de aandrijving) onderschat. Bij de theoretische berekeningen zijn we er alleszins al van uit gegaan dat we een aërodynamische wagen zouden hebben, wat totaal het geval niet was bij deze testrit. Dus 55km/h is inderdaad zo slecht nog niet. Het spijtige hieraan is dat we dus de overgang niet hebben kunnen testen om van de eerste gang naar de tweede gang te gaan. De sturing werkt volledig, want indien we het aandrijvende wiel oplichten en dan de motor laten versnellen, dan krijgt de koppeling bij maximaal toerental van de motor het signaal om in te schakelen.

We hebben ook een test uitgevoerd waarbij we de wagen achteruit laten rijden. De wagen reed maar heel weinig achteruit tot hij na enkele meters gewoon stopte met rijden. De elektromagnetische koppeling slipte volledig door. De oorzaak van dit doorslippen is te zoeken in de mechanische uitwerking van de aandrijving. De twee frictieplaten van de elektromagnetische koppeling zijn bij de montage iets te ver uit elkaar geplaatst, waardoor de koppeling te weinig kracht over heeft om de twee helften met elkaar te koppelen. Nominaal zouden de helften op 0.1mm van elkaar moeten staan, maar de nauwkeurigheid van afwerking was niet hoog genoeg om deze passing te kunnen bekomen.

Principieel werkt alles dus perfect, alleen zijn we bij de uitvoering niet zorgvuldig genoeg geweest om de koppeling goed af te stellen en is onze aërodynamica zonder carrosserie te slecht om een voldoende hoge snelheid te halen op 1 motor. Op de bijgevoegde DVD kunt u enkele filmpjes bekijken van testritten.

Het totale tarragewicht van de wagen zoals hij uiteindelijk geworden is, is 287kg. Indien we de rechtse kant ook voorzien van een aandrijving, komt er 22kg bij. De gewichten zijn redelijk goed verdeeld over de wielen. Elk achterwiel heeft 112kg te dragen, het voorwiel draagt 85kg. Bij de constructie van het frame hebben we evenwel niet gekeken naar gewichtsbesparingen. Indien men een grondige analyse zou maken van het frame kan men het gewicht waarschijnlijk wel met 20% laten afnemen. In het begin van hoofdstuk 3 hebben we een schatting gemaakt van de massa van de wagen, die toen op 224 kg uitkwam. Met andere woorden, de wagen is 60kg zwaarder uitgevallen dan hetgeen we initieel ondersteld hebben.

De wagen rijdt zeer stabiel, en voelt goed aan in de bochten. We hebben een redelijk zachte vering. Hij is zeer wendbaar, hij heeft een draaicirkel van 9 meter.

Bij het testen op de openbare weg heb je veel beziens, het is dus een ideale wagen om een promotiecampagne mee uit te voeren.

#### 6.2 Pluspunten

We hebben een mooi, milieuvriendelijk en origineel ontwerp gerealiseerd op één jaar tijd. De totale aandrijving is een goed voorbeeld van vermogenselektronica gecombineerd met mechanica. De doelstelling om een rijdende wagen af te leveren na één jaar tijd is behaald. De gehele wagen is opgebouwd uit componenten die standaard in de industrie verkrijgbaar zijn. Bijgevolg kan het een relatief goedkope wagen zijn.

#### 6.3 Minpunten

Er zijn echter ook enkele mindere kanten aan dit ontwerp. We hebben zelf gemerkt dat de montage van de mechanische aandrijflijn en ophanging gebruiksvriendelijker kon gemaakt worden. Voor de montage en demontage van de koppeling is er teveel werk nodig, waardoor normale nastelling van de koppeling redelijk omslachtig is. Bovendien is de uitlijning van de motor achteraf niet meer mogelijk. Bij een eventueel nieuw ontwerp moet er dus met deze punten zeker meer rekening worden gehouden.

Het geïnstalleerde vermogen van de motoren kan ook niet ten volle benut worden met de gebruikte drive. We hebben al aangehaald dat de batterijspanning eigenlijk ook beter iets hoger zou zijn. Bijgevolg zou er een drive moeten gezocht worden die een hoger vermogen aan de motor kan geven en die met een hogere DC busspanning werkt. De positionering van de motoren tov de riemschijven zou eigenlijk beter net omgekeerd zijn zodat de achterwielen wat dichter naar binnen kunnen gezet worden en zo de aërodynamische vormgeving nog wat kan verbeterd worden.

#### 6.4 Veranderingen of extra's

Wat verandert er als we een tweede motor aansluiten voor de aandrijving van het rechtse wiel, dienen er speciale maatregelen te worden genomen?

Men zou nog twee extra batterijpacks kunnen voorzien, zodat elke motor een afzonderlijke batterijvoeding heeft. Men moet dan wel opletten dat het totale gewicht van de wagen binnen de perken blijft. Een betere oplossing is misschien om alle NiCd cellen te vervangen door NiMh cellen. Voor één zelfde gewicht aan de batterijen hebben we dan veel meer energie beschikbaar. Hierdoor zouden de batterijladers ook opnieuw moeten worden nagekeken.

Een extra motor impliceert ook een extra convertor. De signalen naar deze nieuwe convertor blijven dezelfde. Het snelheidsdetectiesysteem zal echter dubbel moeten worden uitgevoerd, zodat elke motor zijn afzonderlijke detectie heeft. Hiermee samengaand moet de sturing van de elke koppeling ook afzonderlijk gebeuren. De keuze tussen koppel en snelheidsregeling moet ontdubbeld worden. Er kan eventueel een automatische detectie uitgewerkt worden die zelf bepaalt in welke stand elke motor moet gestuurd worden. Zo kan men ook zaken zoals ESP, ABS, enz... gaan integreren.

### Bibliografie

- [1] http://labo.univ-poitiers.fr/informations-lea/Workshop-Ercoftac-2002/ case9.4/case9.4.html.
- [2] http://tinyurl.com/2vlta5.
- [3] Fluent.Inc. Fluent 6.2 Documentation.
- [4] Fluent.Inc. Gambit 2.3 Documentation.
- [5] Noesis Solutions. Optimus Revision 5.2 User's Manual.
- [6] SAFT. Portable NiCd and NiMh cells and batteries catalogue. SAFT.
- [7] H. Fukuda, K. Yanagimoto, H. China, en K. Nakagawa. Improvement of vehicle aerodynamics by wake control. JSAE Review, 16 (1995)(2) 151–155.
- [8] H. Ozawa, S. Nishikawa, en D. Higashida. Development of aerodynamics for a solar race car. JSAE Review, 19 (1998)(4) 343–349.
- [9] P. Spalart. Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21 (2000)(3) 252–263.
- [10] M. Braun, M. Lanfrit, en D. Cokljat. Simulation of the Ahmed body, 2001.
- [11] R. Howard en M. Pourquie. Large eddy simulation of an Ahmed reference model. Journal Of Turbulence, 3 (2002)(12) 1–18.
- [12] R. Manceau, J.-P. Bonnet, en P. Gilliéron. The Ahmed Body Test Case for Automotive CFD Validation: Recent Results From Experiments and Computations. Powerpoint Presentation, 2002.
- [13] W. Seibert, M. Lanfrit, B. Hupertz, en L. Krüger. A Best-Practice for High Resolution Aerodynamic Simulation around a Production Car Shape, 2002.
- [14] B. E. Company. Small Motor, Gearmotor and Control Handbook. 2003.
- [15] B. Electric. The Bodine Electric Handbook, vol. 5. 2003.

- [16] H. Lienhart, C. Stoots, en S. Becker. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (Ahmed model). SAE Transactions, 112 (2003)(6) 785–796.
- [17] D. Muhs, H. Wittel, M. Becker, en D. Jannasch. Roloff / Matek Machine-onderdelen, Theorieboek. Academic service, 3e druk, 2003.
- [18] M. Stanciu, B. Mohammadi, en S. Moreau. Low complexity models to improve incomplete sensitivities for shape optimization. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 17 (2003)(1) 1–13.
- [19] A. Teughels. Inverse modelling of civil engineering structures based on operational modal data. Doctoraatsthesis, KUL, 2003.
- [20] E. Kozaka, G. Özkan, en I. özdemir. Turbulent structure of three-dimensional flow behind a model car: 1. Exposed to uniform approach flow. *Journal Of Turbulence*, 5 (2004)(2) 1–22.
- [21] E. Kozaka, G. Özkan, en I. özdemir. Turbulent structure of three-dimensional flow behind a model car: 2. Exposed to crosswind. *Journal Of Turbulence*, 5 (2004)(3) 1–18.
- [22] F. Muyl, L. Dumas, en V. Herbert. Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry. *Computers & Fluids*, 33 (2004)(5-6) 849–858.
- [23] J. Melkebeek. Gestuurde elektrische aandrijvingen. Cursus, UGent, 2004-2005.
- [24] A. Van Calster. Elektronische systemen en instrumentatie. Cursus, UGent, 2004-2005.
- [25] S. Krajnovic en L. Davidson. Flow around a simplified car, part 1: Large eddy simulation. Journal Of Fluids Engineering - Transactions Of The ASME, 127 (2005)(5) 907–918.
- [26] S. Krajnovic en L. Davidson. Flow around a simplified car, part 2: Understanding the flow. Journal Of Fluids Engineering - Transactions Of The ASME, 127 (2005)(5) 919–928.
- [27] M. Lanfrit. Best practice guidelines for handling automotive external aerodynamics with FLUENT, 2005.
- [28] D. Muhs, H. Wittel, M. Becker, en D. Jannasch. Roloff / Matek Machine-onderdelen, tabellenboek. Academic service, 4e druk, 2005.
- [29] S. R. Schmidt en R. G. Launsby. Understanding industrial designed experiments. Air Academy Press, 4e druk, 2005.

- [30] A. Van Den Bossche. Vermogenselektronica. Cursus, UGent, EELAB, 2005-2006.
- [31] R. Verschoore. Autotechniek. Cursus, UGent, 2005-2006.
- [32] J. Vierendeels. Stromingsmechanica. Cursus, UGent, 2005-2006.
- [33] E. Fares. Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach. Computers & Fluids, 35 (2006)(8-9) 940–950.
- [34] B. Lehugeur, P. Gilliéron, en T. Ivaniç. Contribution de l'éclatement tourbillonnaire à la réduction de la traînée des véhicules automobiles: approche numérique. CR Mécanique, 334 (2006) 368–372.
- [35] G. Lequeux. Een introductie tot het zetsysteem LaTeX. Cursus, UGent, 2006.
- [36] J. Thierens en D. Vanneuville. Aërodynamisch ontwerp van een dakkoffer. Afstudeerwerk, UGent, 2006.
- [37] H. Transmission. Poly V design 2.1, 2006.
- [38] A. Van Beek. Advanced engineering design, lifetime performance and reliability. TU Delft, 2006.
- [39] R. Wolfgang. DNS and LES of some engineering flow. Fluid Dynamics Research, 38 (2006)(2-3) 145–173.
- [40] X. Zhang, W. Toet, en J. Zerihan. Ground effect aerodynamics of race cars. Applied Mechanics Reviews, 59 (2006)(1) 33–49.
- [41] B. Merci. Modelleren van turbulentie en verbranding. Cursus, UGent, 2006-2007.
- [42] A. Van Calster. Industriële elektrische metingen. Cursus, UGent, 2006-2007.
- [43] G. G Maggeto, P. Van den Bossche, en H. Van Muylem. Advanced electric drive systems for buses, vans and passenger cars to reduce pollution. A.V.E.R.E., December 1992.

# Lijst van figuren

1.1	Hybride wagen
1.2	Brandstofcel
1.3	Venturi Fetish
1.4	Twike
1.5	Wielmotoren
1.6	Voorbeeld van een koppelcurve voor een BLDC
1.7	Cree-Sam
2.1	Algemene indeling wagen
2.2	Lego-model
2.3	Standaard geveerde voorvork
2.4	Yamaha GTS 1000
2.5	Technische specificaties GTS 1000 12
2.6	Frame van een GTS 1000 13
2.7	Ophanging van een GTS 1000    13
2.8	Eerste beeld van ons frame 13
2.9	a: conventionele ophanging; b: bladveren; c: rubbergeveerde torsieas; d:
	dubbele draagarm ophanging <sup>[31]</sup> $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $14$
2.10	Aandrijflijn en ophanging achteraan 15
2.11	De DAF 30 uit 1961 15
3.1	Achterband
3.2	Hellingen in Vlaanderen
3.3	SuperSax motoren
3.4	Koppelcurve gerefereerd tov de wielas
3.5	Snelheid ifv de tijd, a: 2 personen; b: 1 persoon
3.6	Overbrenging: $1^e$ oplossing $\ldots \ldots 25$
3.7	Overbrenging: $2^e$ oplossing $\ldots \ldots 26$
3.8	Elektromagnetische koppeling
3.9	Technische gegevens SSM 100         28

3.10	Doorsnede van een elektromagnetische koppeling
3.11	Soorten riemen
3.12	Afmetingen riemoverbrenging 1
3.13	Afmetingen riemoverbrenging 2
3.14	Gegevens van een spanelement (www.kramp.com) 32
3.15	Standaard klauwkoppelingen 33
3.16	Nieuw design klauwkoppeling van <i>Lovejoy</i> (www.lovejoy-inc.com) 34
3.17	Vrijlooplager
3.18	Datasheet Stieber vrijlooplager (www.stieber.be)
3.19	Totaalbeeld van de aandrijving en ophanging
3.20	Detail van de aandrijving
3.21	Detail van de drijfas
3.22	Illustratie van de ophanging
3.23	3D resultaat
3.24	3D-modellen van de assen
3.25	Equivalente spanning en veiligheidsfactor in de drijfas
3.26	Equivalente spanning en veiligheidsfactor in de wielas
3.27	Overzicht lagers
3.28	Achterophanging
3.29	Principe van een schijfrem
3.30	Asontlasting
3.31	Ontwerp 1
3.32	Ontwerp 2
3.33	Ontwerp 3
3.34	Stuurinrichtingen
3.35	Foto genomen op 17-12-2006
3.36	Tweede ontwerp van de stuurinrichting
3.37	Detail van de tweede stuurinrichting
3.38	Chronologische reeks foto's: deel 1
3.39	Chronologische reeks foto's: deel 2
3.40	Chronologische reeks foto's: deel 3
4.1	Werkingsprincipe van de drive
4.2	Algemeen schema van de elektrische aandrijving 55
4.3	Gates Lead-acid Hawker
4.4	Saft NiMh cel
4.5	GP NiCd cel
4.6	Datasheet GP NiCd cel
4.7	Autonomie in functie van het type batterij <sup>[43]</sup> $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 59$

4.8	Oplaadkarakteristiek NiCd cel											
4.9	Elektronisch schema van een laadcircuit voor NiCd cellen											
4.10	Topologie batterijen											
4.11	Batterijpack (1) $\ldots \ldots \ldots$											
4.12	Batterijpack (2) $\ldots \ldots \ldots$											
4.13	Detail van de flexibele inklemming											
4.14	Lader voor de vermogensbatterijen $\ldots \ldots 63$											
4.15	Stroom door de batterijen bij een celspanning van 1V											
4.16	Stroom door de batterijen bij een celspanning van 1.2V											
4.17	Stroom door de batterijen bij een celspanning van 1.4V											
4.18	Ogenblikkelijk vermogen en secundaire stroom door de transformator bij											
	een celspanning van 1V											
4.19	Mechanische timer											
4.20	Schema energierecuperatie											
4.21	Ontlaadcurve 9A ifv de tijd											
4.22	Ontlaadcurve ifv de geleverde energie											
4.23	Ontlading bij asymmetrie											
4.24	Bovenaanzicht van een batterijpack											
4.25	Schuin aanzicht van een batterijpack											
4.26	Praktische realisatie van de laders en voedingen											
4.27	Vooraanzicht van de laderbox											
4.28	Zijaanzicht van de laderbox											
4.29	Totaal van batterijpacks en laderbox											
4.30	Bedradingsschema laders en voedingen											
4.31	Elektronisch schema van het laadcircuit met de MAX 713 74											
4.32	Oplaadkarakteristieken van de MAX 713											
4.33	Schema van hulpbatterij / lader											
4.34	Schema van de voeding voor de hulplader											
4.35	Spannings- en stroomvormen in de voeding, zonder smoorspoel 77											
4.36	Spannings- en stroomvormen in de voeding met smoorspoel											
4.37	Power dissipation van Q1											
4.38	Cascade verbinding van Q1 met 2N3904											
4.39	Schema van de hulplader met MAX713 80											
4.40	Praktische realisatie van de hulplader											
4.41	PCB plaat van de hulplader											
4.42	Spanningsstabilisator LM7805											
4.43	Micro B plus drive											
4.44	Interne opbouw van een $BLDC^{[14]}$											

4.45	Schematisch diagram $BLDC^{[14]}$	83
4.46	Inductie over de omtrek	84
4.47	Golfvormen in één fase	85
4.48	De stroomvorm in één fase van onze motor	85
4.49	Signalen snelheidsdetectie	87
4.50	Schema van de maximale-snelheidsdetectie	88
4.51	Signalen van de maximale-snelheidsdetectie bij chopfunctie	89
4.52	Signalen van de maximale-snelheidsdetectie zonder chopfunctie	90
4.53	Opgemeten signalen van de snelheidsdetectie	90
4.54	Foto van het snelheidsdetectiecircuit op een breadboard	91
4.55	Schema van de terugschakeldetectie	92
4.56	Signaal van de terugschakelde tectie bij een snelheid trager dan $40 \rm km/h$	93
4.57	Signaal van de terugschakelde tectie bij een snelheid sneller dan $40 \rm km/h$ .	93
4.58	Totaal schema snelheidsdetectie	95
4.59	PCB voor de snelheidsdetectie	96
4.60	Foto van het PCB voor de snelheidsdetectie	96
4.61	Logische schakeling voor de sturing van de koppeling	98
4.62	Totaal schema van de sturing van de koppeling	99
4.63	Voeding van de koppeling	100
4.64	Stroom in de koppeling ifv de stand van de potentiometer	100
4.65	Gebruikte schuifpotentiometer	101
4.66	Verloop van de signaalspanning ifv de pedaalindrukking	101
4.67	Foto's inbouw schuifpotentiometers	102
4.68	Besturingsconsole	103
4.69	Voltmeter SP 200	103
4.70	Spanningsdeler	104
4.71	Dubbele spanningsdeler	104
4.72	Voorbeeld van een configuratie met snelheidsregeling	105
4.73	Voorbeeld van een koppelregeling configuratie	106
4.74	Richtingsblokkering op de drive	108
4.75	Bedradingschema van de stuurkast	109
4.76	Bedradingschema van de interface met de bestuurder	110
4.77	Algemene sturing	111
4.78	Stuurkast	112
5.1	Snelheidsprofiel boundary layer	114
5.2	Wrijvingscoëfficiënt ifv Reynoldsgetal	114
5.3	Stroming over Ahmed Body (Bron: [39])	117
5.4	Rekenlus	117

5.5	Algemeen beeld 3D model in Maple	118
5.6	Profiel wagen	119
5.7	Bovenaanzicht wagen	121
5.8	3D-zicht nr 1	122
5.9	3D-zicht nr 2	122
5.10	Ellips	123
5.11	Output Maple	126
5.12	Beeld Gambit na inlezen punten	127
5.13	Vlak omhulling wagen	128
5.14	Vlakken wielen	128
5.15	Vlak bak onderaan	129
5.16	Weggesneden stukken dmv cilinders	130
5.17	Wagen na de uitsnijdingen	130
5.18	Afrondingen	131
5.19	Vergelijking meshing schema's (Bron: [4] & [10])	136
5.20	Grafiek voor bepaling $celgrootte^{[27]}$	137
5.21	Overgang Boundary Layer <sup>[27]</sup>	137
5.22	Zog achter een wagen	141
5.23	Vergelijking turbulentiemodellen <sup>[27]</sup>	142
5.24	Plot Y-plus waarden ifv lengtecoördinaat	143
5.25	Schema Newtonmethode (SQP)	147
5.26	Flowchart Optimus	148
5.27	3D-plot $C_D$ ifv $\theta_{boven} \& \theta_{zij,2} \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	157
5.28	Contributie termen in $\theta_{boven}$ & $\theta_{zij,2}$	158
5.29	Invloed $\omega_1 \ldots \ldots$	159
5.30	Invloed $\omega_2$	161
5.31	Invloed $\omega_3$	162
5.32	Invloed $p_1$ in details imulatie	163
5.33	Invloed $p_1$	164
5.34	Snelheidsbeeld (x-component) profieldoorsnede	166
5.35	Drukbeeld profieldoorsnede	166
5.36	Snelheidsbeeld (x-component) platte doorsnede	167
5.37	Drukbeeld platte doorsnede	167
5.38	Wervels achteraan $(1)$	169
5.39	Wervels achteraan (2) $\ldots$	169
5.40	Beelden optimaal wagenmodel: deel 1	171
5.41	Beelden optimaal wagenmodel: deel 2	172

# Lijst van tabellen

1.1	Technische specificaties Twike	4
3.1	Besluit riemoverbrengingen	30
3.2	Krachten in de lagers	40
4.1	Partlist hulplader	79
4.2	Waarheidstabel sturing koppeling	97
5.1	Bekomen optimum uit 1e BB	154
5.2	Bekomen optimum uit 2e BB	155
5.3	Bekomen optimum uit 2e BB, op zicht	155
5.4	Bekomen optimum uit 3e BB	156
5.5	Vergelijking krachten & momenten	165



Faculteit Ingenieurswetenschappen Vakgroep Elektrische Energie, Systemen en Automatisering Voorzitter: Prof. dr. ir. J. Melkebeek Vakgroep Mechanica van Stroming, Warmte en Verbranding Voorzitter: Prof. dr. ir. R. Sierens

## Ontwerp en constructie van een elektrisch aangedreven tweepersoonswagen: Bijlagen

Johan Van Gaeveren en Davy Van Rossem

Promotoren: Prof. dr. ir. J Melkebeek en Prof. dr. ir. J Vierendeels Begeleiders: ir. F. De Belie en ir. Koen De Gussemé

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk Werktuigkundig-Elektrotechnisch Ingenieur

Academiejaar 2006-2007

De auteurs en promotoren geven de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.

The authors and promotors give the permission to make this thesis available for consultation and copy parts of the thesis for personal use. Every other use is subject to the copyright laws, especially with respect to the obligation to explicitly mention the source when citing results of this thesis.

Gent, 4 Juni 2007

De auteurs

Van Gaeveren Johan

Van Rossem Davy

De promotoren

Prof. dr. ir. J. Melkebeek

Prof. dr. ir. J. Vierendeels

# Inhoudsopgave

$\mathbf{A}$	Supersax 1140S	1								
в	Berekening afmetingen riemschijven	4								
С	Sterkteberekening wielassen 13									
D	Eigenschappen gekozen lagers 22									
$\mathbf{E}$	Berekening theoretische veerkarakteristiek 23									
$\mathbf{F}$	Berekening asontlasting achteraan	28								
G	Berekening ontlaadcurve batterijen 31									
н	Datasheet gebruikte batterijen 45									
Ι	Datasheet batterijlader: MAX713 47									
J	Top & bottom layer hulplader	65								
K	Handleiding SuperSax Drive	66								
$\mathbf{L}$	Voorbeeld van een Maple journal	105								
$\mathbf{M}$	Voorbeeld van een Gambit journal	117								
	M.1 Deel 1: Definiëren parameters & inlezen data	117								
	M.2 Deel 2: Aanmaken vlakken & uitbreiden naar volumes	118								
	M.3 Deel 3: Afwerken wagenmodel	120								
	M.4 Deel 4: Creëren van het doorstroomde volume	121								
	M.5 Deel 5: Randvoorwaarden $\hdots$	121								
	M.6 Deel 6: Genereren rekenrooster (mesh) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	122								

Ν	Flue	ent journal files	123
	N.1	Hoofd-journal	123
	N.2	Tweede Fluent journal	124
0	Java	a programma's	125
	O.1	ResetTextFiles	125
	O.2	UpdateTeller	125
	O.3	*Generator	126
	O.4	KuisOp	127
	O.5	ConvergentieCheck	128
	O.6	WerkRapportBij	132
Р	Opt	imale geometrie: vergelijking krachten	134
	P.1	Origineel wagenmodel	134
	P.2	Optimaal wagenmodel	135
$\mathbf{Q}$	Inhe	oudstafel DVD's	137
	Q.1	DVD Nr. 1	137
	Q.2	DVD Nr. 2	139

## Bijlage A

# Supersax 1140S

SERIES				SSAX 1055			SSAX 1075			SSAX 1100					SSAX 1140					
	SIZE			S	M	L	XS	S	М	L	S	М	L	XL	XXL	S	M	L	XL	XXL
Mo s	tall Torque (∆t=10	0°C)	(Nm)	0.35	0.8	1.2	1.1	1.6	2.7	3.8	3.2	5.2	7.5	8.5	10.6	13.5	17.8	22	26	30
Mpk	Peak Stall Torque		(Nm)	1.4	3.2	4.8	4.5	6.4	10.8	15.2	12.8	21	30	34	42	55	72	90	105	120
<b>380</b> Va	C Stall Ac Current	lo	(Arms)	0.7	1.4	1.5	1.1	1.5	2.4	3.5	2.2	3.4	4.8	5.5	6.8	8.7	11.5	14	16.5	19
Drive's	Rated speed	Nn	(Rpm)	6000	6000	5000	4000	4000	4000	4000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
voltage	Stall DC Current	lo <sup>DC</sup>	(Adc)	0.9	1.8	1.9	1.3	1.9	3.1	4.4	2.8	4.4	6	7	8.7	11	14.6		_	—
<b>220</b> Va	C Stall Ac Current	lo	(Arms)	0.7	1.4	2.1	1.8	2.6	4.3	6	3.7	5.9	8	9.3	11.7	15	19.8	16	—	—
Drive's main	Rated speed	Nn	(Rpm)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2000	—	—
voltage	Stall DC Current	lo <sup>DC</sup>	(Adc)	0.9	1.8	2.7	2.3	3.4	5.5	7.7	4.7	7.5	10	12	15	19	—	—	—	—
145 VA	C Stall Ac Current	lo	(Arms)	1.1	2.1	3.2	2.8	4	6	9.1	5.6	9.4	12.4	14	18	15	19.8	—	—	—
Drive's	Rated speed	Nn	(Rpm)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	3000	3000	3000	3000	3000	2000	2000	—	—	—
voltage	Stall DC Current	lo <sup>DC</sup>	(Adc)	1.4	2.7	4	3.5	5	7.7	11.7	7.2	11.5	15.9	18	—	19	—	—	—	—
<b>95</b> Va	c Stall Ac Current	lo	(Arms)	1.6	3.2	4.9	4	6.2	8	10	8.6	13.7	15.4	14	18	—		—	—	-
Drive's	Rated speed	N <sub>n</sub>	(Rpm)	4000	4000	4000	4000	4000	3500	3000	3000	3000	2500	2000	2000	—	—	—	—	—
voltage	e Stall DC Current	lo <sup>DC</sup>	(Adc)	2	4	6.2	5	8	10	13.3	11	17.5	19.7	18	—	—	—	—	—	—
44 VA	c Stall Ac Current	lo	(Arms)	3.5	5.2	7.9	8	10	15	15	18.5	19.7	—	—	—	—	—	—	—	—
Drive's	Rated speed	Nn	(Rpm)	4000	3000	3000	3000	3000	3000	2000	3000	2000	—	—	—	—	—	—	—	—
voltage	e Stall DC Current	lo <sup>DC</sup>	(Adc)	4.4	6.6	10	10	13	19	19	—	—	_	—	—	—	_	_	_	—
J	Rotor Inertia (	Kgm	<sup>2</sup> )·10 <sup>-4</sup>	0.08	0.16	0.24	0.4	0.6	1	1.4	1.8	2.8	3.8	4.2	5.2	13.5	18	22	27	31

Figuur A.1: Tabel SuperSax 1000

MECHAI	VICAL	L DIMENS	IONS AI	l díme	ensio	ns refi	er to b	oth r	esolve	er and	l enco	der v	ersion	is -		~			_	_		_							
	w		S D <sup>+</sup> E	0 1/1	L1 (L1	=with bra	ike)		2	P	(clea (threa	4 x F rance hc x F' ded hole	ilas) a)	AN AN			14	Veight	s com	prensiv	e of the	resolver							
REFERE	NCES	1 1	L1	Bis	D	V <sub>h9</sub>	W	U	N <sub>16</sub>	M	F	L.	F'	E	S	R	T	C	P	Z	WEIGHT	WEIGHT							
SERIES - M	ə (Nim)	TUT	ITUTI	mm	mim	mm	INTE	лип	mm	TIOT	mum	mum	mm	лип	піп	mm	mm	mm	mm	<b>D10</b>	Kg	Kg							
1055 S	0.35	117 (127)*	158 (168)*		9 20	100	11-1	111	11-1	11-1	11-1	11	3		M3	1.000	1.00		1.1.1.1		1 2007	1.00	'n	1.01	100	101		1.1	1.4
1055 M	0.8	142 (152)*	183 (193)*	9		x	10.2	2 x	c 40	63	5.5	-		2.5	7	55	74	55	65	(83)*	1.4	1.7							
1055 L	1.2	167 (177)*	208 (218)*			14		8	1.51	1								101			1.7	2.0							
1075 XS	1.1	137 (141)*	170 (190)*		10	100		2.5 M4 x 10	60					M5 x 2.5 8		1.1	100		71	79 (64)*	2.05	2.65							
1075 S	1.6	152 (156)*	185 (205)*	11	23	4x18 1	8 12.5			00		75	75 x 8		10	75		75			2,5	3.1							
1075 M	2.7	182 (186)*	215 (235)*							30	0,0	14			0 IV	13					3.4	3.9							
1075 L	3.8	212 (216)*	245 (265)*	14	30	5x25	16	14			_	_									4.2	4.7							
1100 S	3.2	183	232	111		11										1.1	1	1			4.8	5.5							
1100 M	5.2	218	266			6		MG	1.1							D		1.1	12	1.	6	6.7							
1100 L	7.5	253	301	19	40	X	21.5	X	95	115	9	-	-	3	12	100	135	95	81	82	7.2	7.9							
1100 XL	8.5	271	319			32		16	15.1									1		1.1	7.8	8.5							
1100 XXL	10.6	306	354	100	-	10.0										1.1					9.0	9.7							
1140 S	13.5	210	270														111		1.1		9.8	12.2							
1140 M	17.8	235	295		24 50	8		M8	100	1.00	1.00	1.1					100	100			12,6	15							
1140 L	22	260	320	24		X	27	X	130	165	11	=	-	3.5	.5 13	140	188	135	101	88	15,4	18.5							
1140 XL	26	285	345				40		19												18.2	21.3							
1140 XXL	30	310	370		ų —			L		-	-					-	-	-		21	24.1								

Figuur A.2: Afmetingen SuperSax 1000

#### DATI TECNICI/TECNICHAL DATA

#### SSAX140S - 13.5Nm

Avvolgimento/Windin	g	-	-	20/145	30/220	30/380	/480		
Alimentazione drive/Drive's main voltage	U <sub>m</sub>	VAC	-	-	145	220	380	480	
Velocità nominale/Rated speed	N	rpm	-	-	2000	3000	30	00	
Coppia di stallo/Stall torque ( $\Delta t$ =100°C)	M	Nm	-	-	13.5	13.5	13	8.5	
Corrente di stallo/Stall current	I,	A <sub>rms</sub>	-	-	15	15	8	.7	
Coppia di picco allo stallo/Peak stall torque	M <sub>pk</sub>	Nm	-	-	55	55	5	5	
Corrente di picco allo stallo/Peak stall current	$\mathbf{I}_{_{\mathrm{pk}}}$	A <sub>rms</sub>	-	-	62	62	3	6	
Costante di coppia/Torque constant	Κ	Nm/A <sub>rms</sub>	-	-	0.9	0.9	1.56		
Costante di FCEM/ BEMF constant	K	V <sub>rms</sub> /krpm	-	-	54.4	54.4	94	.3	
Coppia di stallo/Stall torque ( $\Delta t$ =60°C)	M <sub>060</sub>	Nm	-	-			10	.45	
Coppia nominale (a Nn)/Rated torque (at Nn)	M	Nm	-	-			11	5	
Potenza nominale/Rated power (at Mn)	Р <sub>.</sub>	kW	-	-			3	.6	
Tensione motore/Rated voltage at Nn (2xIo)	U,	Vrms	-	-			33	30	
Resistenza/Winding resistance Ph-Ph (Ta=25°C)	R <sub>ph</sub>	Ω(±10%)	-	-			1.	65	
Induttanza/Winding inductance Ph-Ph	L <sub>ph</sub>	mH	-	-			7	.2	
Codice avvolgimento/Winding code	-	-	-	-	-	-		-	

#### DATI PER DRIVE TRAPEZOIDALE/TRAPEZOIDAL DRIVE DATA

Corrente di stall CC/DC stall current (trapezoidal)	I <sub>o dc</sub>	A DC	-	-	19	19	11
Corrente di picco CC/DC pk stall current (trape- zoidal)	I <sub>pk DC</sub>	A DC	-	-	78	78	45
Costante di coppia CC/DC torque constant	K <sub>t dc</sub>	Nm/A DC	-	-	0.71	0.71	1.23
Tensione motore/Rated voltage at Nn (2xIo DC)	ר",	V <sub>rms</sub>					

#### DATI MECCANICI/MECHANICHAL DATA

Massimo carico radiale applicabile all'estremità dell'albero/Radial load capacity at the shaft end (at Nn) (for L <sub>10</sub> =20.000 hours bearing life expectancy)	F <sub>R</sub>	Ν	2322
Massimo carico assiale applicabile all'estremità dell'albero/Axial load capacity at shaft end (at Nn) (for $L_{ig}$ =20.000 hours bearing life expectancy)	F,	Ν	774
Velocità massima/Max mechanical speed	N <sub>max</sub>	rpm	5000
Costante di tempo termica/Thermal time constant	t <sub>th</sub>	min	17.5
Costante meccanica/Mechanical time constant	t	msec	
Inerzia motore/Rotor inertia (with resolver)	J	Kgm²	13.5 × 10 <sup>-4</sup>
Peso motore/Weight	wт	Kg	9.8
N° moduli /Module	-		3

Figuur A.3: Datasheet SSAX 1140S

## Bijlage B

# Berekening afmetingen riemschijven

### Ribbenbanden / power belts / poly-V-riemen

#### > restart:

#### gegevens

> i[riem] [1] := 6;  
(
$$i_{riem}$$
)<sub>1</sub> := 6 (1.1)  
> i[riem] [2] := 3.4;  
( $i_{riem}$ )<sub>2</sub> := 3.4 (1.2)

Als we de riemen op het maximaal piek vermogen van de motor dimensioneren, moet deze riem te zwaar zijn, daarom dimensioneren we hem op 150% van het continue vermogen. \_Als motor gebruiken we BRUSHLESS SERVOMOTOR van SUPERSAX: SSAX 1140 S

> M[continu]:=omega->13.5-(13.5-11.45)\*omega/(3000\*2\*Pi/60); M[piek]:=omega->55; omega[motor\_max]:=3000\*2\*Pi/60;

$$M_{continu} := \omega \to 13.5 - \frac{1}{100} \frac{(13.5 - 11.45) \omega}{\pi}$$

$$M_{piek} := \omega \to 55$$
(1.3)

$$\omega_{motor\ max} := 100\ \pi$$

>  $P[motor\_continu] := omega -> M[continu] (omega) * omega;$  $P_{motor\_continu} := \omega \rightarrow M_{continu}(\omega) \omega$  (1.4)

>  $P[motor\_continu\_max]$  := evalf ( $P[motor\_continu]$  (omega[motor\\_max]));  $P_{motor\_continu\_max}$  := 3597.123589 (1.5)

> omega[wielen\_max] := evalf(omega[motor\_max]/i[riem][2]);  

$$\omega_{wielen\ max} := 92.39978395$$
 (1.6)

>  $P[riem] := 3/2 * P[motor_continu_max];$  $P_{riem} := 5395.685384$ (1.7)

Uit de volgende figuur halen we dat we met een type PK of PJ te maken hebben.



Riemschijven met Pk profielen zijn echter geen standaard schijven, waardoor we niet voor een PK \_profiel kiezen, maar voor een PJ profiel.

De toelaatbare riemsnelheid (m/s) (Rolof Matek):

$$> v:=50;$$

 $v := 50 \tag{1.8}$ 

Minimale diameter van de riemschijf (Rolof Matek):

> d[min]:=20;

$$d_{\min} := 20$$
 (1.9)

De asafstand is ongeveer 445mm en volgt uit de CAD tekeningen:

> e:=445;

$$e := 445$$
 (1.10)

#### overbrenging 1

We stellen de kleinste diameter op 45mm, we merken op dat deze waarde op een iteratieve wijze is bekomen. Als deze waarde kleiner genomen wordt, zullen de krachten in de riem toenemen, alsook de krachten op de assen en lagers. Als deze waarde groter genomen wordt, zal de diameter van de grootste schijf te groot worden, er is dus naar een compromis gestreefd.

$$\left(d_{motor}\right)_{klein} := 45 \tag{2.1}$$

> d[wiel][1]=d[motor][klein]\*i[riem][1];  

$$\begin{pmatrix} d_{wiel} \end{pmatrix}_1 = 270$$
(2.2)

Om constructieve redenen nemen we:

> d[motor][klein]:=45;

> d[wiel][1]:=276.5;

 $(d_{wiel})_1 := 276.5$ (2.3)> fsolve(e=Ld1/4-Pi/8\*(d[motor][klein]+d[wiel][1])+sqrt((Ld1/4-Pi/8\* (d[motor] [klein]+d[wiel] [1]))\*\*2- (d[motor] [klein]-d[wiel] [1])\*\*2/8),Ld1); 1425.119025 (2.4)Dit is de minimale lengte van de riem. Riemen zijn echter maar verkrijgbaar in bepaalde standaard lengtes, voor het PJ profiel moeten we kiezen uit: PJ[197], J[207], PJ[234], PJ[254], PJ[267], PJ[274], PJ[305], PJ[330], PJ[356], PJ[381], PJ[406], PJ [432], PJ[457], PJ[483], PJ[508], PJ[533], PJ[559], PJ[584], PJ[610], PJ[660], PJ[711], PJ[723], PJ [762], PJ[787], PJ[813], PJ[864], PJ[914], PJ[938], PJ[960], PJ[995], PJ[1016], PJ[1059], PJ[1080], PJ[1092], PJ[1105], PJ[1115], PJ[1123], PJ[1126], PJ[1130], PJ[1150], PJ[1168], PJ[1200], PJ [1222], PJ[1233], PJ[1244], PJ[1270], PJ[1280], PJ[1301], PJ[1315], PJ[1321], PJ[1355], PJ[1372], PJ[1397], PJ[1428], PJ[1473], PJ[1549], PJ[1600], PJ[1651], PJ[1663], PJ[1752], PJ[1854], PJ [1895], PJ[1910], PJ[1956], PJ[1965], PJ[1992], PJ[2083], PJ[2210], PJ[2337], PJ[2413], PJ[2489] We nemen een riem van 1428 mm lengte. > L[1] := 1428; $L_1 := 1428$ (2.5)> e1:=evalf(L[1]/4-Pi/8\*(d[motor][klein]+d[wiel][1])+sqrt((L[1]/4-Pi/8\*(d[motor][klein]+d[wiel][1]))\*\*2-(d[motor][klein]-d[wiel] [1])\*\*2/8)); *e1* := 446.4907501 (2.6)De riem is dus te lang, de asafstand zal dus groter zijn, uit de berekening van riemoverbrenging 2 zal volgen dat we bij riemoverbrenging 1 een riemspanner nodig hebben, want overbrenging 2 zal de asafstand bepalen. Uit de figuur afmetingen riemoverbrenging 1 volgt: De omspanningshoek: > beta[1]:=159.48;  $\beta_1 := 159.48$ (2.7)We bepalen het aantal ribben dat nodig is: uit tabel 16-15 (Rolof Matek) volgt: > P[N] := 420; $P_N := 420$ (2.8)U['z']:=35;  $U_{z} := 35$ (2.9)c[1]:=0.95;  $c_1 := 0.95$ (2.10)c[2]:=1.08;  $c_2 := 1.08$ (2.11)'>P[riem]/(P[N]+U['z'])/c[1]/c[2]; (2 12)

$$11.55813762 < z \tag{2.12}$$

> z:=12;

$$= 12$$
 (2.13)

Besluit overbrenging 1:

kleine riemschijf: diameter 45 mm en 12 groeven van het type PJ grote riemschijf: diameter 276.5 mm en 12 groeven van het type PJ

\_riem: type PJ 12 groeven 1428 mm lang

Riemoverbrenging 1 heeft een riemspanner nodig

#### overbrenging 2

\_Voor de tweede overbrenging nemen we de grootste riemschijf even groot als de vorige.

Z

> d[wiel][2]:=d[wiel][1];  

$$(d_{wiel})_2 := 276.5$$
(3.1)

> d[motor][groot]:=80;

$$\left(d_{motor}\right)_{groot} \coloneqq 80 \tag{3.3}$$

We nemen een riem met lengte 1473mm

$$L_2 := 1473$$
 (3.5)

> e2:=evalf(L[2]/4-Pi/8\*(d[motor][groot]+d[wiel][2])+sqrt((L[2]/4-Pi/8\*(d[motor][groot]+d[wiel][2]))\*\*2-(d[motor][groot]-d[wiel] [2])\*\*2/8));

$$e2 := 445.6758653 \tag{3.6}$$

$$445.6758653 < 446.4907501 \tag{3.7}$$

=> riemoverbrenging 1 zal een riemspanner nodig hebben.

Uit de figuur afmetingen riemoverbrenging 2 volgt:

\_De omspanningshoek:

> L[2]:=1473;

> beta[2]:=154.53;

evalf(e2<e1);</pre>

>

$$\beta_2 := 154.53$$
 (3.8)

> P[N] := 800; $P_N := 800$ (3.9)

> 
$$U['z'] := 35;$$
  
 $U_z := 35$  (3.10)

$$c_{1} := 0.94;$$
  
 $c_{2} := 1.08;$   
 $c_{2} := 1.08$ 
(3.11)

> 
$$'z' > P[riem] / (P[N] + U['z']) / c[1] / c[2];$$
  
6.365148407 < z (3.12)

Nu komen we toe met 8 ribben besluit overbrenging 2: kleine riemschijf: diameter 80mm en 8 groeven van het type PJ grote riemschijf: diameter 276.5mm en 8 groeven van het type PJ riem: type PJ 8 groeven 1473 mm lang

### aslasten en voorspanning

We berekenen nu de aslast: Het moment op de kleine schijf:

> M[motor][klein]:=3/2\*13.5;  

$$\binom{M_{motor}}{klein} := 20.25000000$$
(4.1)

> vgl1:=M[motor][klein]=(F[1][1]-F[1][2])\*d[motor][klein]/2/1000;  
vgl1:=20.2500000 = 
$$\frac{9}{400} (F_1)_1 - \frac{9}{400} (F_1)_2$$
(4.2)

Voor een pk6 ribbenband geldt:

> mu:=0.7;

theta:=40.\*Pi/180;

$$\mu := 0.7$$
 (4.3)

$$heta:=0.2222222222$$
  $\pi$ 

> mu[corr]:=evalf(mu/sin(theta/2));  

$$\mu_{corr} := 2.046663080$$
(4.4)

> vgl2:=F[1][1]/F[1][2]=exp(mu[corr]\*beta[1]\*Pi/180);  
vgl2:=
$$\frac{(F_1)_1}{(F_1)_2}$$
=e<sup>(1.813343489 \pi)</sup>
(4.5)

> solve({vgl1,vgl2},{F[1][1],F[1][2]});

ssign (\*);  

$$\left\{ \left(F_1\right)_2 = 3.031236315, \left(F_1\right)_1 = 903.0312363 \right\}$$
(4.6)

> 
$$\mathbf{F[1][t]} := \mathbf{F[1][1]} - \mathbf{F[1][2]};$$
  
( $F_1$ )<sub>t</sub> := 900.0000000 (4.7)

De asbelasting is bij benadering gelijk aan:

> F[1]

vgl4

$$\begin{bmatrix} as \end{bmatrix} := 1.4 * F[1][t]; \\ \begin{pmatrix} F_1 \end{pmatrix}_{as} := 1260.000000$$
(4.8)

We hernemen dit rekenwerk voor overbrenging 2:

> M[motor][groot]:=3/2\*13.5;  

$$\binom{M_{motor}}{groot}$$
:= 20.25000000 (4.9)

> vgl3:=M[motor][groot]=(F[2][1]-F[2][2])\*d[motor][groot]/2/1000; vgl3:=20.2500000 =  $\frac{1}{25}(F_2)_1 - \frac{1}{25}(F_2)_2$  (4.10)

$$= \mathbf{F[2][1]/F[2][2]} = \exp(\operatorname{mu[corr]*beta[2]*Pi/180});$$

$$vgl4 := \frac{(F_2)_1}{(F_2)_2} = e^{(1.757060254\pi)}$$
(4.11)

> solve({vgl3,vgl4}, {F[2][1],F[2][2]});  
assign(%);  
$$\left\{ \left(F_2\right)_2 = 2.036183161, \left(F_2\right)_1 = 508.2861832 \right\}$$
(4.12)

> 
$$\mathbf{F}[2][t] := \mathbf{F}[2][1] - \mathbf{F}[2][2];$$
  
 $(F_2)_t := 506.2500000$  (4.13)

De asbelasting is bij benadering gelijk aan:

> 
$$F[2][as]:=1.4*F[2][t];$$
  
( $F_2$ )<sub>as</sub>:= 708.7500000 (4.14)

>

We gaan nu na hoe groot de voorspankracht dient te zijn om een overbrenging te kunnen verwezelijken waarbij de grootste riemschijven niet dienen voorzien te worden van een v-profiel en dat we ze dus gewoon vlak mogen uitvoeren.

Overbrenging 1:

Het moment op de grote schijf:

> 
$$M[wiel] := 3/2 \times 13.5 \times i[riem][1];$$
  
 $M_{wiel} := 121.5000000$  (4.15)

> vgl5:=M[wiel]=(F[11][1]-F[11][2])\*d[wiel][1]/2/1000;

(1 16)

 $vg/5 := 121.500000 = 0.1382500000 (F_{11})_1 - 0.1382500000 (F_{11})_2$ (4.16)Nu zien we de ribbenband als een vlakke riem: > mu:=0.7; $\mu := 0.7$ (4.17)> beta[11]:=212.64;  $\beta_{11} := 212.64$ (4.18)> vgl6:=F[11][1]/F[11][2]=exp(mu\*beta[11]\*Pi/180);  $vgl6 := \frac{(F_{11})}{(F_{11})_2} = e^{(0.8269333333 \pi)}$ (4.19)solve({vgl5,vgl6}, {F[11][1],F[11][2]}); assign(%);  $\left\{\left(F_{11}\right)_{2} = 70.67305732, \left(F_{11}\right)_{1} = 949.5157336\right\}$ (4.20) $\stackrel{=}{>} \mathbf{F[11][t]:=F[11][1]-F[11][2];} \\ \left(F_{11}\right)_{t} := 878.8426763$ (4.21)De asbelasting is bij benadering gelijk aan: > F[11][as]:=1.4\*F[11][t];  $(F_{11})_{as} := 1230.379747$ (4.22)We hernemen dit rekenwerk voor overbrenging 2: > M[wiel]:=3/2\*13.5\*i[riem][2];  $M_{wiel} := 68.85000000$ (4.23)> vgl7:=M[wiel]=(F[22][1]-F[22][2])\*d[wiel][2]/2/1000; vgl7:=68.85000000=0.1382500000  $(F_{22})_1 - 0.1382500000 (F_{22})_2$ (4.24)> beta[22]:=205.47;  $\beta_{22} := 205.47$ (4.25)> vgl8:=F[22][1]/F[22][2]=exp(mu\*beta[22]\*Pi/180);  $vgl8 := \frac{(F_{22})_1}{(F_{22})_2} = e^{(0.7990500000 \pi)}$ (4.26)> solve({vg17,vg18}, {F[22][1],F[22][2]}); assign(%);  $\left\{ \left(F_{22}\right)_2 = 44.03865279, \left(F_{22}\right)_1 = 542.0495027 \right\}$ (4.27)> F[22][t]:=F[22][1]-F[22][2]; (4.28)

$$(F_{22})_t := 498.0108499$$
 (4.28)

De asbelasting is bij benadering gelijk aan:

> 
$$F[22][as]:=1.4*F[22][t];$$
  
( $F_{22}$ )<sub>as</sub>:= 697.2151899 (4.29)

Besluit: de voorspankrachten:

>

2

> F[1] [voorspanningriem] := (F[1] [1]+F[1] [2])/2; F[11] [voorspanningriem] := (F[11] [1]+F[11] [2])/2; F[voorspankracht1] :=max (F[1] [voorspanningriem], F[11] [voorspanningriem]);  $(F_1)_{voorspanningriem}$  := 453.0312364 (4.30)  $(F_{11})_{voorspanningriem}$  := 510.0943955  $F_{voorspankracht1}$  := 510.0943955

> F[2] [voorspanningriem] := (F[2] [1]+F[2] [2])/2;  
F[22] [voorspanningriem] := (F[22] [1]+F[22] [2])/2;  
F[voorspankracht2] :=max (F[2] [voorspanningriem], F[22]  
[voorspanningriem]);  

$$(F_2)_{voorspanningriem} := 255.1611832$$
 (4.31)  
 $(F_{22})_{voorspanningriem} := 293.0440778$   
 $F_{voorspankracht2} := 293.0440778$ 

Indien deze voorspankrachten worden aangelegd, dan hoeven we geen groeven te voorzien op de grote riemschijven.

De totale aslast wordt dan:

> 
$$F[as]:=2*F[voorspankracht1]+2*F[voorspankracht2];$$
  
 $F_{as}:=1606.276947$  (4.32)

## Bijlage C

## Sterkteberekening wielassen

De eerste 4 pagina's gaan over de drijfas, de volgende 4 over de wielas.

<u> </u>	Calculation	without erro	rs.								
	Project i	information									
					In	put sectinon					
0	Prelimin	ary shaft dia	meter desig	n aru a da							
1 C	Calculation u	inits		SI Units (N, mr	n, kw)	1					
21	ransmitted	power		5	,40	[KW]	1.6	Type of shat	bonding		
35	haft speed				200	[/min]	скер	Material of th			
4 I 5 D	orsion morr			1/	r,19	[INM]	<u> </u>	Material of t	he shaft	ath (850)	
5 P •	reiminary n	nin. diameter		10	5,98	[mm]	0501	uctural steel wit		igui (050)	
0	Shaft sh	ape and dime	ensions		Caladatian	CT II	nite (N mm k)				
1 1	ne scale of	the displayed s	natt diameter	. 🗹	Calculation (		nius (n, nini, ki	(V) <b>•</b>		R	
	6	0								1777//	•////
	4	10									1 + 2
	2	20							Db   🗧		
		.0	··			·· _ · · _ ·			Da		db
	-7		50		100	150		<mark>20</mark> 0		111111	LŢ,
	_								, <u> </u>		
										1	V / / /
	-6	0									-
2	Table	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
_	Origin	0,00	182,00	182,00	182,00	182,00	182,00	182,00	182,00	182,00	182,0
_	L	182,000									
	ø Da	25,000									
_	ø Db	25,000									
_	ø da										
	ø db										
ļ	R Fatal langth	of the shaft				102.00	[]	2.0	The sheft of	urfa ee (Deursh	
3 Т	R Total length	of the shaft				182,00	[mm]	2.6	The shaft su	Irface (Rough	ness Ra)
3 T 4 X	R Fotal length (-coordinate	of the shaft of the left sup	port (bearing)		Free	182,00 18,90	[mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,8	Irface (Rough <sup>8)</sup>	ness Ra)
3 T 4 X 5 X	R Total length (-coordinate (-coordinate	of the shaft of the left sup of the right su	port (bearing) pport (bearing	) ])	Free Fixed	182,00 18,90 139,90	[mm] C [mm] Imm]	2.6	The shaft su CGround (0,8	Irface (Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b>	port (bearing) pport (bearing - <b>down on th</b>	g) e shaft	Free Fixed	182,00 18,90 139,90	[mm] O [mm] • [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,8	Irface (Rough <sup>8)</sup>	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T	R Total length (-coordinate (-coordinate <b>Notches</b> The ultimate	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt	port (bearing) pport (bearing - <b>down on th</b> h (Su, Rm)	g) <b>e shaft</b> 595,0	Free Fixed	182,00 18,90 139,90	[mm] ⊃ [mm] ● [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,8	Irface (Rough	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N	R Fotal length (-coordinate (-coordinate Notches The ultimate Notch sensiti	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> tensile strengt ivity factor (q)	port (bearing) pport (bearing - <b>down on th</b> h (Su, Rm)	9) <b>e shaft</b> 595,0 0,45	Free Fixed	182,00 18,90 139,90	[mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	Irface (Rough	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 A	R Total length C-coordinate C-coordinate Notches The ultimate Notch sensiti A. Transver	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> tensile strengt vity factor (q) <b>rse hole</b>	port (bearing) pport (bearing - <b>down on th</b> h (Su, Rm)	9) e shaft 595,0 0,45	Free Fixed	182,00 18,90 139,90	[mm] C [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	B)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 A	R Total length C-coordinate Notches The ultimate Notch sensiti A. Transver X[mm]	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>se hole</b> d[mm]	port (bearing) pport (bearing -down on th h (Su, Rm) β c	9) e shaft 595,0 0,45 β b	Free Fixed	182,00 18,90 139,90	[mm] C [mm] (mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	(Rough B)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 A	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches The ultimate Jotch sensiti A. Transver X[mm] 0,00	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>se hole</b> d[mm] 0,00	port (bearing) pport (bearing <b>down on th</b> h (Su, Rm) β c 1,00	9) e shaft 595,0 0,45 β b 1,00	Free Fixed □ [MPa] □ β t 1,00 1.00	182,00 18,90 139,90 -50	[mm] (mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	(Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 <b>A</b>	R Total length (-coordinate Notches Notches Notch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 2 Nocking	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>se hole</b> d[mm] 0,00 0,00	port (bearing) pport (bearing <b>down on th</b> h (Su, Rm) <u>β c</u> 1,00 1,00	g) e shaft 595,0 0,45 β b 1,00 1,00	Free Fixed ☑ [MPa] <u>βt</u> 1,00 1,00	182,00 18,90 139,90 -50	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	(Rough	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 <b>A</b> 4 <b>E</b>	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches Notches Notch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking- X[mm]	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>rse hole</b> d[mm] 0,00 0,00 <b>-down</b>	port (bearing) pport (bearing <b>down on th</b> h (Su, Rm) <u>β c</u> 1,00 1,00	g) e shaft 595,0 0,45 β b 1,00 1,00	Free Fixed □ [MPa] □ βt 1,00 1,00	182,00 18,90 139,90 -50 8,+	[mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	(Rough	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 4 E 4	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches Notch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking- X[mm] 73 50	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>se hole</b> d[mm] 0,00 0,00 <b>-down</b> d[mm] 23 90	port (bearing) pport (bearing <b>down on th</b> h (Su, Rm) <u>β c</u> 1,00 1,00 1,00	g) e shaft 595,0 0,45 β b 1,00 1,00 1,00	Free Fixed □ [MPa] □ β t 1,00 1,00 □ β b 1 49	182,00 18,90 139,90 -50 βt 126	[mm] [mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	A contract (Rough (Roug	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 <b>A</b> 4 <b>E</b>	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches The ultimate Notch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking- X[mm] 73,50 98.80	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>rse hole</b> d[mm] 0,00 0,00 <b>cdown</b> d[mm] 23,90 23,90	port (bearing) pport (bearing <b>down on th</b> h (Su, Rm) <u>β c</u> 1,00 1,00 1,00 1,30 1 30	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> </ul>	Free Fixed □ [MPa] □ [MPa]	182,00 18,90 139,90 -50 β t 1,26 1,26	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	I rface (Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 <b>A</b> 4 <b>E</b>	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches Notches Notch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking X[mm] 73,50 98,80 0,00	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>rse hole</b> d[mm] 0,00 0,00 <b>cdown</b> d[mm] 23,90 0,00	port (bearing) pport (bearing <b>down on th</b> h (Su, Rm) <u>β c</u> 1,00 1,00 1,00 r[mm] 1,30 1,30 0,00	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> </ul>	Free Fixed □ [MPa] □ [MPa]	182,00 18,90 139,90 -50 β t 1,26 1,26 1,00	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	Inface (Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 1 T 2 N 4 <b>B</b> 4 <b>B</b>	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches The ultimate lotch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking X[mm] 73,50 98,80 0,00 C. General	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>se hole</b> d[mm] 0,00 0,00 <b>cdown</b> d[mm] 23,90 0,00 <b>notch</b>	port (bearing) pport (bearing -down on th h (Su, Rm) β c 1,00 1,00 1,00 1,30 1,30 0,00	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>β c</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> </ul>	Free Fixed □ [MPa] □ [MPa] □ [MPa] □ 1,00 □ 1,00 □ 1,49 □ 1,49 □ 1,00	182,00 18,90 139,90 -50 β t 1,26 1,26 1,00	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	Inface (Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 1 T 2 N 4 E 5 C	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches The ultimate Notch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking X[mm] 73,50 98,80 0,00 C. General X[mm]	of the shaft of the left sup of the right su <b>and necking</b> - tensile strengt ivity factor (q) <b>se hole</b> d[mm] 0,00 0,00 <b>-down</b> d[mm] 23,90 23,90 0,00 <b>notch</b> b[mm]	port (bearing) pport (bearing -down on th h (Su, Rm) β c 1,00 1,00 1,00 r[mm] 1,30 1,30 0,00 8 c	<ul> <li>g)</li> <li>e shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>β c</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>β b</li> </ul>	Free Fixed □ [MPa] □ βt 1,00 1,00 0 1,49 1,49 1,49 1,00 0 5 t	182,00         18,90         139,90         -50         β t         1,26         1,26         1,00	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	Inface (Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 1 T 2 N 3 <b>A</b> 4 <b>E</b> 5 <b>C</b>	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches The ultimate Notch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking X[mm] 73,50 98,80 0,00 C. General X[mm] 38,40	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20.00	port (bearing) pport (bearing <b>down on th</b> h (Su, Rm) <u>β c</u> 1,00 1,00 1,00 1,30 1,30 0,00 <u>β c</u> 2,00	<ul> <li>a shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>β c</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>β b</li> <li>2,00</li> </ul>	Free Fixed □ [MPa] □ βt 1,00 1,00 1,49 1,49 1,49 1,49 1,00 □ βt 1,30	182,00         18,90         139,90         -50         β t         1,26         1,26         1,26         1,00		2.6	The shaft su CGround (0,4	Inface (Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 <b>A</b> 4 <b>B</b> 5 <b>C</b>	R Total length (-coordinate (-coordinate Notches The ultimate Jotch sensiti A. Transver X[mm] 0,00 0,00 3. Necking X[mm] 73,50 98,80 0,00 C. General X[mm] 38,40 104,40	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25.00	port (bearing) pport (bearing -down on th h (Su, Rm) β c 1,00 1,00 r[mm] 1,30 1,30 0,00 β c 2,00 2,40	<ul> <li>a shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>β c</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>β b</li> <li>2,00</li> <li>2,40</li> </ul>	Free Fixed □ [MPa] □ βt 1,00 1,00 □ βb 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,00	182,00           18,90           139,90           -30           βt           1,26           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press fit (type 1)	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	A contract (Rough 8)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 A 4 B 5 C	R           Fotal length           Fotal length           Coordinate           Notches           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           0,00           S. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160.00	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 20.00	port (bearing) pport (bearing -down on th h (Su, Rm) β c 1,00 1,00 r[mm] 1,30 1,30 0,00 β c 2,00 2,40 2,40 2,40	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>f)</li> <li>f)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>f)</li></ul>	Free Fixed □ [MPa] □ βt 1,00 1,00 □ βt 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,56 1,56 1,56	182,00           18,90           139,90           -so           βt           1,26           1,26           1,26           1,00   Press fit (type 1) Press fit (type 1) Press fit (type 1)	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	A contract (Rough 8)	ness Ra)
	R           Fotal length           Cotal length           Coordinate           Notches           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           0,00           S. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,00           0,00	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 20,00 0,00	port (bearing) pport (bearing -down on th h (Su, Rm)	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>f)</li> <li>c)</li> <lic)< li=""> <lic)< li=""> <lic)< li=""> <lic)< li=""> <l< td=""><td>Free           Fixed           βt           1,00           1,00           1,49           1,49           1,30           1,56           1,56           1,00</td><td>182,00           18,90           139,90           139,90           -so           βt           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press fit (type 1)           User values</td><td>(mm) (mm) (mm) (mm)</td><td>2.6</td><td>The shaft su CGround (0,4</td><td>A contract (Rough B)</td><td>ness Ra)</td></l<></lic)<></lic)<></lic)<></lic)<></ul>	Free           Fixed           βt           1,00           1,00           1,49           1,49           1,30           1,56           1,56           1,00	182,00           18,90           139,90           139,90           -so           βt           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press fit (type 1)           User values	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	A contract (Rough B)	ness Ra)
3 T X 5 X 0 1 T N 3 4 E 5 C	R           Fotal length           Cotal length           Coordinate           Notches           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           0,00           S. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,00           0,00	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 20,00 0,00 0,00	port (bearing) pport (bearing -down on th h (Su, Rm)	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>f)</li> <li>c)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>f)</li></ul>	Free           Fixed           βt           1,00           1,00           1,49           1,49           1,49           1,30           1,56           1,56           1,00	182,00           18,90           139,90           139,90           -so           βt           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press fit (type 1)           User values           User values	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	h	ness Ra)
	R           Fotal length           Fotal length           Coordinate           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           0,00           S. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           X[mm]           38,40           104,40           160,00           0,00           0,00	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 20,00 0,00 0,00 0,00 g between cy	port (bearing) pport (bearing) pport (bearing) <b>down on th</b> h (Su, Rm) 1,00 1,00 1,30 1,30 0,00 β c 2,00 2,40 2,40 1,00 1,00 1,00	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>β b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>β c)</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> </ul>	Free Fixed	182,00         18,90         139,90         139,90         -so         βt         1,26         1,26         1,26         1,00         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         User values         User values	(mm) (mm) (mm) (mm)	2.6	The shaft su CGround (0,4	Inface (Rough B)	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 T 1 T 2 N 4 E 5 C 6 C	R           Fotal length           Cotal length           Coordinate           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           3. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,000           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,00           0,00           D. Roundin	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt vity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 25,00 25,00 0,00 0,00 0,00	port (bearing) pport (bearing) pport (bearing) <b>down on th</b> h (Su, Rm) 1,00 1,00 1,30 1,30 0,00 β c 2,40 2,40 2,40 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>β b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> </ul>	Free Fixed	182,00         18,90         139,90         139,90         -so         βt         1,26         1,26         1,26         1,26         1,26         1,00         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         User values         User values         5		2.6	The shaft su CGround (0,4	l Inface (Rough 8) 150 3  b 9	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 1 T X 3 A 4 B 5 C 6 C	R           Fotal length           Cotal length           Coordinate           Notches           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           0,00           B. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,00           0,00           D. Roundin           β c	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt vity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 25,00 20,00 0,00 0,00 g between cy 1 1,00	port (bearing) pport (bearing) pport (bearing) -down on th h (Su, Rm) 1,00 1,00 1,30 1,30 0,00 β c 2,40 2,40 2,40 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>tions of the</li> <li>3</li> <li>1,00</li> </ul>	Free Fixed	182,00           18,90           139,90           139,90           -50           βt           1,26           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press fit (type 1)           User values           5           1,00	[mm] [mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	krface (Rough B) 150 150 150 150 150 150 150 150	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T N 3 A 4 E 5 C 6 C	R           Fotal length           Cotal length           Coordinate           Notches           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           0,00           3. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,000           0,000           D. Roundin           β c           β b	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt vity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 25,00 20,00 0,00 g between cy 1 1,00 1,00	port (bearing) pport (bearing) pport (bearing) -down on th h (Su, Rm) 1,00 1,00 1,30 0,00 	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>f)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>f)<!--</td--><td>Free Fixed</td><td>182,00           18,90           139,90           139,90           -S0           βt           1,26           1,26           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press fit (type 1)           User values           5           1,00           1,00</td><td>[mm] [mm] [mm] [mm] [mm]</td><td>2.6 Ø d X 7 1,00 1,00</td><td>The shaft su CGround (0,4</td><td>x 9 1,00 1,00</td><td>ness Ra)</td></li></ul>	Free Fixed	182,00           18,90           139,90           139,90           -S0           βt           1,26           1,26           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press fit (type 1)           User values           5           1,00           1,00	[mm] [mm] [mm] [mm] [mm]	2.6 Ø d X 7 1,00 1,00	The shaft su CGround (0,4	x 9 1,00 1,00	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T N 3 A 4 B 5 C 6 C	R           Fotal length           Cotal length           Coordinate           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           0,00           B. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,000           0,000           D. Roundin           β c           β b           β t	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt vity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 25,00 20,00 0,00 g between cy 1 1,00 1,00	port (bearing) pport (bearing) pport (bearing) -down on th h (Su, Rm) 1,00 1,00 1,30 0,00 β c 2,40 2,40 2,40 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00	<ul> <li>a)</li> <li>b)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>b)</li> <li>c)</li> <li>f)</li> <li>b)</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> </ul>	Free Fixed βt 1,00 1,00 βb 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,56 1,56 1,00 1,56 1,00 1,56 1,00 1,00 2 shaft 4 1,00 1,00	182,00           18,90           139,90           139,90           -S0           βt           1,26           1,26           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Vser values           5           1,00           1,00           1,00	[mm] [mm] [mm] [mm]	2.6 Ø d X 7 1,00 1,00 1,00	The shaft su CGround (0,4	Provide the second seco	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T N 3 <b>A</b> 4 <b>B</b> 5 <b>C</b> 6 <b>C</b> 6 <b>C</b> 6 <b>C</b>	R           Fotal length           Cotal length           Coordinate           Notches           Transver           X[mm]           0,00           3. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,000           0,00           D. Roundin           β c           β b           β t           Loading	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt vity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 25,00 25,00 20,00 0,00 g between cy 1 1,00 1,00 0,00 of the shaft	port (bearing) pport (bearing) down on th h (Su, Rm) β c 1,00 1,00 r[mm] 1,30 1,30 0,00 β c 2,00 2,40 2,40 2,40 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00	<ul> <li>g)</li> <li>e shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>β c</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> </ul>	Free           Fixed           βt           1,00           βb           1,49           1,49           1,49           1,56           1,56           1,00           shaft           4           1,00           1,00	182,00         18,90         139,90         -\$0         -\$0         -\$0         Press fit (type 2)         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         User values         5         1,00         1,00         1,00         1,00	[mm] [mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	x 9 1,00 1,00 1,00	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 3 <b>A</b> 4 <b>E</b> 5 <b>C</b> 6 <b>C</b>	R           Fotal length           Cotal length           Cotal length           Cotal length           Notches           Notches           Transver           X[mm]           0,00           3. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,000           0,00           D. Roundin           β c           β b           β t           Loading	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt vity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 25,00 20,00 0,00 g between cy 1 1,00 1,00 0 f the shaft	port (bearing) pport (bearing) down on th h (Su, Rm)	<ul> <li>g)</li> <li>e shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> </ul>	Free         Fixed         βt         1,00         βb         1,49         1,49         1,49         1,56         1,56         1,00         shaft         4         1,00         1,00	182,00         18,90         139,90         -\$0         -\$0         -\$0         Press fit (type 2)         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         User values         5         1,00         1,00         1,00         1,00	[mm] [mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,4	x 9 1,00 1,00 1,00 1,00	ness Ra)
3 T 4 X 5 X 0 1 T 2 N 4 E 5 C 6 C 6 C	R           Fotal length           Cotal length           Cotal length           Cotal length           Notches           Notches           Transver           X[mm]           0,00           3. Necking           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,000           0,00           D. Roundin           β c           β b           β t           Loading	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 20,00 0,00 0,00 g between cy 1 1,00 1,00 0,00 of the shaft	port (bearing) pport (bearing) down on th h (Su, Rm)	<ul> <li>g)</li> <li>e shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> </ul>	Free Fixed βt 1,00 1,00 βb 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,49 1,56 1,56 1,56 1,56 1,00 1,00 2 shaft 4 1,00 1,00	182,00         18,90         139,90         -\$0         -\$0         -\$0         Press fit (type 2)         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         User values         5         1,00         1,00         1,00	[mm] [mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,t	b 1,00 1,00 1,00 1,00	ness Ra)
	R           Fotal length           Fotal length           Coordinate           Notches           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           B. Necking-           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,00           0,00           D           B c           β b           β t           Loading	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) rse hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 20,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0	port (bearing) pport (bearing) pport (bearing) down on th h (Su, Rm)	<ul> <li>a shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>β c</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> </ul>	Free         Fixed         βt         1,00         βb         1,49         1,49         1,49         1,56         1,56         1,00         4         1,00         4         1,00         1,00	182,00         18,90         139,90         39,90         βt         1,26         1,26         1,26         1,26         1,26         1,00         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         Press fit (type 1)         User values         5         1,00         1,00         1,00         +Q	[mm] [mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,t 100 100 1,00 1,00 1,00 1,00	Price (Rough B) 150 150 150 150 150 150 150 150	ness Ra)
3 T	R           Fotal length           Fotal length           Coordinate           Notches           Notches           The ultimate           Jotch sensiti           A. Transver           X[mm]           0,00           3. Necking-           X[mm]           73,50           98,80           0,00           C. General           X[mm]           38,40           104,40           160,00           0,00           D. Roundin           β c           β b           β t           Loading	of the shaft of the left sup of the right su and necking- tensile strengt ivity factor (q) se hole d[mm] 0,00 0,00 -down d[mm] 23,90 0,00 notch b[mm] 20,00 25,00 20,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0	port (bearing) pport (bearing) pport (bearing) down on th h (Su, Rm)	<ul> <li>a shaft</li> <li>595,0</li> <li>0,45</li> <li>β b</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,54</li> <li>1,00</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>2,40</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> <li>1,00</li> </ul>	Free         Fixed         Ø         βt         1,00         βb         1,49         1,49         1,49         1,30         1,56         1,00         shaft         4         1,00         1,00	182,00           18,90           139,90           139,90           βt           1,26           1,26           1,26           1,26           1,26           1,26           1,00           Press fit (type 1)           Press rit (type 1)           Ver values           5           1,00           1,00           1,00           +Q           + 4	[mm] [mm] [mm] [mm] [mm] [mm] [mm] [mm]	2.6	The shaft su CGround (0,t 100 100 1,00 1,00 1,00 1,00	rface (Rough 8) 150 150 3 X b 9 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,0	ness Ra)










11

b

χ

+F

́Мb

18







# Bijlage D

# Eigenschappen gekozen lagers



Figuur D.1: eigenschappen PF 25 RM



Figuur D.2: eigenschappen FYTB 25 TF



Figuur D.3: eigenschappen FYTB 30 TF

Deep groove ball bearings, single row

Princip	pal		Basic load	l ratings	Fatigue	Speed ratir	ngs	Mass	Designation	
dimen	sions		dynamic	static	load limit	Reference speed	Limiting speed			
d	D	В	C	CO	Pu	0.			* - SKF Explorer bearing	
mm			kN		kN	r/min		kg		
25	47	12	11,9	6,55	0,275	32000	20000	0,08	6005-RSL *	-



Figuur D.4: eigenschappen 6005 2RSL

# Bijlage E

# Berekening theoretische veerkarakteristiek



#### > kveert;

#### 112401.3809

[ De theoretische waarde komt vrij goed overeen met de opgemeten waarde.

We be ogen een totale slag te bekomen voor het wiel van ongeveer 15cm, aangezien we slechts een slag van ongeveer 5cm hebben in de veer, moet de veer geplaatst worden op 1/3 van de afstand van wielas tot scharnier. De kracht op de veer is dan 3 keer de verticale kracht op het wiel: 3\*1500N = 4500N

Bij statische belasting van de veer is de doorbuiging iets meer dan de helft van de slag. De gekozen veer kan dus voldoen.

De eigenfrequentie van de koets, wagen kan geschreven worden als:

> f:=1/2/Pi\*sqrt(k/m);

met k de gemiddelde veerkconstante van de suspensie ter hoogte van het wiel (deze is verschillend van de veerconstante van de veer, omdat de veer niet aangrijpt in het centrum van het wiel) en m de massa van de koets op één achterwiel.

*k* := 35155.15373

m := 150

 $f := \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2}$ 

Achteraan rekenen we op 150kg per wiel

> k:=kveer/3;

> m:=150;

> evalf(f);

#### 2.436514514

[ eigenfrequentie koets: 2.4Hz

[ De demper heeft een demping van ongeveer 3320N.s/m (experimenteel bepaald)
[ > c:=3320;

*c* := 3320

> D=c/2/sqrt(k\*m);

#### D = 0.7228829105

[ met D de relatieve demping, D<1 => onderkritisch gedempt

Bijlage F

Berekening asontlasting achteraan

Γ

```
ASONTLASTING BIJ REMMEN
 > restart:
 Verticaal evenwicht:
 > vgl1:=2*Ra+Rv=9.81*450;
                                 vgl1 := 2 Ra + Rv = 4414.50
 Horizontaal evenwicht:
 > vgl2:=450*4=Tv+2*Ta;
                                   vgl2 := 1800 = Tv + 2 Ta
 Momentenevenwicht rond het raakpunt van het voorwiel met de grond:
 > vgl3:=450*4*0.5+2*Ra*2.3=450*9.81*1.6;
                              vgl3 := 900.0 + 4.6 Ra = 7063.200
 > solve({vgl1,vgl3},{Ra,Rv});
                           { Rv = 1734.847826, Ra = 1339.826087 }
[ > assign(%);
 We onderstellen dat we een wrijvingscoëfficiënt van 0.7 halen (droge wrijving tussen rubber en
 beton). We rekenen er op dat de banden niet slippen.
 > vgl4:=Tv<Rv*0.7;</pre>
                                  vgl4 := Tv < 1214.393478
 > vgl5:=Ta<Ra*0.7;</pre>
                                  vgl5 := Ta < 937.8782609
 > 1800<1214+937.8*2;
                                       1800 < 3089.6
 De eis van 4m/s<sup>2</sup> afremming is dus fysisch mogelijk.
 Om deze remkracht op de wielen te krijgen dienen we voldoende druk op de remschoenen te
 krijgen. Aangezien wij geen gebruik maken van een rembekrachtiging, moet deze druk dus volledig
 manueel kunnen opgebouwd worden.
 De remschijf vooraan heeft een diameter van 30cm, achteraan hebben we 22cm. De
 voorwieldiameter is 57cm. Een realistische schatting voor de wrijvingscoëfficiënt tussen de pads en
 de remschijf is 0.5.
 Indien we het maximum willen halen uit het remsysteem, dan moet de remkracht op de remblok
 vooraan:
 > Rv*0.7*57/30;
                                        2307.347609
 De drukkracht van de remblok dient dan:
 > Dv:=%*1/0.5;
                                     Dv := 4614.695218
 Het oppervlak van de remcilinder zuigers (3x30mm diameter)is:
 > Av:=evalf(3*Pi*30**2/4);
                                     Av := 2120.575041
 De te onwikkelen druk in de remleiding is dan:
 > Pdrukv:=evalf(Dv/Av*10);
                                   Pdrukv := 21.76152755
[ Indien we dus 22 bar kunnen ontwikkelen, dan kunnen we maximaal remmen op het voorwiel.
 Indien we het maximum willen halen uit het remsysteem, dan moet de remkracht op de remblok
```

achteraan: > Ra\*0.7\*60/22; 2557.849802 De drukkracht van de remblok dient dan: > Da:=%\*1/0.5; Da := 5115.699604[ Het oppervlak van de remcilinder zuigers (2x30mm diameter)is: > Aa:=evalf(2\*Pi\*30\*\*2/4); *Aa* := 1413.716694 De te onwikkelen druk in de remleiding is dan: > Pdrukv:=evalf(Da/Aa\*10); *Pdrukv* := 36.18617242 Indien we dus 36 bar kunnen creëren, dan kunnen we maximaal remmen op de achterwielen. De druk in de remleiding wordt bekomen met een rempomp die manueel wordt bediend. De kracht op de pomp is het dubbele van de kracht op het pedaal, door de scharnierwerking. De norm schrijft voor dat we maar een kracht van 700N mogen uitoefenen. Hierdoor is de kracht op de rempomp 1400N. De diameter van de rempomp is 20mm. Hierdoor is de ontwikkelde druk: > Pontwik:=evalf(1400/(Pi\*20\*\*2/4)\*10); *Pontwik* := 44.56338405 Om een remdruk van 20 bar te ontwikkelen dienen we met een kracht te duwen van > evalf(20/10\*Pi\*20\*\*2/4)/2; 314.1592654 We voldoen dus aan de norm. We merken nog op dat de remkracht vooraan steeds hoger zal zijn dan de remkracht achteraan. Dit zit hem in het feit van de verkeerde keuze tussen de remblokken. > De totale remkracht die bekomen wordt bij een druk van 22 bar (we remmen zonder dat er één wiel slipt) > Dv20:=Av\*22/10; Da20:=Aa\*22/10; Dv20 := 4665.265090Da20 := 3110.176727> Tv20:=Dv20\*0.5\*30/57; *Tv20* := 1227.701339 > Ta20:=Da20\*0.5\*22/60; *Ta20* := 570.1990665 > Ttotaal20:=Tv20+2\*Ta20; *Ttotaal20* := 2368.099472 > a20:=Ttotaal20/450; a20 := 5.262443271[ Dit is de maximaal haalbare vertraging zonder dat het voorwiel slipt.

# Bijlage G

# Berekening ontlaadcurve batterijen

### ONTLADING VAN TWEE PARALLELLE BATTERIJPACKS

probleem: twee batterijpakken moeten parallel komen te staan, er moet dus aandacht besteed worden aan de mogelijke assymetrische ontlading van de batterijen en de eventueel aanwezige kringstromen.

### deel 1 Algemene berekening op de gebruikte cellen









Vdrempel := 0.7De inwendige weerstand van de batterijen veronderstellen we voorlopig gelijk aan 2 ohm > R1:=2; R2:=2; R1 := 2R2 := 2De uitgangspanning van beide batterij takken moet gelijk zijn, aangezien ze dezelfde last voeden. Om kringstromen te vermijden plaatsen we twee zenerdiodes. > Vuit=168\*V(E1(t))-R1\*Istroom1(t)-piecewise(Istroom1(t)>0,Vdre mpel,-Vreverse); Vuit=168\*V(E2(t))-R2\*Istroom2(t)-piecewise(Istroom2(t)>0,Vdre mpel,-Vreverse);  $Vuit = 168 \text{ V}(\text{E1}(t)) - 2 \text{ Istroom1}(t) - \left( \begin{cases} 0.7 & 0 < \text{Istroom1}(t) \\ -5 & otherwise \end{cases} \right)$  $Vuit = 168 \text{ V}(\text{E2}(t)) - 2 \text{ Istroom2}(t) - \left( \begin{cases} 0.7 & 0 < \text{Istroom2}(t) \\ -5 & otherwise \end{cases} \right)$ > 168\*V(E1(t))-R1\*Istroom1(t)-piecewise(Istroom1(t)>0,Vdrempel, -Vreverse)=168\*V(E2(t))-R2\*(Itotaal(t)-Istroom1(t))-piecewise ((Itotaal(t)-Istroom1(t))>0,Vdrempel,-Vreverse);  $168 \operatorname{V}(\operatorname{E1}(t)) - 2 \operatorname{Istroom1}(t) - \left( \begin{cases} 0.7 & 0 < \operatorname{Istroom1}(t) \\ -5 & otherwise \end{cases} \right) = 168 \operatorname{V}(\operatorname{E2}(t)) - 32$  $-8 \sin\left(\frac{t \pi}{400}\right) + 2 \operatorname{Istroom1}(t) - \left( \begin{cases} 0.7 & 0 < 16 + 4 \sin\left(\frac{t \pi}{400}\right) - \operatorname{Istroom1}(t) \\ -5 & otherwise \end{cases} \right)$ Aangezien deze piecewise functies voor onoverkomelijke problemen zullen zorgen, laten we ze weg, en veronderstellen we dat Istroom steeds >0 is, wat achteraf dan gecontroleerd dient te worden natuurlijk. > 168\*V(E1(t))-R1\*Istroom1(t)-Vdrempel=168\*V(E2(t))-R2\*(Itotaal (t)-Istroom1(t))-Vdrempel; 168 V(E1(t)) - 2 Istroom1(t) - 0.7 =168 V(E2(t)) - 32.7 - 8 sin $\left(\frac{t \pi}{400}\right)$  + 2 Istroom1(t) > vgl1:=Istroom1(t)=solve(%,Istroom1(t)); vgll := Istroom1(t) = 42. V(E1(t)) + 8 - 42. V(E2(t)) + 2. sin(0.007853981634t)[ en uit het eerste deel weten we dat: > V:=E->-.1373112222e-19\*E^5+.4960886350e-15\*E^4-.7013156415e-1 1\*E^3+.4872701172e-7\*E^2-.1729066084e-3\*E+1.401512399;  $V := E \rightarrow -0.1373112222 \ 10^{-19} \ E^5 + 0.4960886350 \ 10^{-15} \ E^4 - 0.7013156415 \ 10^{-11} \ E^3$  $+ 0.4872701172 \ 10^{-7} \ E^2 - 0.0001729066084 \ E + 1.401512399$ dus: > vgl1; Istroom1(t) =  $-0.5767071332 \ 10^{-18} \ \text{E1}(t)^5 + 0.2083572267 \ 10^{-13} \ \text{E1}(t)^4$  $-0.2945525694 \ 10^{-9} \ \text{E1}(t)^3 + 0.2046534492 \ 10^{-5} \ \text{E1}(t)^2 - 0.007262077553 \ \text{E1}(t)$ 



We zien dus dat in het ideale geval de geleverde energie door beide batterijen dezelfde is, wat te verwachten was.

### deel 3 verschil in inwendige weerstand

[ Stel dat door bepaalde omstandigheden de inwendige weerstanden niet meer dezelfde zijn.

```
> restart:with(plots):with(stats):
Warning, the name changecoords has been redefined
> R1:=2;
R2:=5;
Vdrempel:=0.7;
```

$$R2 := 5$$
$$Vdrempel := 0.7$$

$$Itotaal := t \to 16 + 4 \sin\left(\frac{1}{400} t \pi\right)$$

> 168\*V(E1(t))-R1\*Istroom1(t)-Vdrempel=168\*V(E2(t))-R2\*(Itotaal



Deze oplossingen zijn niet meer voor te stellen door een eenvoudige polynoom, we werken













# Bijlage H

# Datasheet gebruikte batterijen

# **GP** Batteries

### Data Sheet

Туре	: Rechargeable Nickel Cadmium Cylindrical Cell	
Nominal Dimension (with Sleeve)	: Ø = 23.0mm H = 43.0mm	
Application	: Discharge current 200mA to 29A (Continuous) 58A (Momentary)	
Nominal Voltage	: 1.2V	
Nominal Capacity	: Minimum : 2000mAh Typical : 2200mAh when discharged at 400mA to 1.0V a 20°C	ıt
Charging Condition	: 200mA for 14 hrs at 20°C	
Fast Charge	<ul> <li>1000mA to 2000mA (0.5C to 1C) with charge termination control. Recommended control parameter : -ΔV : 10-20mV Timer : 120% nominal input</li> </ul>	I
Service Life	: > 500 cycles (IEC standard)	
Continuous Overcharge	: 200mA maximum current No conspicuous deformation and/or leakage	
Weight	: 53.0g	
Internal Resistance	: Average 8mΩ upon fully charged (Range : 7-10mΩ) at 1000Hz	
Max. Charging Voltage	: 1.5V at 200mA charging	
Ambient Temperature Range	: Standard Charging       : 0°C to 40°         Fast Charging       : 10°C to 40°         Discharging       : -20°C to 50°         Storage       : -20°C to 35°         Storage (1 week)       : -20°C to 60°	



### Model No.: 200SCK

Fast Charge (Charge Control required)





Voltage (V)



#### High Rate Discharge



\*The information (subject to change without prior notice) contained in this document is for reference only and should not be used as a basis for product guarantee or warranty. For application other than those described here, please consult GP Sales and Marketing Office or Distributors.

Member Gold Peak Group

Manufacturer reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice. ZRS

ZRS1043 Rev.00

Bijlage I

Datasheet batterijlader: MAX713



#### **General Description**

The MAX712/MAX713 fast-charge Nickel Metal Hydride (NiMH) and Nickel Cadmium (NiCd) batteries from a DC source at least 1.5V higher than the maximum battery voltage. 1 to 16 series cells can be charged at rates up to 4C. A voltage-slope detecting analog-to-digital converter, timer, and temperature window comparator determine charge completion. The MAX712/MAX713 are powered by the DC source via an on-board +5V shunt regulator. They draw a maximum of 5µA from the battery when not charging. A low-side current-sense resistor allows the battery charge current to be regulated while still supplying power to the battery's load.

The MAX712 terminates fast charge by detecting zero voltage slope, while the MAX713 uses a negative voltage-slope detection scheme. Both parts come in 16-pin DIP and SO packages. An external power PNP transistor, blocking diode, three resistors, and three capacitors are the only required external components.

For high-power charging requirements, the MAX712/ MAX713 can be configured as a switch-mode battery charger that minimizes power dissipation. Two evaluation kits are available: Order the MAX712EVKIT-DIP for quick evaluation of the linear charger, and the MAX713EVKIT-SO to evaluate the switch-mode charger.





# **MANKI/M** NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

#### Features

- Fast-Charge NiMH or NiCd Batteries
- ♦ Voltage Slope, Temperature, and Timer
- Fast-Charge Cutoff
- Charge 1 to 16 Series Cells
- Supply Battery's Load While Charging (Linear Mode)
- ♦ Fast Charge from C/4 to 4C Rate
- C/16 Trickle-Charge Rate
- Automatically Switch from Fast to Trickle Charge
- Linear or Switch-Mode Power Control
- ♦ 5µA (max) Drain on Battery when Not Charging
- 5V Shunt Regulator Powers External Logic

#### \_Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX712CPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP
MAX712CSE	0°C to +70°C	16 Narrow SO
MAX712C/D	0°C to +70°C	Dice*
MAX712EPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP
MAX712ESE	-40°C to +85°C	16 Narrow SO
MAX712MJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP**

Ordering Information continued at end of data sheet.

Contact factory for dice specifications.

\*\*Contact factory for availability and processing to MIL-STD-883.

#### **Typical Operating Circuit**



#### M/XI/M

Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

V+ to BATT	0.3V, +7V	REF Curi
BATT- to GND	±1V	Continuc
BATT+ to BATT-		Plastic
Power Not Applied	±20V	Narrov
With Power Applied	The higher of ±20V or	CERD
	±2V x (programmed cells)	Operatin
DRV to GND	0.3V, +20V	MAX7
FASTCHG to BATT-	0.3V, +12V	MAX7
All Other Pins to GND	0.3V, (V+ + 0.3V)	MAX7
V+ Current	100mÁ	Storage
DRV Current	100mA	Lead Ter

REF Current	10mA
Continuous Power Dissipation (T <sub>A</sub> = +70°	°C)
Plastic DIP (derate 10.53mW/°C above	+70°C842mW
Narrow SO (derate 8.70mW/°C above -	+70°C696mW
CERDIP (derate 10.00mW/°C above +7	70°C800mW
Operating Temperature Ranges	
MAX71_C_E	0°C to +70°C
MAX71_E_E	40°C to +85°C
MAX71_MJE	55°C to +125°C
Storage Temperature Range	65°C to +150°C
ead Temperature (soldering, 10s)	+300°C

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

#### **ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

 $(I_{V+} = 10 \text{mA}, T_A = T_{MIN}$  to  $T_{MAX}$ , unless otherwise noted. Refer to the *Typical Operating Circuit*. All measurements are with respect to BATT-, not GND.)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
V+ Voltage	5mA < I <sub>V+</sub> < 20mA	4.5		5.5	V	
I <sub>V+</sub> (Note 1)		5			mA	
BATT+ Leakage	V+ = 0V, BATT+ = 17V			5	μA	
BATT+ Resistance with Power On	PGM0 = PGM1 = BATT-, BATT+ = 30V	30			kΩ	
C1 Capacitance		0.5			μF	
C2 Capacitance		5			nF	
REF Voltage	0mA < I <sub>REF</sub> < 1mA	1.96		2.04	V	
Undervoltage Lockout	Per cell	0.35		0.50	V	
External VLIMIT Input Range		1.25		2.50	V	
THI, TLO, TEMP Input Range		0		2	V	
THI, TLO Offset Voltage (Note 2)	0V < TEMP < 2V, TEMP voltage rising	-10		10	mV	
THI, TLO, TEMP, VLIMIT Input Bias Current		-1		1	μA	
VLIMIT Accuracy	$\begin{array}{l} 1.2 \text{V} < \text{V}_{\text{LIMIT}} < 2.5 \text{V}, \ 5 \text{mA} < \text{I}_{\text{DRV}} < 20 \text{mA}, \\ \text{PGM0} = \text{PGM1} = \text{V} + \end{array}$	-30		30	mV	
Internal Cell Voltage Limit	VLIMIT = V+	1.6	1.65	1.7	V	
Fast-Charge VSENSE		225	250	275	mV	
	PGM3 = V+	1.5	3.9	7.0	- mV	
	PGM3 = open	4.5	7.8	12.0		
Thekie-charge vservse	PGM3 = REF	12.0	15.6	20.0		
	PGM3 = BATT-	26.0	31.3	38.0	1	
Voltage Clane Consitivity (Note 2)	MAX713		-2.5		mV/t <sub>A</sub>	
Voltage-Slope Sensitivity (Note 3)	MAX712		0		per cell	
Timer Accuracy		-15		15	%	
Battery-Voltage to Cell-Voltage Divider Accuracy		-1.5		1.5	%	
DRV Sink Current	V <sub>DRV</sub> = 10V	30			mA	

2

#### **ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)**

(Iv+ = 10mA, TA = TMIN to TMAX, unless otherwise noted. Refer to the Typical Operating Circuit. All measurements are with respect to BATT-, not GND.)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
FASTCHG Low Current	VFASTCHG = 0.4V	2			mA
FASTCHG High Current	VFASTCHG = 10V			10	μA
A/D Input Range (Note 4)	Battery voltage ÷ number of cells programmed	1.4		1.9	V

Note 1: The MAX712/MAX713 are powered from the V+ pin. Since V+ shunt regulates to +5V, R1 must be small enough to allow at least 5mA of current into the V+ pin. Note 2: Offset voltage of THI and TLO comparators referred to TEMP.

Note 3: tA is the A/D sampling interval (Table 3).

Note 4: This specification can be violated when attempting to charge more or fewer cells than the number programmed. To ensure proper voltage-slope fast-charge termination, the (maximum battery voltage) ÷ (number of cells programmed) must fall within the A/D input range.

#### **Typical Operating Characteristics**



M/X/W



### Pin Description

PIN	NAME	FUNCTION
1	VLIMIT	Sets the maximum cell voltage. The battery terminal voltage (BATT+ - BATT-) will not exceed VLIMIT x (number of cells). Do not allow VLIMIT to exceed 2.5V. Tie VLIMIT to VREF for normal operation.
2	BATT+	Positive terminal of battery
3, 4	PGM0, PGM1	PGM0 and PGM1 set the number of series cells to be charged. The number of cells can be set from 1 to 16 by connecting PGM0 and PGM1 to any of V+, REF, or BATT-, or by leaving the pin open (Table 2). For cell counts greater than 11, see the <i>Linear-Mode, High Series Cell Count</i> section. Charging more or fewer cells than the number programmed may inhibit $\Delta V$ fast-charge termination.
5	THI	Trip point for the over-temperature comparator. If the voltage-on TEMP rises above THI, fast charge ends.
6	TLO	Trip point for the under-temperature comparator. If the MAX712/MAX713 power on with the voltage-on TEMP less than TLO, fast charge is inhibited and will not start until TEMP rises above TLO.
7	TEMP	Sense input for temperature-dependent voltage from thermistors.
8	FASTCHG	Open-drain, fast-charge status output. While the MAX712/MAX713 fast charge the battery, FASTCHG sinks current. When charge ends and trickle charge begins, FASTCHG stops sinking current.
9, 10	PGM2, PGM3	PGM2 and PGM3 set the maximum time allowed for fast charging. Timeouts from 33 minutes to 264 minutes can be set by connecting to any of V+, REF, or BATT-, or by leaving the pin open (Table 3). PGM3 also sets the fast-charge to trickle-charge current ratio (Table 5).
11	CC	Compensation input for constant current regulation loop
12	BATT-	Negative terminal of battery
13	GND	System ground. The resistor placed between BATT- and GND monitors the current into the battery.
14	DRV	Current sink for driving the external PNP current source
15	V+	Shunt regulator. The voltage on V+ is regulated to +5V with respect to BATT-, and the shunt current powers the MAX712/MAX713.
16	REF	2V reference output

MAX712/MAX713

5

M/X/W
#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

MAX712/MAX713

#### \_Getting Started

The MAX712/MAX713 are simple to use. A complete linear-mode or switch-mode fast-charge circuit can be designed in a few easy steps. A linear-mode design uses the fewest components and supplies a load while charging, while a switch-mode design may be necessary if lower heat dissipation is desired.

 Follow the battery manufacturer's recommendations on maximum charge currents and charge-termination methods for the specific batteries in your application. Table 1 provides general guidelines.

Table 1. Fast-Charge Termination Methods

Charge Rate	NiMH Batteries	NiCd Batteries
> 2C	ΔV/Δt and temperature, MAX712 or MAX713	$\Delta V/\Delta t$ and/or temperature, MAX713
2C to C/2	ΔV/Δt and/or temperature, MAX712 or MAX713	$\Delta V/\Delta t$ and/or temperature, MAX713
< C/2	ΔV/Δt and/or temperature, MAX712	ΔV/Δt and/or temperature, MAX713

- 2) Decide on a charge rate (Tables 3 and 5). The slowest fast-charge rate for the MAX712/MAX713 is C/4, because the maximum fast-charge timeout period is 264 minutes. A C/3 rate charges the battery in about three hours. The current in mA required to charge at this rate is calculated as follows:
  - IFAST = (capacity of battery in mAh)

#### (charge time in hours)

Depending on the battery, charging efficiency can be as low as 80%, so a C/3 fast charge could take 3 hours and 45 minutes. This reflects the efficiency with which electrical energy is converted to chemical energy within the battery, and is not the same as the powerconversion efficiency of the MAX712/MAX713.

3) Decide on the number of cells to be charged (Table 2). If your battery stack exceeds 11 cells, see the *Linear-Mode High Series Cell Count* section. Whenever changing the number of cells to be charged, PGM0 and PGM1 must be adjusted accordingly. Attempting to charge more or fewer cells than the number programmed can disable the voltage-slope fast-charge termination circuitry. The internal ADC's input voltage range is limited to between 1.4V and 1.9V (see the *Electrical Characteristics*), and is equal to the voltage across the battery divided by the number of cells programmed (using PGM0 and PGM1, as in Table 2). When the ADC's input voltage falls out of its specified range, the voltage-slope termination circuitry can be disabled.

- 4) Choose an external DC power source (e.g., wall cube). Its minimum output voltage (including ripple) must be greater than 6V and at least 1.5V higher (2V for switch mode) than the maximum battery voltage while charging. This specification is critical because normal fast-charge termination is ensured only if this requirement is maintained (see *Powering the MAX712/MAX713* section for more details).
- 5) For linear-mode designs, calculate the worst-case power dissipation of the power PNP and diode (Q1 and D1 in the *Typical Operating Circuit*) in watts, using the following formula:

PDPNP = (maximum wall-cube voltage under load - minimum battery voltage) x (charge current in amps)

If the maximum power dissipation is not tolerable for your application, refer to the *Detailed Description* or use a switch-mode design (see *Switch-Mode Operation* in the *Applications Information* section, and see the MAX713 EV kit manual).

6) For both linear and switch-mode designs, limit current into V+ to between 5mA and 20mA. For a fixed or narrow-range input voltage, choose R1 in the *Typical Operation Circuit* using the following formula:

R1 = (minimum wall-cube voltage - 5V) / 5mA

For designs requiring a large input voltage variation, choose the current-limiting diode D4 in Figure 19.

- 7) Choose R<sub>SENSE</sub> using the following formula: RSENSE = 0.25V / (IFAST)
- 8) Consult Tables 2 and 3 to set pin-straps before applying power. For example, to fast charge at a rate of C/2, set the timeout to between 1.5x or 2x the charge period, three or four hours, respectively.

#### M/X/M

Cells		
NUMBER OF CELLS	PGM1 CONNECTION	PGM0 CONNECTION
1	V+	V+
2	Open	V+
3	REF	V+
4	BATT-	V+
5	V+	Open
6	Open	Open
7	REF	Open
8	BATT-	Open
9	V+	REF
10	Open	REF
11	REF	REF
12	BATT-	REF
13	V+	BATT-
14	Open	BATT-
15	REF	BATT-
16	BATT-	BATT-

#### Table 2. Programming the Number

#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

Table 3. Programming the MaximumCharge Time

TIMEOUT (min)	A/D SAMPLING INTERVAL (s) (t <sub>A</sub> )	VOLTAGE- SLOPE TERMINATION	PGM3 CONN	PGM2 CONN
22	21	Disabled	V+	Open
22	21	Enabled	V+	REF
33	21	Disabled	V+	V+
33	21	Enabled	V+	BATT-
45	42	Disabled	Open	Open
45	42	Enabled	Open	REF
66	42	Disabled	Open	V+
66	42	Enabled	Open	BATT-
90	84	Disabled	REF	Open
90	84	Enabled	REF	REF
132	84	Disabled	REF	V+
132	84	Enabled	REF	BATT-
180	168	Disabled	BATT-	Open
180	168	Enabled	BATT-	REF
264	168	Disabled	BATT-	V+
264	168	Enabled	BATT-	BATT-



7



Figure 1. Block Diagram

M/IXI/M

#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

**Detailed Description** The MAX712/MAX713 fast charge NiMH or NiCd batteries by forcing a constant current into the battery. The MAX712/MAX713 are always in one of two states: fast charge or trickle charge. During fast charge, the current level is high; once full charge is detected, the current reduces to trickle charge. The device monitors three variables to determine when the battery reaches full charge: voltage slope, battery temperature, and charge time.



Figure 2. Typical Charging Using Voltage Slope



Figure 3. Typical Charging Using Temperature

8

Figure 1 shows the block diagram for the MAX712/ MAX713. The timer, voltage-slope detection, and temperature comparators are used to determine full charge state. The voltage and current regulator controls output voltage and current, and senses battery presence.

Figure 2 shows a typical charging scenario with batteries already inserted before power is applied. At time 1, the MAX712/MAX713 draw negligible power from the battery. When power is applied to DC IN (time 2), the power-on reset circuit (see the POWER\_ON\_RESET signal in Figure 1) holds the MAX712/MAX713 in trickle charge. Once POWER\_ON\_RESET goes high, the device enters the fast-charge state (time 3) as long as the cell voltage is above the undervoltage lockout (UVLO) voltage (0.4V per cell). Fast charging cannot start until (battery voltage) / (number of cells) exceeds 0.4V.

When the cell voltage slope becomes negative, fast charge is terminated and the MAX712/MAX713 revert to trickle-charge state (time 4). When power is removed (time 5), the device draws negligible current from the battery.

Figure 3 shows a typical charging event using temperature full-charge detection. In the case shown, the battery pack is too cold for fast charging (for instance, brought in from a cold outside environment). During time 2, the MAX712/MAX713 remain in trickle-charge state. Once a safe temperature is reached (time 3), fast charge starts. When the battery temperature exceeds the limit set by THI, the MAX712/MAX713 revert to trickle charge (time 4).



Figure 4. Typical Charging with Battery Insertion

The MAX712/MAX713 can be configured so that voltage slope and/or battery temperature detects full charge.

Figure 4 shows a charging event in which a battery is inserted into an already powered-up MAX712/MAX713. During time 1, the charger's output voltage is regulated at the number of cells times VLIMIT. Upon insertion of the battery (time 2), the MAX712/MAX713 detect current flow into the battery and switch to fast-charge state. Once full charge is detected, the device reverts to trickle charge (time 3). If the battery is removed (time 4), the MAX712/MAX713 remain in trickle charge and the output voltage is once again regulated as in time 1.

#### Powering the MAX712/MAX713

AC-to-DC wall-cube adapters typically consist of a transformer, a full-wave bridge rectifier, and a capacitor. Figures 10-12 show the characteristics of three consumer product wall cubes. All three exhibit substantial 120Hz output voltage ripple. When choosing an adapter for use with the MAX712/MAX713, make sure the lowest wall-cube voltage level during fast charge and full load is at least 1.5V higher (2V for switch mode) than the maximum battery voltage while being fast charged. Typically,

#### NiCd/NiMH Battery **Fast-Charge Controllers**

the voltage on the battery pack is higher during a fastcharge cycle than while in trickle charge or while supplying a load. The voltage across some battery packs may approach 1.9V/cell.



Figure 5. DRV Pin Cascode Connection (for high DC IN voltage or to reduce MAX712/MAX713 power dissipation in linear mode)

9

POWER_ON_RESET	UNDER_VOLTAGE	IN_REGULATION	COLD	HOT	RESULT*
0	х	х	х	х	Set trickle
1	1	x	х	х	No change
1	х	1	х	х	No change
1	х	x	0	х	No change
1	х	x	х	0	No change***
1	0	0	1	1	Set fast
1	0	0	1	1	No change
1	0	0	$\downarrow$	1	No change
1	$\downarrow$	0	1	1	Set fast
1	0	$\downarrow$	1	1	Set fast
1	0	0	1	↑	No change***
1	0	0	↑ (	1	Set fast**
1	х	x	0	х	Trickle to fast transition inhibited
1	х	х	х	0	Trickle to fast transition inhibited
1	↑	0	Х	х	Set trickle
1	0	<u>↑</u>	Х	х	Set trickle
1	х	x	Х	$\downarrow$	Set trickle

#### Table 4. MAX712/MAX713 Charge-State Transition Table<sup>†</sup>

+ Only two states exist: fast charge and trickle charge.

\* Regardless of the status of the other logic lines, a timeout or a voltage-slope detection will set trickle charge.

\*\* If the battery is cold at power-up, the first rising edge on COLD will trigger fast charge; however, a second rising edge will have no effect.

\*\*\* Batteries that are too hot when inserted (or when circuit is powered up) will not enter fast charge until they cool and power is recycled.

## MAX712/MAX713

DC IN

#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

Ş REF DRV VLIMIT D1 CELL\_VOLTAGE GND CURRENT-SENSE AMPLIFIER PGM3 FAST\_CHARGE Av + Х 8 512 V+ OPFN 0 256 128 REF 0 BATT 64 BATT-0 RSENSE BATT-BATT IN\_REGULATION GND 1.25V T BATT-

Figure 6. Current and Voltage Regulator (linear mode)

The 1.5V of overhead is needed to allow for worst-case voltage drops across the pass transistor (Q1 of *Typical Operating Circuit*), the diode (D1), and the sense resistor (RSENSE). This minimum input voltage requirement is critical, because violating it can inhibit proper termination of the fast-charge cycle. A safe rule of thumb is to choose a source that has a minimum input voltage =  $1.5V + (1.9V \times$  the maximum number of cells to be charged). When the input voltage at DC IN drops below the  $1.5V + (1.9V \times$  number of cells), the part oscillates between fast charge and trickle charge and might never completely terminate fast-charge.

The MAX712/MAX713 are inactive without the wall cube attached, drawing  $5\mu A$  (max) from the battery. Diode D1 prevents current conduction into the DRV pin. When the wall cube is connected, it charges C1 through R1 (see *Typical Operating Circuit*) or the current-limiting diode (Figure 19). Once C1 charges to 5V, the internal

10

shunt regulator sinks current to regulate V+ to 5V, and fast charge commences. The MAX712/MAX713 fast charge until one of the three fast-charge terminating conditions is triggered.

If DC IN exceeds 20V, add a cascode connection in series with the DRV pin as shown in Figure 5 to prevent exceeding DRV's absolute maximum ratings. Furthermore, if Figure 19's DC IN exceeds 15V, a transistor level-shifter is needed to provide the proper voltage swing to the MOSFET gate. See the MAX713 EV kit manual for details.

Select the current-limiting component (R1 or D4) to pass at least 5mA at the minimum DC IN voltage (see step 6 in the *Getting Started* section). The maximum current into V+ determines power dissipation in the MAX712/MAX713.

maximum current into V+ =

(maximum DC IN voltage - 5V) / R1

power dissipation due to shunt regulator =

5V x (maximum current into V+)

Sink current into the DRV pin also causes power dissipation. Do not allow the total power dissipation to exceed the specifications shown in the *Absolute Maximum Ratings*.

#### Fast Charge

The MAX712/MAX713 enter the fast-charge state under one of the following conditions:

- Upon application of power (batteries already installed), with battery current detection (i.e., GND voltage is less than BATT- voltage), and TEMP higher than TLO and less than THI and cell voltage higher than the UVLO voltage.
- Upon insertion of a battery, with TEMP higher than TLO and lower than THI and cell voltage higher than the UVLO voltage.

R<sub>SENSE</sub> sets the fast-charge current into the battery. In fast charge, the voltage difference between the BATTand GND pins is regulated to 250mV. DRV current increases its sink current if this voltage difference falls below 250mV, and decreases its sink current if the voltage difference exceeds 250mV.

fast-charge current (IFAST) = 0.25V / RSENSE

#### **Trickle Charge**

Selecting a fast-charge current (IFAST) of C/2, C, 2C, or 4C ensures a C/16 trickle-charge current. Other fast-charge rates can be used, but the trickle-charge current will not be exactly C/16.

#### Table 5. Trickle-Charge CurrentDetermination from PGM3

PGM3	FAST-CHARGE RATE	TRICKLE-CHARGE CURRENT (ITRICKLE)
V+	4C	IFAST/64
OPEN	2C	IFAST/32
REF	С	IFAST/16
BATT-	C/2	IFAST/8

The MAX712/MAX713 internally set the trickle-charge current by increasing the current amplifier gain (Figure 6), which adjusts the voltage across RSENSE (see Trickle-Charge VSENSE in the *Electrical Characteristics table*).

#### Nonstandard Trickle-Charge Current Example

Configuration:

Typical Operating Circuit 2 x Panasonic P-50AA 500mAh AA NiCd batteries C/3 fast-charge rate 264-minute timeout

Negative voltage-slope cutoff enabled

Minimum DC IN voltage of 6V

Settings:

Use MAX713

 $\begin{array}{l} \mathsf{PGM0} = \mathsf{V}+, \ \mathsf{PGM1} = \mathsf{open}, \ \mathsf{PGM2} = \mathsf{BATT}-, \\ \mathsf{PGM3} = \mathsf{BATT}-, \ \mathsf{RSENSE} = 1.5\Omega \ (\mathsf{fast-charge current}, \\ \mathsf{I}_{\mathsf{FAST}} = \mathsf{167mA}), \ \mathsf{R1} = (\mathsf{6V} - \mathsf{5V}) \ / \ \mathsf{5mA} = 200\Omega \end{array}$ 

Since PGM3 = BATT-, the voltage on R<sub>SENSE</sub> is regulated to 31.3mV during trickle charge, and the current is 20.7mA. Thus the trickle current is actually C/25, not C/16.

#### Further Reduction of Trickle-Charge Current for NiMH Batteries

The trickle-charge current can be reduced to less than C/16 using the circuit in Figure 7. In trickle charge, some of the current will be shunted around the battery, since Q2 is turned on. Select the value of R7 as follows:

 $R7 = (V_{BATT} + 0.4V) / (I_{TRICKLE} - I_{BATT})$ 

where VBATT = battery voltage when charged ITRICKLE = MAX712/MAX713 trickle-charge current setting

IBATT = desired battery trickle-charge current

#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers



Figure 7. Reduction of Trickle Current for NiMH Batteries (Linear Mode)

#### **Regulation Loop**

The regulation loop controls the output voltage between the BATT+ and BATT- terminals and the current through the battery via the voltage between BATT- and GND. The sink current from DRV is reduced when the output voltage exceeds the number of cells times  $V_{\rm LIMIT}$ , or when the battery current exceeds the programmed charging current.

For a linear-mode circuit, this loop provides the following functions:

- 1) When the charger is powered, the battery can be removed without interrupting power to the load.
- If the load is connected as shown in the *Typical* Operating Circuit, the battery current is regulated regardless of the load current (provided the input power source can supply both).

#### Voltage Loop

The voltage loop sets the maximum output voltage between BATT+ and BATT-. If  $V_{\text{LIMIT}}$  is set to less than 2.5V, then:

Maximum BATT+ voltage (referred to BATT-) =  $V_{LIMIT} x$  (number of cells as determined by PGM0, PGM1)

VLIMIT should be set between 1.9V and 2.5V. If VLIMIT is set below the maximum cell voltage, proper termination of the fast-charge cycle might not occur. Cell voltage can approach 1.9V/cell, under fast charge, in some battery packs. Tie VLIMIT to VREF for normal operation .

With the battery removed, the MAX712/MAX713 do not provide constant current; they regulate BATT+ to the maximum voltage as determined above.

M/IXI/M

#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

The voltage loop is stabilized by the output filter capacitor. A large filter capacitor is required **only** if the load is going to be supplied by the MAX712/MAX713 in the absence of a battery. In this case, set C<sub>OUT</sub> as:

 $C_{OUT}$  (in farads) = (50 x I<sub>LOAD</sub>) / (V<sub>OUT</sub> x BW<sub>VRL</sub>)

where BW<sub>VRL</sub> = loop bandwidth in Hz (10,000 recommended)

COUT > 10µF

 $I_{LOAD}$  = external load current in amps  $V_{OUT}$  = programmed output voltage

(VLIMIT x number of cells)

#### **Current Loop**

Figure 6 shows the current-regulation loop for a linearmode circuit. To ensure loop stability, make sure that the bandwidth of the current regulation loop ( $BW_{CRL}$ ) is lower than the pole frequency of transistor Q1 (f<sub>B</sub>). Set  $BW_{CRL}$  by selecting C2.

> $BW_{CRL}$  in Hz = gm / C2, C2 in farads, gm = 0.0018 Siemens

The pole frequency of the PNP pass transistor, Q1, can be determined by assuming a single-pole current gain response. Both fT and  $B_0$  should be specified on the data sheet for the particular transistor used for Q1.

 $f_B$  in Hz = fT / B<sub>0</sub>, fT in Hz, B<sub>0</sub> = DC current gain

Condition for Stability of Current-Regulation Loop:

BWCRL < fB

The MAX712/MAX713 dissipate power due to the current-voltage product at DRV. Do not allow the power dissipation to exceed the specifications shown in the *Absolute Maximum Ratings*. DRV power dissipation can be reduced by using the cascode connection shown in Figure 5 or by using a switch-mode circuit.

Power dissipation due to DRV sink current = (current into DRV) x (voltage on DRV)

#### Voltage-Slope Cutoff

The MAX712/MAX713's internal analog-to-digital converter has 2.5mV of resolution. It determines if the battery voltage is rising, falling, or unchanging by comparing the battery's voltage at two different times. After power-up, a time interval of tA ranging from 21sec to 168sec passes (see Table 3 and Figure 8), then a battery voltage measurement is taken. It takes 5ms to perform a measurement. After the first measurement is complete, another tA interval passes, and then a second measurement is taken. The two measurements are compared, and a decision whether to terminate charge is made. If charge is not terminated, another full two-measurement cycle is repeated until charge is terminated. Note that each cycle has two  $t_{\mbox{\scriptsize A}}$  intervals and two voltage measurements.

The MAX712 terminates fast charge when a comparison shows that the battery voltage is unchanging. The MAX713 terminates when a conversion shows the battery voltage has fallen by at least 2.5mV per cell. This is the only difference between the MAX712 and MAX713.

#### **Temperature Charge Cutoff**

Figure 9a shows how the MAX712/MAX713 detect overand under-temperature battery conditions using negative temperature coefficient thermistors. Use the same model thermistor for T1 and T2 so that both have the same nominal resistance. The voltage at TEMP is 1V (referred to BATT-) when the battery is at ambient temperature.

The threshold chosen for THI sets the point at which fast charging terminates. As soon as the voltage-on TEMP rises above THI, fast charge ends, and does not restart after TEMP falls below THI.

The threshold chosen for TLO determines the temperature below which fast charging will be inhibited. If TLO > TEMP when the MAX712/MAX713 start up, fast charge will not start until TLO goes below TEMP.

The cold temperature charge inhibition can be disabled by removing R5, T3, and the  $0.022\mu$ F capacitor; and by tying TLO to BATT-.

To disable the entire temperature comparator chargecutoff mechanism, remove T1, T2, T3, R3, R4, and R5, and their associated capacitors, and connect THI to V+ and TLO to BATT-. Also, place a 68kQ resistor from REF to TEMP, and a  $22k\Omega$  resistor from BATT- to TEMP.

Some battery packs come with a temperature-detecting thermistor connected to the battery pack's negative





terminal. In this case, use the configuration shown in Figure 9b. Thermistors T2 and T3 can be replaced by standard resistors if absolute temperature charge cutoff is acceptable. All resistance values in Figures 9a and 9b should be chosen in the  $10k\Omega$  to  $500k\Omega$  range.

#### Applications Information

#### Switch-Mode Operation

For applications where the power dissipation in the pass transistor cannot be tolerated (ie., where heat sinking is not feasible or is too costly), a switch-mode charger is recommended.

Switch-mode operation can be implemented simply by using the circuit of Figure 19. The circuit of Figure 19 uses the error amplifier at the CC pin as a comparator with the 33pF capacitor adding hysteresis. Figure 19 is shown configured to charge two cells at 1A. Lower charge currents and a different number of cells can be accommodated simply by changing RSENSE and PGM0–PGM3 connections (Tables 2 and 3).

The input power-supply voltage range is 8V to 15V and must be at least 2V greater than the peak battery voltage, under fast charge. As shown in Figure 19, the source should be capable of greater than 1.3A of output current. The source requirements are critical because if violated, proper termination of the fastcharge cycle might not occur. For input voltages greater than 15V, see the MAX713SWEVKIT data sheet.



Figure 10. Sony Radio AC Adapter AC-190 Load Characteristic, 9VDC 800mA



Figure 9a. Temperature Comparators



Figure 9b. Alternative Temperature Comparator Configuration

#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

The voltage-slope, fast-charge termination circuitry might become disabled if attempting to charge a different number of cells than the number programmed. The switching frequency (nominally 30kHz) can be decreased by increasing the value of the capacitor connected between CC and BATT-. Make sure that the two capacitors connected to the CC pin on the MAX712/MAX713 and that their leads are of minimum length. The CC node is a high-impedance point, so do not route logic lines near the CC pin. The circuit of Figure 19 cannot service a load while charging. Order the MAX713SWEVKIT-SO for quick evaluation of

Order the MAX713SWEVRIT-SO for quick evaluation of the MAX712/MAX713 in switch-mode operation. For more information on switch-mode operation and ordering information for external components, order the MAX713EVKIT data sheet.



Figure 11. Sony CD Player AC Adapter AC-96N Load Characteristic, 9VDC 600mA



Figure 13. 3 NiMH Cells Charged with MAX712

14

#### **Battery-Charging Examples**

Figures 13 and 14 show the results of charging 3 AA, 1000mAh, NiMH batteries from Gold Peak (part no. GP1000AAH, GP Batteries (619) 438-2202) at a 1A rate using the MAX712 and MAX713, respectively. The *Typical Operating Circuit* is used with Figure 9a's thermistor configuration.

DC IN = Sony AC-190 +9VDC at 800mA AC-DC adapter PGM0 = V+, PGM1 = REF, PGM2 = REF, PGM3 = REF R1 = 200 $\Omega$ , R2 = 150 $\Omega$ , RSENSE = 0.25 $\Omega$ 

 $C1 = 1\mu F$ ,  $C2 = 0.01\mu F$ ,  $C3 = 10\mu F$ ,  $V_{LIMIT} = REF$ 

R3 =  $10k\Omega$ , R4 =  $15k\Omega$ T1, T2 = part #14A1002 (Alpha Sensors: 858-549-4660) R5 omitted, T3 omitted, TLO = BATT-



Figure 12. Panasonic Modem AC Adapter KX-A11 Load Characteristic, 12VDC 500mA



Figure 14. NiMH Cells Charged with MAX713

Linear-Mode, High Series Cell Count

**Efficiency During Discharge** 

The absolute maximum voltage rating for the BATT+ pin

is higher when the MAX712/MAX713 are powered on. If

more than 11 cells are used in the battery, the BATT+

input voltage must be limited by external circuitry when

The current-sense resistor, RSENSE, causes a small

efficiency loss during battery use. The efficiency loss is

DC IN is not applied (Figure 15).

#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

significant only if R<sub>SENSE</sub> is much greater than the battery stack's internal resistance. The circuit in Figure 16 can be used to shunt the sense resistor whenever power is removed from the charger.

#### Status Outputs

Figure 17 shows a circuit that can be used to indicate charger status with logic levels. Figure 18 shows a circuit that can be used to drive LEDs for power and charger status.



Figure 15. Cascoding to Accommodate High Cell Counts for Linear-Mode Circuits



Figure 16. Shunting R<sub>SENSE</sub> for Efficiency Improvement



Figure 17. Logic-Level Status Outputs



Figure 18. LED Connection for Status Outputs

MIXIM



#### NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers

Figure 19. Simplest Switch-Mode Charger

16

\_\_\_\_\_

TEMP RANGE

0°C to +70°C

 $0^{\circ}$ C to +70°C

0°C to +70°C

-40°C to +85°C

-40°C to +85°C

-55°C to +125°C

Dice\*

PART

MAX713CPE

MAX713CSE

MAX713C/D

MAX713EPE

MAX713ESE

MAX713MJE

#### **NiCd/NiMH Battery Fast-Charge Controllers**



TRANSISTOR COUNT: 2193 SUBSTRATE CONNECTED TO V+

(2.032mm)

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.

17 Maxim Integrated Products, 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA 94086 (408) 737-7600

© 2002 Maxim Integrated Products

Printed USA MAXIM is a registered trademark of Maxim Integrated Products. MAX712/MAX713

#### Bijlage J

#### Top & bottom layer hulplader



#### Bijlage K

#### Handleiding SuperSax Drive



•: FDC Fuse Type: F=Quick-acting M= Medium time-lag T=Time-lag External forced cooling required
 Recommended DC power supply

\*: Peak current= x 1second

**\* AXOR** IND. A COMPLETE LINE OF MOTORS AND SERVODRIVES **\*** 



MOTORS & DRIVES **AXOR INDUSTRIES**<sup>®</sup>

Stazione,5 - 36054 Montebello Vic.no - Vicenza - Italy e: (+39) 0444 440441 (a lines) - fax: (+39) 0444 440418 site: www.axorindustries.com - e-mail: info@axorindustries.com

The MICROB PLUS Series of amplitters are marked CE because they conform to European Directives for	Index
Electromagnetic Compatibility and Low Voltage.	
· ·	1) Description
This manual describes the mechanical and electrical	- - - - - - - - - - - - - - - - - - -
characteristics of the MicroB Plus servoamplifier	1.0 Secunty Standards
series. It is important that the installation procedures	1.1 Introduction and Options
are only performed by gualified personnel in	1.2 Technical Data
accordance with local safety guidelines.	1.3 MicroB Plus Description
Whoever installs the equipment <u>must</u> follow all of the	1.4 Drive Dimensions
technical instructions printed in this manual.	1.5 Drive Label Description
For more information, please contact AXOR's	1.6 Connections
technical department.	1.7 Signal Inputs and Outputs14-17
	1.8 Power Supply Inputs and Outputs18
	2) Indicator I.F.Ds and Remilations
	Z.U Potentiameter Adjustments
	2.1 Protections
	2.2 Indicator LEDs
	3) Installation
	3.0 Installation Notes
	3.1 Ventilation 23
85	3.2 Power Supply Construction and Rating
	3.3 Multiple MicroB Connections
	3.4 Ground and Shield Connections
	3.5 Istructions for EMC Requirements
	3.6 Example of MicroB Plus Connections
	3.7 Speed Reference
	3.8 Current Reference
	3.9 Current Output Limitation
	3.10 Enabling with (positive/negative) Logic41
and the second sec	3.11 Encoder + Hall Connections
All richte recented Reproduction in whole or in part is prohibited	

All rights reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without prior written consent of the copyright owner. All specifications are subject to change without prior written consent of the copyright owner. All specifications are subject to change without prior notification. Ver. MCBP-GB ver.24/07/2002

2

	General Description
	1.0 Security standards
<ul> <li>3.12 Hall Signals Connections</li></ul>	Danger Sign This symbol is used where security directives should be adhered to, where substantial risks are involved, and where life endangerement or injury could occur.
<ul> <li>4) Start up procedures</li> <li>4.0 Preliminary Checks</li></ul>	Installers must scrupulously adhere to prescribed directives and must communicate them to the users.
5) Adjustments 5.0 Personalization and Settings	Warning of Current being present This symbol warns the user/installer to pay particular
5.1 Adjustments on Personalization Base	attention to the presence of dangerous current (up to
5.3 Speed Adjustments with Encoder Feedback 58-59	It's recommended to always remove drive from the
5.4 Speed Adjustments with Armature Feedback 60-61 5.5 Speed Adjustments with Hall Effect Feedback 62-63	power supply net before working on the drive.
5.6 Speed Balance Adjustments (Offset)63	Warning
5.7 Nominal and Peak Current Adjustments	This symbol is present in all particularly important
5.9 Dynamic Constant Adjustments	points. It's used where the intent is to highlight useful
6) Notes	considerations, prescriptions, indications, and the correct execution procedures of every type of
0.0 UIIKIIOWII MOUOF FIOCEGUTE	intervention and prevention of damaging both systems and drives.
7.0 Troubleshooting71	General Security Directives
Conformity Declaration72	Along with what is prescribed in the manual, pay attention to the security directives for prevention of accidents and risks.
	Always remove the power supply (disable) from both the system and the drive prior to any type of intervention on electric or mechanical parts.
Ю	4

X

70

General Description	General Description
	1.1 Introduction
The Microb Plus must only be installed by trained, qualified and authorized personnel.	The MICRO B Brushless Servo Amplifier is a compact full DC four quadrant drive. The (MOSFET)output power stage is controlled by a 22 Khz PWM (Pulse With Modulation)signal that
Any intervention or modifications effected on Microb Plus, and their components or accessories, constitutes loss of guarantee.	allows it t drive small to medium sized brushless servo motors (up to 6Nm) where high dynamic performance and precise
Isolate the drive from the power supply net before removing it (by removing fuses or turning off the principal power switch).	The MICROB only requires a single power supply to operate and develops all needed voltages on board to make power supply design easy and convenient The immit voltage is from 20 to 270
The drive is equipped with electronic protections that disactivate it in case of abnormalities, therefore the motor becomes uncontrolled; this could cause the stoppage or idle motor (for a period determined by the type of system used).	Vdc max "See Tecnical Data". (Chapter 3 describes how to design a proper supply.) Closing the velocity feedback loop to motor may be done in several different ways to accommodate most applications. Three types of velocity feedback are available with these drives. Refer
In some cases the drive could restart automatically when the reason for blockage is corrected. In this case, some systems could be damaged or destroyed endangering the welfare of personnel.	to Chapter 5 for the setup procedures that will effect your application. Feedback Types: -Hall effect + encoder. -Internal PWM (Armature).
In this case the user must remove the drives' and systmes' power supply so that the motor cannot automatically restart or prevent such an event in the controller's program.	-Hall effect -Pwm+Direction Two inputs are present for the disabling of clockwise and counter- clockwise motor rotation (+LM SW,-LM SW).
The Microb Pus' terminals must always be grounded as per the instructions in this manual.	The possibility to completely adjust the Lynamic Constant exists by inserting new values "as opposed to the standard mounted values". The insertion of various prearranged operational drive values
	are easily realized by opening and closing solder points. The intervention of drive protections are all visible with LEDs on the front of the drive.
	The nominal current, as well as peak current is adjusted through resistance on the base.
	The operating temperature is from 0 to $+40$ °C (32° to $104^{\circ}$ F). In accordance with the current size and model, supplemental
	ventilation can be requested.

Bijlage K. Handleiding SuperSax Drive

ഹ

Contraction of the second	
General Description	

## Characteristic and Options

The speed feedback present on the Microb Plus are highlighted.

Speed Feedback from Encoder
Speed Feedback from Armature
Speed Feedback from Hall Effect Signals
Speed Feedback from Input (Pwm + Dir)
Speed Feedback from Resolver o
Speed Feedback with Tachogenerator
Version with Booster

<b>\$</b>	\$	¢	
External Power Supply + Brake for plus .60	External Power Supply + Brake for plus .140	rternal Power Supply + Brake for plus .200	

- $\bullet =$  Standard.
- $\Box$  = Standard on sizes 14/28 ,20/40.
- $\diamond \mathbf{0} = \text{Optional}$  (available from 02/2000).

= Micro 8 Dec ---

## 1.2 Technical Data

MICROB	PLUS VOLT	AGE	
Microb Microb Microb	200	0 - 80 Vdc° 0 - 180 Vdc° 0 - 270 Vdc°	Note a)
MICROB	PLUS CURI	rent sizi	ES
Size 2.5/5 5/10 8/16 10/20 14/28** 20/40**	I nom . () ++ 2.5 ++ 5 ++ 10 ++ 10 ++ 20	A) – pea + <b>10</b> + <b>13</b> + <b>14</b> + <b>16</b> + <b>16</b> + <b>16</b>	ak(A)

\* Minimum and maximum voltage.

\*\* Sizes 14/28 e 20/40 have an additional booster radiator. Note a) The Microb plus 60 is produced only in sizes 14/28 e 20/40.

TECHNICAL DATA CHARACTERISTICS

PWM frequency	22Khz
Operating Temperature	32œ-104ʷF (0∞+40∞C)
Storage Temperature	1200-15800F (-1000+7000C)
Drift	+/-10uV Degree F
Analog inputs	+/-10Vdc
Current Monitor (Imot)	+/-7Vdc = (PK. curr.)
Encoder and Hall Signal	
Power Supply (+V)	+5/+12Vdc (250 mA Max)
Auxiliary power supply	+/-10Vdc (4mA Max.)
Encoder Max.Freq.	250Khz Max.
Band Width	2.5Khz
Weight Microb plus	26.45 oz (750 gr.)
Weight Microb plus w/booster	44.1 oz (1250 gr.)
Humidity	10/95% non-condensing

~









General Description		Ger	neral Descri	otion
1.6 Connections		1.7	Signal inputs	s and outputs
	On the TACHO test point it	The	following is th	e Signal Connector Description.
	is possible to see the drives frequency/internal voltage simulated ouput. Output from 0 a +/-8V corrisponds to zero at max. velocity. At this point it will be possible to analyze the signal when one of the following velocity feedbacks	-	IMOT(OUT).	Current Monitor,Range: +/-7 Vdc Output in Volts, the current in the motor windings. Since current is proportional to torque, this output may be used to monitor the torque the motor is producing.(+/-3.5Vdc=nominal current, +/-TVdc=Peak current)
	are enabled: i Encoder feedback i Hall signal feedback i PWM+Dir feedback	~	OK(OUT)	Drive OK, Open Collector output 50mA Max. (Normally closed, opens when in protection mode)
38 米 単 単 58 米 単 単 58 米 単 単 58 米 単 58 米 単 58 米 58 米 58 米 58 米 58 米 58 米 58 米 58 米			TPRC(IN) (OUT)	This signal can be used in 3 distinct modes:
				<ul> <li>A) Motor Current Limit Mode:</li> <li>Soldering point S15 open S16 closed.</li> <li>Applying a signal between zero and +10V you receive the current limitation output from zero to max. drive size.</li> </ul>
				Mcb 10/20A+5V limits the current to +/-10A. Mcb 14/28A+3.2V limits the current to +/-9A.
				Ving= <u>10 x I required</u> I peak
	13	14		Continued

Ge	neral Descri	ption Ministeria 0	Gene	eral Descri	btion
			Cont	inued	
	B) Moto S15 clo	or Current Limit Mode: sed S16 open.			
	A moto resistor	current Limit mode connect an external to GND (pin 4) reduces the maximun	œ	+REF(IN)	Reference Positive differential input. (Velocity command)
	current the TPF A 47Kol	. Connect a 1/4W o 1/8W resistor between {C and GND terminals. am resistor reduces the current by 50%.	6	-REF (IN)	Reference Negative differential input. (Velocity command)
	Note: T C) Curr S15 clos Range:	he drive velocity loop remains active. ent Reference (Torque Input): sed, S16 open +/- 10V, which corresponds to the drives	10	CHA(IN)	Encoder input Channel A High logic level from +3,2V to +24Vdc. Low logic level <1,5V.
	ln this disable	mode the velocity loop is automatically d .	=	CHB(IN)	Encoder input Channel B High logic level from +3,2V to +24Vdc. Low logic level <1,5V.
4	GND	Drive Common Ground. Corrisponds to power supply's negative -AT input.	12	+V(oUT)	Power Supply +5Vdc 250mA Max.=(Solder bridge S17 closed). Power Supply +12Vdc 250mA
	+10V(OUT)	Power Supply +10Vdc 4mÅ Max.	13	GND	Drive Common Ground. Corrisponds
و	-10V(OUT)	Power Supply -10Vdc 4mÅ Max.			to power supply's negative -AT input.
~	ENABLE(IN)	Drive Enable. Range +8Vdc to +24Vdc. It's also possible to enable the drive with negative logic by connecting a GND input (to enable such a function, close solder bridges S12-S13). Chapter 3.10	14-15-	16 HALL	<b>A-B-C (IN)</b> Hall Sensor inputs from the motor. Each input has a pull-up resistor of 1 Kohm to +5V. High logic level>3,2V , Low logic level<1,5V.

General Description	Continued

+LM SW (IN) Logic input that , disable with positive rotation (CW) of motor.(Motor limit). Such a function is enabled, closing soldering point S18 and connecting a positive Voltage (between +5Vdc e +24Vdc)on said input. When the

11

rotation blockage intervenes in a

clockwise sense. Chapter 3.14

voltage on said input is absent, motor

-LM SW (IN) Logic input that , disable with positive rotation (CW) of motor.(Motor limit). Such a function is enabled, closing soldering pointS18 and connecting a positive Voltage (between +5Vdc e +24Vdc)on said input. When the current on said input is absent, motor rotation blockage intervenes in a counter-clockwise sense.Chapter 3.14

**1**8

General Description

# 1.8 Power Supply Inputs and Outputs

+AT	(Input).	Positive continuous power supply.
-AT	(Input).	Negative Continuous power supply. Common Zero Signal GND
n	(Output).	Motor connection U phase
Ν	(Output).	Motor connection V phase
≥	(Output).	Motor connection W phase

77

S
Ξ
ē
Ξ
st
Ë
÷
-



## 2.0 Potentiometer Adjustments



#### Motor speed adjustement.Use this motor speed. Turn clockwise (cw) to potentiometer to adjust the maximum increase the motor speed and counterclockwise (ccw) to reduce the motor speed. The range of the adjustment is +/-20%.Note: Potentiometer is disabled in torque mode.

#### BIL Offset

adjustment. Adjust this potentiometer to cancel any motor (Max ref. compensation +/- 200mV). speed when the Ref. input is 0 Vdc.

#### ≥

Gain potentiometer.Use this potentiometer to increase or With a clockwise turn (cw)we increase the gain of the PI decrease the dynamic behavior of the motor

'speed stage", therefore, improving the response.Note: Potentiometer is disabled in torque mode.

#### DER

Derivative potentiometer. Turning this potentiometer clockwise decreases motor overshoot. Note: Potentiometer is disabled in torque mode.

#### ACC

the acceleration and deceleration ramps. Turning the (ramp). With this potentiometer we can adjust the slope of The solder bridges S1-S3 select the acc/dec function potentiometer clockwise (cw) increases the ramp time rom 0,1 to 1 Sec (with 10 V reference)

### Continued

19

## 

### Continued

Adjustments

It is also possible to increase or decrease the pre-set max acc/dec ramp time by opening solder bridge S2 and inserting resistance RAMP.

(See chapter RAMP TIME ADJUSTMENT)





2.1 Protections

Adjustments

79

-Short circuit

	Installation
	3.2 Power Supply Construction and Rating
mounting inside a box. I be found in chapter 1.4 must be fixed vertically	WARNING:Use only Un-regulated power supplies with the MicroB Drive.The power supply is used to absorb the motor's BEMF. Als, with this scheme, no braking resistor
efficient cooling by the he box must satisfy the	are needed. The MicroBPlus was designed to generate all required supply voltages in the Drive, so only a simple single voltage power
arantee that inside the en 0°C and +40°C with ihout condensation	supply is needed. Use the schematic and formulas provided below to design a supply that will be trouble-free and handle the power needed by the drive.
mechanical vibrations in ling any kind of metallic ficrob Plus.	
om the heat source.	<b>)</b>
a predisposition for op- ageways.	Transformer: A single ground is used in the drive that is connected to -AT, so DO NOT USE AN AUTO TRANSFORMER Tise a standard heavy duty nower
tically on the bottom to s working temperature	transformer without center taps on the secondary as shown in the schematic above. The VA rating should be 10% greater
40° C. Supplementary ardance to size. See the	than the power needed by the system to insure cool operation. DO NOT CONNECT ANY TRANSFORMER PRIMARY, OR SECONDARY SIGNALS TO GROUND.
0/20 14/28 20/40	Keep the +AT and -AT wires, between the power supply and the MicroB, as short as possible.
a N BV I B BV I BV BV	<b>Voltage:</b> The primary voltage depends on what is available locally for a single phase. The secondary voltage is
b Plus. ble with Microb Case PM1) apter 1.5) (See	calculated from the motor's voltage at the required operating speed. The secondary voltage V2 is:
+ supplementary ventilation. <b>23</b>	$24 \qquad V2(Dc) = \frac{VM}{0,8}$

**3.0 Installation Notes** 

Installation

"Drive Dimensions". The Microb Plus on the bottom of the box to guarantee drive itself. The positioning inside th The mounting hole measurements can The Microb Plus is predisposed for following dispositions:

**ï** For best results from drive gu humidity between 10% and 95% with electrical box a temperature betwe

i Keep the drive from excessive the electrical box.

residue from falling inside of the M i During installation, insure avoid

i Maintain a distance of 80mm fro

portune air filtering holes or passe The electrical box must have :--

## 3.1 Ventilation

guarantee efficient cooling. The drives must be between  $+0^{\circ}$  C and +4ventilation may be requested in acco TheMicrob plus must be affixed ver table below.

Model	2,5/5	5/10	8/16	10/20	14/28	20/40
60	n.a	n.a	n.a	n.a	N	BV
140	N	Z	Z	N	В	ΒV
200	N	N	Z	N	BV	ΒV
ombination	table of di	ssipators p	resent on <b>N</b>	Aicrob Plus.		

Unavailable size with Microb Plus (Availa ő

n.a = B = =

Microb Plus with normal radiator (See Cha Microb Plus with added radiator Booster

Chapter 1.4) B/V = Microb Plus with added radiator Booster



Reference of	
Installation	

# Power Supply Construction and Rating (continued)

a capacitor is used to filter the straightened voltage from the Where V2 = DC voltage present on capacitor without load. Such power supply and to recover energy during the motor's braking phase.

## Discharge resistor

helps in bringing the supply voltage down quickly. This filter capacitor when power is removed from the supply. This resistor is mounted directly across the filter capacitor. To calculate the correct value and wattage use the formula The bleeder resistor is used to drain the charge from the below.





### Installation

# Power Supply Construction and Rating (continued)

#### Fuses

the transformer itself. They need to be of the slow blow type fuse (F1) on the hot leg of the AC input power and the Fuses are required on both the primary and secondary of the transformer to protect against harm to the system and to handle current in-rush at power-up. Locate the primary before the rectifier. Use the formula below to calculate the secondary fuse (F2) on the + side of the secondary output, correct values for both fuses. Where:

x 1,1	=3,16A =5A =10A =16A =26A =25A
former ary) ac	2,5/5 5/10 8/16 10/20 14/28 20/40
= (VA) tras Vac (prim	X MCB X MCB X MCB X MCB X MCB X MCB X MCB
F 1 =	F2

A separate fuse F2 is required for each drive in a multi-axis system



IA1 <u>ک</u>

+AT A

A 5

W i r i n g Technique Incorrect

MicroB

length.

Ā A

Ā A

FAT 

**Use This** 

MicroB



tions

3.3 Multiple Connecti

30

	Installation
	3.5 Instructions for EMC Requirements
	The regulated standard in accordance with conformity of electromacmetic is summarized in Remulation CELEN 61800
ind connections are as short	crocupingirence is summaried in regardion out of 0000 (complete).
inches (20 cm). The figure	Microb Plus conformity is assured only if it is installed following
nals fixed to the drive's base	the precise assembly criteria expressed below. The
educes disturbances in the	fundamental assembly characteristics are summarized bolow:
e external (not inserted in a	1) Use of appropriate network to must use the transformer input), from disturbances conducted or produced by the drive.
ction 1.5 mmg (0,059 square	A series of filters released by AXOR are available for this
must he shielded. The cable	purpose. 2) Ilse of shielded cables both for nower connection (to the
body of the motor.	transformer and the motor), and for signal connection (also to
he motor power cable, the U	the controller).
ether.	3)Using the division of cables technique. Separate power
	cables from signal cables.
ind additional installation	4) The correct ground connection of predisposed parts.
:quirements.	Network Filters
	Of all of the mentioned system, the use of network filters is
	without a doubt fundamental in soppressing disturbances.
	Axor, after tests, has recognized some good solutions, about
	its products.
	Concerning equipment where are mounted other sources, Axor
	can't evaluate the global equipment. In the following page, are
	reported some foundamental configurations, with the
	suggested filters.
	We did an agreement with Schaffner and Timonta products.
	The market offers other product with the same characteristics,
	but not yet checked from Axor.
	When other products will be checked and approved, it will be notified
	Tollow concred on commule chant the voice loved with and
	rourow reported an example about the noise rever with and without filter as explained in the following pages.
גן	37
->	02

Description:

Installation

It is important that the drive's ground connections are as s as possible and no longer than 8 inches (20 cm). The fig shows the connection using terminals fixed to the drive's b (bottom). This connection also reduces disturbances in net.

The Motor ground cable has to be external (not inserted in a multipolar cable) with minimun section 1.5 mmq (0,059 square inch).

Drive power and signal cables must be shielded. The cable shields must be connected to the body of the motor.

Shelded cable is not required for the motor power cable, the U V W cables should be twisted together.

On the follwoing page you'll find additional installation

	Installation	
(continued)	Instructions for EMC	C requirements (continued)
ct lines in some of the e on page 34-35. These ad TIMONTA.	For filter connection (c frequency) consideri leakage current toward	livert to building ground the unwanted ng such devices can produce small is building ground (this current amounts
istics may be sufficient, by AXOR.	is necessary to conne connecting the power Recarding current 1	of the filter to building ground prior to supply.
the current absorption mends connecting the r. This method, besides	considered when sizi undesired interventions can be found below.	ng differential devices, thus avoiding s. The precise data relative to our filters
. result, also allows for ng a lot less current,	Mechanical and Elect	trical Characteristics
s advantage of the dimensions to be used	Below is a table show recommended filters. differential adjustemen with operational tempe	ing the electrical characteristics of our . Pay particular attention to leakage, its, and nominal current in accordance erature.
	Type Current (A)	Leakage Curr. Power Loss Weight (mA) W Lb.
imary	SCHAFFNERFN355 3(40°C) Thonta Fanu4 4(40°C)	0.07 (400V 50Hz) 1.5 0.55 <0.5 (400V 50Hz)
r the necessary filter.	Below fundamental n are shown.	nechanical characteristics of the filters
r. iion in watts(VA)		
: 2+ect.		The SCHAFFNER FN355-3 Series filters are furnished with Fast-on connectors for both input and output.
Continued		Max voltage : 420Vac Max current : 3A @ 40°C Working temperature: -25° +85°C
33	34	

Installation

Instructions for EMC requirements

main configurations are shown in the table The recommended filters for the produfilters are produced by SCHAFFNER ar

but have not been tested or evaluated by Other products with the same characteri

filter before the power supply transformer offering better disturbance soppression the use of filters capable of supportin consequetly they're cheaper (take In choosing the filter, we also considered of its connecting devices. AXOR recomi transformer's ratio). Follow the formula below for the filter d with the MicroB Plus.



Where:

I=is the nominal current in Amperes for Vprimary= is the voltage of Transforme Ptot=is the motor's max. power absorpt Ptot=VA=Motor power1+motor power



Net filter

۶ļ

Ē

ww 37 ww 38

**Do Not** connect a supply exceeding 24Vdc. Connect the Power Supply GND externally using connector 4. This output has a rating of 50mA Max.

35

the same channels (keep separate). Avoid twisting, crossing, etc. If

crossing is inevitable, try to cross at a 90 degree angle. Where

possible use metallic channels connected to ground

-Power and Command/Signal condotors should not be placed in

drive.

|--|



+24V EXT O 

7





Bijlage K. Handleiding SuperSax Drive

87

Installation

Installation	Installation
3.9 Current Output Limitation	Current Output Limitation (continued)
With a voltage output (ex. from a CNC) <b>only positive</b> between 0V and +10Vdc, you have a limitation of output current (from zero to max. size) drive's. For this configuration the soldering point S15 is open, S16	By connecting a resistance load at TPRC (ex. a potentiometer), you'll obtain the limitation current output. For this configuration soldering point \$15 is closed , \$16 is open.
closed. The speed ring remains active and uses the input reference signal.	Connect a resistence of 1/4W - 1/8W between the TPRC terminal and the GND terminal, or a potentiometer connected as in figure 5.
Example: Mcb 10/20A+5V limits the current to +/-10A. Mcb 14/28A+3.2V limits the current to +/-9A.	With external Kesistance of 4/K you limit the current at 50% of I Max. of size. Example: Math Dive 10/2015 1776thm limite the current to 1/101
The current polarity functions as speed ring output.	
4)	5)
11 MOT 2 OK 2 OK 4 GUD 5 CK 6 -10V 7 ENABLE 13 GUD 13 GUD 13 GUD 13 GUD 13 CHB 13 CHB 14 HALL A 14 CHB 13 CHB 14 CHB 13 CHB 14 CHB 13 CHB 14 CHB	18 -TW 2M 14 +TW 2M 14 +WTT C 14 +WTT C 14 +WTT C 14 +WTT C 14 +WTT C 14 +WTT C 14 +WTT C 15 +A 14 +WTT C 14 +
	The potentiometer of the output current limitation 470K-1M Ohm.
In this case the loop of <u>internal velocity remains</u> warning	In this case the loop of <u>internal velocity remains</u> warNG
39	40

M








Installation

## Power supply +V (terminal 12)

The drive can supply voltage to the connector +V equal to +5Vdc with point S17 closed or +12Vdc with S17open). Setting predisposed by manufacturer :+ 5Vdc .



Bijlage K. Handleiding SuperSax Drive

The drive's supply is able to supply 250 mA for the encoder and Hall effect sensors.

Care should be taken when using both, measure the current draw so as not exceed the 250mA limit. If powering both does exceed 250mA, then use the controllers +5Vdc output for the encoder. Be sure to also connect ground from the controller to the drive to complete the circuit. If isolation is required between the drive and controller, consult the factory for the correct wiring.



WARNING: Hall sensors must be supplied using the internal +V of the Microb (connector 12). If an external supply is used, open solder bridge S11.



SSO

11)

Installation

92

48

Installation	Installation
3.14 Limit Switch Input +/-	3.15 Power Connections
It's possible to enable clockwise (CW) and counter- clockwise (CCW) motor rotation by connecting the +LM SW and -LM SW inputs.	Power cable specification is recommended as follows: 1.5 square mm up to 8/16 2.5 square mm up to 10/20
They may be used to block motor rotation when the machines overflow contact is intercepted.	The U V and W drive outputs can be connected directly to the motor terminals.
The Enable input in regards to this input always has priority.	motors driven with armature inductance lower than 200uH, it is necessary to use 3 chokes connected in series with the motor. The amolifier itself is canable of driving motors with inductance
Open soldiering point S18 Then connect on said input a positive voltage (between	between 200uH and 40mH.
+5Vdc and + 24Vdc) coming from -for example two N.C.	
contacts. You may connect an external supply "combining negative" as well as from one of the supplies furnished on	
the Microb Plus. Function: At opening one of the following contacts you enable the motor rotation in the corresponding irrection.	Optional U
18 =NOT ENABLE =+/- LIMIT SW. ENABLE	
13)	
HB WIL B WIL B WIL C WIL B WIL C WIL B WIL C WIL	For some motors it may be necessary to alter the drive current loop. This is done by opening solder bridge S7 and inserting a
	RKI resistor on the personalization zone and a CkI capacity in accordance to the table below.
	Value         0,2-1,9         2-4,9         5-14,9         15-40         Motor Inductance Load           Cki         2.2nF         2.2nF         10nF         (mH)
	RKI     47K     220K     470K     1M       The factory configures the MICRO B PLUS for a (2-4,9 mH) inductance
49	50

Bijlage K. Handleiding SuperSax Drive

	Start up procedures
	<ul> <li>Powering up the drive.</li> </ul>
	Under normal conditions the green L.E.D. comes on after
nished with the following	approx. I second. If a Hall signal is missing or the Hall cells
the second se	are not powered the red AH L.E.D. will come on. Verify the
It of arrive corresponds to the	presence of said signals. Attention: Between shut down
ors are not mountea". 20A peak for 2 seconds. 10A	and the successive re-start you must wait until the drive is
	Prepare to power up the drive by first insuring that the
it for 3000 rpm at 10V ref. with	reference signal is zero =0V.
INC resistor = 12Kohm''	ATTENTION: If possible, in the case of piloting motor with
	a C.N.C. controller, make sure the manual reference with
	the calculated error corrections of the same are not
	inserted. (Space ring not inserted).
Plus into function:	<ul> <li>Power up the Enable input. (It's a good application norm</li> </ul>
n pre-adjusted for its motor and	to always supply the Enable command after the powering up
sheet, proceed with chapter on	the drive).
4	If the motor still has torque or rotates slightly, the encoder
djusted for its motor, first consult	channels and the signals coming from the Hall cells are correct.
and Settings" and Chapter 6.0	<ul> <li>Furnish the reference signal.</li> </ul>
	Increase the speed reference signal up to minimum value
	(approx. 1V) and observe the motors sense of rotation. If the
ver connection terminals are nd execute a visual check of	motor rotates contrary to what you require, shutdown and invert the + REF and -REF,
	<ul> <li>Reconnect the motor's shaft to the load and insert the</li> </ul>
	space ring of eventual controller. If at this point you still
v shaft and he vrevered to	have the same results as those verified before insertion and
r if romitrod (Marning: boon	the controller doesn't show errors, the system is regulated
n required. (Varinig. Reep wind/floor or attached to a	correctly.
ana/11001 01 anaciica 10 a	<ul> <li>Now execute standard working cycles verifying that no</li> </ul>
vith alternating power or insert	protections intervene.
	IN NOTE. The starting procedures require that would
agnet, msuring me avanable th a tester.	know the timing between the Hall signals and the warning microh plus

Start up procedures

Start up procedures

The standard drive is fur characteristics:

 Nominal and Peak currer drive size; "RIN and RIP resite Ex.: Microb Plus 140 10/20A

upon return.

Encoder speed adjustmer encoder of 1000 Imp/rev. "RE •

KV and DER positions are

## How to proceed

Two ways to place the Microb ]

- If the drive has already been has accompanying connection "Starting procedures".
- If the drive hasn't been pre-ac the chapter on "Personalization

### What to check

accurately closed/tightened ar Verify that all signal and pov the drive's cabling.

## 4.1 Starting Procedures

motor well fixed to the grc Remove load from moto quickly shut off power supply mechanical support). •

the corresponding thermal main power value by measuring wit Insert the fuses in series w

(Also see the connection sheet for Axor motors, or

the phasing procedures in chapter 6.0)

Adjustments	Adjustments	
5.0 Personalizazion and Settings	Personalizazio	n and Settings (continued)
Adjustment Zone (View)	All of the adjust	tments are located in the area behind the
A Soldering points A A A	potentiometers . 0.4" (10.16mm) J spaced a 0.2" (5 and radial lead (	The resistors mount on headers spaced at pitch and the capacitors mount on headers 0.08mm) pitch. Use 1/8 or 1/4 watt resistors capacitors.
	5.1 Adjusteme	ent components
	RENC	Encoder or Hall Effect resistor, Chapter 5.3 .
	RA	Armature Feedback resistor; Chapter 5.4
	RCA	Droop compensation for internal motor resistance (RI);Chapter 5.4
	RIN	Nominal drive current resistor; Chapter 5.7 .
0 0 0 0 0 0 0 0	RIP	Peak drive current resistor ; Chapter 5.7 .
o→ newc.→o Personalization base adjustments	GAIN	Changes static gain in the velocity loop. Open Solder bridge S6 and insert R GAIN if a change is required. Consult
If the drive isn't adjusted with the proper servomotor, follow		factory for the correct value.
these procedures. If changes need to made to the internal drive setting powering, please wait at least 10 seconds after the power has been removed and the OK LED is off. All of the personalizations are located inside of the MICRO B. To gain access to the adjustment pads and the solder bridges,	CDER	Derivative constant capacitor, increases the velocity loop derivative constant. Consult factory for the correct value.
unscrew (A), and remove the cover (B). (See figure above).		

Bijlage K. Handleiding SuperSax Drive

95

Continued

53

Adjustments		Adjustments
Adjustement c	omponents (Continued)	5.2 Solder Bridges
RKV- CKV	Resistor and capacitor values that respectively form the proportional/ integral network of the velocity Loop gain. Standard values are 100Kohm-47nF, there are disabled by opening Solder bridge S5.	<b>18 Solder Bridges</b> located on the left hand side of the drive are used to change internal and external functions on the MicroB Plus. Below are the descriptions of each solder bridge functions. Verify the corresponding solder bridge closings required by the drive. This Drive is factory set with the following solder bridge configuration.
RKI- CKI	Resistor and capacitor values that respectively form the proportional/ integral network of the current Loop.	
	Standard values are 220Kohm-2,2nF, they are disabled by opening Solder bridge S7.	<b>S1 e S3</b> Normally open. (See chapter 5.8 "Ramp time adjustment").
	Also see chapter 3.15 .	32 Normally closed. (See Chapter 5.8 "Ramp time adjustment").
RCF1-RCF2	Resistence adjustment values of drive frequency/mirrent The insertion of such	M Normally closed. If Open - disable the Encoder or Hall Effect speed feedback if selected.
	values permits changing the gain of said stages.	Solution Normally closed. If Open , install components for the Dynamic velocity costant CKV and RKV. (Standard constant RKV=100Kohm CKV= 47nF) Consult factory for prover use
CFV1-CFV2	Capacitor adjustment values of the drives integral frequency/current functions. The insertion of said values	So Normally closed. If Open - you must insert theNew GAIN resistor. (Static Gain). Standard value= 220hm
	increases ine ramp ume constant of said stages.	SI Normally closed. If Open - you must insert the Dynamic Constant CVI BVI on the perconalization base
		(Adjustments Reserved for Qualified Personnel Only!)



3.9)



adjustment.

Adjustments

Example:

98

60



(
نت
Φ
F
5
S.
Ξ.
÷
σ
$\triangleleft$
_





off (if present). This resistor is for adjusting the encoder scaling. This value is completely WARNING: Be sure to take the RENC resistor different from the formula used in Hall Effect Speed adjustment. WARNING: Rotate the KV and DER trimmers counter-clockwise (ccw) when using Hall Effect Signal Feedback.

Feedback. It is possible that such constants Note: The internal Frequency/Voltage constants are pre-set according to series, for the Encoder For additional information contact AXOR. require modifications.

# 5.6 Adjusting Speed Balance (Offset)



The MicroB is provided with a **BIL** potentiometer that allows the motor to be adjusted to zero speed when 0.0 Vdc is applied to the +REF.

With the reference input at Zero turn the BIL potentiometer Re-adjust the Bil trimmer to correct eventual system offset. (You may compensate +/- 200mV from reference input) until the motor stops moving.

Adjustments

MIGRO H Das

# 5.7 Nominal and Peak Current Adjust

refer to the chart below and select the correct resistor value The MicroB is pre-set to the nominal current rating of the to be fitted as RIN. Use the table below to select the correct drive, if a lower current is needed to match the motor used, value.

Nominal Cu	rren	t									
VALUE RIN in Kohm	*	56	33	18	10	6,8	4,7	3,3	2,2	1,5	1
Mcb 2,5/5(A)	2,5	2,3	2,2	2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0'9	0,7
Mcb 5/10(A)	ß	4,6	4,4	4,1	3,6	3,3	2,9	2,5	2,1	1,8	1,5
Mcb 8/16(A)	œ	Τ,4	Τ,1	6,6	5,9	5,3	4,7	4,1	3,4	2,9	2,4
Mcb 10/20(A)	10	9,2	8.8	8,2	Τ,3	6,6	5,8	5,1	4.2	3,6	e
Mcb 14/28(A)	14	13	12,4	11,5	10,3	9,2	8,2	$\mathbf{T},\mathbf{l}$	5,9	ß	4,2
Mcb20/40(A)	20	18,5	17, 7	16,5	14,7	13,2	11, 7	10,2	8,5	T,2	9
Note * = No res	sistor 1	noun	ted.								

To reduce the value of the peak motor current , it's necessary to mount RIP on the header located inside of the drive.Use the table below to select the correct value.

### Peak Current

VALUE RIP in Kohm	*	68	56	33	22	18	15	12	10	8,2	6,8
Mcb 2,5/5(A)	ß	4,8	4,6	4,3	4	3,8	3,5	3,3	3,1	2,8	2,5
Mcb 5/10(A)	10	9,7	9,3	8,7	8,1	Ζ,6	$\mathbf{T},\mathbf{I}$	6,6	6,1	5,6	5,1
Mcb 8/16(A)	16	15,5	15	14	13	12,2	11,5	10,6	9,8	6	8,2
Mcb 10/20(A)	20	19,2	18,7	17,5	16,2	15,2	14,3	13,2	12,2	11,2	10,2
Mcb 14/28(A)	28	26,8	26,1	24,5	22,6	21,2	20	18,4	17	15,6	14,2
Mcb20/40(A)	40	38, 7	37,5	35	32,5	30	28, T	26,5	24,5	22,5	20,5

Note \* = No resistor mounted.

Adjustments	Adjustments
5.8 Ramp time Adjustment	5.9 Dynamic Constant Adiustments
This function is enabled by solder bridges <b>S1, S3 (closed).</b> It allows adjustment of the ramp slope during both acceleration and deceleration.	Usually, these settings are made by the factory and do not need to be changed. Only re-tuning by KV and DER potentiometer is
Adjusting the ACC potentiomenter, located in front of the drive, clockwise (cw) increases the ramp time between 0,1 and 1S (It for a 10V reference). (See figure below)	required. If high inertia loads are present (ratio 3:1 between load and motor), it is necessary to set the proportional gain <b>"KV</b> "
	potentiometer and the derivative gain "UER potentiometer".
	The adjustment procedure must take place with the load connected to the motor.
It is also possible to modify the "range of the ramp" by opening solder bridge <b>S2</b> and mounting a resistor <b>(RAMP)</b> with the values	Connect a square wave $(0,5$ hz, $+/-1V)$ function generator to the input speed reference terminals.
shown in the table 2) below. 1)	Connect the "channel A" probe of the memory oscilloscope to the test point TESTI. (The ground of the probe must be
SI S2 S3 Function Range Note	connected to the GND of the atrive). Adjust the "DER and KV potentiometers".
<ul> <li>Ramp enabled 0,1-1 sec</li> <li>Ramp enabled By RAMP Adjusted by ACC pot</li> </ul>	Be sure that the load's motion doesn't create a safety risk. Apply power to the drive and start it.
2)	The load will begin to move alternatively; if possible
RAMP Resistor         680K         820K         1Mohm           TIME         0,2.2,6sec         0,3 - 3,2sec         0,4 - 3,9sec	Check the signals in the oscilloscope; the waveforms
	should be as shown on the next page.

<b>RAMP</b> Resistor	680K	820K	lMohn
TIME	0,2-2,6sec	0,3 - 3,2sec	0,4 - 3,

99

Adjustments		Notes and Indications
		6.0 Unknown Motor Procedure.
	Insufficient proportional gain.	A simple procedure to use if the motor is not supplied by AXOR.
Segnale divencia		Since there is no hard standard between brushless servomotor manufactures and drive manufactures for the
	Increase the gain by turning clockwise (cw) using <b>"KV potentiometer"</b> until	motor lead phasing, a simple procedure is needed to get the wiring correct. This procedure will help in getting your motor wired correctly if it was not sumplied by AXOR The
Segnole di velocità	מסוווס אדום משומתחסון משמווס אווי סון חוס וסווי	simple procedure below will use the most basic of parts of
sagnile d vecciti	To reduce the overshoot adjust clockwise (cw) using <b>"Der</b> <b>potentiometer"</b> until achieving a situation as shown on the left.	be expanded on once operation is confirmed to suit the intended application. This procedure needs to be performed by a qualified technician.
	<b>Caution</b> : Do not set KV too high : it can cause unnecessary motor heating	Initial parts needed: 1)A 60 Vdc unregolated power supply. Refer to chapter 3
Begride visualizable to Teat continuir occerne minimus et leagrape d GND 1351	caused from ocsillating currents in the motor.	2)A 10/47Kohm potentiometer to use as the speed reference, or a 1.5 - 3V battery. Refer chapter 3.6
ALL		3) A Brushless motor with $+5$ Vdc Hall Effect commutation of $120^{\circ}$ phasing.
		4) A MicroB Plus suitable for the above motor.
DER		5) An Enable switch (can be substituted by a wire bridge).

It's possible to increase the velocity loop derivative constant by inserting a capacitor CDER on the personalization adjustment. See Chapter 2.1

If the motor has an Encoder, do not connect it at this time, It

**PROCEDURE:** 

is not needed to confirm Hall effect operation and phasing.

68

Notes and Indications	Notes and indications
Unknown Motor Procedure (continued)	Unknown Motor Procedure (continued)
1) First wire the Hall sensor as shown in chapter 3, Hall signal connections. Do not wire the motor leads at this point.	8) Connect the speed potentiometer wiper to +REF, one end of the potentiometer to +10V and the other end to -10V. Add a
2) Wire a switch or jumper between +10Vdc and Enable.	jumper from GND to -KEF. Set the potentiometer to the mid point.
3) Apply power and check the OK LED, it should be ON.	9) Power the MicroB Plus and turn the potentiometer a little, if
4) Turn the motor shaft, if the OK LED stays on and the AH LED is off, the halls are operating and connected properly.	has torque, then the motor lead phasing is correct. If not, power down and swap the leads as per the chart above.
5) If the OK LED goes OFF and the AH LED goes ON, then the cause may be any or all of the following:	are the symptoms: will cause use inout to act sualigery, itere are the symptoms: a) The motor turns at max, speed with no control from the speed
a) The Hall effect sensor are not powered. Check with Voltmeter.	potentiometer. b) Erratic motor movement.
b) A Hall effect sensor is missing. Check with Voltmeter.	c) No movement and bumps in the torque as felt by holding the shaft.
6) Connect the encoder leads as shown in Chapter 3, Hall sensor + Encoder.	Upon finding the correct U V W combination, make a note of it and use this to connect the motor to the drive
<i>T</i> ) Label the motor leads <i>A</i> , <i>B</i> and <i>C</i> and connect them to U, V and W as shown in Chapter 3, Motor Connections.	
They are 6 possible combinations for the motor leads, each will produce a known type failure and one will make the motor turn correctly. Use the chart below as well as the descriptions to determine when the motors turn properly.	

W	U	В	U	A	В	A
Λ	В	U	A	U	A	В
U	A	A	Ю	В	U	U
	1)	2)	(c)	4)	63	(9

Froubleshooting	
7.0 Troubleshooting	<b>CE CONFORMITY DECLARATION</b>
1) When power is on -the green OK LED doesn't come on. Check the voltage between +AT and -AT with a multimeter	The manufacturer: AXOR Industries Address: Viale Stazione 15, 36054 Montebello Vicentino (VI) ITALY
20V < = Voltage < = 50V	DECLARE under their own responsability that the following line of
<ol><li>With the green OK LED on the motor doesn't run when the drive is enabled.</li></ol>	products: series MICR0-B PLUS with the relative options and accessories installed in accordance with the operation instructions furnished by
- Check input signal (Enable-reference)	the manufacturer, conform to the provisions of the following discretions includes the horizont model of the provisions of the following discretions includes the horizont model of and offer and offer provisions of the following discretions and offer provisions and offer pro
3) When the drive is enabled the green OK LED goes off and the red O.C. LED comes on.	urecuves, incuaning the ratest mounications and an relative national issued legislation:
- Short circuit between motor terminals or motor winding is connected to ground. Switch off and measure with tester.	Machine Directive (89/392, 91/368, 93/44, 93/68) Electromagnetic Compatibility Directive (89/336, 92/31, 93/68) And that 5 the following technical standards were
4) During motor deceleration phase the green OK LED	applied: CEI EN 60204-1 Safety of machinery ñ Electrical
-You've exceeded max. consented voltage. Verify filter capacity value. (See Power Supply chapter).	equipment of machines ñ Part 1: General requirements. CEI EN 60439-1 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies ñ Part 1: Type-tested and partially type-tested
5) During operation the motor stops and the S.T. LED comes	CELEN ¢1800 2 Adiretable encod electrical novier drive
on. -Drive operating temp. is too high (more than 40°C). Ventilation missing (where required).	Systems ñ Part 3: EMC product standard including specific test methods. Recall: CELEN 61000-4-2 CELEN 60146-1-1.
6) Motor goes out of control when enabled. -Encoder signals incorrectly connected (CHA and CHB signals swapped, or encoder power supply missing).	CEI 28-6 Insulation co-ordination for equipment within low- voltage systems ñ Part 1: Principles, requirements and tests.
7) At Startup or Enabling the AH Led comes on. -One or more missing Hall Signals. -Missing power supply to Hall Cells.	CEI 64-8 Electrical system users of nominal voltage not exceeding a 1000V.alternate current and a 1500V continuous current.
	Montebello Vicentino, 21 September 1999 Management
71	72

### Bijlage L

### Voorbeeld van een Maple journal

```
restart: with(plots): with(linalg):
neutralehoogte:=40;
omega:=
           0.70;
omega2:=
            0.10;
omega3:=
             0.50;
bultenrek:=
               40.00;
bultenschaal:=
                   0.60;
p1:=
       19.00; p2:=
                       20.00;
maxhoogte:=p2+105;
hoogteellipsboven:=20;
maxrechtstuk:=maxhoogte-hoogteellipsboven;
maxlengte:=
              240.00;
lengtemidden:=150;
breedtevoor:=96;
breedteachter:=115;
hoogterechtstukvoor:=p1+40;
thetaonder:=
                 6.00;
thetazij1max:=achterwielafstand-lengtemidden+schijfdiameter/2+riemdikte;
thetazij1verschuiving:=13;
beginriemschijf:=14;
einderiemschijf:=30;
thetazij1:=arctan(thetazij1verschuiving/thetazij1max)*180/Pi;
thetaboven:=
                20.00;
thetaboven2:=180/Pi*arctan((maxrechtstuk-maxhoogte+tan(thetaboven*Pi/180)*(
   maxlengte-lengtemidden)+5)/(maxlengte-lengtemidden));
dikteellipsonder:=3;
voorwieldikte:=12;
voorwieldiameter:=58;
voorwielafstand:=45.5;
voorwielbandhoogte:=3;
```

```
achterasdikte:=3;
achteraslengte:=117;
achterwieldikte:=9;
achterwielafstand:=lengtemidden+33;
achterwielbandhoogte:=3.5;
achterwieldiameter:=61.5;
bakcenterafstand:=lengtemidden-12.5;
bakcenterhoogte:=p2+16.5;
schijfdiameter:=27.6;
bakdiameter:=20;
bakbegin:=breedteachter/2-einderiemschijf;
bakeind:=breedteachter/2-beginriemschijf;
riemdikte:=1;
thetabakken:=15;
thetazij2:=
               15.00;
afplatting:=0.5;
reslang:=50;
resbreed:=16;
resbreedz:=5;
resbreeda:=4;
reslangw:=20;
resbreedw:=5;
reslangb:=20;
resbreedb:=5;
correctiemaxzij:=1;
correctiemaxachter:=1;
extrarijafstand:=0.05;
correctiefactorboven:=0.25;
wielafsnee:=1;
aa:=x=-(a*z^2+b*z+c);
bb:=x=-(sqrt(e^2-(z*e/d)^2));
cc:=x=-lengtemidden/((breedteachter-breedtevoor)/2)*(z+breedtevoor/2);
_EnvExplicit:=true;
solve({subs({z=-breedtevoor/2,x=0},aa),subs({z=breedtevoor/2,x=0},aa),subs({z
   =-28,x=-61},aa)},{a,b,c});
solve({subs({z=-breedtevoor/2,x=0},bb),subs({z=-28,x=-61},bb)},{d,e});
assign(%%); assign(%[1]);
solve(subs(z=-breedtevoor/2,diff(rhs(cc),z))=subs(z=-breedtevoor/2+0.05,diff(
   omeganeutraal*rhs(aa)+(1-omeganeutraal)*rhs(bb),z)),omeganeutraal);
omeganeutraal:=abs(%);
subs(z=0, (omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)*(breedtevoor/2-abs(z))/(
   breedtevoor/2))^2*rhs(aa)+(1-(omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)*(
```

```
breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2)*rhs(bb));
verstevoorpunt:=evalf(%);
ricowielas:=(20.5-55)/(-54+35.5);
cirkelparam:=[-voorwielafstand+voorwieldiameter/2*cos(theta),voorwieldiameter
   /2+voorwieldiameter/2*sin(theta),0];
asparam:=[-voorwielafstand+deltax,20.5+ricowielas*deltax,0];
alphawielas:=arctan(ricowielas);
rot1:=matrix(3,3,[cos(alphawielas),sin(alphawielas),0,-sin(alphawielas),cos(
   alphawielas),0,0,0,1]);
cirkelparam2:=multiply(rot1,cirkelparam);
asparam2:=multiply(rot1,asparam);
wentelhoogte:=subs(deltax=0,asparam2[2]);
trans1:=[0,-wentelhoogte,0];
cirkelparam3:=[trans1[1]+cirkelparam2[1],trans1[2]+cirkelparam2[2],trans1[3]+
   cirkelparam2[3]];
asparam3:=[trans1[1]+asparam2[1],trans1[2]+asparam2[2],trans1[3]+asparam2[3]];
rot2:=matrix(3,3,[1,0,0,0,cos(phi),sin(phi),0,-sin(phi),cos(phi)]);
cirkelparam4:=multiply(rot2,cirkelparam3);
asparam4:=asparam3;
cirkelparam5:=[-trans1[1]+cirkelparam4[1],-trans1[2]+cirkelparam4[2],-trans1
    [3]+cirkelparam4[3]];
asparam5:=[-trans1[1]+asparam4[1],-trans1[2]+asparam4[2],-trans1[3]+asparam4
   [3]];
cirkelparam6:=multiply(inverse(rot1), cirkelparam5);
asparam6:=multiply(inverse(rot1),asparam5);
dd:=y=a2*x^2+b2*x+c2;
ee:=y=neutralehoogte+sqrt(e2^2-((x-lengtemidden)*e2/d2)^2);
solve({subs({x=verstevoorpunt,y=neutralehoogte},dd),subs({x=lengtemidden,y=
   maxhoogte},dd),subs({x=-24,y=75},dd)},{a2,b2,c2});
solve({subs({x=verstevoorpunt,y=neutralehoogte},ee),subs({x=lengtemidden,y=
   maxhoogte},ee)},{d2,e2});
assign(%%); assign(%[4]);
midden:=lengtemidden-(lengtemidden-verstevoorpunt)/2;
bulten:=piecewise(x<midden,-sin((x-midden)/bultenrek+Pi)*exp((x-midden)/
   bultenrek+Pi)*bultenschaal,sin(-(x-midden)/bultenrek+Pi)*exp(-(x-midden)/
   bultenrek+Pi)*bultenschaal);
ff:=y=neutralehoogte-sqrt((x-verstevoorpunt)/a3);
gg:=y=neutralehoogte-sqrt(e3<sup>2</sup>-(x*e3/d3)<sup>2</sup>);
solve(subs({x=0,y=p1},ff),a3);
solve({subs({x=verstevoorpunt,y=neutralehoogte},gg),subs({x=0,y=p1},gg)},{d3,
   e3});
a3:=%%; assign(%%[4]);
ii:=x=verstevoorpunt+a3*(y-neutralehoogte)^2;
```

```
jj:=x=-sqrt(verstevoorpunt^2-((y-neutralehoogte)*verstevoorpunt/(
    neutralehoogte-p1))^2);
```

vooronderparam:=[t,subs(x=t,p1+dikteellipsonder+t\*(p1+dikteellipsonderneutralehoogte)/(0-verstevoorpunt)-(p1+dikteellipsonder+t\*(p1+ dikteellipsonder-neutralehoogte)/(0-verstevoorpunt)-(omega3\*rhs(ff)+(1omega3)\*rhs(gg)))\*(sqrt(1^2-(u\*1/solve(subs(abs(z)=z,t=(omeganeutraal+( omega-omeganeutraal)\*(breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2\*rhs(aa)+(1-( omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)\*(breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2)) ^2)\*rhs(bb)),z))^2))),u];

- voorbovenparam:=[t,hoogterechtstukvoor+(hoogterechtstukvoor-neutralehoogte)/ abs(verstevoorpunt)\*t+(subs(x=t,omega2\*rhs(dd)+(1-omega2)\*rhs(ee)+bulten)-( hoogterechtstukvoor+(hoogterechtstukvoor-neutralehoogte)/abs(verstevoorpunt )\*t))\*(sqrt(1^2-(u\*1/solve(subs(abs(z)=z,t=(omeganeutraal+(omegaomeganeutraal)\*(breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2\*rhs(aa)+(1-( omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)\*(breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2)) ^2)\*rhs(bb)),z))^2)),u];
- middenbovenparam:=[t,hoogterechtstukvoor+(maxrechtstuk-hoogterechtstukvoor)/ lengtemidden\*t+(subs(x=t,omega2\*rhs(dd)+(1-omega2)\*rhs(ee)+bulten)-( hoogterechtstukvoor+(maxrechtstuk-hoogterechtstukvoor)/lengtemidden\*t))\*( sqrt(1^2-(u\*1/(breedtevoor/2+(breedteachter/2-breedtevoor/2)/lengtemidden\*t ))^2)),u];
- onderplaat1param:=[t,(p1+(p2-p1)/lengtemidden\*t+dikteellipsonder) dikteellipsonder\*sqrt(1^2-(u\*1/(breedtevoor/2+(breedteachter/2-breedtevoor
   /2)/lengtemidden\*t))^2),u];

onderplaat2param:=[t,(p2+tan(thetaonder\*Pi/180)\*(t-lengtemidden)+
 dikteellipsonder)-dikteellipsonder\*sqrt(1^2-(u\*1/(breedteachter/2-tan(
 thetazij1\*Pi/180)\*(t-lengtemidden)))^2),u];

- onderplaat3param:=[t,(p2+tan(thetaonder\*Pi/180)\*(t-lengtemidden)+
   dikteellipsonder)-dikteellipsonder\*sqrt(1^2-(u\*1/(breedteachter/2-tan(
   thetazij1\*Pi/180)\*thetazij1max-tan(thetazij2\*Pi/180)\*(t-lengtemidden thetazij1max)))^2),u];
- zijpaneel3param:=[subs(z=u,(omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)\*(breedtevoor /2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2\*rhs(aa)+(1-(omeganeutraal+(omega-

omeganeutraal)\*(breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2)\*rhs(bb)),t,u];

zijpaneel4param:=[t,u,breedteachter/2-tan(thetazij1\*Pi/180)\*(t-lengtemidden)]; zijpaneel5param:=[t,u,-breedteachter/2+tan(thetazij1\*Pi/180)\*(t-lengtemidden)

```
];
```

- zijpaneel6param:=[t,u,breedteachter/2-tan(thetazij1\*Pi/180)\*thetazij1max-tan(
   thetazij2\*Pi/180)\*(t-lengtemidden-thetazij1max)];
- zijpaneel7param:=[t,u,-breedteachter/2+tan(thetazij1\*Pi/180)\*thetazij1max+tan(
   thetazij2\*Pi/180)\*(t-lengtemidden-thetazij1max)];

```
achterboven1param:=[t,maxrechtstuk-tan(thetaboven2*Pi/180)*(t-lengtemidden)+(
   maxhoogte-tan(thetaboven*Pi/180)*(t-lengtemidden)-(maxrechtstuk-tan(
   thetaboven2*Pi/180)*(t-lengtemidden)))*sqrt(1^2-(u*1/(breedteachter/2-tan(
   thetazij1*Pi/180)*(t-lengtemidden)))^2),u];
achterboven2param:=[t,maxrechtstuk-tan(thetaboven2*Pi/180)*(t-lengtemidden)+(
   maxhoogte-tan(thetaboven*Pi/180)*(t-lengtemidden)-(maxrechtstuk-tan(
   thetaboven2*Pi/180)*(t-lengtemidden)))*sqrt(1^2-(u*1/(breedteachter/2-tan(
   thetazij1*Pi/180)*thetazij1max-tan(thetazij2*Pi/180)*(t-lengtemidden-
   thetazij1max)))^2),u];
achterplaatparam:=[maxlengte,t,u];
achterwiel1param:=[achterwielafstand+achterwieldiameter/2*cos(t)*sin(p),(
   achterwieldiameter-wielafsnee)/2+achterwieldiameter/2*sin(t)*sin(p),-(
   achteraslengte/2+achterwielvar1*cos(p))];
achterwiel2param:=[achterwielafstand+achterwieldiameter/2*cos(t)*sin(p),(
   achterwieldiameter-wielafsnee)/2+achterwieldiameter/2*sin(t)*sin(p),
   achteraslengte/2+achterwielvar1*cos(p)];
pachter:=solve(subs(t=Pi/2,achterwiel1param[2])=achterwieldiameter-
   achterwielbandhoogte,p);
achterwielvar1:=solve(subs(p=pachter,achterwiel1param[3])+achteraslengte/2=
   achterwieldikte/2);
voorwielparam:=[-voorwielafstand+voorwieldiameter/2*cos(t)*sin(p),(
   voorwieldiameter-wielafsnee)/2+voorwieldiameter/2*sin(t)*sin(p),voorwielvar
   *cos(p)];
pvoor:=solve(subs(t=Pi/2,voorwielparam[2])=voorwieldiameter-voorwielbandhoogte
    ,p);
voorwielvar:=solve(subs(p=pvoor,voorwielparam[3])=voorwieldikte/2);
rico1:=(bakcenterhoogte-achterwieldiameter/2)/(bakcenterafstand-
   achterwielafstand);
if rico1=0 then
  xtijdel:=bakcenterafstand;
  ytijdel:=bakcenterhoogte-bakdiameter/2;
else
 rico2:=-1/rico1;
  if rico2>0 then
   xtijdel:=bakcenterafstand-cos(arctan(rico2))*bakdiameter/2;
  else
   xtijdel:=bakcenterafstand+cos(arctan(rico2))*bakdiameter/2;
  end if;
  ytijdel:=bakcenterhoogte-abs(sin(arctan(rico2)))*bakdiameter/2;
end if;
```

```
rico3:=(ytijdel-(achterwieldiameter/2-schijfdiameter/2-riemdikte-1))/(xtijdel
   -(achterwielafstand));
bakparam:=[t,piecewise(t<(achterwielafstand+2),ytijdel+rico3*(t-xtijdel),</pre>
   ytijdel+rico3*(achterwielafstand+2-xtijdel)+tan(thetabakken*Pi/180)*(t-
   achterwielafstand-2)),u];
bakeinde:=achterwielafstand+schijfdiameter/2+riemdikte;
uitvoer:=matrix((reslang+1)*resbreed,3,0):
teller:=1:
eindwaarde:=rowdim(uitvoer):
xstap:=(maxlengte-verstevoorpunt-afplatting)/(reslang-1):
for i from 0 to (reslang-1) do
  xloc:=maxlengte-i*xstap:
  if xloc<0 then
    ymaxloc:=solve((omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)*(breedtevoor/2-abs(z))
        /(breedtevoor/2))^2*rhs(aa)+(1-(omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)*(
        breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2)*rhs(bb)=xloc)[1]:
   zlocmin:=p1+dikteellipsonder-(neutralehoogte-p1-dikteellipsonder)*xloc/(0-
        verstevoorpunt):
   zlocmax:=hoogterechtstukvoor+(hoogterechtstukvoor-neutralehoogte)/abs(
        verstevoorpunt)*xloc:
    zstap:=(zlocmax-zlocmin)/(resbreedz-1):
    for j from 0 to ((resbreed-1-resbreedz)/2) do
      yloc:=ymaxloc*j/((resbreed-1-resbreedz)/2):
      zloc1:=subs({t=xloc,u=yloc},hoogterechtstukvoor+(hoogterechtstukvoor-
          neutralehoogte)/abs(verstevoorpunt)*t+(subs(x=t,omega2*rhs(dd)+(1-
          omega2)*rhs(ee)+bulten)-(hoogterechtstukvoor+(hoogterechtstukvoor-
         neutralehoogte)/abs(verstevoorpunt)*t))*(sqrt(1^2-(u*1/fsolve(subs(
          abs(z)=z,xloc=(omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)*(breedtevoor/2-abs
          (z))/(breedtevoor/2))^2*rhs(aa)+(1-(omeganeutraal+(omega-
          omeganeutraal)*(breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2)*rhs(bb)),z)
          )^2))):
      zloc2:=subs({t=xloc,u=yloc},subs(x=t,p1+dikteellipsonder+t*(p1+
          dikteellipsonder-neutralehoogte)/(0-verstevoorpunt)-(p1+
          dikteellipsonder+t*(p1+dikteellipsonder-neutralehoogte)/(0-
          verstevoorpunt)-(omega3*rhs(ff)+(1-omega3)*rhs(gg)))*(sqrt(1^2-(u*1/
          fsolve(subs(abs(z)=z,xloc=(omeganeutraal+(omega-omeganeutraal)*(
          breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2*rhs(aa)+(1-(omeganeutraal+(
          omega-omeganeutraal)*(breedtevoor/2-abs(z))/(breedtevoor/2))^2)*rhs(
          bb)),z))^2)))):
      uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
      uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc)):
      uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc1)):
```

```
coord2:=resbreed*ceil(teller/resbreed)-j;
    uitvoer[coord2,1]:=Re(evalf(xloc)):
   uitvoer[coord2,2]:=Re(evalf(yloc)):
    uitvoer[coord2,3]:=Re(evalf(zloc2)):
    teller:=teller+1:
  end do:
  for j from 0 to (resbreedz-3) do
    zloc:=zlocmax-(j+1)*zstap:
    uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
    uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij*xloc/verstevoorpunt*(
       min((zlocmax-zloc),(zloc-zlocmin))/((zlocmax-zlocmin)/2))*sqrt((
        zlocmax-zlocmin)/(hoogterechtstukvoor-p1-dikteellipsonder))+
        correctiemaxzij*((xloc-verstevoorpunt)/abs(verstevoorpunt))^2)):
    uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
    teller:=teller+1:
  end do:
  zloc:=zlocmax-(1-extrarijafstand)*(zlocmax-zlocmin):
 uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
 uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij*xloc/verstevoorpunt*(min
      ((zlocmax-zloc),(zloc-zlocmin))/((zlocmax-zlocmin)/2))*sqrt((zlocmax-
     zlocmin)/(hoogterechtstukvoor-p1-dikteellipsonder))+correctiemaxzij*((
     xloc-verstevoorpunt)/abs(verstevoorpunt))^2)):
 uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
  teller:=teller+((resbreed-1-resbreedz)/2)+2:
else
  if xloc<lengtemidden then
    if abs(xloc-lengtemidden)<xstap*0.4 then xloc:=lengtemidden-0.5*xstap:
        end if:
    ymaxloc:=(breedtevoor/2)+(breedteachter/2-(breedtevoor/2))/lengtemidden*
        xloc:
    zlocmin:=p1+(p2-p1)/lengtemidden*xloc+dikteellipsonder:
    zlocmax:=hoogterechtstukvoor+(maxrechtstuk-hoogterechtstukvoor)/
        lengtemidden*xloc:
    zstap:=(zlocmax-zlocmin)/(resbreedz-1):
    for j from 0 to ((resbreed-1-resbreedz)/2) do
      yloc:=ymaxloc*j/((resbreed-1-resbreedz)/2):
      zloc1:=subs({t=xloc,u=yloc},middenbovenparam[2]):
      zloc2:=subs({t=xloc,u=yloc},onderplaat1param[2]):
      uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
      uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc)):
      uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc1)):
      coord2:=resbreed*ceil(teller/resbreed)-j;
      uitvoer[coord2,1]:=Re(evalf(xloc)):
```

```
uitvoer[coord2,2]:=Re(evalf(yloc)):
   uitvoer[coord2,3]:=Re(evalf(zloc2)):
   teller:=teller+1:
  end do:
 for j from 0 to (resbreedz-3) do
   zloc:=zlocmax-(j+1)*zstap:
   uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
   uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij)):
   uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
   teller:=teller+1:
 end do:
 zloc:=zlocmax-(1-extrarijafstand)*(zlocmax-zlocmin):
 uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
 uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij)):
 uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
 teller:=teller+((resbreed-1-resbreedz)/2)+2:
else
 if xloc<(lengtemidden+thetazij1max) then
   if abs(xloc-lengtemidden)<xstap*0.4 then xloc:=lengtemidden+0.5*xstap:
        end if:
   ymaxloc:=breedteachter/2-tan(thetazij1*Pi/180)*(xloc-lengtemidden):
   zlocmin:=p2+tan(thetaonder*Pi/180)*(xloc-lengtemidden)+
       dikteellipsonder:
   zlocmax:=maxrechtstuk-tan(thetaboven2*Pi/180)*(xloc-lengtemidden):
   zstap:=(zlocmax-zlocmin)/(resbreedz-1):
   for j from 0 to ((resbreed-1-resbreedz)/2) do
     yloc:=ymaxloc*j/((resbreed-1-resbreedz)/2):
     zloc1:=subs({t=xloc,u=yloc},achterboven1param[2]):
     zloc2:=subs({t=xloc,u=yloc},onderplaat2param[2]):
     uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
     uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc)):
     uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc1)):
     coord2:=resbreed*ceil(teller/resbreed)-j;
     uitvoer[coord2,1]:=Re(evalf(xloc)):
     uitvoer[coord2,2]:=Re(evalf(yloc)):
     uitvoer[coord2,3]:=Re(evalf(zloc2)):
     teller:=teller+1:
   end do;
   for j from 0 to (resbreedz-3) do
     zloc:=zlocmax-(j+1)*zstap:
     uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
     uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij)):
     uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
```

```
teller:=teller+1:
 end do:
 zloc:=zlocmax-(1-extrarijafstand)*(zlocmax-zlocmin):
 uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
 uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij)):
 uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
 teller:=teller+((resbreed-1-resbreedz)/2)+2:
else
 ymaxloc:=breedteachter/2-tan(thetazij1*Pi/180)*thetazij1max-tan(
     thetazij2*Pi/180)*(xloc-lengtemidden-thetazij1max):
 zlocmin:=p2+tan(thetaonder*Pi/180)*(xloc-lengtemidden)+
     dikteellipsonder:
 zlocmax:=maxrechtstuk-tan(thetaboven2*Pi/180)*(xloc-lengtemidden):
 zstap:=(zlocmax-zlocmin)/(resbreedz-1):
 for j from 0 to ((resbreed-1-resbreedz)/2) do
   yloc:=ymaxloc*j/((resbreed-1-resbreedz)/2):
   zloc1:=subs({t=xloc,u=yloc},achterboven2param[2]):
   zloc2:=subs({t=xloc,u=yloc},onderplaat3param[2]):
   uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
   uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc)):
   uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc1)):
   coord2:=resbreed*ceil(teller/resbreed)-j;
   uitvoer[coord2,1]:=Re(evalf(xloc)):
   uitvoer[coord2,2]:=Re(evalf(yloc)):
   uitvoer[coord2,3]:=Re(evalf(zloc2)):
   if j=(resbreed-1-resbreedz)/2 then
     uitvoer[teller,2]:=evalf(uitvoer[teller,2]-sqrt(2)*
         correctiemaxachter*((xloc-lengtemidden-thetazij1max)/(maxlengte
         -lengtemidden-thetazij1max))^(3/2)):
     uitvoer[teller,3]:=evalf(uitvoer[teller,3]-sqrt(2)*
         correctiemaxachter*((xloc-lengtemidden-thetazij1max)/(maxlengte
         -lengtemidden-thetazij1max))^(3/2)):
   end if:
   teller:=teller+1:
 end do:
 for j from 0 to (resbreedz-3) do
   zloc:=zlocmax-(j+1)*zstap:
   uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
   uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij)):
   uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
   teller:=teller+1:
  end do:
```

```
zloc:=zlocmax-(1-extrarijafstand)*(zlocmax-zlocmin)+(xloc-lengtemidden
            -thetazij1max)/(maxlengte-lengtemidden-thetazij1max)*
            extrarijafstand*(zlocmax-zlocmin):
        uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
        uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc+correctiemaxzij)):
        uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc)):
        teller:=teller+((resbreed-1-resbreedz)/2)+2:
      end if:
    end if:
  end if:
end do:
yloc:=0:
xstap:=0.75*afplatting*2/resbreed:
for i from 0 to (resbreed-2)/2 do
  xloc:=verstevoorpunt+0.75*afplatting-xstap*i:
  zloc1:=subs(x=xloc,omega2*rhs(dd)+(1-omega2)*rhs(ee)+bulten):
  zloc2:=subs(x=xloc,omega3*rhs(ff)+(1-omega3)*rhs(gg)):
  uitvoer[teller,1]:=Re(evalf(xloc)):
  uitvoer[teller,2]:=Re(evalf(yloc)):
  uitvoer[teller,3]:=Re(evalf(zloc1)):
  coord2:=eindwaarde-i:
  uitvoer[coord2,1]:=Re(evalf(xloc)):
  uitvoer[coord2,2]:=Re(evalf(yloc)):
  uitvoer[coord2,3]:=Re(evalf(zloc2)):
  teller:=teller+1:
end do:
for i from 1 to rowdim(uitvoer) do
  for j from 1 to 3 do
    if abs(uitvoer[i,j])<10^(-5) then uitvoer[i,j]:=0: end if:</pre>
  end do:
end do:
appendto("coordinaten_auto16.out");
for i from 1 to rowdim(uitvoer) do
 uitvoer[i,1],uitvoer[i,2],uitvoer[i,3];
end do;
writeto(terminal);
uitvoerwa:=matrix(reslangw*resbreedw,3,0):
teller:=1:
for i from 0 to (reslangw-1) do
```

```
for j from -(resbreedw-1)/2 to (resbreedw-1)/2 do
    sprong:=(Pi/2-pachter)*2/(resbreedw-1):
   uitvoerwa[teller,1]:=Re(evalf(subs({t=2*Pi*i/reslangw-Pi/2,p=Pi/2+j*sprong
        },achterwiel2param[1]))):
   uitvoerwa[teller,2]:=Re(evalf(subs({t=2*Pi*i/reslangw-Pi/2,p=Pi/2+j*sprong
        },achterwiel2param[3]))):
   uitvoerwa[teller,3]:=Re(evalf(subs({t=2*Pi*i/reslangw-Pi/2,p=Pi/2+j*sprong
       },achterwiel2param[2]))):
   teller:=teller+1:
  end do:
end do:
for i from 1 to rowdim(uitvoerwa) do
  for j from 1 to 3 do
    if abs(uitvoerwa[i,j])<10<sup>(-5)</sup> then uitvoerwa[i,j]:=0: end if:
  end do:
end do:
appendto("coordinaten_wiela16.out");
for i from 1 to rowdim(uitvoerwa) do
 uitvoerwa[i,1],uitvoerwa[i,2],uitvoerwa[i,3];
end do;
writeto(terminal);
uitvoerwv:=matrix(reslangw*(resbreedw+1)/2,3,0):
teller:=1:
for i from 0 to (reslangw-1) do
  for j from 0 to (resbreedw-1)/2 do
    sprong:=(Pi/2-pvoor)*2/(resbreedw-1):
   uitvoerwv[teller,1]:=Re(evalf(subs({t=2*Pi*i/reslangw+Pi/2,p=Pi/2-j*sprong
        },voorwielparam[1]))):
   uitvoerwv[teller,2]:=Re(evalf(subs({t=2*Pi*i/reslangw+Pi/2,p=Pi/2-j*sprong
        },voorwielparam[3]))):
   uitvoerwv[teller,3]:=Re(evalf(subs({t=2*Pi*i/reslangw+Pi/2,p=Pi/2-j*sprong
       },voorwielparam[2]))):
   teller:=teller+1:
  end do:
end do:
for i from 1 to rowdim(uitvoerwv) do
  for j from 1 to 3 do
    if abs(uitvoerwv[i,j])<10^(-5) then uitvoerwv[i,j]:=0: end if:</pre>
  end do:
```

end do:

```
appendto("coordinaten_wielv16.out");
for i from 1 to rowdim(uitvoerwv) do
  uitvoerwv[i,1],uitvoerwv[i,2],uitvoerwv[i,3];
end do;
writeto(terminal);
uitvoerb:=matrix(reslangb*resbreedb,3,0):
teller:=1:
for i from 0 to (reslangb-1) do
  xloc:=xtijdel+(bakeinde-xtijdel)*i/(reslangb-1):
  for j from 0 to (resbreedb-1) do
    yloc:=bakbegin+(bakeind-bakbegin)*j/(resbreedb-1):
    uitvoerb[teller,1]:=Re(evalf(subs({t=xloc,u=yloc},bakparam[1]))):
    uitvoerb[teller,2]:=Re(evalf(subs({t=xloc,u=yloc},bakparam[3]))):
    uitvoerb[teller,3]:=Re(evalf(subs({t=xloc,u=yloc},bakparam[2]))):
    teller:=teller+1:
  end do:
end do:
appendto("coordinaten_bak16.out");
for i from 1 to rowdim(uitvoerb) do
  uitvoerb[i,1],uitvoerb[i,2],uitvoerb[i,3];
end do;
writeto(terminal);
appendto("verstevoorpunt16.out");
verstevoorpunt;
writeto(terminal);
```

### Bijlage M

### Voorbeeld van een Gambit journal

M.1 Deel 1: Definiëren parameters & inlezen data

volume delete lowertopology
face delete lowertopology
edge delete lowertopology
vertex delete
sfunction delete
physics delete btype
physics delete ctype
solver select "FLUENT 5/6"
<pre>\$achteraslengte=117/2</pre>
<pre>\$achterasstraal=3/2</pre>
<pre>\$achterwielafstand=183</pre>
<pre>\$achterwielstraal=61.5/2</pre>
<pre>\$achterwielstraal2=\$achterwielstraal-1/2</pre>
<pre>\$voorwielstraal=58/2</pre>
<pre>\$achteraslengte2=\$achteraslengte/2</pre>
\$reslang=50
\$reslangw=20
<pre>\$reslangb=20</pre>
\$p1= 19.00
\$p2= 20.00
<pre>\$rowdimwiel=\$reslangw+1</pre>
<pre>\$rowdimauto=\$reslang+1</pre>
<pre>\$uitsnijstraal1=\$achterwielstraal+5</pre>
<pre>\$uitsnijstraal2=\$achterwielstraal+4</pre>
<pre>\$vooruitsnijstraal1=\$voorwielstraal+4</pre>
\$vooruitsnijstraal2=\$voorwielstraal-2

```
$vooruitsnijhoogte=$p1*2+38+(20-$p1)*3/4
$uitsnijdiepte=13
$uitsnijoffset=$achteraslengte*3/2-$uitsnijdiepte
$verstevoorpunt=-83.60877121
$maxlengte=
             240.00
$wagenlengte=-$verstevoorpunt+$maxlengte
$wagenbreedte=115
$wagenhoogte=105+$p2
$voorwielafstand=-45.5
$innerboxx=$wagenlengte*2.5
$innerboxy=$wagenbreedte/2+$wagenlengte/2
$innerboxz=$wagenhoogte+$wagenlengte/2
$innerboxxoffset=$innerboxx/2+$verstevoorpunt-$wagenlengte/2
$innerboxyoffset=$innerboxy/2
$innerboxzoffset=$innerboxz/2
$outerboxx=$wagenlengte*9
$outerboxy=$wagenbreedte+$wagenlengte*5
$outerboxz=$wagenhoogte+$wagenlengte*5
$outerboxxoffset=$outerboxx/2+$verstevoorpunt-$wagenlengte*3
$outerboxyoffset=$outerboxy/2
$outerboxzoffset=$outerboxz/2
```

import vertexdata "coordinaten\_auto16.txt"
import vertexdata "coordinaten\_wiela16.txt"
import vertexdata "coordinaten\_wielv16.txt"
import vertexdata "coordinaten\_bak16.txt"

### M.2 Deel 2: Aanmaken vlakken & uitbreiden naar volumes

```
vertex modify "vertex.1" label "v1"
....
vertex modify "vertex.816" label "v816"
```

```
face create vertices "v1" ... "v816" \
rowdimension $rowdimauto tolerance 0.1
face create vertices "vertex.817" ... "vertex.821" \
rowdimension $rowdimwiel interpolate
face create vertices "vertex.917" ... "vertex.919" \
```

rowdimension \$rowdimwiel interpolate

```
face create vertices "vertex.977" ... "vertex.1076" \backslash rowdimension $reslangb tolerance 0.1
```

```
face smooth "face.1" geometry tolerance 0.1 replacebad simplify
face heal "face.1" simplify 0.1 stitch maxtolerance 0.1 geombuild tolerant
```

```
edge create straight "v1" "v16"
face create wireframe "edge.15" "edge.1" real
face create wireframe "edge.15" "edge.4" "edge.2" "edge.3" real
face create wireframe "edge.9" real
face create wireframe "edge.10" real
face create wireframe "edge.6" real
face create wireframe "edge.7" real
```

```
volume create stitch "face.3" "face.7" "face.8" real
volume create stitch "face.2" "face.9" "face.10" real
volume create stitch "face.1" "face.5" "face.6" real
```

```
vertex cmove "vertex.981" "vertex.977" "vertex.1076" "vertex.1072" multiple \
 1 offset 0 0 30
edge create straight "vertex.1078" "vertex.1077"
edge create straight "vertex.1078" "vertex.1080"
edge create straight "vertex.1080" "vertex.1079"
edge create straight "vertex.1079" "vertex.1077"
edge create straight "vertex.1078" "vertex.977"
edge create straight "vertex.1077" "vertex.981"
edge create straight "vertex.1080" "vertex.1072"
edge create straight "vertex.1079" "vertex.1076"
face create wireframe "edge.22" "edge.17" "edge.20" "edge.14" real
face create wireframe "edge.22" "edge.18" "edge.23" "edge.13" real
face create wireframe "edge.23" "edge.12" "edge.21" "edge.19" real
face create wireframe "edge.21" "edge.11" "edge.20" "edge.16" real
face create wireframe "edge.17" "edge.16" "edge.19" "edge.18" real
volume create stitch "face.11" "face.15" "face.12" "face.13" "face.14" \backslash
  "face.4" real
```

### M.3 Deel 3: Afwerken wagenmodel

volume create frustum height \$achteraslengte radius \$achterasstraal \
offset \$achterwielafstand \$achteraslengte2 \$achterwielstraal2 yaxis
volume create frustum height \$achteraslengte radius1 \$uitsnijstraal1 \
radius2 \$uitsnijstraal2 offset \$achterwielafstand \$uitsnijoffset \
\$achterwielstraal2 yaxis
volume create frustum height \$vooruitsnijhoogte radius1 \$vooruitsnijstraal1 \
radius2 \$vooruitsnijstraal2 offset \$voorwielafstand 0 0 zaxis
volume create width 1000 depth 1000 height 1000 \
offset 0 0 -500 brick

```
edge round "edge.26" radius1 2
volume blend "volume.6"
volume subtract "volume.3" volumes "volume.6" "volume.7"
volume subtract "volume.2" volumes "volume.8" keeptool
volume subtract "volume.1" volumes "volume.8"
```

```
volume unite volumes "volume.3" "volume.1" "volume.5" "volume.4" "volume.2"
$coords1=ENT2LOC("vertex.1072")
$coords2=ENT2LOC("vertex.1076")
$bakzijden1 = ENTS_AT(t_ed, $coords1[1], $coords1[2], $coords1[3], 1)
$bakzijden2 = ENTS_AT(t_ed, $coords2[1], $coords2[2], $coords2[3], 1)
edge round "edge.1" radius1 2 radius2 1
volume blend "volume.3"
edge round $bakzijden1 $bakzijden2 radius1 1
volume blend "volume.3"
edge round "edge.51" radius1 1
volume blend "volume.3"
edge round "edge.45" "edge.46" "edge.48" "edge.49" radius1 1.5
volume blend "volume.3"
```

window modify vertex invisible

```
$coords3=ENT2LOC("v11")
$achtervlakken = ENTS_AT(t_fa, $coords3[1], $coords3[2], $coords3[3], 3)
face merge "face.64" "face.65" "face.66" "face.69" "face.70" "face.35" \
    "face.67" "face.68" "face.34" "face.71" "face.72" $achtervlakken mergelower
face merge "face.49" "face.59" "face.50" "face.58" "face.60" "face.63" \
    "face.62" "face.61" "face.55" "face.57" "face.56" mergelower
```

### M.4 Deel 4: Creëren van het doorstroomde volume

```
volume create width $innerboxx depth $innerboxy height $innerboxz \
offset $innerboxxoffset $innerboxyoffset $innerboxzoffset brick
volume delete "volume.5"
face split "face.76" virtual edges "edge.72" tolerance 1e-05
face connect "face.30" "v_face.84" virtual
face split "v_face.85" virtual edges "edge.69" "edge.68" tolerance 1e-05
face connect "v_face.90" "face.39" virtual
edge merge "v_edge.141" "edge.3" "v_edge.142" forced
face split "v_face.83" virtual edges "edge.75" "edge.55" "v_edge.161" \
    "edge.76" "edge.73" tolerance 1e-05
face delete "v_face.93"
volume create stitch "face.7" "face.46" "v_face.91" "face.47" "v_face.73" \
    "v_face.75" "face.45" "face.51" "face.9" "face.79" "face.48" "v_face.94" \
    "face.81" "face.80" "face.78" virtual
```

```
volume create width $outerboxx depth $outerboxy height $outerboxz \
offset $outerboxxoffset $outerboxyoffset $outerboxzoffset brick
volume delete "volume.6"
face delete "face.95" "face.96"
edge delete "edge.162"
edge create straight "vertex.1165" "vertex.1157"
edge create straight "vertex.1158" "vertex.1166"
face create wireframe "edge.163" "edge.174" "edge.145" "edge.147" "edge.146" \
    "edge.175" "edge.164" "edge.165" real
face create wireframe "edge.174" "edge.148" "edge.152" "edge.149" "edge.175" \
    "edge.167" "edge.170" "edge.166" real
volume create stitch "face.101" "face.102" "face.98" "face.100" "face.97" \
    "face.99" "face.78" "face.80" "face.81" "face.79" virtual
volume delete "v_volume.4" lowertopology
```

### M.5 Deel 5: Randvoorwaarden

physics create "uitlaat" btype "PRESSURE\_OUTLET" face "face.98" physics create "randentunnel" btype "SYMMETRY" face "face.99" "face.100" physics create "symmvlak" btype "SYMMETRY" face "v\_face.94" "face.102" physics create "vloer" btype "WALL" face "v\_face.91" "face.101"

```
physics create "binnenvlakken" btype "INTERIOR" face "face.78" "face.79" \
    "face.80" "face.81"
physics create "inlaat" btype "VELOCITY_INLET" face "face.97"
physics create "achterwielzij" btype "WALL" face "face.9" "face.51"
physics create "achteras" btype "WALL" face "face.45"
physics create "achteras" btype "WALL" face "face.48"
physics create "behuizing" btype "WALL" face "v_face.73" "v_face.75"
physics create "binnenplaatvoorwiel" btype "WALL" face "face.47"
physics create "voorwielzij" btype "WALL" face "face.46"
physics create "voorwielband" btype "WALL" face "face.46"
```

M.6 Deel 6: Genereren rekenrooster (mesh)

```
sfunction create sourcefaces "v_face.73" "v_face.75" normalangle 20 \
  growthrate 1.20 sizelimit 2 minsize 1.2 attachfaces "v_face.73" "v_face.75"
      curvature
sfunction bgrid attachfaces "v_face.73" "v_face.75"
face mesh "v_face.73" "v_face.75" triangle size 1
undo begingroup
blayer create first 0.40 growth 1.25 total 3.28281 rows 5 transition 1 \setminus
 trows 0 continuous wedge uniform
blayer attach "b_layer.1" volume "v_volume.5" "v_volume.5" face "v_face.75" \
 "v_face.73" add
undo endgroup
volume mesh "v_volume.5" tetrahedral sizelimit 30 growthrate 1.25 size 1
window modify volume "v_volume.5" shade
sfunction create sourcefaces "face.78" "face.79" "face.80" "face.81" \backslash
  growthrate 1.3 sizelimit 75 attachvolumes "v_volume.6" meshed
sfunction bgrid attachvolumes "v_volume.6"
volume mesh "v_volume.6" tetrahedral sizelimit 75 growthrate 1.3 size 30
export fluent5 "gambitmesh16.msh"
```

### Bijlage N

### Fluent journal files

### N.1 Hoofd-journal

Deze journal wordt bij elke simulatie uitgevoerd en berekent de eerste (en normaal ook enige) 750 iteraties. De code is de volgende:

```
file read-case "gambitmesh16.msh"
file/read-bc
boundary.bc
file read-case "gambitmesh16.msh"
yes
file/read-bc
boundary.bc
grid/scale
0.01
0.01
0.01
solve/monitors/force/drag-coefficient
yes
7
8
9
6
3
4
no
yes
"cd-history16.txt"
yes
1
no
```

```
1
0
0
solve/monitors/force/moment-coefficient
yes
7
8
9
6
5
3
4
no
yes
"cm-history16.txt"
yes
2
no
"Y-Axis"
1.83
0
0.3025
solve/initialize/compute-defaults/velocity-inlet
inlaat
solve/initialize/initialize-flow
solve/iterate 750
file write-case-data
fluentcase16
exit
yes
```

### N.2 Tweede Fluent journal

Deze file wordt enkel uitgevoerd wanneer er na 750 iteraties nog niet voldoende convergentie zou zijn (gecontroleerd door een Java programma). De code is de volgende:

file read-case-data	
fluentcase16	yes
solve/iterate 100	exit
file write-case-data	yes
fluentcase16	
### Bijlage O

### Java programma's

### 0.1 ResetTextFiles

### O.2 UpdateTeller

```
ort java.io.*;
import java.lang.*;
import javagently.*;
class UpdateTeller {
    public static void main(String[] args) throws IOException {
```

```
BufferedReader in = Text.open("teller.txt");
String s = in.readLine();
in.close();
int i = Integer.parseInt(s.trim());
i++;
s = String.valueOf(i);
FileOutputStream out = new FileOutputStream("teller.txt");
new PrintStream(out).println(s);
out.close();
}
```

#### 0.3 \*Generator

}

Dit is een algemene template voor alle files die een journal of shell moeten genereren:

```
import java.io.*;
import java.lang.*;
import javagently.*;
class IetsGenerator {
        public static void main(String[] args) throws IOException {
                String uitvoer;
                int aantal = 11;
                BufferedReader in = Text.open("parameters.txt");
                String[] parameters = new String[aantal];
                for (int i=0;i<aantal;i++) {</pre>
                        parameters[i] = in.readLine();
                }
                in.close();
                in = Text.open("teller.txt");
                String teller = in.readLine();
                in.close();
                uitvoer="filenaamdeel"+args[0]+teller+".extensie";
                FileOutputStream out = new FileOutputStream(uitvoer);
                new PrintStream(out).println("eerste lijn code");
                . . .
                new PrintStream(out).println("laatste lijn code");
                out.close();
        }
}
```

### O.4 KuisOp

KuisOpVoorpunt is analoog aan deze

```
import java.io.*;
import java.lang.*;
import javagently.*;
class KuisOp {
        public static void main(String[] args) throws IOException {
                String invoer, uitvoer, teller;
                BufferedReader in = Text.open("teller.txt");
                teller = in.readLine();
                in.close();
                invoer=args[0]+teller+".out";
                uitvoer=args[0]+teller+".txt";
                in = Text.open(invoer);
                FileOutputStream out = new FileOutputStream(uitvoer);
                String s,s1,s2,s3;
                boolean b=true;
                int j,k,l;
                do{
                         s=in.readLine();
                         j=0;
                         k=0;
                         1=0;
                         if ((s!=null)&&(s.length()>1)&&(s.charAt(0)==' ')) {
                                 b=true;
                                 for (j=0;(j<s.length())&&b;j++) if (s.charAt(j</pre>
                                     )!=' ') b=false;
                                 b=true;
                                 for (k=j;(k<s.length())&&b;k++) if (s.charAt(k</pre>
                                     )==',') b=false;
                                 b=true;
                                 for (l=k+1;(l<s.length())&&b;l++) if (s.charAt</pre>
                                     (1)==',') b=false;
                                 s1=s.substring(j-1,k-1);
                                 s2=s.substring(k,l-1);
                                 s3=s.substring(1,s.length());
                                 new PrintStream(out).println(s1+s2+s3);
                         }
                }while (s!=null);
                in.close();
```

}

```
out.close();
FileOutputStream out2 = new FileOutputStream(invoer);
out2.close();
}
```

#### O.5 ConvergentieCheck

```
import java.io.*;
import java.lang.*;
import java.text.*;
import java.util.*;
import javagently.*;
class ConvergentieCheck {
        public static void main(String[] args) throws IOException {
                BufferedReader in = Text.open("teller.txt");
                String teller = in.readLine();
                in.close();
                in = Text.open("convergentieboolean.txt");
                String convergentieboolean = in.readLine();
                in.close();
                if (convergentieboolean.charAt(0)=='f') {
                        double[] tempinlezing = new double[1000];
                        double[] cdinlezing,cminlezing;
                        String temp;
                        int i;
                        int begincoeff,eindecoeff;
                        int grootte;
                        double tijdel,max,min,test;
                        double cd, cm;
                        i=0;
                        in = Text.open("cd-history"+teller+".txt");
                        temp = in.readLine();
                        temp = in.readLine();
                        temp = in.readLine();
                        do{
                                temp=in.readLine();
                                if (temp!=null) {
                                        begincoeff=0;
                                        eindecoeff=6;
```

```
do {
                         begincoeff++;
                }while (temp.charAt(begincoeff)!='\t')
                    ;
                do {
                         eindecoeff++;
                }while (temp.charAt(eindecoeff)!='\t')
                tempinlezing[i]=Double.valueOf(temp.
                     substring(begincoeff+1,eindecoeff
                    -1)).doubleValue();
                i++;
        }
}while (temp!=null);
in.close();
cdinlezing = new double[i];
grootte=cdinlezing.length;
for (int l=0;l<grootte;l++) cdinlezing[l]=tempinlezing</pre>
    [1];
max=-100.0;
min=100.0;
for (int l=grootte-20;l<grootte;l++) {</pre>
        tijdel = cdinlezing[1];
        if (tijdel>max) max=tijdel;
        if (tijdel<min) min=tijdel;</pre>
}
test = (max-min)/((max+min)/2.0);
if (test<0.03) {
        tijdel=0.0;
        for (int l=grootte-20;l<grootte;l++) {</pre>
                tijdel=tijdel+cdinlezing[1];
        }
        cd=tijdel/20;
        i=0;
        in = Text.open("cm-history"+teller+".txt");
        temp = in.readLine();
        temp = in.readLine();
        temp = in.readLine();
        do{
                temp=in.readLine();
                if (temp!=null) {
                         begincoeff=0;
                         eindecoeff=6;
```

} else {

```
do {
                         eindecoeff++;
                }while (temp.charAt(eindecoeff
                    )!='\t');
                do {
                        begincoeff++;
                }while (temp.charAt(begincoeff
                    )!='\t');
                tempinlezing[i]=Double.valueOf
                    (temp.substring(begincoeff
                    +1,eindecoeff-1)).
                    doubleValue();
                i++;
        }
}while (temp!=null);
in.close();
cminlezing = new double[i];
grootte=cminlezing.length;
for (int l=0;l<grootte;l++) cminlezing[l]=</pre>
    tempinlezing[1];
tijdel=0.0;
for (int l=grootte-20;l<grootte;l++) {</pre>
        tijdel=tijdel+cminlezing[1];
}
cm=tijdel/20;
FileOutputStream out = new FileOutputStream("
    dragcoeff.txt");
new PrintStream(out).println(cd);
out.close();
out = new FileOutputStream("momentcoeff.txt");
new PrintStream(out).println(cm);
out.close();
out = new FileOutputStream("
    convergentieboolean.txt");
new PrintStream(out).println("true");
out.close();
out = new FileOutputStream(args[0]+teller+".
    jou");
new PrintStream(out).println("exit");
new PrintStream(out).println("yes");
out.close();
```

```
tijdel=0.0;
for (int l=grootte-20;l<grootte;l++) {</pre>
        tijdel=tijdel+cdinlezing[1];
}
cd=tijdel/20;
i=0;
in = Text.open("cm-history"+teller+".txt");
temp = in.readLine();
temp = in.readLine();
temp = in.readLine();
do{
        temp=in.readLine();
        if (temp!=null) {
                begincoeff=0;
                 eindecoeff=6;
                do {
                         eindecoeff++;
                }while (temp.charAt(eindecoeff
                    )!='\t');
                do {
                         begincoeff++;
                }while (temp.charAt(begincoeff
                    )!='\t');
                tempinlezing[i]=Double.valueOf
                     (temp.substring(begincoeff
                    +1,eindecoeff-1)).
                    doubleValue();
                i++;
        }
}while (temp!=null);
in.close();
cminlezing = new double[i];
grootte=cminlezing.length;
for (int l=0;l<grootte;l++) cminlezing[l]=</pre>
    tempinlezing[1];
tijdel=0.0;
for (int l=grootte-20;l<grootte;l++) {</pre>
        tijdel=tijdel+cminlezing[1];
}
cm=tijdel/20;
FileOutputStream out = new FileOutputStream("
    dragcoeff.txt");
new PrintStream(out).println(cd);
```

```
out.close();
out = new FileOutputStream("momentcoeff.txt");
new PrintStream(out).println(cm);
out.close();
}
}
```

#### O.6 WerkRapportBij

}

}

```
import java.io.*;
import java.lang.*;
import java.text.*;
import java.util.*;
import javagently.*;
class WerkRapportBij {
        public static void main(String[] args) throws IOException {
                BufferedReader in = Text.open("teller.txt");
                String teller = in.readLine();
                in.close();
                in = Text.open("parameters.txt");
                int aantal = 11;
                String[] parameters = new String[aantal];
                for (int i=0;i<aantal;i++) {</pre>
                        parameters[i] = in.readLine();
                }
                in.close();
                in = Text.open("dragcoeff.txt");
                String dragcoeff = in.readLine();
                in.close();
                in = Text.open("momentcoeff.txt");
                String momentcoeff = in.readLine();
                in.close();
                in = Text.open("rapport.txt");
                String s = "";
                String temp;
                do{
                        temp=in.readLine();
                        if (temp!=null) s=s+"\r\n"+temp;
                }while (temp!=null);
```

```
in.close();
           DateFormat dateFormat = new SimpleDateFormat("yyyy/MM/dd HH:mm
               :ss");
Date date = new Date();
String tijd = dateFormat.format(date);
           FileOutputStream out = new FileOutputStream("rapport.txt");
           new PrintStream(out).println(s);
           new PrintStream(out).println("Iteratie "+teller+":");
           new PrintStream(out).println("");
           new PrintStream(out).println("Tijdstip bijwerking rapport : "+
               tijd);
           new PrintStream(out).println("");
           new PrintStream(out).println("Omega : "+parameters[0]);
           new PrintStream(out).println("Omega2 : "+parameters[1]);
           new PrintStream(out).println("Omega3 : "+parameters[2]);
           new PrintStream(out).println("Bultenrek : "+parameters[3]);
           new PrintStream(out).println("Bultenschaal : "+parameters[4]);
           new PrintStream(out).println("P1 : "+parameters[5]);
           new PrintStream(out).println("P2 : "+parameters[6]);
           new PrintStream(out).println("Maxlengte : "+parameters[7]);
           new PrintStream(out).println("Thetaonder : "+parameters[8]);
           new PrintStream(out).println("Thetaboven : "+parameters[9]);
           new PrintStream(out).println("Thetazij2 : "+parameters[10]);
           new PrintStream(out).println("");
           new PrintStream(out).println("Dragcoeff : "+dragcoeff);
           new PrintStream(out).println("Momentcoeff rond achteras : "+
               momentcoeff);
           new PrintStream(out).println("");
           new PrintStream(out).println
               ("------")
           new PrintStream(out).println("");
           out.close();
    }
```

}

## Bijlage P

# Optimale geometrie: vergelijking krachten

### P.1 Origineel wagenmodel

Force vector: (1 0 0)						
	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
achteras	0.65195954	0.0069851335	0.65894467	0.0025873203	2.7720704e-05	0.002615041
achterband	3.1258085	0.22257678	3.3483853	0.012404861	0.00088330239	0.013288164
achterwielzij	0	0.32607245	0.32607245	0	0.001294028	0.001294028
behuizing	30.287218	5.0172901	35.304508	0.1201957	0.019911261	0.14010696
binnenplaatvoorwiel	0	0.013584499	0.013584499	0	5.3910478e-05	5.3910478e-05
voorwielband	3.9297297	-0.0035145511	3.9262151	0.015595246	-1.3947598e-05	0.015581298
voorwielzij	0	0.046508919	0.046508919	0	0.00018457199	0.00018457199
net	37.994716	5.6295034	43.624219	0.15078313	0.022340847	0.17312397
Force vector: (0 0 1)						
	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
achteras	0.22683729	0.0010730462	0.22791034	0.00090021035	4.258415e-06	0.00090446876
achterband	-1.8318734	0.096606784	-1.7352666	-0.0072698426	0.00038338681	-0.0068864558
achterwielzij	0	-0.0087539423	-0.0087539423	0	-3.4740273e-05	-3.4740273e-05
behuizing	-23.383291	0.19284205	-23.190449	-0.092797267	0.00076529925	-0.092031968
binnenplaatvoorwiel	7.7259984	0	7.7259984	0.030660848	0	0.030660848
voorwielband	-0.81136417	-0.006010381	-0.81737455	-0.0032199222	-2.3852371e-05	-0.0032437745
voorwielzij	9	-0.019875078	-0.019875078	9	-7.8874819e-05	-7.8874819e-05
net	-18.073693	0.25588248	-17.817811	-0.071725973	0.001015477	-0.070710496

Figuur P.1: Krachten op origineel model

Moment Center: (1.83	0.30250001)	
zone name	pressure moment	viscous moment
	∩-m 	n-m 
achteras	(0.11236251 -2.2383163e-05 -0.32205012)	(0.00055562257 -1.7452867e-05 -0.0034689005)
achterband	(-1.6196069 -0.013215241 -0.11921696)	(0.059859972 0.090766169 -0.11593504)
achterwielzij	(-1.1589941 0 0.86890429)	(-0.0039036912 0.0048725051 -0.19612022)
behuizing	(-76.508698 -55.78508 -137.75909)	(-0.050101135 1.8378792 -2.5064435)
binnenplaatvoorwiel	(1.0738126 16.662655 0)	(-0.00083268003 0.00091695361 -0.032801826)
voorwielband	(0.086661905 -1.9255066 0.88696331)	(0.0041861138 -0.01066586 -0.085042886)
voorwielzij	(0.47347635 0 -0.97182798)	(-0.0011925048 -0.048296381 -0.0027905351)
net	(-77.540985 -41.061169 -137.41632)	(0.0085716979 1.8754551 -2.9426029)

Figuur P.2: Momenten op origineel model, deel 1

total moment
n-m 
(0.11291813 -3.983603e-05 -0.32551902)
(-1.5597469 0.077550928 -0.23515201)
(-1.1628978 0.0048725051 0.67278408)
(-76.558799 -53.947201 -140.26554)
(1.0729799 16.663572 -0.032801826)
(0.090848019 -1.9361725 0.80192042)
(0.47228385 -0.048296381 -0.97461852)
(-77.532413 -39.185714 -140.35892)

Figuur P.3: Momenten op origineel model, deel 2

### P.2 Optimaal wagenmodel

Force vector: (1 0 0)						
	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
achteras	0.66925675	0.0076839556	0.6769407	0.0026559647	3.0494e-05	0.0026864587
achterband	3.2471328	0.23571312	3.4828459	0.01288634	0.00093543434	0.013821775
achterwielzij	0	0.35845146	0.35845146	0	0.001422525	0.001422525
behuizing	24.833208	5.0936141	29.926822	0.098551304	0.020214155	0.11876546
binnenplaatvoorwiel	0	0.010105932	0.010105932	0	4.0105684e-05	4.0105684e-05
voorwielband	3.6464803	-0.00047213794	3.6460082	0.014471163	-1.873693e-06	0.014469289
voorwielzij	0	0.082225986	0.082225986	0	0.0003263162	0.0003263162
net	32.396078	5.7873224	38.1834	0.12856477	0.022967156	0.15153193
Force vector: (0 0 1)						
	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
achteras	-0.06924738	-0.0013514546	-0.070598835	-0.00027481023	-5.3632868e-06	-0.00028017351
achterband	-1.5061911	0.093724184	-1.412467	-0.005977363	0.00037194713	-0.0056054159
achterwielzij	0	-0.011758451	-0.011758451	0	-4.6663754e-05	-4.6663754e-05
behuizing	-29.510519	0.14621447	-29.364305	-0.11711335	0.00058025635	-0.11653309
binnenplaatvoorwiel	2.2359517	0	2.2359517	0.0088734388	9	0.0088734388
voorwielband	-2.1988831	0.0062552271	-2.1926278	-0.0087263309	2.482405e-05	-0.0087015069
voorwielzij	0	-0.014248881	-0.014248881	0	-5.6547098e-05	-5.6547098e-05
net	-31.048889	0.21883509	-30.830054	-0.12321841	0.00086845339	-0.12234996

Figuur P.4: Krachten op optimaal model

Moment Center: (1.83 0 0	.30250001)	
zone name	pressure moment	viscous moment
	n-m 	n-m 
achteras	(-0.036022127 6.4156651e-05 -0.32944188)	(-0.00067488273 -1.2864145e-06 -0.0038116826)
achterband	(-1.3912299 -0.013334501 -0.28996319)	(0.058482494 0.09708076 -0.12342769)
achterwielzij	(-1.2546078 0 0.74902987)	(-0.0058382484 0.0036021348 -0.21353543)
behuizing	(-71.890694 -44.405563 -113.11947)	(-0.080822967 2.034476 -2.6246135)
binnenplaatvoorwiel	(0.22885807 4.6963696 0)	(-0.0012658883 0.00098532811 -0.03211059)
voorwielband	(0.25264326 -5.1018209 -1.6082116)	(0.0046073673 0.014994636 -0.077848248)
voorwielzij	(0.96488863 0 -13.445931)	(-0.00085493264 -0.038504958 -0.0049335579)
net		(-0.026367058 2.1126327 -3.0802807)

Figuur P.5: Momenten op optimaal model, deel 1

total moment n-m
(-0.036697009 6.2870237e-05 -0.33325356)
(-1.3327474 0.083746259 -0.41339087)
(-1.260446 0.0036021348 0.53549445)
(-71.971517 -42.371087 -115.74408)
(0.22759218 4.697355 -0.03211059)
(0.25725062 -5.0868263 -1.6860599)
(0.9640337 -0.038504958 -13.450865)
(-73.152531 -42.711652 -131.12427)

Figuur P.6: Momenten op optimaal model, deel 2

### Bijlage Q

# Inhoudstafel DVD's

Achteraan in dit boek zitten 2 DVD's met alle gebruikte elektronische bestanden erop (met uitzondering van papers e.d. aangezien die onder copyright-wetgeving vallen). We geven hier een overzicht van de mappen die u op deze dvd's terugvindt met een korte toelichting bij de inhoud ervan.

#### Q.1 DVD Nr. 1

- 'Aerodynamica'
  - 'Editor ...': een teksteditor die het mogelijk maakt tekstbestanden te openen die door Linux aangemaakt zijn waarbij de entertekens herkend worden (itt de standaard Notepad)
  - 'Lienhart Measurements': metingen uit experimenten die gebruikt zijn als basis voor het MOVA Project
  - 'Werkmap': map met alle bestanden die gebruikt zijn voor de optimalisatielus, en de aangemaakte bestanden tijdens iteraties 1 tot en met 81.
    - \* 'javagently': een Java-bibliotheek die nodig is om de zelf geschreven Javaprogramma's te kunnen compileren
    - \* 'Testbestanden': oude versies van journal files, maple files met de evolutie van ons 3d-model erin, enz...
- 'Algemeen & allerlei': wat algemene info die nergens anders thuis hoorde
- 'Algemene sturing': datasheets van gebruikte elektronische componenten en AutoCADlayouts van de complete circuit voor de aansturing van de motor
- 'Banden': wat algemene info over banden, niet echt gebruikt

- 'Batterijen': datasheets en prijzen van allerlei types batterijen en opladers, gegroepeerd per technologie
- 'Bijlage Powerpoint': een presentatie met algemene info over elektrische wagens, waarnaar verwezen wordt in hoofdstuk 1 van onze thesis
- 'Boog frame': pdf's die uitgeprint zijn op ware grootte om de ellipsvormige boog bovenaan onze wagen te kunnen maken
- 'Controllers': theoretische & technische info over sturingen voor BLDC-motoren
- 'Cree SAM': info over een elektrische wagen van Zwitserse makelij, genaamd de Cree SAM
- 'Excelfiles sterkteberekeningen': sterkteberekeningen van de aandrijf- en wielas dmv MITcalc (Dit zijn excelfiles, maar ze kunnen pas geopend worden met speciaal geïnstalleerde software)
- 'Figuren koppeling': allerlei figuren van het koppelingssysteem tussen motor en wiel
- 'Fotos': Zelf genomen foto's en filmpjes van het verloop van onze thesis, gesorteerd in mappen op datum
- 'Hellingen in Vlaanderen': wat informatie over de steiltegraad van de hellingen in Vlaanderen, om te bepalen waartoe onze wagen moet in staat zijn
- 'Koppelingen': datasheets van allerlei koppelingen gesorteerd per soort
- 'Maple berekeningen':
  - 'root folder': figuren en AutoCAD drawings die verband houden met de koppeling
  - 'Nuttige berekeningen': berekeningen van gebruikte riemen en motor in Maple
  - 'Scrap': niet gebruikte berekeningen op andere types motoren
- 'Motoren': datasheets, algemene info, en interessante weetjes over mogelijke types en merken van motoren voor elektrische wagens
- 'Presentaties': tussentijdse presentaties van 15 december 2006
- 'PSPice': PSPice schema's van alle elektronische circuits, inclusief vorige versies ervan
  - 'Batterijladers': Schema's van de hoofd en hulplader
  - 'Snelheidsdetectie': Evolutie van de schema's van de snelheidsdetectie

- \* 'Berekeningen snelheidsdetectie': Enkele berekeningen die noodzakelijk zijn bij het ontwerp van de snelheidsdetectie
- \* 'Print files': De uiteindelijk PCB print files
- \* 'Status koppeling': Programatuur van de PEEL voor de bepaling van de status van de koppeling
- 'Remmen': berekeningen asontlasting en catalogus remmen Shimano
- 'Scriptie in LaTeX': bronbestanden en pdf's van onze scriptie, inclusief alle figuren waarvan de meeste in hogere resolutie dan in het boek zelf
- 'Solidworks 3D Model': 3D modellen van de batterijpacks en het volledige frame, waarbij van het frame een evolutie bijgehouden is van een eerste versie tot een vijfde versie, in aparte mappen
- 'Suspensie': korte berekening van de veerkarakteristiek van onze achterophanging
- 'Thesis uit China': Een thesis over een elektrisch aangedreven scooter met brandstofcellen
- 'Transmissie': datasheets van riemschijven en poly-V-riemen
- 'Twike': allerlei info over deze wagen van Duitse makelijk, evenals een reeks foto's die we kunnen nemen hebben van een Twike die in Gent rondrijdt (met als eigenaar Prof. S. Hoste)
- 'Vrijloop': datasheets van het vrijlooplager dat we gebruikt hebben
- 'Yamaha GTS Moto': enkele foto's in een Word document van de moto waaraan wij ons voorwiel met ophanging ontleend hebben

#### Q.2 DVD Nr. 2

Hierop staat enkel een map 'Werkmap' met daarin de bestanden die aangemaakt zijn tijdens een tweede deel iteraties van de aërodynamische optimalisatie, namelijk iteraties 101 tot en met 181. Dit omdat er te weinig plaats was op 1 DVD.