VRIJ TECHNISCH INSTITUUT St. ALOYSIUS
PAPEBRUGSTRAAT 8A
8820 TORHOUT

Industriële Wetenschappen

De elektrische multicopter

Naam leerlingen:

Matthias Baert
Olivier Claeys
Bram Cobbaert
Dieter Jonckheere
Andy Soete
Gilles Vancanneyt
Lowie Vandewalle
Marijn Veraverbeke

Mentors:

Dirk Verhaeghe
Paul Hemeryck

DOSSIER GEINTEGREERDE PROEF 2012-2013
VRIJ TECHNISCHE INSTITUUT | Papebrugstraat 8A | 8820 TORHOUT
Tel 050 23 15 15
e-mail: vti@sint-rembert.be | website: http://www.sint-rembert.be/vti

VRIJ TECHNISCH INSTITUUT St. ALOYSIUS
PAPEBRUGSTRAAT 8A
8820 TORHOUT

Industriële Wetenschappen

De elektrische multicopter

Naam leerlingen:

Matthias Baert
Olivier Claeys
Bram Cobbaert
Dieter Jonckheere
Andy Soete
Gilles Vancanneyt
Lowie Vandewalle
Marijn Veraverbeke

Mentors:

Dirk Verhaeghe
Paul Hemeryck

DOSSIER GEINTEGREERDE PROEF 2012-2013
VRIJ TECHNISCHE INSTITUUT | Papebrugstraat 8A | 8820 TORHOUT
Tel 050 23 15 15
e-mail: vti@sint-rembert.be | website: http://www.sint-rembert.be/vti

Voorwoord

Wij zitten in het 6de jaar industriële wetenschappen en hebben zoals iedereen in het technisch onderwijs de opdracht om een eindwerk te vervaardigen, dit wordt ook wel een GIP genoemd (geïntegreerde proef). Voor een richting als IW is het enkel nodig om een theoretische uitwerking te maken, maar wij hebben er voor gekozen om ook de technische vervaardiging van ons project te maken. Hierbij kun je kiezen om alleen een GIP te maken of in een kleine groep te werken. Hier in het VTI Torhout hebben we voor ons zelf de lat nog iets hoger gelegd. Wij hebben er voor gekozen om dit in een grote groep te doen, namelijk met 8 personen die elk een eigen idee hebben. Zo was het in hoofdzaak de bedoeling te kunnen overleggen en samen naar een oplossing toe te werken, zoals het ook gebeurt in het echte bedrijfsleven. Wij hebben dan ook op sommige ogenblikken op een verstandige manier gediscussieerd en zo goed als mogelijk onze mening naar voorgebracht. Dit is voor ons waarschijnlijk het belangrijkste wat we dit jaar hebben geleerd. Het was dan ook niet altijd even gemakkelijk, maar we mogen wel besluiten dat we dit op een goede manier hebben gedaan.

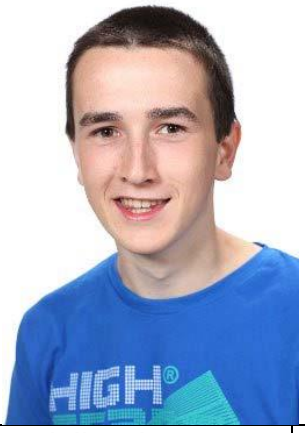
Dankwoord

Zonder hulp van buitenaf zou het ons zeker nooit gelukt zijn om onze GIP te realiseren. We willen graag iedereen bedanken die ons heeft geholpen bij het maken van onze multicopter. We willen eerst en vooral onze twee mentors, Meneer Verhaeghe en Meneer Hemeryck, bedanken voor alle hulp. Ruben Busschaert heeft ook een zeer belangrijke rol gespeeld in onze GIP, want de sturing is door hem vervaardigd. We willen hem bedanken dat we de sturing bij hem konden en mochten aankopen en natuurlijk ook voor alle verdere hulp en uitleg. Mevrouw Delaere heeft ons geholpen met enkele berekeningen, dus willen we haar hiervoor bedanken. Mevrouw Boeyden wordt bedankt voor het controleren van ons GIP-boek en mevrouw Vanclooster voor het controleren van onze Franse tekst. Ook bedanken we de juryleden want zij lieten ons nieuwe dingen inzien door het stellen van hun soms onverwachte maar toch goed bedachte vragen.

Klas 614: Industriële wetenschappen

Schooljaar: 2012-2013
Titularis: Dhr. Dirk Verhaeghe
Hulptitularis: Dhr. Paul Hemeryck

Mensen van de multicopter:			
Matthias Baert	Olivier Claeys	Bram Cobbaert	Dieter Jonckheere
Andy Soete	Gilles Vancanneyt	Lowie Vandewalle	Marijn Veraverbeke

Mensen van de smartbird			
			
Mathias Baert	Laurens Cavey	Kjell Deboysere	Sven Dedeene
Daan Demeulenaere	Ruben Goethals	Tim Maertens	Arne Vervaecke
Jeroen Viaene			

Inhoud

3. De (traditionele) helikopter 22
4. Geschiedenis 23
4.1 Leonardo De Vinci 23
4.2 Paul Cornu 24
4.3 Igor Sikorsky 24
4.4 Heinrich Focke 25
5. Het concept “multicopter” 26
6. De verschillende multicopters 27
6.1 De tricopter 27
6.2 De quadcopter 28
6.3 De hexacopter 28
6.4 De octocopter 29
7. Voorafgaande berekeningen 30
8. Metingen 35
8.1 Algemeen 35
8.2 Servo driver 35
8.2.1 Schema 35
8.2.2 Werking 35
8.3 Meetopstelling 36
8.3.1 Elektrisch 36
8.3.2 Mechanisch 37
8.4 Resultaten 38
8.5 Verslag projectweek 1 48
8.5.1 Verslag vrijdag 2 november 2012 48
8.5.2 Verslag maandag 5 november 2012 49
8.5.3 Verslag dinsdag 6 november 2012 50
8.5.4 Verslag donderdag 8 november 2012 51
8.5.5 Verslag vrijdag 9 november 2012 52
9. Berekeningen 53
10. Propeller 56
10.1 Wat is een propeller? 56
10.2 Werking propeller bij helikopter 56
10.3 Hoe kan een helikopter vooruit vliegen? 57
10.4 Hoe kan een helikopter sturen? 57
10.5 Bij welke propellerafmeting is de stuwkracht het grootst? 58

10.6 Bevestiging propeller bij multicopters 59
10.7 Links- en rechtsdraaiende propellers 60
11. Propellers balanceren 61
11.1 Werkwijze 61
11.1.1 Voorbereiding 61
11.1.2 Horizontaal balanceren 62
11.1.3 Verticaal balanceren (hub balancing) 62
11.1.4 Controle 62
11.2 Besluit 62
12. Het frame 63
12.1 De materiaalkeuze 63
12.2 Mogelijke ontwerpen 63
12.3 TIG lassen in een notendop 65
12.4 Het resultaat 66
13. Ringen 67
13.1 Ondervindingen 71
13.2 Nabewerkingen 71
13.3 Mogelijke verbeteringen 72
14. Motor 73
14.1 Inleiding 73
14.2 De elektromotor 73
14.3 Gebruik elektromotor 73
14.4 Onze motor 74
14.5 Samenstelling 74
15. Lipo 75
15.1 Inleiding 75
15.2 Het gebruik 75
15.3 Laden 75
15.4 Ontladen 76
15.5 Bewaren 76
15.6 Onze keuze 77
15.7 Foto's 77
16. Sturing 78
16.1 Algemeen 78
16.2 Zender en ontvanger 79
16.3 PWM naar RS232 convertor 79
16.4 De flightcontroller 79

16.5 De gyroscoop 79
16.6 De ESC's 79
16.7 De relaiskaart 80
17. Zender en ontvanger 81
17.1 Onze zender en ontvanger 81
17.2 De ontvanger 81
17.3 De zender aan de ontvanger koppelen 82
17.3.1 Voorzorgsmaatregelen 82
17.3.2 Het binden 83
17.4 Werking zender-ontvanger communicatie 83
17.5 Kanalen 85
17.6 Bereik 87
17.7 Simulatie 87
18. PWM naar RS232 convertor 88
18.1 Functie 88
18.2 PWM 88
18.3 RS232 88
18.4 Schema 89
18.5 Bespreking schema 89
18.6 Firmware 90
19. De flightcontroller 92
19.1 Algemeen 92
19.2 Schema voeding 92
19.3 Bespreking schema voeding 93
19.4 Schema 93
19.5 Bespreking schema 95
19.5.1 USB detectie 95
19.5.2 Lipo detectie 95
19.5.3 Spanningsbeveiliging 99
19.6 Firmware 101
19.6.1 Algemeen 101
19.6.2 PID-regelkring 104
19.6.3 Flight lights 107
19.6.4 Beveiliging 108
20. De gyroscoop 109
20.1 Algemeen 109
20.2 Functie 109

20.3 Rotatiegyroscopen 110
20.3.1 Algemeen 110
20.3.2 Opbouw 110
20.3.3 Werking 110
20.3.4 Problemen 111
20.3.5 Toepassingen 111
20.4 Vibratiegyroscopen 112
20.4.1 Algemeen 112
20.4.2 Opbouw 112
20.4.3 Werking 112
20.4.4 Toepassingen 114
20.5 Optische gyroscopen 115
20.5.1 Algemeen 115
20.5.2 Opbouw 115
20.5.3 Werking 115
20.5.4 Toepassingen 116
20.6 Opbouw gyroscoop 116
20.6.1 Gyroscopen 116
20.6.2 ADC's 117
20.6.3 Temperatuur sensor 117
20.6.4 Sensor register 117
20.6.5 I²C interface 117
20.6.6 Charge pump 117
20.7 Communicatie met flight controller 118
20.8 Aankoop van een gyroscoop 119
20.9 Onze gyroscoop: 119
20.10 Elektrisch schema 120
20.11 Voeding 120
20.12 Uitlijnen gyroscoop 121
21. De ESC's 122
21.1 Algemeen 122
21.2 Functie 122
21.3 Elektrisch 122
21.4 Werking 124
21.5 Aansturing 125
21.6 Verschillen tussen ESC's 126
21.6.1 Hoofdeigenschappen 126

21.6.2 Lage spanningsbewaking ... 126
21.6.3 Opto ... 127
21.6.4 Sensored / sensorless ... 127
21.6.5 BEC ... 128
21.6.6 Motor timing ... 129
21.6.7 Remfunctie ... 129
21.6.8 Programmeerbaar ... 129
21.6.9 Kostprijs ... 130
21.7 Het schakelen van een ESC ... 130
21.8 Onze ESC ... 131
21.9 Evolutie ... 131
22. De relaiskaart ... 132
22.1 Functie ... 132
22.2 Schema ... 132
22.3 Bespreking schema ... 132
22.4 Bespreking componenten ... 133
22.4.1 Spanningsregelaar ... 133
22.4.2 Condensatoren ... 133
22.4.3 Relais ... 133
22.4.4 Diode ... 134
22.5 Componenten lijst ... 134
22.6 Evolutie ... 134
23. Versterkerprintje ... 137
23.1 Algemeen ... 137
23.2 Functie ... 137
23.3 Schema: ... 137
23.4 Bespreking schema ... 137
23.5 Berekeningen ... 138
23.5.1 Transistor 2 ... 138
23.5.2 Transistor 1 ... 138
23.6 Componenten lijst ... 138
24. Software ... 139
24.1 Functie ... 139
24.2 Charger monitor ... 139
24.3 Scratchy Set Beta ... 140
24.3.1 Algemeen ... 140
24.3.2 Instellen stick gevoeligheid ... 140

24.3.3 Instellen PID regelkring 141
24.3.4 Controleren zender en ontvanger 141
24.4 HID Bootloader: 142
25. Financiën 143
25.1 Inkomsten 143
25.1.1 Pannenkoekenverkoop 143
25.1.2 Meneer Verhaeghe 143
25.1.3 Landbouwwerken Dirk & Martine Soete-Feys 143
25.2 Overzicht eigen uitgaven 144
25.3 Overzicht uitgaven school 145
25.4 Totaal 146
26. Onze multicopter 147
26.1 Flightcontroller 147
26.2 ESC's 147
26.3 Motoren 147
26.4 Propellers 147
26.5 Lipo's motoren 148
26.6 Lipo sturing 148
26.7 Ringen 148
26.8 Zender en ontvanger 148
27. Handleiding 149
27.1 Controles 149
27.2 Aansteken 150
27.3 Besturen: 151
27.4 Problemen 152
27.5 Laden 152
28. Bibliografie 154
28.1 Geschiedenis 154
28.2 Propeller 154
28.3 Lipo 154
28.4 Zender en ontvanger: 154
28.5 Convertor 155
28.6 Flightcontroller 155
28.7 De gyroscoop 155
28.8 De ESC's 156
28.9 De relaiskaart 156
29. Bijlagen 157

29.1 Bijlage 1: tekening uitboren propeller 157
29.2 Bijlage 2: prop balancer 158
29.3 Bijlage 3: frame 163
29.4 Bijlage 4: Microcontroller 176
29.5 Bijlage 5: Gyroscoop 181
29.6 Bijlage 6: Onze ESC 220
29.7 Bijlage 7: Transistor BC547B 230
29.8 Bijlage 8: Transistor BC557B 230

Inleiding

Op het einde van ons vijfde jaar kregen we de vraag of we enkele ideeën hadden voor de GIP. Al snel volgden er enkele, van meneer Verhaeghe en natuurlijk van de leerlingen zelf, van ons dus.

- Een 3D-printer
- Een smartbird
- Een hoverbike
- Een elektrische multicopter
- …

In het begin van het zesde jaar volgde er een stemming, wat zou ons GIP onderwerp worden? We verdeelden de klas in twee groepen de ene groep verkoos de smartbird, de andere groep de elektrische multicopter.
Wij kozen voor de multicopter. Dit was in onze ogen een ideaal project om dingen bij te leren op verschillende gebieden, de mechanische constructie, de elektrische schakelingen, de sturing… Onze GIP is de gelegenheid om te tonen uit welk hout we zijn gesneden, wat we waard zijn.

Ons eerste doel was het realiseren van een multicopter die een persoon kan vervoeren. Al snel moesten we het idee van een bemande vlucht opgeven, omdat dit (vooral financieel) onhaalbaar leek. Ons doel is dus het realiseren van een op afstand bestuurbare multicopter met een zeker draagvermogen.

Épreuve intégrée

Bonjour,

Nous sommes un groupe de huit étudiants très motivés de la sixième année. Nous suivons les sciences industrielles dans une école technique à Torhout. A la fin de l'année passée, notre prof nous a demandé de faire une proposition pour notre épreuve intégrée de l'année suivante. Nous avons rapidement trouvé beaucoup de sujets. Les idées les plus intéressantes étaient une imprimante 3D, un jetpack qui marche avec de l'eau ou un multicopter. Après les vacances, nous avons pris la décision: nous avons choisi le multicopter !

Après ça, nous avons commencé à chercher toute sorte d'informations sur un hélicoptère électrique, mais nous avons rapidement compris que l'idée d'un vol habité n'était pas réalisable, à cause de la sécurité du chauffeur et surtout dangereux ça coûtait trop cher. Donc, pour cette raison, nous avons changé notre idée en un hélicoptère électronique, commandé par une télécommande et qui peut aussi élever une masse en surplus.

On ne baisse pas les bras et nous commençons immédiatement à chercher des nouvelles informations. Notre première décision importante était de quels et de combien de moteurs on va utiliser. On a décidé d'utiliser un multiple de quatre moteurs parce que c'est plus facile pour trouver une commande et pour pouvoir bien le commander. Nous allons chercher des moteurs électriques et des hélices pour expérimenter. On a fait quelques expériences concernantla puissance de levage. Après beaucoup de tests, on a choisi un moteur électrique sans brosses de 1kW et avec une puissance de levage de 5,5 kg. On a décidé de construire un multicopter avec huit moteurs et un châssis d'aluminium. Ainsi est né l'octocopter.

Lorsque nous avons eu une idée, nous avons commencé à chercher un système de commande pour un quadcopter. Nous avons cherché ce système parce que nous avons partagé les huit moteurs en quatre groupes. Chaque groupe comprend deux moteurs et deux régulateurs de vitesse. Un régulateur de vitesse est un appareil électrique qui règle la vitesse de moteurs au moyen d'un courant alternatif. D'abord nous avons choisi des groupes qui comprennent deux moteurs et un régulateur de vitesse pour les deux moteurs, mais ça n'était pas une bonne idée parce qu'un moteur travaille comme moteur et l'autre moteur travaille comme générateur. Pour le système de commande, nous avons opté pour le système de commande de l'école supérieure Vives. Ce système de commande comprend un convertisseur PWM à RS232, un controleur de vol et un gyroscope pour la stabilité. Nous avons aussi choisi de voler dans une X – configuration.

Nous accordons beaucoup d'attention à la sécurité parce que c'est un des plus grand multicopter dans le modélisme. Nous avons des anneaux pour la puissance de levage. Les anneaux ont la forme d'un tube à réaction. Ils sont produits dans un matériel d'isolation à l'aide d'un désagrégateur. Selon des sources sur l'Internet, les anneaux auraient une influence positive, mais d'autres tests doivent donner plus de

clarté. Nous avons un vibreur pour nous alarmer quand le voltage des piles est trop bas.

Nous allons aussi prévoir des possibilités supplémentaires pour pouvoir ajouter des applications complémentaires au multicopter dans le futur. Nous avons déjà prévu un éclairage de façon à connaître la différence entre l'avant et l'arrière du multicopter. Ça, c'est important pour le conducteur. Etant donné que ce n'est pas simple de conduire un multicopter, nous allons exercer avec un simulateur. Çela est nécessaire et si on veut conduire le multicopter pour la première fois. Nous espérons pouvoir présenter le résultat final à la fin du mois d'avril.

1. Figuren

1.1 De traditionele helikopter

Figuur 1: helikopter met een staartrotor
Figuur 2: helikopter met twee grote rotoren

1.2 Geschiedenis

Figuur 1: Leonardo da Vinci
Figuur 2: ontwerp van een vliegmachine
Figuur 3: ontwerp van een helikopter
Figuur 4: de VS-300
Figuur 5: Igor Sikorsky
Figuur 6: FW 61
Figuur 7: Fa 223
Figuur 8: Heinrich Focke

1.3 Het concept "multicopter"

Figuur 1: quadcopter met GOpro camera

1.4 De verschillende multicopters

Figuur 1: tricopter
Figuur 2: quadcopter
Figuur 3: hexacopter
Figuur 4: octocopter

1.5 Metingen

Figuur 1: schema servo driver
Figuur 2: meetopstelling projectweek
Figuur 3: meetopstelling hefkracht
Figuur 4: meetopstelling koppel
Figuur 5: nodig vermogen batterij motor 4999
Figuur 6: hefkracht motor 4999
Figuur 7: hefkracht in functie van het vermogen
Figuur 8: nodig vermogen batterij motor 4664
Figuur 9: hefkracht motor 4664
Figuur 10: hefkracht in functie van het vermogen

1.6 Propeller

Figuur 1: carbon propellers
Figuur 2: lift bij helikopter
Figuur 3: benaming propeller
Figuur 4: propeller efficiëntie
Figuur 5: prop-saver

Figuur 6: prop adapter

1.7 Propellers balanceren

Figuur 1: spanmoeren en propas
Figuur 2: magnetische prop balancer
Figuur 3: mechanische prop balancer

1.8 Het frame

Figuur 1: H-frame
Figuur 2: kruis-frame
Figuur 3: cirkelvormig frame
Figuur 4: asymmetrisch frame
Figuur 5: octocopter frame
Figuur 6: TIG lassen

1.9 Ringen

Figuur 1: straalbuis
Figuur 2: resultaat
Figuur 3: foto van tijdens het snijden
Figuur 4: verschillende doorsneden voor ringen

1.10 Lipo

Figuur 1: Lipo
Figuur 2: Lipo lader

1.11 Sturing

Figuur 1: principeschema sturing

1.12 Zender en ontvanger

Figuur 1: DX6i
Figuur 2: reflectie met hoofdontvanger
Figuur 3: reflectie met bijkomende ontvanger
Figuur 4: loskoppelen motor
Figuur 5: binden zender aan ontvanger
Figuur 6: manieren van informatie verspreiding
Figuur 7: verschillende modes
Figuur 8: rolbeweging
Figuur 9: knikbeweging
Figuur 10: gierbeweging

1.13 PWM naar RS232 convertor

Figuur 1: elektrisch schema convertor

1.14 De flightcontroller

Figuur 1: schema voeding flightcontroller
Figuur 2: schema flightcontroller
Figuur 3: USB detectie flightcontroller
Figuur 4: Lipo detectie flightcontroller
Figuur 5: spanningsbeveiliging flightcontroller
Figuur 6: knikbeweging
Figuur 7: motoren bij knikbeweging
Figuur 8: rolbeweging
Figuur 9: motoren bij rolbeweging
Figuur 10: gierbeweging
Figuur 11: motoren bij gierbeweging
Figuur 12: principeschema regelkring
Figuur 13: PID regelaar
Figuur 14: inschakelen LED verlichting
Figuur 15: uitschakelen LED verlichting

1.15 De gyroscoop

Figuur 1: principeschema regelkring
Figuur 2: rotatiegyroscoop
Figuur 3: opbouw vibratiegyroscoop
Figuur 4: corioliseffect vectoren
Figuur 5: corioliseffect afgelegde weg
Figuur 6: opbouw optische gyroscoop
Figuur 7: blokschema gyroscoop
Figuur 8: complete I²C data communicatie
Figuur 9: elektrisch schema gyroscoop
Figuur 10: 3-Pin SOT-223
Figuur 11: uitlijnen gyroscoop

1.16 De ESC's

Figuur 1: aansluitschema ESC
Figuur 2: elektrische schema ESC
Figuur 3: vereenvoudigd elektrische schema ESC
Figuur 4: Principe PBM
Figuur 5: kleurencode aansluiting ESC
Figuur 6: aansturingspuls
Figuur 7: optocoupler
Figuur 8: principe BEC
Figuur 9: schakelen van twee ESC's

Figuur 10: onze ESC

1.17 De relaiskaart

Figuur 1: schema relaiskaart
Figuur 2: functie ontstoringscondensatoren
Figuur 3: eerste schema relaiskaart
Figuur 4: tweede schema relaiskaart

1.18 Versterkerprintje

Figuur 1: schema versterkerprintje

1.19 Software

Figuur 1: charger monitor
Figuur 2: scratchy set beta
Figuur 3: HID bootloader

1.20 Onze multicopter

Figuur 1: onze multicopter

1.21 Handleiding

Figuur 1: aansteken LED verlichting
Figuur 2: uitschakelen LED verlichting
Figuur 3: armen multicopter
Figuur 4: disarmen multicopter
Figuur 5: Lipo lader
Figuur 6: aansluitconnectoren Lipo lader
Figuur 7: aansluitingen Lipo lader

2. Tabellen

Tabel 1: voorafgaande berekening 1
Tabel 2: voorafgaande berekening 2
Tabel 3: voorafgaande berekening 3
Tabel 4: voorafgaande berekening 4
Tabel 5: voorafgaande berekening 5
Tabel 6: voorafgaande berekening 6
Tabel 7: voorafgaande berekening 7
Tabel 8: motor 4664
Tabel 9: motor 4999
Tabel 10: motor 4998
Tabel 11: motor 4996
Tabel 12: motor 4999, prop 8x8
Tabel 13: motor 4999, prop 13x4
Tabel 14: motor 4999, prop 13x6
Tabel 15: motor 4999, prop 13x 6,5
Tabel 16: motor 4999, prop 13x8
Tabel 17: motor 4999, prop 15x8
Tabel 18: motor 4999, prop 17x8
Tabel 19: motor 4664, prop 13x 6
Tabel 20: motor 4664, prop 13x 6,5
Tabel 21: motor 4664, prop 13x 8
Tabel 22: motor 4664, prop 15x 8
Tabel 23: motor 4664, prop 17x 8
Tabel 24: berekening 1
Tabel 25: berekening 2
Tabel 26: berekening 3
Tabel 27: berekening 4
Tabel 28: overzicht eigen uitgaven
Tabel 29: overzicht uitgaven school
Tabel 30: vliegduur

3. De (traditionele) helikopter

Iedereen kent de traditionele helikopter. De naam helikopter is afgeleid van het Griekse Helix (= spiraal of draaiend) en pteron (= vleugel). Deze bestaat uit één (of twee) grote rotoren met een verticale as. De meeste helikopters hebben ook een staartrotor. Deze is noodzakelijk om de ontstane tangentiële kracht die de helikopter doet draaien in de tegenovergestelde richting aan de draairichting van de rotor tegen te werken.

- Voordelen ten opzichte van vliegtuigen
  - Kunnen verticaal opstijgen en landen
  - Kunnen stil in de lucht hangen
  - Kunnen zij- en achterwaarts vliegen

- Toepassingen
  - Bij reddingsacties (actief in moeilijk bereikbaar gebied)
  - Transport (bv. naar booreilanden → geen landingsbaan)
  - Militaire doeleinden (wendbaar en veel hefkracht)

Figuur 1: helikopter met een staartrotor

Figuur 2: helikopter met twee grote rotoren

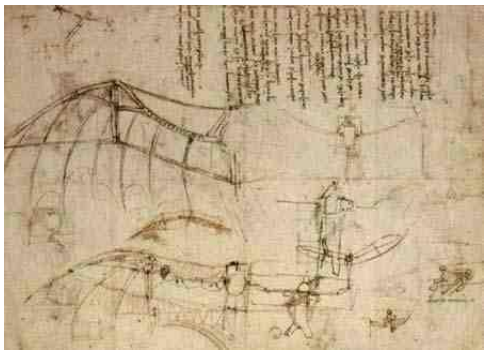
4. Geschiedenis

4.1 Leonardo De Vinci

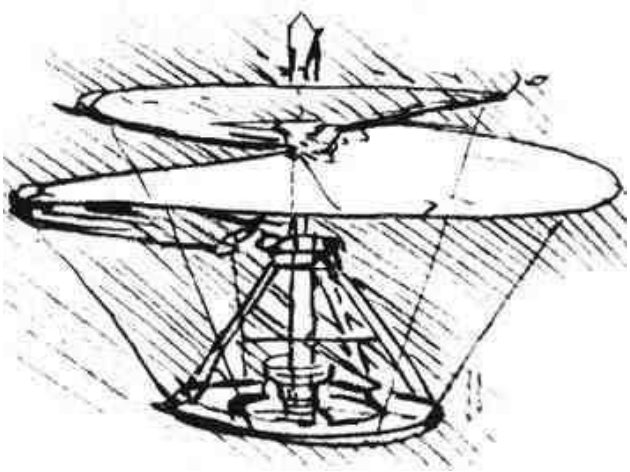
Leonardo da Vinci (Vinci, 15 april 1452 - Amboise, 2 mei 1519) was een beroemde architect, uitvinder, ingenieur, filosoof, natuurkundige, scheikundige, anatomist, beeldhouwer, schrijver, schilder en componist uit de Florentijnse Republiek, tijdens de renaissance. Iedereen kent Da Vinci als de schilder van de Mona Lisa, maar wat ons vooral interesseert is Da Vinci als wetenschapper.

Figuur 1: Leonardo da Vinci

Da Vinci hield zich bezig op vele gebieden van de wetenschap. Naast tekeningen van wapens, bruggen, parachutes… stonden in zijn boeken ook tekeningen van vliegtuigen en hefschroefvliegtuigen (helikopters). Voor vliegtuigen baseerde hij zich op de vleugelstructuur van vogels. Jammer genoeg was zijn constructie te zwaar om van de grond te komen. Zijn helikopter had de vorm van een boor, dus moest deze zich als het ware de lucht in boren. Zijn ontwerp was grondleggend, maar ook zijn helikopter is nooit van de grond gekomen.



Figuur 2: ontwerp van een vliegmachine



Figuur 3: ontwerp van een helikopter

4.2 Paul Cornu

Paul Cornu (Glos-la-Ferrière, 15 juni 1881 – Lisieux, 6 juni 1944) was een Franse rijwielhandelaar en uitvinder die als eerste een vlucht maakte in een helikopter.

De vlucht vond plaats op 13 november 1907 in het Franse plaatsje Coquain Villiers. De vlucht, op 1,50 meter hoogte, duurde 20 seconden. Zijn helikopter (ook wel bekend als de "vliegende fiets") was 6,20 meter lang en bestond uit een 24 pk Antoinette-motor[1] en twee tegengesteld draaiende rotors, met een diameter van 6 meter, om het koppel tegen te gaan. Het toestel woog 260 kg en het had aan beide zijden een kleine vleugel die als sturing diende.

4.3 Igor Sikorsky

Igor Ivanovitsj Sikorsky (Kiev, Oekraïne, 25 mei 1889 - Easton Connecticut, Verenigde Staten, 26 oktober 1972) was een Russisch-Amerikaans luchtvaartpionier. Hij leverde verschillende belangrijke bijdragen aan de ontwikkeling van de luchtvaart. Hij ontwierp de eerste vliegtuigen die door vier motoren werden aangedreven, maar zijn belangrijkste uitvinding was die van de helikopter.

In 1909 en 1910 bouwde hij twee prototypes van een helikopter, geïnspireerd door de ontwerpen van Leonardo da Vinci, maar deze mislukten omdat hij geen motor tot zijn beschikking had die zowel licht als sterk genoeg was. Hierna hield hij zich bezig met meer conventionele vliegtuigen, waarmee hij meer succes had. In de jaren dertig vatte Sikorsky zijn oude droom van het bouwen van een helikopter weer op, en op 14 September 1939 was hij piloot van de eerste vlucht met zijn helikopter, de VS-300. In 1941 werden de eerste helikopters gekocht door het Amerikaanse leger, maar in de Tweede Wereldoorlog werden ze nog weinig gebruikt. Tijdens de Korea- en de Vietnamoorlog speelden helikopters echter een belangrijke rol. Het door Sikorsky opgerichte bedrijf (Sikorsky Aircraft Corporation) is tot op heden de meest toonaangevende fabrikant van helikopters. Sikorsky zelf ging in 1957 met pensioen.

Figuur 4: de VS-300

Figuur 5: Igor Sikorsky

[1]Een Franse vliegtuigmotor (Antoinette was een Franse vliegtuigfabrikant)

4.4 Heinrich Focke

Heinrich Focke (8 Oktober 1890 – 25 Februari 1979) was een Duitse luchtvaartpionier uit Bremen. Hij richtte in 1923 samen met Georg Wulf zijn eigen luchtvaartbedrijf op, Focke-Wulf. Hiermee bouwde hij in 1936 de eerste praktisch toepasbare helikopter, de FW 61. Nadat hij werd verdreven uit de Focke-Wulf Company startte hij in 1937 samen met Gerd Achgelis een ander bedrijf op, Focke Achgelis. Dit bedrijf concentreerde zich op het ontwikkelen van helikopters. Het ontwikkelde onder andere de FA 223 dat door de Duitsers werd gebruikt in de tweede wereldoorlog.

Figuur 6: FW 61

Figuur 7: FA 223

Figuur 8: Heinrich Focke

5. Het concept “multicopter”

Het verschil tussen een multicopter en een helikopter zit hem in de manier waarop ze draaien, de manier om te stijgen is identiek. We nemen als voorbeeld de Sikorsky UH-3 Seaking mk 48, of in de volksmond gewoon weg de Seaking. De Seaking gebruikt zijn hoofd- en staartpropeller om op te stijgen, maar om te draaien worden de bladen onder een bepaalde hoek gedraaid. Verschillend van hoe scherp de piloot wil draaien. Bij de multicopter is dit anders, hier wordt door een variabel toerental gedraaid. Willen we naar links dan moeten de motoren aan de rechterkant sneller draaien en de motoren aan de linkerkant trager zodat er een draaieffect wordt gecreëerd en we dus naar links draaien. Het woord multicopter is ook een “algemeen” woord, het staat voor meerdere objecten. Normaal gezien spreekt men vanaf er meer dan vier rotoren zijn over een multicopter. Dus vanaf de quadcopter. Een quadcopter is een vliegend voertuig dat vier propellers gebruikt voor de lift en het sturen, er zijn veel verschillende quadcopters net zoals er veel verschillende multicopters zijn. De uitdaging zit hem er één zelf te ontwikkelen.

De toepassingen van een multicopter zijn zeer veelzijdig:

- Een multicopter wordt onder andere gebruikt om te filmen bij een cyclocross wedstrijd.
- Wordt ook gebruikt door de federale politie.
- Of gewoon voor de fun.

Een paar van deze voorbeelden worden mogelijk gemaakt door een camera onder de multicopter te hangen de meest gebruikte camera hiervoor zijn die van GOpro!

Figuur 1: quadcopter met GOpro camera

6. De verschillende multicopters

In dit hoofdstuk bespreken we de verschillende multicopters. Alle multirotor luchtvaartuigen werken in principe hetzelfde, het maakt niet uit of er 4-6-8-12 of nog meer motoren op zitten. Hier zetten we de meest voorkomende op een rijtje.

6.1 De tricopter

De tricopter is het buitenbeentje, dit omdat deze eigenlijk geen multicopter is. De werking is ook volledig anders. Bij een multicopter wordt het moment gecreëerd door het draaien van een propeller opgevangen door het draaien van een propeller in tegenovergestelde richting, doordat er hier een oneven aantal propellers zijn is dit niet mogelijk. Dit probleem wordt opgevangen door de achterste motor te monteren op een verdraaibare arm, de verdraaiing van deze arm gebeurt door een servo motor. Eigenlijk is dit soort dus een mengeling van een multicopter en een helikopter. Het grootste nadeel van deze opstelling is dat de sterkte veel minder is dan bij multicopter, dit komt door de verdraaibare arm.

Figuur 1: tricopter

6.2 De quadcopter

Een quadcopter is een multicopter met vier motoren. Deze opstelling kan nog worden opgedeeld in twee verschillende opstellingen namelijk in X- en + formatie.

Figuur 2: quadcopter

6.3 De hexacopter

Een hexacopter is een multicopter met zes motoren.

Figuur 3: hexacopter

6.4 De octocopter

Een octocopter is een multicopter met acht motoren.

Figuur 4: octocopter

7. Voorafgaande berekeningen

Vooraleer het mogelijk was om materiaal te kiezen waar we vervolgens proeven mee gingen doen, moesten we een idee hebben van hoe zwaar onze motoren ongeveer moesten zijn en hoeveel het allemaal zou kosten. Daarom hebben we op voorhand een paar berekeningen gemaakt met specificaties van motoren die we via het internet hadden gevonden. Hier vind u een verkorte versie van de berekeningen en uiteindelijk het besluit, de volledige berekeningen kunnen gevonden worden in de elektronische bijlage 1: voorafgaande berekeningen. Alle berekeningen zijn gemaakt bij vol vermogen en zodat de multicopter 20 minuten zou kunnen vliegen. De berekende draagkracht is steeds de draagkracht van de motoren verminderd met het gewicht van de ESC's, de propellers, de motoren en de batterijen. De aantallen staan steeds onder de naam van het onderdeel.

Berekening 1:		
Motor: x 20	Type	Vermogen (W)
	http://www.alebproducts.com/proddetail.php?prod=emaxmotor003	340
ESC: x 20	Type	Stroom (A)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18008__HobbyKing_Red_Brick_60A_ESC_Opto_.html	60
Propeller: x 20	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22431	11
Batterij: x 32	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=6500	4S 5000mAh Lipo
➔ draagkracht	12,24	
➔ draagkracht per watt	4,411764706	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	1544,62
	Kostprijs per kg	126,19
	Zonder batterijen	777,90
	Kostprijs per kg zonder batterijen	63,55

Tabel 1: voorafgaande berekening 1

Berekening 2:		
Motor: x 8	Type	Vermogen (W)
	http://www.alebproducts.com/proddetail.php?prod=emaxmotor004	700
ESC: x 8	Type	Stroom (A)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18008__HobbyKing_Red_Brick_60A_ESC_Opto__.html	60
Propeller: x 8	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22432	12
Batterij: x 28	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=6500	4S 5000mAh Lipo
➔ draagkracht	-2,18	
➔draagkracht per watt	2,142857143	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	988,08
	Kostprijs per kg	-453,25
	Zonder batterijen	317,20
	Kostprijs per kg zonder batterijen	-145,50

Tabel 2: voorafgaande berekening 2

Berekening 3:		
Motor: x 12	Type	Vermogen (W)
	http://www.alebproducts.com/proddetail.php?prod=emaxmotor005	1320
ESC: x 12	Type	Stroom (A)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=18465	80
Propeller: x 12	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22436	16
Batterij: x 40	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=8586	6S 5000mAh Lipo
➔ draagkracht	28,348	
➔ draagkracht per watt	3,787878788	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	2294,40
	Kostprijs per kg	80,94
	Zonder batterijen	888,00
	Kostprijs per kg zonder batterijen	31,32

Tabel 3: voorafgaande berekening 3

Berekening 4:		
Motor: x16	Type	Vermogen (W)
	http://www.alebproducts.com/proddetail.php?prod=emaxmotor005	1320
ESC: x 16	Type	Stroom (A)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=18465	80
Propeller: x 16	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22436	16
Batterij: x 52	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=8586	6S 5000mAh Lipo
➔ draagkracht	38,6	
➔ draagkracht per watt	3,787878788	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	3069,60
	Kostprijs per kg	79,52
	Zonder batterijen	1241,28
	Kostprijs per kg zonder batterijen	32,16

Tabel 4: voorafgaande berekening 4

Berekening 5:		
Motor: x 16	Type	Vermogen (W)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__19030__Turnigy_G60_Brushless_Outrunner_300kv_60_Glow_.html	1425
ESC: x 16	Type	Stroom (A)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=18465	80
Propeller: x 16	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22435	15
Batterij: x 20	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=8581	5S 5000mAh Lipo
➔ draagkracht	15,92	
➔ draagkracht per watt	1,368421053	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	1859,68
	Kostprijs per kg	116,81
	Zonder batterijen	1156,48
	Kostprijs per kg zonder batterijen	72,64

Tabel 5: voorafgaande berekening 5

Berekening 6:		
Motor: x 12	Type	Vermogen (W)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__19039__Turnigy_G110_Brushless_Outrunner_210kv_1_10_Glow_.html	2000
ESC: x 12	Type	Stroom (A)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=18465	80
Propeller: x 12	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=10017	21
Batterij: x 12	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=8586	6S 5000mAh Lipo
➔ draagkracht	34,148	
➔ draagkracht per watt	2,55	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	2020,56
	Kostprijs per kg	59,17
	Zonder batterijen	895,44
	Kostprijs per kg zonder batterijen	26,22

Tabel 6: voorafgaande berekening 6

Berekening 7:		
Motor: x 8	Type	Vermogen (W)
	http://www.alebproducts.com/proddetail.php?prod=emaxmotor006	2800
ESC: x 8	Type	Stroom (A)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__17983__Turnigy_dlux_80A_HV_Brushless_Speed_Controller_OPTO_.html	80
Propeller: x 8	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=8088	20
Batterij: x 8	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22586	10S Lipo 4500mAh
➔ draagkracht	16,192	
➔ draagkracht per watt	3,785714286	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	4545,84
	Kostprijs per kg	280,75
	Zonder batterijen	1094,64
	Kostprijs per kg zonder batterijen	67,60

Tabel 7: voorafgaande berekening 7

Zo dit zijn de voornaamste berekeningen. Uit deze berekening hebben we geresulteerd dat we geen te grote motoren moesten kiezen, want grote motoren betekent Lipo's van meer dan 6S waardoor de prijs enorm stijgt. We hebben ook geresulteerd dat we het best werken met een motor van rond de 1300 tot 2000 W op voorwaarde dat hij kan werken met een 6S Lipo dit is te zien in kostprijs per kg. Vervolgens hebben we de volgende motoren geselecteerd om proeven mee te doen:

Motor 4664	
Spanning	15 ➔ 30 V
Lipo cellen	4 ➔ 8
Omwentelingen per volt	400
Stroom	60 A, max = 82 A
Gewicht	330 g
Vermogen	1500 W

Tabel 8: motor 4664

Motor 4999	
Spanning	10 ➔ 24 V
Lipo cellen	3 ➔ 6
Omwentelingen per volt	430
Stroom	42 A, max = 72 A
Gewicht	280 g
Vermogen	1050 W

Tabel 9: motor 4999

Motor 4998	
Spanning	7 ➔ 20 V
Lipo cellen	2 ➔ 5
Omwentelingen per volt	590
Stroom	35 A, max = 45 A
Gewicht	175 g
Vermogen	700 W

Tabel 10: motor 4998

Motor 4996	
Spanning	7 ➔ 20 V
Lipo cellen	2 ➔ 5
Omwentelingen per volt	1150
Stroom	38 A, max = 45 A
Gewicht	152 g
Vermogen	480 W

Tabel 11: motor 4996

De resultaten van de metingen zijn te vinden in hoofdstuk 8: Metingen.

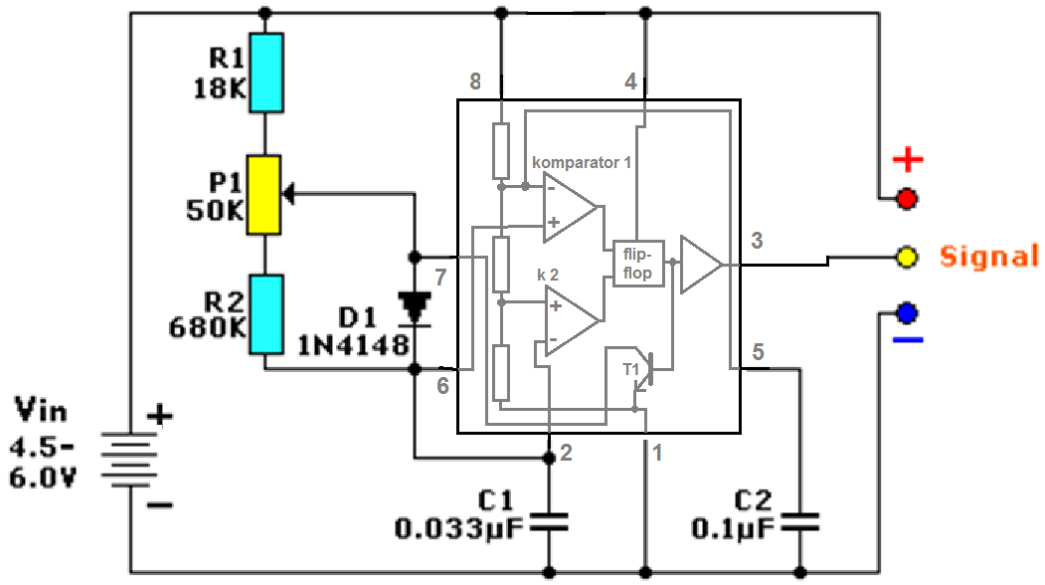
8. Metingen

8.1 Algemeen

Tijdens de eerste projectweek van 5 tot 9 november hebben het eerder aangekochte materiaal getest. Dit was ons eerste contact met ESC's en dit soort motoren, daarom liep het in het begin nogal stroef. We hadden namelijk problemen met het aansturen van de ESC's, om dit probleem te verhelpen hebben we een servo driver gemaakt. Een ander probleem was dat we geen metingen konden doen op de twee kleinere motoren dit doordat de spanningsbeveiliging van de ESC in werking trede. Dit kwam doordat we gebruikte maakte van één autobatterij, maar 12 V is nu juist de spanning waarbij de spanningsbeveiliging van de ESC's in werking treedt.

8.2 Servo driver

8.2.1 Schema



Figuur 1: schema servo driver

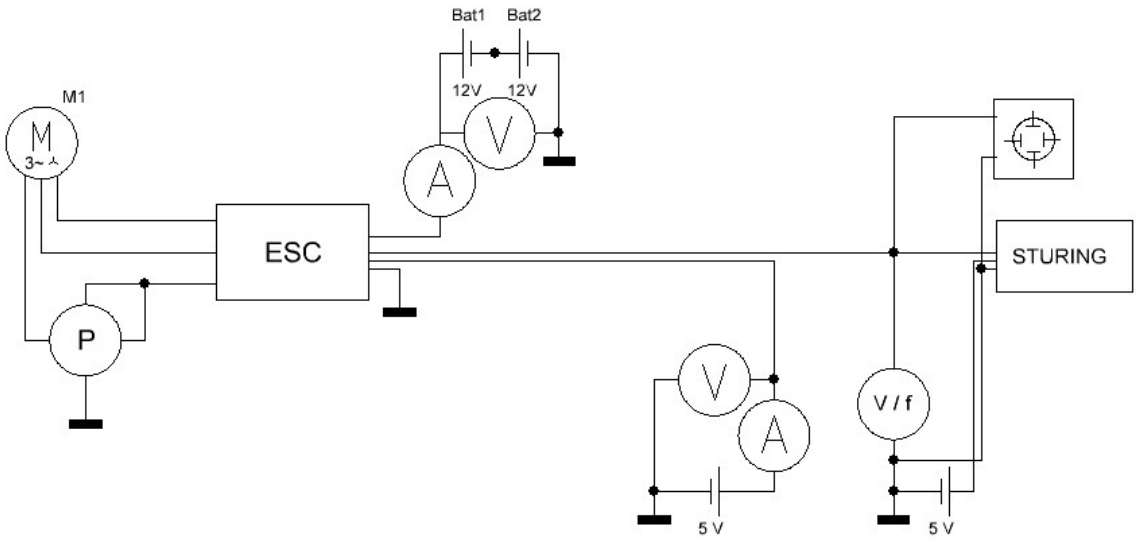
8.2.2 Werking

Het schema is opgebouwd rond de IC555, dit is een redelijk gekend timer IC. Wanneer er een spanning wordt aangesloten op de IC dan zal deze spanning verdeeld worden over een spannningsdeler, dit zijn de drie in serie geschakelde weerstanden in de IC. Wanneer de spanning over C1 hoger wordt dan 2/3 van de aangelegde spanning zal de OPAM k1 een hoog uitgangssignaal hebben, deze reset de flipflop wat ervoor zorgt dat het uitgangssignaal van de IC laag wordt. Tegelijkertijd zal de transistor T1 in geleiding gaan waardoor de condensator C1 ontlaadt. Wanneer de spanning over C1 nu minder wordt dan 1/3 van de aangelegde spanning dan zal de

OPAM k2 een hoog uitgangssignaal hebben, deze set de flipflop wat ervoor zorgt dat het uitgangssignaal van de IC hoog wordt. Tevens zal de transistor stoppen met geleiden, waardoor de condensator opnieuw kan beginnen opladen. Aan de hand van de potentiometer kan de ontlaadtijd van de condensator ingesteld worden.

8.3 Meetopstelling

8.3.1 Elektrisch



Figuur 2: meetopstelling projectweek

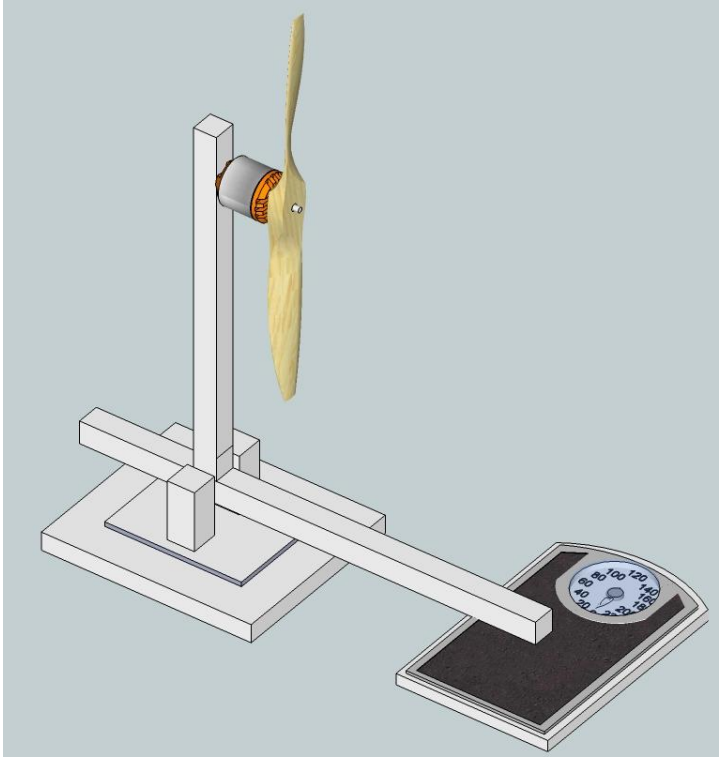
Als voeding voor de motor werd gebruikt gemaakt van twee in serie geschakelde autobatterijen dit doordat we toen nog geen Lipo's hadden en doordat er geen voeding op school aanwezig is die de nodige stroom kon leveren.

De gebruikte ESC was de 100 A 900-serie Roxxy.

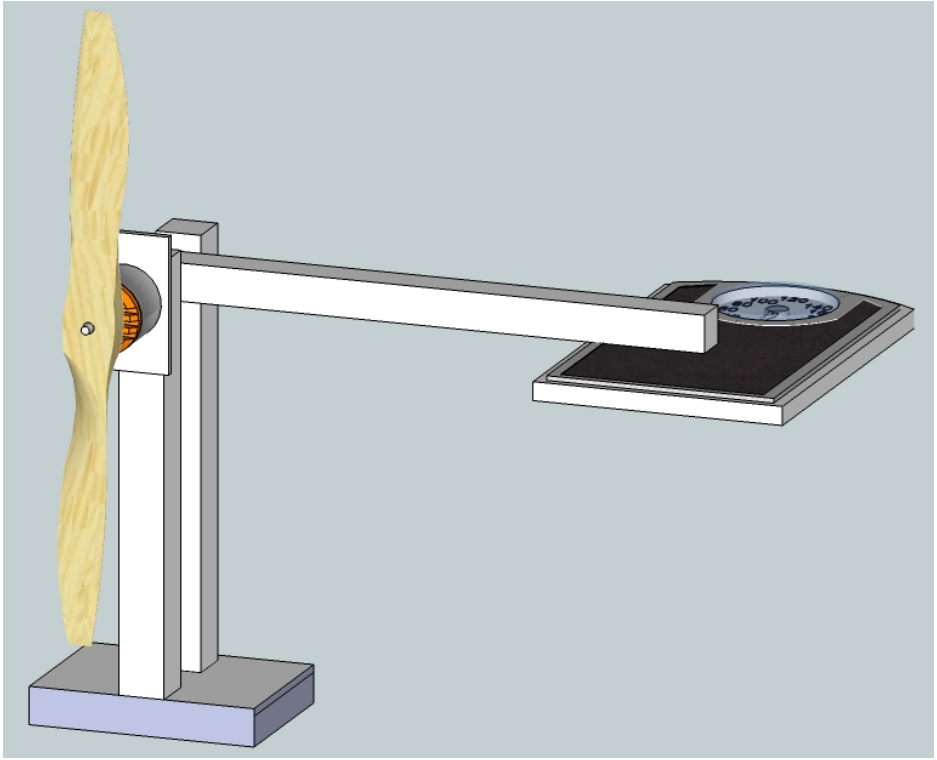
De vermogen meter werd gebruikt om spanning, stroom, arbeidsfactor, vermogen zowel actief, reactief als schijnbaar vermogen en frequentie te meten. De frequentie was nodig om later het toerental van de motor te kunnen berekenen.

De stroom meter die bij de voeding van de ESC staat, was omdat we wouden weten hoeveel stroom de ESC nodig heeft. Dit was omdat we zeker wouden zijn dat de voeding van onze flightcontroller zwaar genoeg is.

8.3.2 Mechanisch



Figuur 3: meetopstelling hefkracht



Figuur 4: meetopstelling koppel

8.4 Resultaten

Hier vindt u de meetresultaten en de bijhorende verwerking, zowel analytisch als grafisch. Dit zijn enkel de meetresultaten voor de meting op hefkracht, de meting om de belastingskarakteristiek van de motoren op te stellen leverde onbetrouwbare resultaten op. De licht grijze cellen staan voor onjuiste gemeten waarden, de donker rode voor niet gemeten waarden.

Met Motor 4999 (1050W) en prop 8x8							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc}(mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
0,781	5,000	0,256	54,56	0,161	623	2,0	24,54
1,017	5,000	0,328	56,16	0,205	705	2,8	24,44
1,501	5,000	0,486	54,52	0,304	854	4,6	24,36
1,985	5,000	0,660	56,20	0,414	954	6,2	24,25
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cosϕ	*Hefkracht*(kg)	*Toerental* (/min)
3,18	4,02	4	4	5	0,70	0,178	5300
3,84	4,51	9	8	11	0,64	0,224	6000
5,22	5,51	20	15	23	0,76	0,345	7300
6,10	6,12	26	23	36	0,79	0,424	8150
Berekende waarden							
P_f(W)[2]	P_t(W)[3]	$P_{batterij}$(W)[4]	*gram/watt*[5]	*Toerental (/min)*[6]	*Gebruikt toerental van de motor*[7]	Cosϕ[8]	$P_{batterij}$ / P_t
8,95	26,85	49,08	3,63	5340,00	39,05	0,80	1,83
11,08	33,25	68,43	3,27	6042,86	50,85	0,82	2,06
21,86	65,58	112,06	3,08	7320,00	75,05	0,87	1,71
29,49	88,48	150,35	2,82	8177,14	99,25	0,72	1,70

Tabel 12: motor 4999, prop 8x8

[2] $P_f = I_f \times U_f \times \cos\phi$

[3] $P_t = P_f \times 3$

[4] $P_{batterij} = U_{batterij} \times I_{batterij}$

[5] gram/watt = $\frac{\text{Hefkracht} \times 1000}{P_{batterij}}$

[6] Toerental = $\frac{f_{motor}}{7} \times 60$

[7] Gebruikt toerental van de motor = $\frac{\text{Pulslengte}}{2} \times 100$

[8] $\text{Cos}\phi = \frac{P_f}{S_f}$

Met Motor 4999 (1050W) en prop 13x4							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc} (mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
0,781	5,000	0,500	*	0,160	751	5,1	24,40
1,005	5,000	0,321	*	0,202	826	6,8	24,27
1,501	5,000	0,485	54,45	0,303	1020	12,4	24,03
1,985	5,000	0,500	56,16	0,413	1110	16,8	24,00
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cosϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
6,40	4,85	21	16	26	0,72	0,83	6390
7,80	5,36	29	22	36	0,78	1,032	7500
11,07	6,73	58	44	70	0,78	1,645	6300
13,32	7,50	75	52	91	0,83	1,98	9533
Berekenden waarden							
P_f(W)	P_t(W)	$P_{batterij}$ (W)	*gram/watt*	*Toerental (/min)*	*Gebruikt toerental van de motor*	Cosϕ	$P_{batterij}$ / P_t
22,35	67,05	124,44	6,67	6437,14	39,05	0,81	1,86
32,61	97,83	165,04	6,25	7080,00	50,25	0,81	1,69
58,11	174,33	297,97	5,52	8742,86	75,05	0,83	1,71
82,92	248,75	403,20	4,91	9514,29	99,25	0,82	1,62

Tabel 13: motor 4999, prop 13x4

Met Motor 4999 (1050W) en prop 13x6							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc} (mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
0,781	5,000	0,255	*	0,160	1020	4,8	24,37
1,005	5,000	0,322	*	0,202	974	6,2	24,17
1,501	5,000	0,490	54,50	0,304	793	11,1	24,03
1,985	5,000	0,664	56,16	0,413	876	14,7	23,89
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cosϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
7,50	3,95	0	0	0	0,60	0,815	*
8,30	4,26	1	1	2	0,65	0,987	*
12,70	5,27	42	37	57	0,76	1,486	*
15,00	5,88	61	51	84	0,77	1,805	*
Berekende waarden							
P_f(W)	P_t(W)	$P_{batterij}$ (W)	*gram/watt*	*Toerental (/min)*	*Gebruikt toerental van de motor*	Cosϕ	$P_{batterij}$ / P_t
17,78	53,33	116,98	6,97	8742,86	39,05	#DEEL/0!	2,19
22,98	68,95	149,85	6,59	8348,57	50,25	0,50	2,17
50,87	152,60	266,73	5,57	6797,14	75,05	0,74	1,75
67,91	203,74	351,18	5,14	7508,57	99,25	0,73	1,72

Tabel 14: motor 4999, prop 13x6

Met Motor 4999 (1050W) en prop 13x6,5							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc} (mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$ (V)
0,781	5,000	0,255	*	0,160	1760	4,5	24,30
1,005	5,000	0,322	*	0,202	656	5,9	24,24
1,501	5,000	0,485	54,53	0,303	806	10,7	23,98
1,985	5,000	0,665	56,16	0,413	889	14,7	23,84
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
7,00	3,99	0	0	0	0,42	0,788	*
8,20	4,33	2	2	2	0,69	0,958	*
11,78	5,33	42	38	55	0,75	1,462	*
14,55	5,96	59	57	77	0,72	1,827	*
Berekende waarden							
P_f (W)	P_t (W)	$P_{batterij}$ (W)	gram/watt	Toerental (/min)	Gebruikt toerental van de motor	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
11,73	35,19	109,35	7,21	15085,71	39,05	#DEEL/0!	3,11
24,50	73,50	143,02	6,70	5622,86	50,25	1,00	1,95
47,09	141,27	256,59	5,70	6908,57	75,05	0,76	1,82
62,44	187,31	350,45	5,21	7620,00	99,25	0,77	1,87

Tabel 15: motor 4999, prop 13x 6,5

Met Motor 4999 (1050W) en prop 13x8							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc}(mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
0,806	5,000	0,500	*	0,163	870	5,2	24,22
1,005	5,000	0,500	*	0,204	964	7,0	24,00
1,501	5,000	0,500	54,48	0,305	789	12,5	23,84
1,985	5,000	0,500	56,17	0,413	873	17,4	23,68
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
8,0	3,90	0	0	0	0,70	0,800	*
9,6	4,34	2	1	2	0,70	1,000	*
14,0	5,32	52	41	67	0,73	1,556	*
17,5	5,92	68	66	93	0,75	1,900	*
Berekende waarden							
P_f (W)	P_t (W)	$P_{batterij}$ (W)	gram/watt	Toerental (/min)	Gebruikt toerental van de motor	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
21,84	65,52	125,94	6,35	7457,14	40,30	#DEEL/0!	1,92
29,16	87,49	168,00	5,95	8262,86	50,25	1,00	1,92
54,37	163,11	298,00	5,22	6762,86	75,05	0,78	1,83
77,70	233,10	412,03	4,61	7482,86	99,25	0,73	1,77

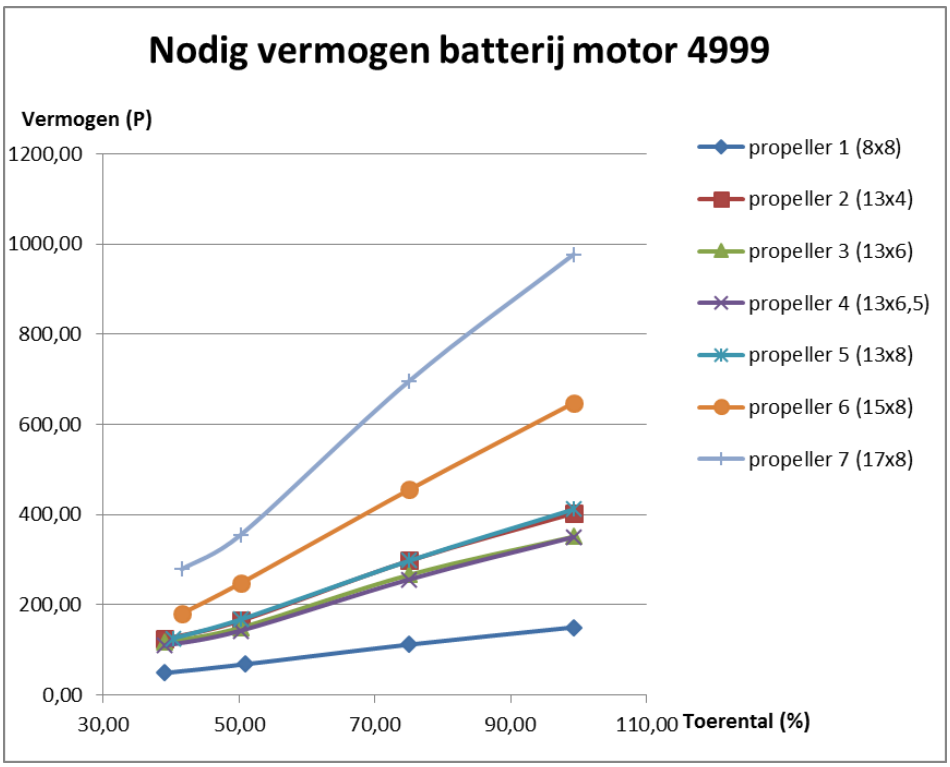
Tabel 16: motor 4999, prop 13x8

Met Motor 4999 (1050W) en prop 15x8							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc} (mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
0,831	5,000	0,500	*	0,161	1800	7,5	24,10
1,005	5,000	0,500	*	0,204	616	10,4	23,88
1,501	5,000	0,500	54,43	0,304	749	19,3	23,60
1,985	5,000	0,500	56,16	0,414	827	27,7	23,39
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
12,0	3,73	0	0	0	0	1,250	*
14,0	4,23	32	34	47	0,70	1,570	*
21,7	5,26	63	70	95	0,66	2,350	*
27,7	5,97	95	110	144	0,67	3,000	*
Berekende waarden							
P_f (W)	P_t (W)	$P_{batterij}$ (W)	gram/watt	Toerental (/min)	Gebruikt toerental van de motor	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
0,00	0,00	180,75	6,92	15428,57	41,55	#DEEL/0!	#DEEL/0!
41,45	124,36	248,35	6,32	5280,00	50,25	0,68	2,00
75,33	226,00	455,48	5,16	6420,00	75,05	0,66	2,02
110,80	332,39	647,90	4,63	7088,57	99,25	0,66	1,95

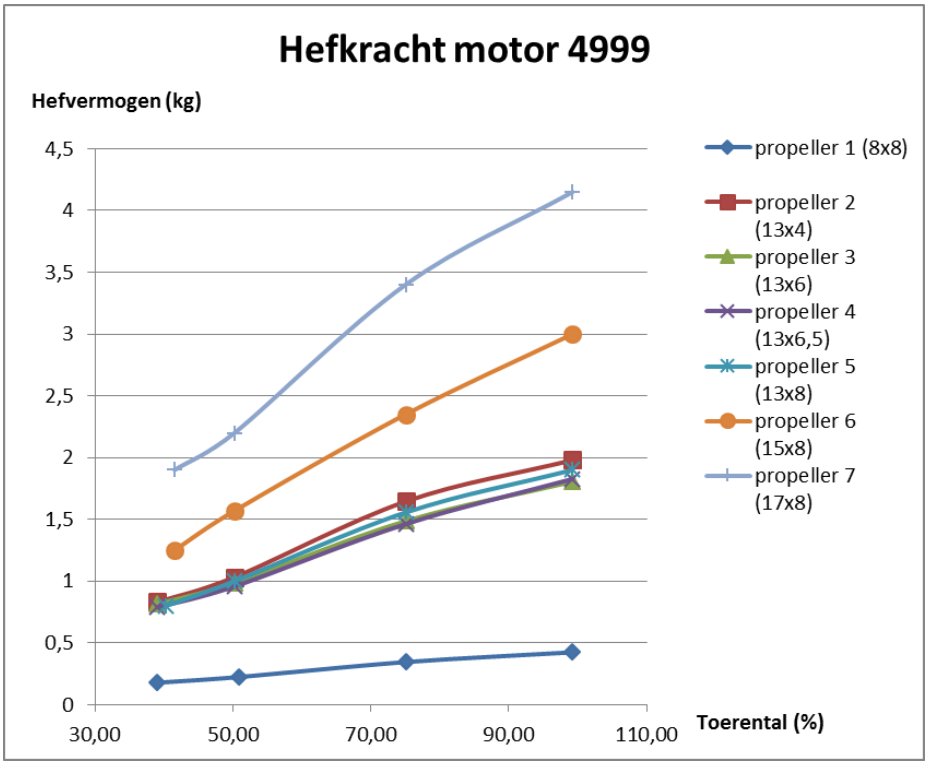
Tabel 17: motor 4999, prop 15x8

Met Motor 4999 (1050W) en prop 17x8							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc}(mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
0,831	5,000	0,500	*	0,170	536	11,7	23,87
1,005	5,000	0,500	*	0,203	579	15,0	23,70
1,501	5,000	0,500	54,48	0,303	707	29,9	23,30
1,985	5,000	0,500	56,16	0,413	783	42,5	23,00
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
18,00	3,82	31	41	51	0,63	1,900	*
21,25	4,17	42	53	70	0,63	2,200	*
32,00	5,29	85	112	137	0,61	3,400	*
40,20	6,02	125	170	210	0,60	4,150	*
Berekende waarden							
P_f (W)	P_t (W)	$P_{batterij}$ (W)	gram/watt	Toerental (/min)	Gebruikt toerental van de motor	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
43,32	129,96	279,28	6,80	4594,29	41,55	0,61	2,15
55,83	167,48	355,50	6,19	4962,86	50,25	0,60	2,12
103,26	309,78	696,67	4,88	6060,00	75,05	0,62	2,25
145,20	435,61	977,50	4,25	6711,43	99,25	0,60	2,24

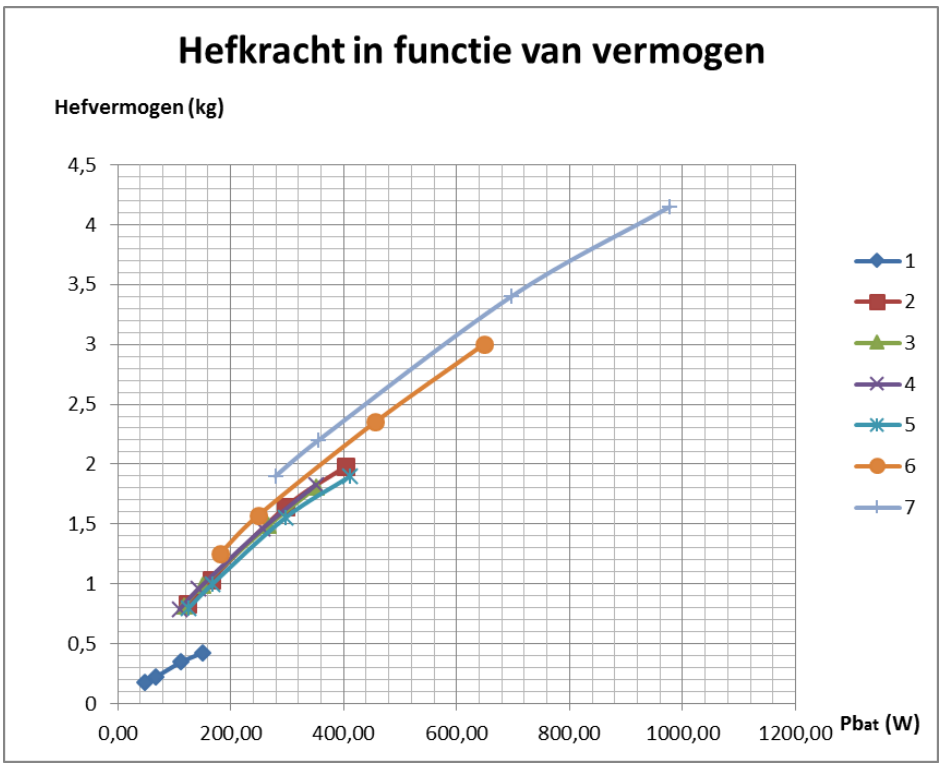
Tabel 18: motor 4999, prop 17x8



Figuur 5: nodig vermogen batterij motor 4999



Figuur 6: hefkracht motor 4999



Figuur 7: hefkracht in functie van het vermogen

Dit zijn de resultaten voor de meting op de motor die we nu gebruiken. In de meetresultaten ziet u dat wanneer de motor meer vermogen vraagt, deze minder efficiënt is. Dit kan u zien doordat de berekende gram/watt steeds afneemt. U kan ook zien dat de propeller die we nu gebruiken, de 17x8, juist ideaal is voor deze motor. Dit ziet u doordat het opgenomen vermogen van onze motor bij maximum toerental met deze propeller ongeveer 1 kW is en dit is juist het vermogen waarvoor dit type motor is gemaakt. U ziet ook dat de stroom die nodig is als voeding voor de ESC's bijna nul bedraagt dit komt doordat de ESC waar we gebruik van maakten eigenlijk geen externe voeding nodig heeft doordat deze BEC[9] bevat.

[9]BEC: zie p. 128

Met Motor 4664 (1500W) en prop 13x6							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc} (mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor} (Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
1,517	5,0	0,5	54,47	0,313	698	8,7	24,47
1,702	5,0	0,5	54,60	0,350	929	19	24,08
1,800	5,0	0,5	54,77	0,371	1010	24,6	23,9
1,985	5,0	0,5	56,16	0,419	1010	24,6	23,9
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
10,95	4,90	39	23	46	0,86	1,2	6022
17,2	6,52	91	53	103	0,86	2,0	7919
20,5	7,29	119	68	177	0,87	2,4	8400
20,5	7,22	117	66	135	0,88	2,4	8670
Berekende waarden							
P_f(W)	P_t(W)	$P_{batterij}$ *(W)*	*gram/watt*	*Toerental (/min)*	*Gebruikt toerental van de motor*	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
46,14	138,43	212,89	5,64	5982,86	75,85	0,85	1,54
96,44	289,33	457,52	4,37	7962,86	85,10	0,88	1,58
130,02	390,05	587,94	4,08	8657,14	90,00	0,67	1,51
130,25	390,75	587,94	4,08	8657,14	99,25	0,87	1,50

Tabel 19: motor 4664, prop 13x 6

Met Motor 4664 (1500W) en prop 13x6,5							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc}(mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
1,554	5,000	0,5	54,37	0,317	660	6,3	24,5
1,704	5,000	0,5	54,58	0,350	853	13,0	24,3
1,800	5,000	0,5	54,72	0,371	933	17,0	24,15
1,985	5,000	0,5	56,13	0,419	931	17,0	24,20
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
8,55	4,54	27	17	30	0,86	0,98	
13,12	5,83	62	36	70	0,86	1,63	
15,7	6,37	81	46	93	0,88	1,969	
15,6	6,43	82	46	92	0,87	1,969	
Berekende waarden							
P_f (W)	P_t (W)	$P_{batterij}$ (W)	gram/watt	Toerental (/min)	Gebruikt toerental van de motor	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
33,38	100,15	154,35	6,35	5657,14	77,70	0,90	1,54
65,78	197,34	315,90	5,16	7311,43	85,20	0,89	1,60
88,01	264,02	410,55	4,80	7997,14	90,00	0,87	1,55
87,27	261,80	411,40	4,79	7980,00	99,25	0,89	1,57

Tabel 20: motor 4664, prop 13x 6,5

Met Motor 4664 (1500W) en prop 13x8							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc} (mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor} (Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
1,517	5,045	0,1	54,75	1,047	710	9,5	24
1,665	5,046	0,1	55,23	1,092	883	18,5	23,7
1,788	5,046	0,1	56,00	1,14	1020	29,3	23,5
1,985	5,000	0,66	56,16	0,414	1010	27,4	23,67
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
11	5,2	45	25	51	0,89	1,25	6000
17	6,58	30	15	35	0,91	1,98	7500
23,5	7,45	150	69	165	0,9	2,69	8500
22,5	7,26	118	89	150	0,79	2,60	8600
Berekende waarden							
P_f(W)	P_t(W)	$P_{batterij}$ *(W)*	*gram/watt*	*Toerental (/min)*	*Gebruikt toerental van de motor*	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
50,91	152,72	228,00	5,48	6085,71	75,85	0,88	1,49
101,79	305,38	438,45	4,52	7568,57	83,25	0,86	1,44
157,57	472,70	688,55	3,91	8742,86	89,40	0,91	1,46
129,05	387,14	648,56	4,01	8657,14	99,25	0,79	1,68

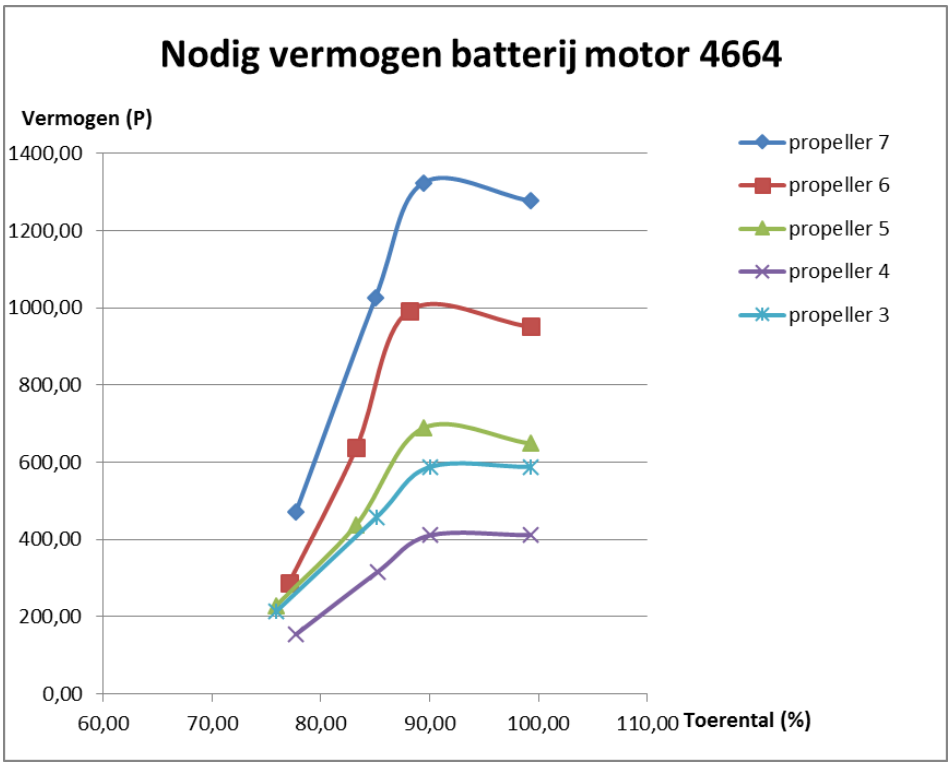
Tabel 21: motor 4664, prop 13x 8

Met Motor 4664 (1500W) en prop 15x8							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc}(mA)	f_{puls} (Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
1,541	5,040	0,1	54,65	1,043	670	12	23,9
1,665	5,047	0,1	55,16	1,094	827	27	23,6
1,762	5,050	0,1	56,67	1,142	943	42,6	23,3
1,985	5,000	0,66	56,16	0,414	935	40,6	23,42
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
16	4,9	55	34	65	0,86	1,7	5500
26,7	6,3	126	73	148	0,85	2,92	7000
35,3	7,3	201	120	233	0,86	3,9	8000
34,05	7,07	166	140	221	0,76	3,83	8000
Berekende waarden							
P_f (W)	P_t (W)	$P_{batterij}$ (W)	gram/watt	Toerental (/min)	Gebruikt toerental van de motor	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
67,42	202,27	286,80	5,93	5742,86	77,05	0,85	1,42
142,98	428,94	637,20	4,58	7088,57	83,25	0,85	1,49
221,61	664,84	992,58	3,93	8082,86	88,10	0,86	1,49
182,96	548,87	950,85	4,03	8014,29	99,25	0,75	1,73

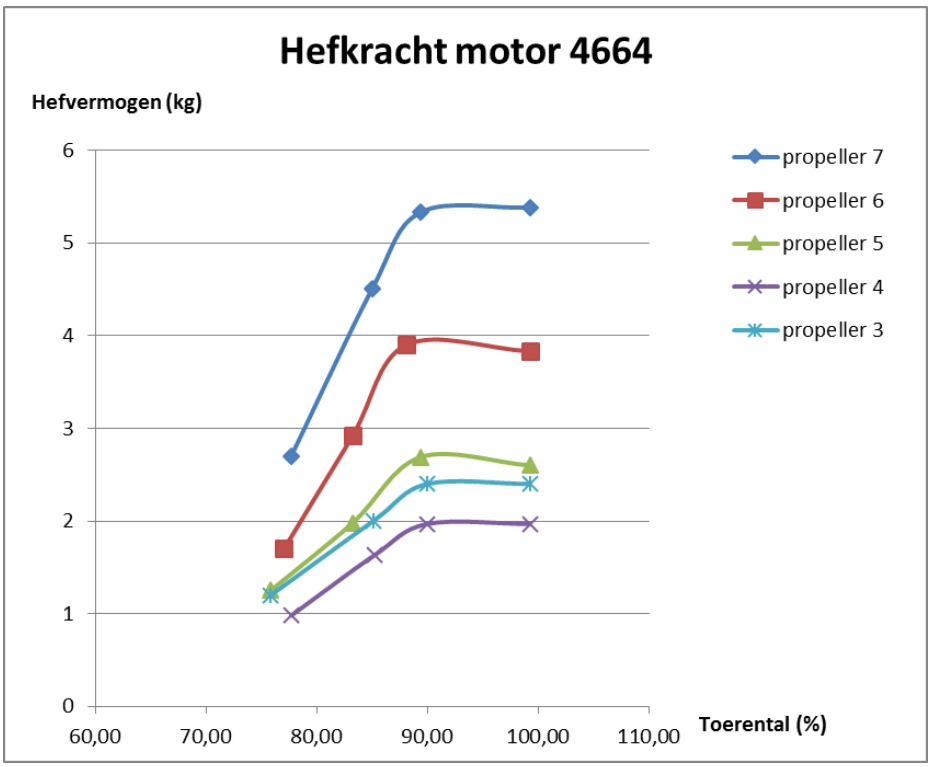
Tabel 22: motor 4664, prop 15x 8

Met Motor 4664 (1500W) en prop 17x8							
Gemeten waarden							
Pulslengte (ms)	U_{esc}(V)	I_{esc} (mA)	f_{puls}(Hz)	U_{puls}(V)	f_{motor}(Hz)	$I_{batterij}$(A)	$U_{batterij}$(V)
1,554	4,900	0,1	54,77	1,055	1230	19,8	23,8
1,7	4,900	0,1	55,2	1,103	796	44	23,3
1,788	4,984	0,1	56,68	1,142	859	57,3	23,1
1,985	5,000	0,66	56,14	0,414	862	55	23,22
I_f(A)	U_f(V)	P_f(W)	Q_f(var)	S_f(VA)	Cos ϕ	*Hefvermogen* (kg)	*Toerental* (/min)
25,2	4,84	82	55	103	0,85	2,7	5400
41	6,32	187	130	237	0,85	4,5	6800
50	7,15	254	184	314	0,83	5,33	7400
47,58	6,83	198	208	317	0,69	5,38	7300
Berekende waarden							
P_f(W)	P_t (W)	$P_{batterij}$ *(W)*	*gram/watt*	*Toerental (/min)*	*Gebruikt toerental van de motor*	Cos ϕ	$P_{batterij}$ / P_t
103,67	311,02	471,24	5,73	10542,86	77,70	0,80	1,52
220,25	660,76	1025,20	4,39	6822,86	85,00	0,79	1,55
296,73	890,18	1323,63	4,03	7362,86	89,40	0,81	1,49
224,23	672,69	1277,10	4,21	7388,57	99,25	0,62	1,90

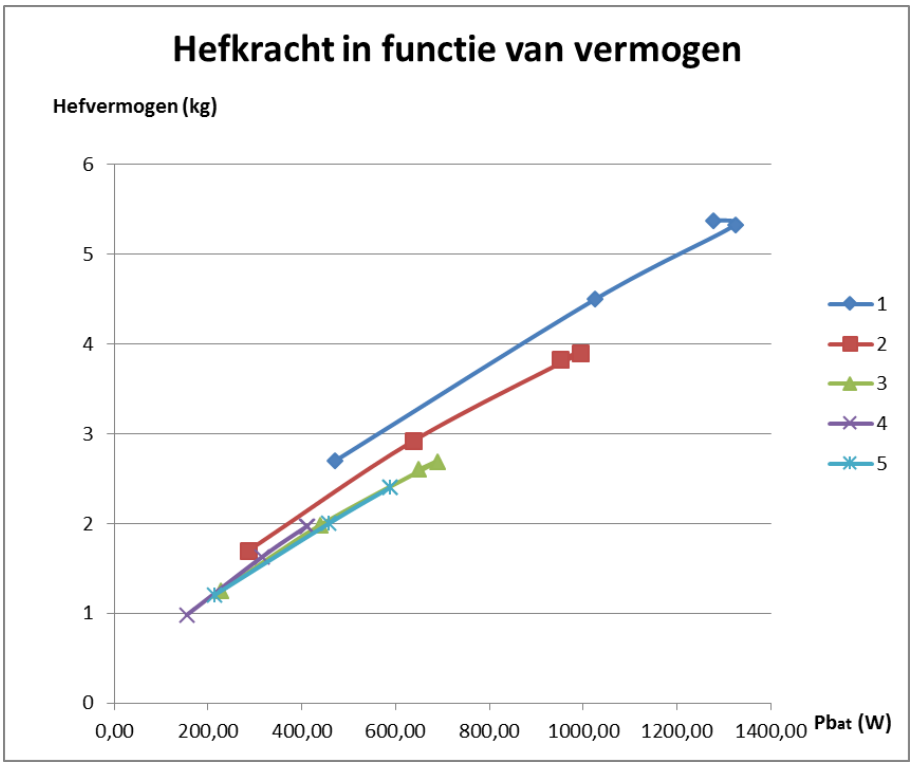
Tabel 23: motor 4664, prop 17x 8



Figuur 8: nodig vermogen batterij motor 4664



Figuur 9: hefkracht motor 4664



Figuur 10: hefkracht in functie van vermogen

De knik in de grafieken zijn afkomstig doordat deze metingen in twee dagen zijn gebeurd. Wanneer u de berekende gram/watt gaat gaan vergelijken met deze van de motor 4999 dan ziet u dat deze motor minder efficiënt is. Na het vergelijken van de meetresultaten ging onze voorkeur uit naar de 4999 maar vervolgens hebben we toch nog eens een kostprijzenberekening gemaakt met beide motoren, deze zijn te vinden in het hoofdstuk 9: Berekeningen.

8.5 Verslag projectweek 1

8.5.1 Verslag vrijdag 2 november 2012

Voor de herfstvakantie hadden we afgesproken wanneer we naar school zouden komen om de projectweek voor te bereiden. Het is de bedoeling dat we in de projectweek een aantal proeven uitvoeren. Op deze proeven willen we dan onze keuze van motoren en propellers voor onze multicopter baseren. We hadden al een planning gemaakt in klas wat we zouden doen vooraf en op vrijdag. Dieter, die thuis een metaalverwerkingsbedrijf heeft, had vooraf 2 constructies gemaakt. Eén slagboom om de tilkracht te meten, en één slagboom om het koppel van een propeller te kunnen meten. Dieter ging spijtig genoeg op reis tijdens de herfstvakantie. Dus heeft Matthias deze constructies gehaald en meegebracht vrijdag. Marijn had thuis met behulp van kippenhaas kooien gemaakt om deze proeven op een veilige manier te laten verlopen. Gilles had al veel tijd gespendeerd aan het maken van een site. Bram is op zoek geweest naar autoaccu's en een lader om deze accu's op te laden. Gilles en Matthias zijn heel de dag aanwezig geweest. Bram is bijna heel de dag aanwezig geweest. Marijn en Olivier konden maar tot de middag blijven en Lowie, Dieter en Andy konden wegens omstandigheden niet aanwezig zijn. Wanneer we binnenkwamen in lokaal 035 was er al onmiddellijk slecht nieuws voor ons. De bestelling van 4 motoren, 8 propellers en 4 ESC's was nog niet binnengekomen. Dit kon zorgen voor grote problemen. Dit belette ons niet om meteen van start te gaan en de proefstanden voor te bereiden. We hebben 2 proefstanden kunnen maken. Gilles, Bram en Matthias hebben zicht vooral bezig gehouden met het mechanische deel van de proefstanden. Marijn en Olivier hebben de elektrische voorbereidingen getroffen. Rond de middag waren we klaar en konden we niets meer doen. Dus besloten we om eerst te gaan eten. Wanneer we terugkwamen was er plots het goeie nieuws. De modelbouwwinkel had gebeld en we mochten om de bestelling gaan. Dus besloten we met z'n drieën mee te gaan met meneer Verhaeghe naar Brugge. Niet alles was geleverd, maar we hadden net genoeg om toch te kunnen werken in de projectweek. Wanneer we terug in het lokaal kwamen en alles eens goed bekeken botsten we al snel op een enorm probleem. We hadden geen rekening gehouden dat de motoren outrunners waren. Bijna heel de motor draait dus rond. Hierdoor konden we onze bevestigingsvoorzieningen niet meer gebruiken. Nadat we het even bekeken hadden vonden toch een oplossing. We hebben 2 bevestigingsplaatjes op

elkaar gelegd en tot onze grote vreugde hadden we dan dikte genoeg om de as in een lege boring, volledig nutteloos te laten draaien. Zo konden we via de bevestigingsstukken die bij de motor geleverd werden toch nog motor vast maken. We hebben dan de schroef die ook bij de motor geleverd werd kunnen vastmaken aan de onderzijde (de plaats waar we eerst de motor gingen mee bevestigen) met andere woorden we hebben de motor volledig omgekeerd aan onze slagbomen vastgemaakt. Toen hadden we nog meer 1 probleem en dat was hoe bevestigen we de propellers aan de motoren. We beslisten om dat te houden voor de projectweek, omdat het al 17u30 was geworden.

8.5.2 Verslag maandag 5 november 2012

Maandag was de eerste dag van de projectweek. We zijn er onmiddellijk ingevlogen. Ons hoofddoel van de dag was om een motor te doen draaien. Daarna gingen we proberen te onderzoeken hoe de werking precies ging. Als laatste wilden we maandag een motor kunnen regelen. Daarmee bedoel ik dat we de sturing zo kunnen instellen dat de motor als gewenst draait. Om ons eerste doel te bereiken hebben we eerst en vooral alle propellers doorboort met een boor van 9,75. Dit moesten we doen omdat de bouten die je kunt bevestigen aan de motoren van verschillende diameter zijn. We hebben dus besloten alle propellers te maken zodat ze passen op de grootste diameter. Daarna zouden we busjes maken die we dan in de boringen van de propellers zouden stoppen, zodat ze op alle motoren zouden kunnen bevestigd worden. Terwijl Dieter, Matthias en Bram hiermee bezig waren hebben Marijn en Andy de schakeling al beginnen maken. Gilles was toen bezig om een digitale oscilloscoop op zijn laptop te installeren en daarna nog wat verder te werken met de site. Hij heeft van iedereen een eigen deeltje gemaakt op de site waarbij ons e-mail adres staat zodat ze ons kunnen contacteren. Lowie heeft zich ongeveer heel de dag toegespitst op het gip boek. We gingen de motor aansturen met behulp van 2 autoaccu's een DC-voeding en een laagfrequentiegenerator. De 2 autoaccu's gebruikten we om de motor van stroom te voorzien. De motor had namelijk zo'n 60 A nodig bij een spanning van 24 VDC. De DC-voeding die we instelden op 5 V was nodig om de snelheidsregelaar te voeden. Dan dachten we nog dat we gewoon op een pulstrein nodig hadden van 50 Hz en met een variabele pulslengte. Marijn had wat opzoekwerk gedaan en hij vertelde ons dat de puls heel belangrijk was. Als we een puls tussen de 1 en de 1,5 ms stuurden naar de ESC zou de motor de ene kant op draaien. Een puls van 1,5 ms zou zorgen voor een stilstand. Van 1,5 naar 2 ms zou de motor de andere kant opdraaien. Maar dit signaal kon niet gecreëerd worden door onze laagfrequent generator. Het heeft wel tot de middag geduurd voordat de motor zijn eerste omwenteling deed. Er werd ons verteld door een leerkracht van het katho dat we de snelheidsregelaar zo weinig mogelijk moesten programmeren. Het werkte allemaal niet, dus besloten we toch

eens de programmer aan te sluiten. Nadat we alles die in het boekje stond eens geprobeerd te hebben lukte het ons plots toch om de motor aan de praat te krijgen. We probeerden het eerst met de lichtste motor, omdat we dan dachten het minste gevaar of risico te lopen. Maar deze motor viel constant stil. Dus probeerden we direct de grootste motor. Dit was een groter succes, want deze motor konden we volledig op zijn maximum doen draaien. Het was niet volledig zijn maximum, want de motor kon zo'n spanning aan van 30 V en wij beschikten maar over een spanning van 24 V. Met deze 24 V konden we maximum een tilkracht bereiken van 5,5 kg. Dit vonden we een zeer goed resultaat, want volgens onze schattingen zou de multicopter niet meer wegen dan 30 kg en zouden we dus met 8 motoren van 1,3 kW de multicopter in de lucht krijgen. We gaan sowieso werken met een aantal motoren deelbaar door 4, omdat we hem dan kunnen sturen met een sturing voor een quadcopter. We zijn na de les nog een uurtje gebleven, maar hebben dan besloten om de volgende dag verder te werken. 's Avonds hebben Marijn en Dieter nog opzoekingswerk gedaan en ze kwamen tot het besluit dat deze motoren ook te sturen waren met een sturing voor een normale servo-motor. Dit gaf ons moed voor de volgende dag.

8.5.3 Verslag dinsdag 6 november 2012

Op dinsdag hebben we onmiddellijk de hulp ingeroepen van Meneer Hemeryck om de informatie die Marijn en Dieter ons gaven te controleren. Er was jammer genoeg geen apparaat of schakeling aanwezig in school die dit kon. Dus hebben Marijn, Olivier en dieter een schakeling van het internet nagemaakt. Het ging om een servo-driver. Waarvan het hoofdcomponent de NE-555 is. Daarnaast worden er ook een aantal weerstanden, condensatoren en een diode gebruikt. Door de weerstand te veranderen kan je de oplaad- en ontlaadtijd van de condensatoren wijzigen. Hierdoor kan je de lengte van de positieve puls wijzigen. De negatieve puls wordt weggewerkt door de diode. Door dit signaal te regelen kan je via de ESC de snelheid van de motor sturen. Matthias heeft ondertussen het verslag van maandag gemaakt. Lowie heeft zich nogmaals verdiept in het gip-boek. Gilles heeft de digitale oscilloscoop afgesteld en daarna verder gewerkt aan de site. Andy en Bram hebben de juiste propellers en motoren op onze meetplaatsen bevestigd en daarna de batterijen vervangen door nieuwe opgeladen batterijen. De oude hebben ze terug aan de batterijlader gehangen. Omstreeks 10u was de schakeling af en was iedereen klaar om te starten met de metingen. We hebben eerst even gepauzeerd om dan van slag te gaan. De motor startte niet onmiddellijk. Na even zoeken hebben we ontdekt dat de weerstand moest verhoogd worden, omdat de puls niet klein genoeg kon gemaakt worden. Daarna konden we beginnen meten. Olivier probeerde het toerental te meten, wat niet zo eenvoudig is, omdat de toerentalmeter die we gekregen had niet echt goed werkte. Dit kwam doordat de propellers niet genoeg terugkaatsten naar het oog van de meter. Dit

konden we oplossen door een strookje zilverpapier te bevestigen op de propeller, maar ook dit bleek niet ideaal. Door de wijziging in gewicht (die miniem was) kregen we toch volledig andere meetwaarden. Dus besloten we om het toerental desnoods achterwege te laten en te hopen dat het af en toe wel werkte. Bram las de weegschalen af. Matthias bestuurde de powermeter en riep de waarden naar Dieter. Ook Andy deed dit, maar dan met de digitale multimeters die hij aangewezen kreeg. Het noteren van alle meetwaarden was de taak van Dieter, dit deden we op blaadjes die we al gemaakt hadden. Deze blaadjes werden dan op zijn beurt doorgegeven naar Gilles, die dan de waarden invulde in het Excel-bestand. Marijn en Lowie hebben terwijl wij bezig waren met meten verder gewerkt aan het gip-boek. We konden jammer genoeg maar 2u meten, omdat we in de namiddag naar Picanol moesten.

8.5.4 Verslag donderdag 8 november 2012

Donderdag hebben we in de voormiddag workshops gevolgd over de algemene vakken. In de namiddag konden we dan onze metingen verder zetten van dinsdag. We hebben eerst de proef van de tilkracht van alle propellers op motor 4 gemeten. We hebben per propeller 4 meetwaarden genomen. We konden bijna niet meer meetwaarden nemen, omdat het zeer moeilijk was om de puls perfect te regelen. Na een tijdje kwam Andy met een goed idee om terwijl we bij de ene meting de propeller verwisselden de andere meting uit te voeren op de koppelkracht meter. Deze meting is zeer simpel. We plaatsen een motor in een kooi. Aan deze kooi is een momentarm van een halve meter bevestigd, deze momentarm staat loodrecht op de as van de motor. Wanneer we dan de motor aansteken maakt de propeller een moment. We kunnen dan het moment meten doordat we aan het einde van de momentarm een weegschaal plaatsen. Daarna moeten we de gemeten waarde in gram delen door 1000 en maal 9,81 doen om het in newton te plaatsten. We moeten dan nog deze waarde delen door 2 om aan het moment te komen in Nm, dit was omdat de momentarm een halve meter bedraagde. Dus dan konden we snel meten en werd er geen tijd verloren. Verder kan ik hier niet veel meer over vertellen. Lowie is dan bezig geweest met het gip-boek omdat niet iedereen de meting kon doen. Marijn is beginnen schema’s maken van de elektrische schakelingen. ’s Avonds hebben we nog 2 uur doorgewerkt, omdat we alle metingen op alle motoren wilden gedaan krijgen. We hebben daarna nog een probleem tegengekomen. We hadden een snelheidsregelaar besteld, maar deze kon niet op tijd geleverd worden, dus kregen we een krachtiger ESC. Het probleem was dat de minimum spanning dat deze ESC kon sturen 4 lipo was. 1 lipo cel bevat 3,7 V, dus kan deze ESC minimum 14,8 V sturen. Doordat we motoren hebben die op 20V werken konden we jammer genoeg niet werken met 2 autoaccu’s, omdat we dan de motor zouden kunnen verbranden. Uit noodzaak hebben we dus moeten beslissen om maar

metingen te doen op 2 motoren. We hebben deze metingen allemaal kunnen afwerken.

8.5.5 Verslag vrijdag 9 november 2012

De vrijdag was de laatste dag van de eerste projectweek. Op ons programma stond er dat we in de voormiddag aan onze gip mochten werken en in de namiddag een voorstelling moesten geven van wat we allemaal gepresteerd hadden in de projectweek. Dit is niet alles, we mochten ook 4 voorstellingen naar keuze uitkiezen om zelf naar te gaan kijken. Met andere woorden, de voorstelling die we moesten geven was niet voor leerkrachten, maar eerder voor de leerlingen zelf. In de voormiddag hebben we geen metingen meer gedaan, maar besluiten proberen te trekken uit onze gemeten waarden en het Excel bestand op punt gesteld met grafiekjes en mogelijke fouten proberen te verklaren. Wanneer dat allemaal gebeurd was, hebben we in 2 gescheiden groepjes, die we vooraf bepaald hadden een PowerPoint gemaakt om onze voorstelling te bekrachtigen. De groepjes waren als volgt verdeeld. De eerste voorstelling was van Gilles, Andy, Bram en Matthias. In dit groepje hebben Gilles en Andy zich bezig gehouden met de PowerPoint. Bram heeft de meetplaats klaargemaakt om te verhuizen naar lokaal 032, waar we onze voorstelling moesten doen. Matthias heeft de verslagen van de voorbije dagen getypt. Rond 11u was de PowerPoint zo goed als af en zijn we begonnen met de meetplaats te verhuizen naar de 032. Zo konden we in onze voorstelling een kleine demonstratie geven. Om 12u waren we er volledig klaar voor. De tweede voorstelling werd gebracht door Marijn, Dieter, Olivier en Lowie. In deze groep hebben Dieter en Olivier de presentatie voorbereid. Marijn heeft het Excelbestand geoptimaliseerd en Lowie heeft nog wat verder gewerkt aan het GIP boek. In de namiddag zijn we naar de voorstellingen gaan kijken. Onze voorstellingen verliepen zeer goed. Er werden weinig vragen gesteld en de vragen die ze stelden konden we beantwoorden. Nadien werd er nog een glaasje gedronken op de geslaagde projectweek.

9. Berekeningen

Na de metingen die gebeurd zijn in de eerste projectweek zijn we opnieuw beginnen rekenen. Dit keer hebben we enkel berekeningen gemaakt met de gemeten resultaten van de motor 4999. Hier vind u de verkorte versie van de berekeningen. De belangrijkste berekening is de berekening met half vermogen dit omdat de multicopter best op half vermogen werkt zo is hij het best bestuurbaar. De berekende draagkracht is steeds de draagkracht van de motoren verminderd met het gewicht van de ESC's, het frame, de Lipo's, de ringen, de relaiskaart, de motoren, de propellers en de bekabeling.

Berekening 1:		
Motor: x 8	Nummer	Vermogen (W)
	4999	355,5
ESC: x 8	Type	Stroom (A)
	SKYMAXX PRO 85 85A - 2-6S - OPTO (RC-SKX-085-O)	85-100
Propeller: x 8	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22431	17
Lipo's motoren: x 8	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__14384__ZIPPY_Flightmax_5000mAh_6S1P_15C_DE_Warehouse_.html	6S 5000mAh LiPo
Lipo sturing x 1	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=13942	4S 3000mAh LiPo
➔ draagkracht	1,725	
➔ draagkracht per watt	6,188466948	
➔ Vliegtijd	18,73417722	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	1504,93
	kostprijs per kg	872,42
	Zonder batterijen	1180,60
	kostprijs per kg zonder batterijen	684,41

Tabel 24: berekening 1

Berekening 2:		
Motor: x 8	Nummer	Vermogen (W)
	4999	525
ESC: x 8	Type	Stroom (A)
	SKYMAXX PRO 85 85A - 2-6S - OPTO (RC-SKX-085-O)	85-100
Propeller: x 8	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22431	17
Lipo's motoren: x 8	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__14384__ZIPPY_Flightmax_5000mAh_6S1P_15C_DE_Warehouse_.html	6S 5000mAh LiPo
Lipo sturing: x 1	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=13942	4S 3000mAh LiPo
➔ draagkracht	6,525	
➔ draagkracht per watt	5,333333333	
➔ Vliegtijd	12,68571429	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	1504,93
	kostprijs per kg	230,64
	Zonder batterijen	1180,60
	kostprijs per kg zonder batterijen	180,93

Tabel 25: berekening 2

Berekening 3:		
Motor: x 12	Nummer	Vermogen (W)
	4999	355,5
ESC: x 12	Type	Stroom (A)
	SKYMAXX PRO 85 85A - 2-6S - OPTO (RC-SKX-085-O)	85-100
Propeller: x 12	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22431	17
Lipo's motoren: x 12	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__14384__ZIPPY_Flightmax_5000mAh_6S1P_15C_DE_Warehouse_.html	6S 5000mAh LiPo
Lipo sturing: x 1	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=13942	4S 3000mAh LiPo
Y-kabel x 8	Type	
	http://www.conrad.be/ce/nl/product/208393/Y-kabel-JR-050mm/1207062&ref=list	
➔ draagkracht	6,265	
➔ draagkracht per watt	6,188466948	
➔ Vliegtijd	18,73417722	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	2287,91
	kostprijs per kg	379,74
	Zonder batterijen	1813,22
	kostprijs per kg zonder batterijen	300,95

Tabel 26: berekening 3

Berekening 4:		
Motor: x 8	Nummer	Vermogen (W)
	4999	977,5
ESC: x 8	Type	Stroom (A)
	SKYMAXX PRO 85 85A - 2-6S - OPTO (RC-SKX-085-O)	85-100
Propeller: x 8	Type 1	Diameter (inch)
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=22431	17
Lipo's motoren: x 8	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__14384__ZIPPY_Flightmax_5000mAh_6S1P_15C_DE_Warehouse_.html	6S 5000mAh LiPo
Lipo sturing: x 1	Type	Naam
	http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=13942	4S 3000mAh LiPo
➔ draagkracht	17,325	
➔ draagkracht per watt	4,245524297	
➔ Vliegtijd	6,813299233	
Totale kostprijs:	Met type 1 propeller	1504,93
	kostprijs per kg	86,86
	Zonder batterijen	1180,60
	kostprijs per kg zonder batterijen	68,14

Tabel 27: berekening 4

Zo dit zijn de voornaamste berekeningen, alle berekeningen kunnen gevonden worden in de elektronische bijlage 2: Berekeningen.

10. Propeller

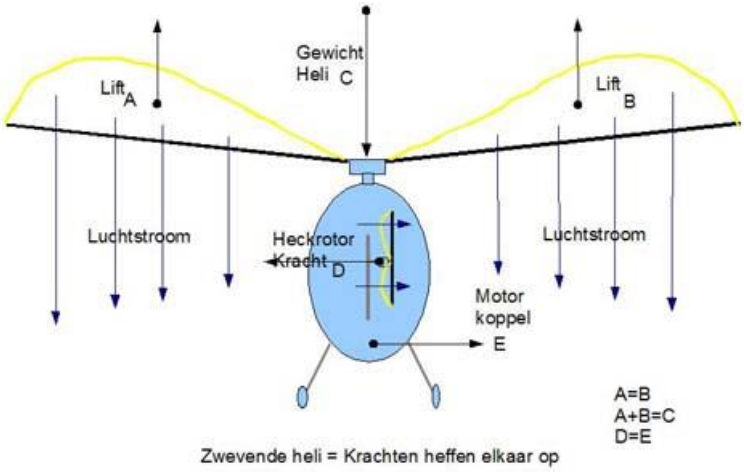
10.1 Wat is een propeller?

Een propeller is een onderdeel van een vliegtuig of een schip waarmee het (lucht) vaartuig wordt voortbewogen. Bij schepen wordt meestal de term schroef gebruikt.

Figuur 1: carbon propellers

10.2 Werking propeller bij helikopter

De propellers van een helikopter zorgen voor de lift, dat is de kracht die ervoor zorgt dat een helikopter kan opstijgen en door de lucht kan bewegen. Om lift te verkrijgen moet je er voor zorgen dat de propellers zich als het ware af kunnen zetten tegen de lucht. Dat gebeurt door met de propellers een neerwaartse luchtstroom te veroorzaken. De horizontale beweging van de rotor moet omgezet worden in een verticale luchtstroom. Dat gebeurt als volgt, de propellers hebben een aerodynamische vorm die ervoor zorgt dat de lucht die over het rotorblad heen stroomt een langere afstand moet afleggen als de lucht die er onderdoor stroomt. Daardoor wordt de luchtstroom die er over heen gaat als het ware uitgerekt en ontstaat er daar een lagere luchtdruk als de luchtdruk onder de propeller. Als gevolg daarvan wil het rotorblad omhoog. Met de spoedstangen kan het rotorblad ook gekanteld worden, waardoor het schuin gaat staan. Dan wordt de lucht die er onderdoor gaat ook nog eens samengeperst, wat een hogere luchtdruk onder het rotorblad veroorzaakt. Hiermee kun je de lift vergroten en kun je zelfs de helikopter laten opstijgen. Je kunt de rotor van een helikopter beschouwen als een schroef die als het ware in de lucht boort. De aerodynamische vorm en het schuin kantelen zorgen samen voor voldoende kracht om de helikopter de lucht in te krijgen en er ook in te houden.



Figuur 2: lift bij helikopter

Er is echter nog een probleem, want als de rotor wordt aangedreven door een motor in de romp van de helikopter, dan zou niet alleen de propeller ronddraaien, maar dan zou de romp zelf rond gaan draaien in de tegengestelde richting, dit heet het reactiekoppel. Dat wordt voorkomen door de staartrotor, deze werkt op dezelfde manier als de grote rotor, maar staat verticaal en oefent dus een horizontale kracht uit, in de tegengestelde richting waarin de romp zou gaan draaien. Een helikopter die op deze manier werkt noemen we een helikopter met een enkele rotor. Er zijn nog andere manieren om dit probleem te verhelpen. Je kunt namelijk ook een dubbele rotor (twee boven elkaar) op de helikopter laten draaien, waarbij beide rotors een andere kant op draaien. Dit heet een coaxiale rotor. Een andere mogelijkheid is de tandemrotor, daarbij draaien twee rotors achter elkaar in tegengestelde richting. Dit zie je vaak bij transportheli's van het leger. Een helikopter kan meer dan alleen maar opstijgen en landen, hij kan ook door de lucht manoeuvreren.

10.3 Hoe kan een helikopter vooruit vliegen?

Als je vooruit wilt vliegen moet je de rotor een beetje schuin naar voren zetten waardoor de lift diagonaal naar boven en dus ook een beetje naar voren werkt. Dat gebeurt door de tuimelschijf [10] ook schuin naar voren te zetten. Als een rotorblad dan vooraan is wordt de spoedstang iets naar beneden getrokken en gaat het rotorblad iets minder schuin staan waardoor de lift vooraan iets vermindert. Het rotorblad kan dan iets naar beneden klappen omdat er een scharnier aanzit. Op dezelfde manier wordt de lift aan de achterkant iets hoger en klappen daar de rotorbladen iets omhoog. Je kunt ook in andere richtingen vliegen door de rotor in andere richtingen schuin te laten staan. Een nadeel van de helikopter in het algemeen is dat hij niet zo snel kan vliegen. Dat komt omdat de rotor aan de ene kant naar voren draait en aan de andere kant naar achteren. Als de helikopter vooruit vliegt gaat het rotorblad dat naar achteren draait dus eigenlijk langzamer als het andere. Als een helikopter te snel vliegt wordt dat verschil te groot en wordt de draagkracht van dat rotorblad te klein waardoor de helikopter scheef gaat hangen.

10.4 Hoe kan een helikopter sturen?

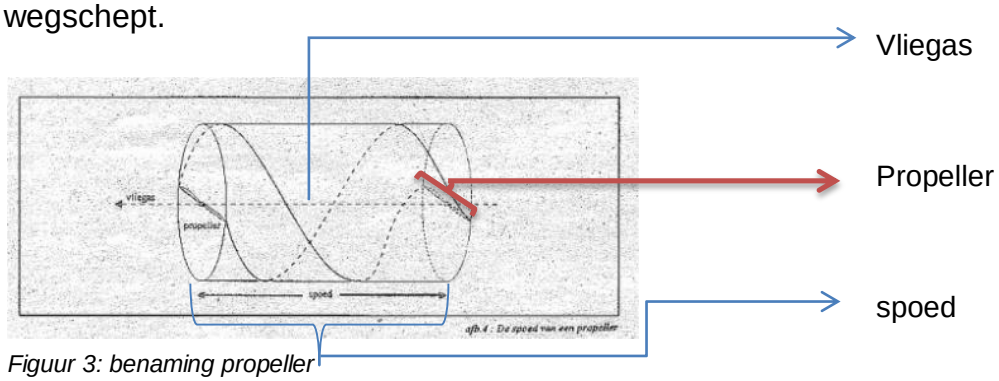
Als je de staartpropeller meer lucht laat verplaatsen draait de helikopter de ene kant op en als je hem minder lucht laat verplaatsen, dan draait de helikopter vanzelf de andere kant op door het reactiekoppel.

[10] dat is een soort van kogellager; het bovenste deel draait en het onderste niet en daartussen zitten kogeltjes die zorgen dat het soepel loopt

10.5 Bij welke propellerafmeting is de stuwkracht het grootst?

In eerste instantie zal de stuwkracht toenemen bij een grotere propeller. De massa van de helikopter neemt dan echter ook toe, waardoor de stuwkracht weer afneemt. Er zal dus een maximale stuwkracht zijn bij een bepaalde propellerafmeting.

De afmetingen van een propeller worden gegeven door de diameter en de spoed. De spoed is de lengte van een kolom lucht die de propeller in één omwenteling wegschept.



Figuur 3: benaming propeller

Een propeller bestaat meestal uit twee bladen die om dezelfde as draaien. Doordat de bladen een bepaalde hoek maken met de vliegas (bladhoek), scheppen de bladen de lucht, die tegen de bladhoek aanbotst, weg. Hierdoor ontstaat een naar voren gerichte stuwkracht, die evenwijdig is met de vliegas.

De ideale stuwkracht T wordt gegeven door:

$$T = \pi . r^2 . \rho . p . n$$

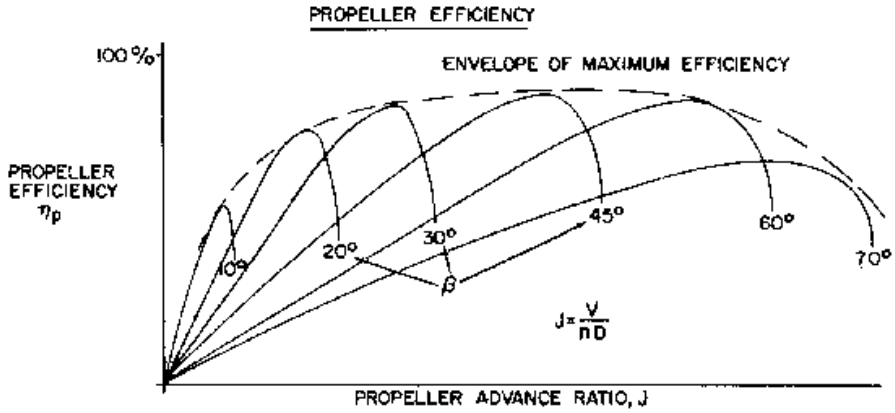
Hierin is r de straal, ρ de dichtheid van lucht, p de spoed en n het toerental.
De snelheid van het vliegtuig is in ideale toestand gelijk aan de snelheid, waarmee de propeller rond draait. Per seconde maakt de propeller n omwentelingen en in één omwenteling legt de helikopter p meter af. De vliegsnelheid v is dus:

$$V = p . n$$

Om de efficiëntie van een propeller te bepalen kan de waarde J gebruikt worden:

$$J = \frac{V}{n \times d}$$

De efficiëntie is in theorie 100% als J = 0.5. J ligt in de praktijk tussen 0.46 en 0.51.



Figuur 4: propeller efficiëntie

10.6 Bevestiging propeller bij multicopters

Op forums wordt er uitgelegd hoe je de propellers bevestigt op een motor. Er is sprake van een prop-saver en over prop adapters. De bedoeling van deze stukken is om de propeller te bevestigen op de motor. Bij een prop-saver wordt dit gedaan door middel van een soort elastiek, maar er wordt vooraf een soort ring op de motor bevestigd om het elastiek goed te kunnen bevestigen.

Figuur 5: prop-saver

Bij een prop adapter wordt de bevestiging op een andere manier gedaan, deze manier wordt ook aangeraden door de mensen die op het forum actief zijn. Bij een prop adapter wordt er een soort dop op de propeller geplaatst die dan met schroefdraad vast aan de motor hangt.

Figuur 6: prop adapter

Wij hebben gebruik gemaakt van het principe van een prop adapter, maar hebben de propeller bevestigd met behulp van een borgmoer. Vooraleer dit mogelijk was moesten we de propellers uitboren, dit hebben we gedaan aan de hand van een werkstuk die ervoor zorgde dat de boring perfect in het midden zat. De technische tekening van dit werkstuk is te vinden in bijlage 1: tekening uitboren propeller.

10.7 Links- en rechtsdraaiende propellers

De meest voorkomende propellers zijn linksdraaiende daarom moesten we ook rekening houden bij de keuze van de propellers, dat er zowel links- als rechtsdraaiende propellers waren van de zelfde afmeting.

11. Propellers balanceren

Een propeller kopen is een simpel klusje, eenmaal je hem hebt kan je hem in principe gebruiken maar dat doe je toch beter niet. Want, een kleine onbalans in de propeller kan leiden tot grote schade aan de motor en bijhorende delen, ook de elektronica kan hier niet goed tegen. Als het ene propellerblad iets zwaarder is dan het andere (en dus het zwaartepunt niet meer in het center van het gat ligt) ontstaat er een centripetale kracht waardoor het zwaarste blad naar buiten wil vliegen. De lagers worden daardoor ongelijk belast en gaan sneller slijten. Die onbalans zorgt dus zeker en vast voor trillingen en deze hebben een grote vernietigende werking. De onbalans kan veroorzaakt worden door een beschadiging na een crash of in het geval van een nieuwe propeller door een productiefout. Als de mal waarin de kunststof gespoten word niet perfect gemaakt is of de kunststof niet homogeen is kan dit leiden tot onbalans. Dus dient een propeller gebalanceerd te worden net zoals een autowiel gebalanceerd moet worden. De technische tekeningen van onze prop balancer zijn te vinden in bijlage 2: prop balancer.

11.1 Werkwijze

11.1.1 Voorbereiding

1. Zorg dat de boring van de propeller de gewenste diameter heeft.
2. Zet de propeller met 2 conische moeren vast op een asje, zodat het center van het boorgat in het center van het asje ligt.

Figuur 1: spanmoeren en propas

3. Zorg voor een wrijvingloze opstelling waarop de propeller kan draaien. Dit kan een magnetische prop balancer zijn maar evengoed een wrijvingsloze oplegging

Figuur 2: magnetische prop balancer

Figuur 3: mechanische prop balancer

4. Wegnemen van materiaal gebeurt meestal met schuurpapier, gebruik eerst een ruwere korrel vb. K180 en daarna K 400. Bijvoegen van materiaal kan gebeuren met secondelijm.

11.1.2 Horizontaal balanceren

1. Hang de propeller zo goed mogelijk horizontaal. Onthoud naar welke kant hij valt en wat dus het zwaarste blad is. Om zeker te zijn draai de as en herhaal je dit nog eens.
2. Als je zeker bent wat het zwaarste blad is schuur je een beetje materiaal weg in het midden van de achterkant (onderkant) van het propellerblad. Zeker niet op de voorkant op te tippen want dan zal hij niet meer optimaal werken omdat je het profiel veranderd.
3. Blijf dit herhalen totdat de propeller in horizontale balans blijft hangen.

11.1.3 Verticaal balanceren (hub balancing)

1. Als de propeller horizontaal in orde is, zet je hem zo goed mogelijk verticaal. En kijk weer wat de zwaartste kant is.
2. Dan je kan je aan de zwaarste kant een beetje materiaal wegnemen van de naaf (eng. Hub) of je voegt een beetje secondenlijm toe aan de andere kant.
3. Blijf dit herhalen totdat de propeller in beide verticale posities blijft hangen.

11.1.4 Controle

Als je de propeller goed gebalanceerd hebt zou deze in alle posities moeten blijven staan, hij mag zich niet verdraaien. Indien dit niet het geval is begin je het balanceren weer vanaf stap 1.

11.2 Besluit

Dit klusje neemt veel tijd in beslag, dus geduld is zeker nodig. Per propeller mocht je toch rekenen op een twintigtal minuutjes. Wat wel opviel was dat vooral de linksdraaiende propellers bijgewerkt moesten worden. Er moest echt veel materiaal worden weggenomen, dus werd er met een klein boortje enkele puntjes weggeboord zodat het wat vlotter ging. Ook merk je een groot verschil in geluidsniveau tussen een gebalanceerde propeller en een niet gebalanceerde propeller. Dus het loont zeker de moeite om de propellers te balanceren.

12. Het frame

Het frame bij een multicopter is één van de hoofdonderdelen dus dient er voldoende belang aan gehecht te worden. Bij kleinere multicopters kan je gemakkelijk standaard frames kopen in alle mogelijke configuraties, materialen, kleuren en prijsklassen. Omdat onze multicopter toch niet van dagdagelijkse omvang is moesten we ons eigen frame bouwen, wat natuurlijk ook een grote meerwaarde biedt aan onze GIP.

Belangrijkste vereisten van het frame:

- licht
- demonteerbaar
- voldoende stevig
- Nauwkeurig uitgelijnd

12.1 De materiaalkeuze

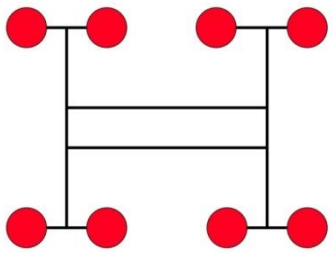
De materiaalkeuze voor het frame was snel gemaakt: het zou aluminium worden. Daarbij speelden de volgende voordelen een grote rol.

- Aluminium is licht, stevig en gemakkelijk te bewerken zoals lassen, zagen, boren, frezen.
- Aluminium is vrij corrosiebestendig door zo'n natuurlijke oxidatie laag, dit kan men nog verbeteren door de aluminium te behandelen, bv. anodiseren (Dus een extra verflaag tegen corrosie is niet meer nodig).
- Aluminium is zo'n 3 keer lichter dan staal (het kost wel 3 keer zoveel, maar hoe lichter hoe beter).
- Dieter heeft thuis een metaalverwerkend bedrijf waar er verschillend aluminium buisprofielen beschikbaar zijn, zo konden we de berekeningen uitvoeren op verschillende afmetingen.

12.2 Mogelijke ontwerpen

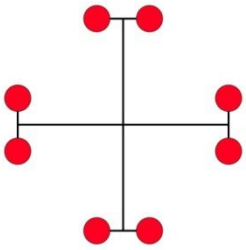
Er zijn natuurlijk verschillende mogelijkheden voor je frame:

- H-frame



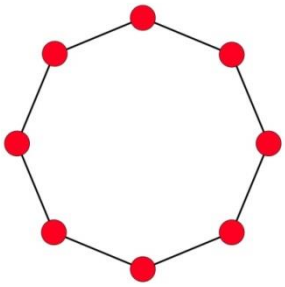
Figuur 1: H-frame

- Kruis-frame



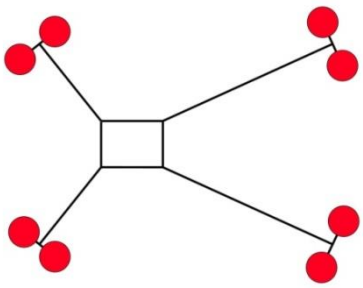
Figuur 2: kruis-frame

- Cirkelvormig frame



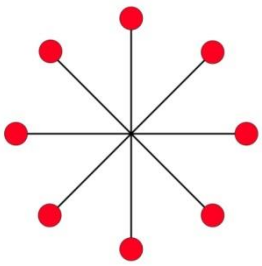
Figuur 3: cirkelvormig frame

- Asymmetrisch frame



Figuur 4: asymmetrisch frame

- Octocopter frame



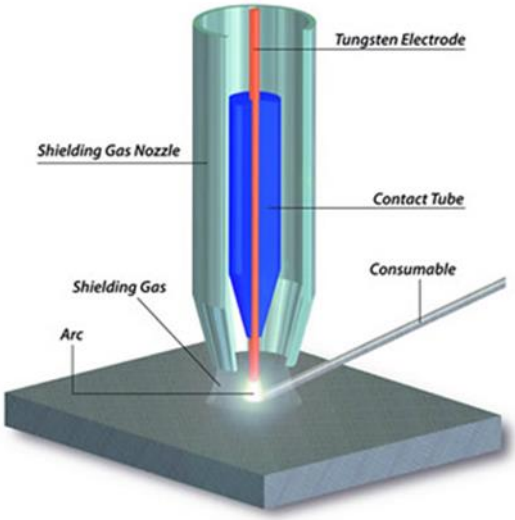
Figuur 5: octocopter frame

We hebben een centrale sturing waar elke snelheidsregelaar aan verbonden is, ook alle lipo pakketten zijn parallel geschakeld. Als we de sturing niet centraal zouden kunnen plaatsen, wat bij o.a. een cirkelvormig frame niet mogelijk is, zou dat ten eerste veel extra bekabeling betekenen en ten tweede zou de sturing ook niet goed functioneren, omdat de gyroscopen dan verkeerd georiënteerd staan. Een H frame was mogelijk, maar zo'n frame zou meer wegen dan de andere constructies en heeft een iets ingewikkeldere constructie die ook na demontage nog veel plaats inneemt. Een asymmetrisch frame wordt bijna uitsluitend gebruikt om mee te filmen, omdat men de camera op een goede plaats kan monteren (omdat de propellers hier het zicht niet belemmeren). Een octocopter frame was zeker uitgesloten, omdat er veel meer materiaal aan te pas komt en omdat het moeilijk te demonteren zou zijn. Dus kwamen we uit bij kruisframe, omdat dit weinig plaats inneemt als het gedemonteerd is, de sturing centraal kan staan, het frame rond de rol en knik as eenzelfde traagheid heeft (wat de vliegeigenschappen ten goede komt). Ook is het gemakkelijker om de ringen op zo'n frame te monteren, omdat je meer bevestigingspunten hebt.

Op Zaterdag 12 Januari werd het frame door Lowie en Dieter vervaardigd. Dit werd gedaan in de werkplaats bij Dieter thuis (Cafralu). Lowie heeft ervaring opgedaan bij het zagen en boren van de stukken terwijl Dieter alles aaneenlaste en afwerkte. Het lassen gebeurde volgens het TIG proces, dat zich uitstekend leent voor het lassen van aluminium, er is wel enige ervaring vereist bij dit proces.

12.3 TIG lassen in een notendop

De afkorting staat voor Tungsten Inert Gas, het is een vorm van elektrisch booglassen waarbij gebruik gemaakt word van een wolfram elektrode en een inert beschermgas (vb. Argon/Helium). Voor het lassen van aluminium is een TIG lastoestel nodig met een AC bron, dit heb je nodig om door de oxide laag te komen. Bij aluminium moet je het smeltbad goed in de gaten houden en op het juiste moment toevoegmateriaal aanbrengen, bij gelijkstroom lassen is dit minder het geval.



Figuur 6: TIG lassen

Voordelen van TIG lassen:

- hoge laskwaliteit
- bijna geen lasrook
- geen lasspatten
- alle posities
- mooie lasnaden
- bijna alle metalen zijn te lassen met deze methode

Nadelen:

- Tijdrovend en dus duurder dan vb. Mig/Mag
- Grote warmte inbreng

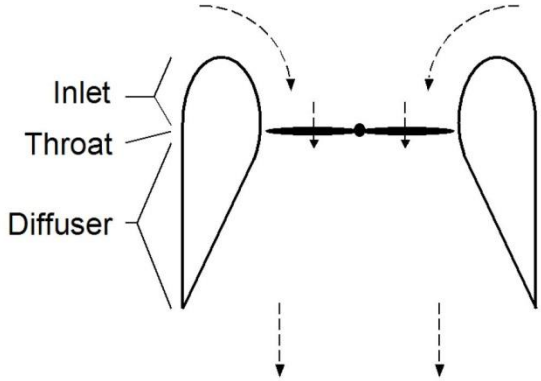
Dankzij de lastafel konden we alles mooi haaks lassen, zo bekwamen we een nauwkeurige constructie. De plastic inslagdoppen zorgen voor een mooie afwerken en bovendien voor een afgerond kopvlak.

12.4 Het resultaat

Het is een zeer licht frame, het weegt (zonder bekabeling, ringen…) slechts 3,22 kg. Het frame is zéér gemakkelijk te demonteren, en is zeker sterk genoeg. Een persoon die op het midden van het frame staat zorgt slechts voor een kleine doorbuiging. Alle tekeningen en de stukkenlijst van het frame zijn te vinden in bijlage 3: frame.
Alle bouten, moeren en schroeven werden vastgezet met borgmiddel en indien mogelijk nog met borgmoeren zodat ze zeker niet zouden loskomen door trillingen. Ook moet er voor elke vlucht gecontroleerd worden of alles stevig vastzit zodat gevaarlijke situaties vermeden worden.
Nadien werden er nog verschillende dingen aan het frame gemonteerd zoals: bevestigingen van de ringen, sturing, bekabeling, massa klemmen, Lipo’s, …

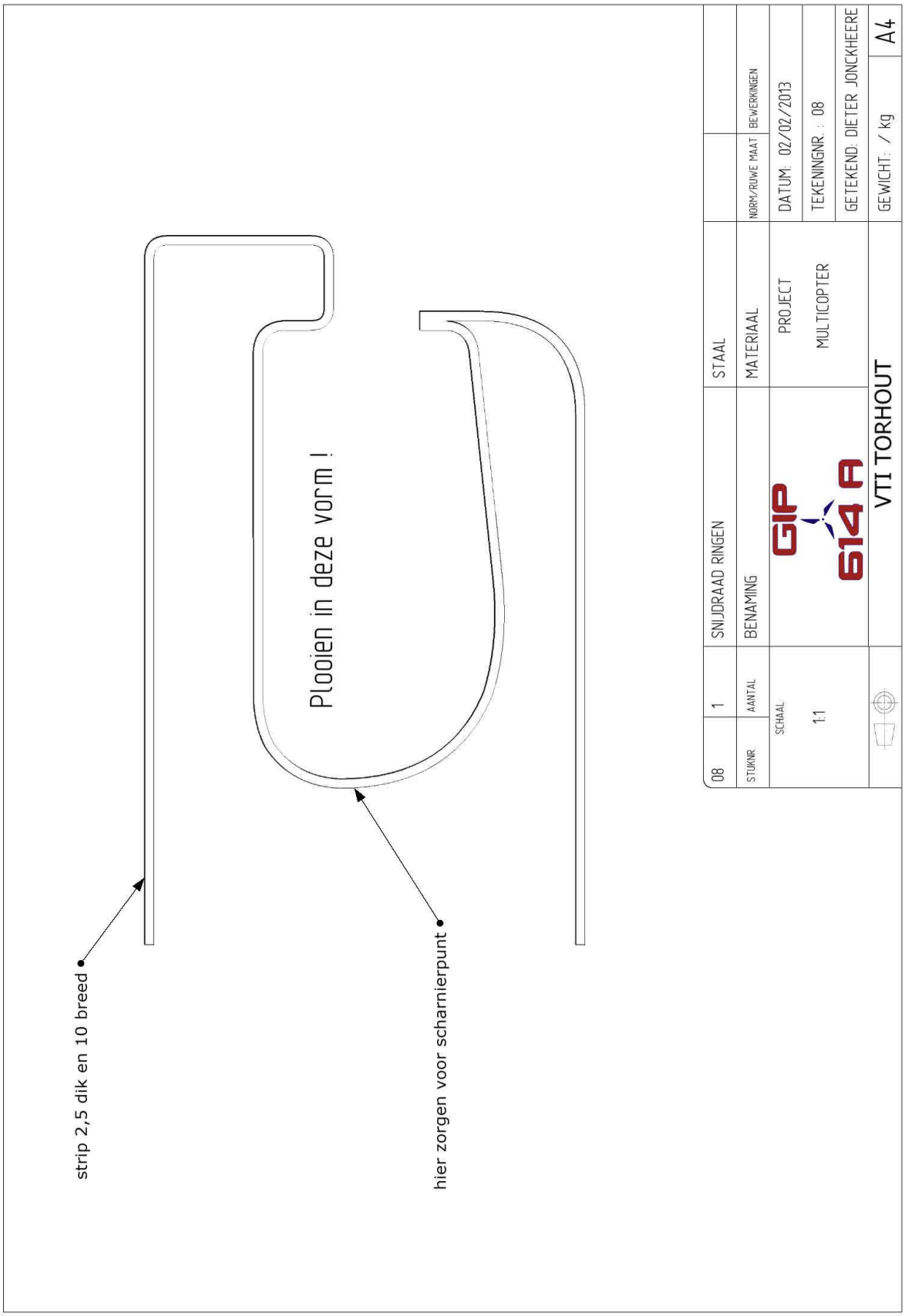
13. Ringen

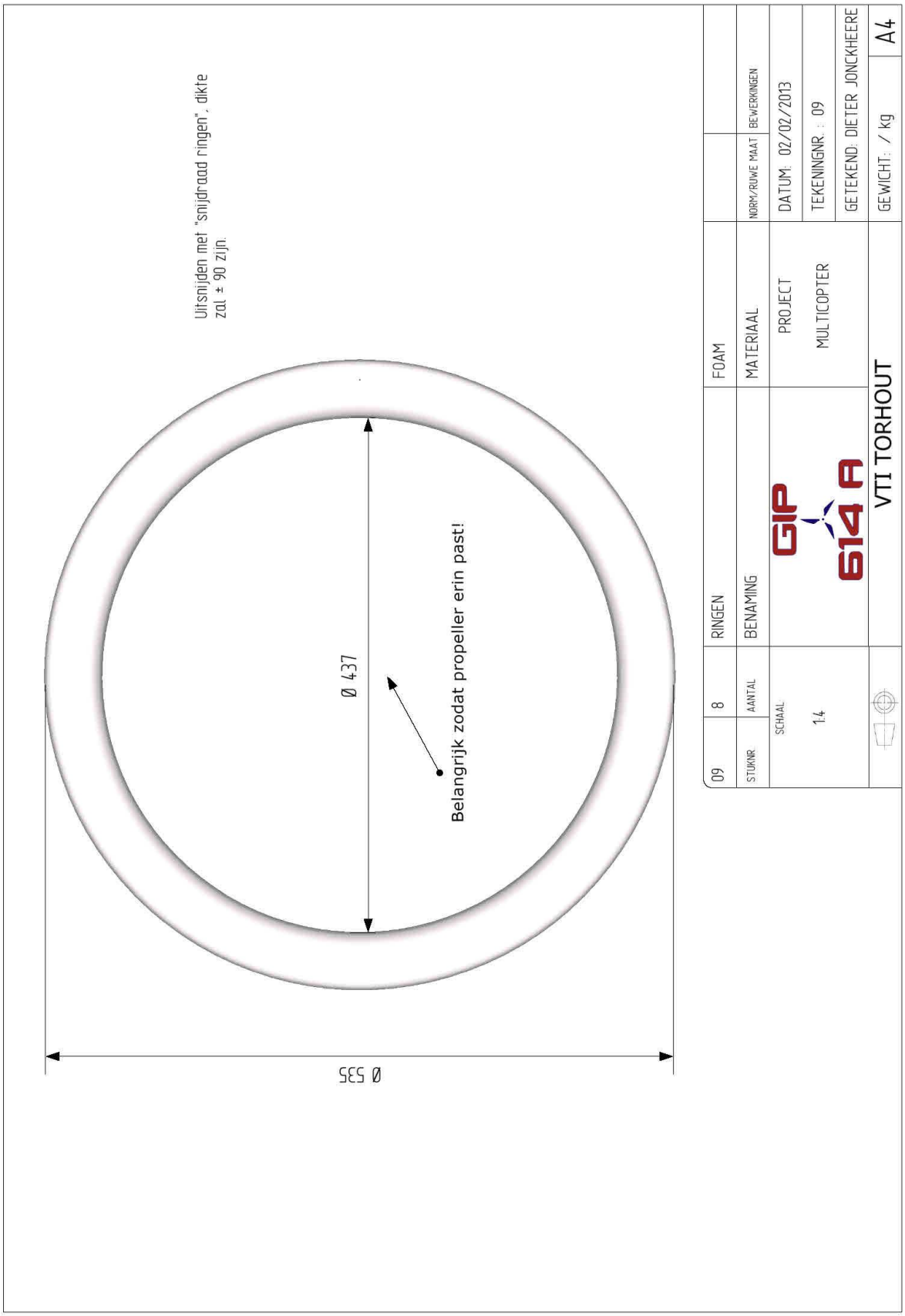
Veiligheid is één van de aspecten van onze GIP en daar hebben we dus ook rekening mee gehouden.
Omdat draaiende propellers met een toerental van ± 8000tr/min gevaarlijk zijn moest er een oplossing komen. Toen Ruben Buyschaert zijn demonstratie kwam geven had hij een drone mee die volledig in een foam was ingebouwd. Dat bracht ons op het idee om “iets” rond de propellers te doen zodat direct contact niet mogelijk is. Na enige tijd hadden we een oplossing gevonden, we zouden ringen maken die rond de propellers pasten, maar dit heeft nog bijkomende voordelen. Door de ring zo te vormen dat hij op een straalbuis gelijkt kan je meer lift creëren. Een voorbeeld op internet toont voor een propeller van ongeveer 15cm in diameter, een tilkracht die 15% hoger licht dan zonder ring. Nog een voordeel is dat het geluid gereduceerd word. Dus hadden we direct 2 voordelen. Nu moesten we dit nog enkel zien te vervaardigen.



Figuur 1: straalbuis

Het eerste idee was het maken van een mal en deze op te vullen met isolatieschuim dat je in de bouwsector kan krijgen. Dus maakten we een mal met rechte wanden en binnen afmetingen van de propeller. De mal werd gevuld met schuim en vervolgens werd het deksel, met gaten, boven op de mal vastgeschroefd. Na korte tijd zette het schuim al uit en kwam het door de voorziene gaten naar buiten, het zag er allemaal goed uit. De volgende dag werd de mal opengemaakt en kwamen we tot de jammerlijke vaststelling dat het mislukt was. Het schuim was volledig ingezakt en zelfs niet hard. Dus moesten we op zoek naar een andere oplossing.
Die oplossing zou het snijden van foam worden, na een kleine proefopstelling met een hittedraad lukte snijden van piepschuim zeer goed, enige nadeel is dat de draad goed gespannen moet zijn en dus zorgt voor een rechte snede. Als we onze straalbuis vorm willen behouden moeten we een ander alternatief zoeken. Het werd uiteindelijk een vaste “snijdraad” die de vorm had van de doorsnede van een straalbuis (eng. Duct). De vaste vorm bekwamen we door een stalen strip van 2,5 mm dik en 10 mm breed te plooien in de vorm volgens volgende tekening.


strip 2,5 dik en 10 breed
hier zorgen voor scharnierpunt
Plooien in deze vorm !
08
STUKNR
1
AANTAL
SNIJDRAAD RINGEN
BENAMING
STAAL
MATERIAAL
SCHAAL
1:1
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
DATUM: 02/02/2013
TEKENINGNR. : 08
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
GEWICHT: / kg
A4
VTI TORHOUT

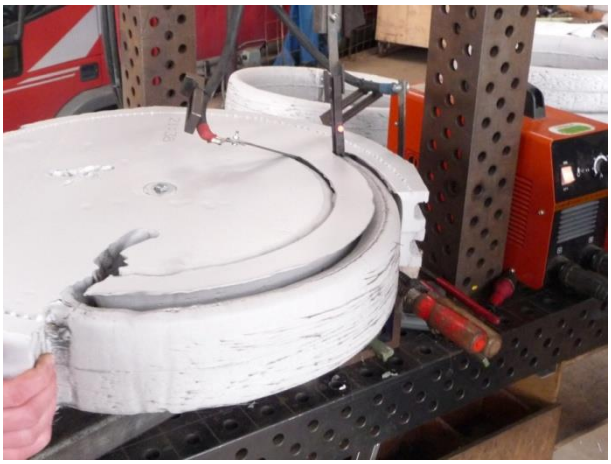

Uitsnijden met "snijdraad ringen", dikte zal ± 90 zijn.
Ø 437
Belangrijk zodat propeller erin past!
Ø 535
09
STUKNR
8
AANTAL
RINGEN
BENAMING
FOAM
MATERIAAL
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
SCHAAL
1:4
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
DATUM: 02/02/2013
TEKENINGNR. : 09
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
VTI TORHOUT
GEWICHT: / kg
A4

Maar omdat de breedte onderaan smaller is dan bovenaan moest dit open kunnen om de snede te kunnen inzetten, dus werd er bovenaan een scharnierpunt gemaakt. Om voldoende hitte in de snijdraad te kunnen ontwikkelen is er voldoende stroom nodig zeker omdat de strip een grote doorsnede en geleidbaarheid heeft. Dus hebben we gebruik gemaakt van een elektrode laspost waarbij we aan elke zijde van de snijdraad een pool van de laspost hingen. Dit toestel kon maximaal 160 A leveren wat juist voldoende was om de draad goed heet te krijgen en dus goed te kunnen snijden. Omdat de ringen mooi rond en gelijk moesten zijn hebben we gebruik gemaakt van een draaiplateau waarop we een stuk foam konden bevestigen. Omdat de ringen toch een zeker hoogte zouden hebben, lijmden we twee isolatieplaten van 50mm dik op elkaar. Dan sneden we er vierkante stukken uit waaruit de ring gesneden moest worden.

Verloop van het snijden.

1. Monteren van foam stuk op de draaiplateau
2. Voorverwarmen van de snijdraad (± 2 min)
3. Sluiten van de snijdraad en op het juiste moment starten met het stuk rond te draaien.
4. Een constante snelheid en kracht uitoefenen zorgt voor een mooie egale snede
5. Tijdens het snijden met een ventilator de rook wegblazen
6. Op het einde de ring zelf goed begeleiden en op het juiste moment de snijdraad openen

Figuur 2: resultaat



Figuur 3: foto van tijdens het snijden

13.1 Ondervindingen

Het inzetten en het einde gingen het moeilijkst, soms begon de foam zelfs te branden en moesten we extra blazen om geen vlammen te krijgen want dit zorgt voor het krimpen van de foam. Pas na de 3de ring kregen we de binnendiameter zoals gewenst.

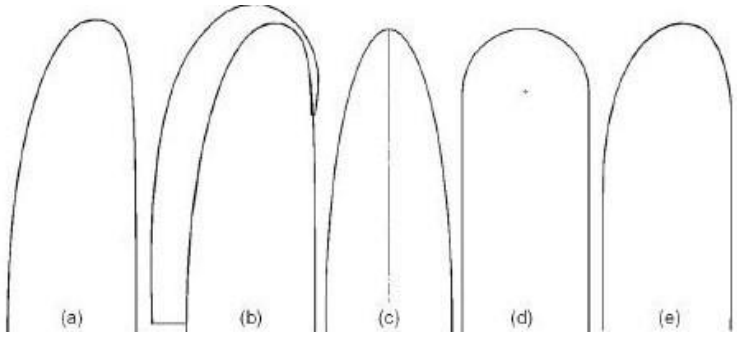
13.2 Nabewerkingen

Als de ringen gesneden waren was het oppervlak zeer ruw en hier en daar zat een gaatje of uitstulping. Dus werden de ringen allemaal geschuurd en op geplamuurd met speciaal plamuur voor isolatieplaten, het voordeel daarvan is dat het zéér licht is en goed hecht. Als het plamuur droog was werden de ringen nog bijgeschuurd en zonodig nog een 2de maal geplamuurd. Om de montage wat te vergemakkelijken en het een mooier uitzicht te geven werden de ringen per twee aan elkaar gezet. Om een goed contactoppervlak te bekomen werd van beide een stuk weg gesneden en met speciale isolatielijm werden de twee aaneen gelijmd. Deze lijm is uiterst sterk en dus zeer geschikt voor onze toepassing, het nadeel is wel dat het een grote massadichtheid heeft. Als dat gedroogd was werden de ringen wat bijgewerkt en werden er 2 in het zwart gespoten, zodat we duidelijk zien wat de voorkant van onze multicopter is. De rest van de ringen zouden we later spuiten als het geheel in werking is en er nog tijd over is. Het spuiten zelf is niet zo simpel omdat de verf in de ringen drengt en geen goede dekking heeft. Dus met enkele lagen geeft dit een beter resultaat. Het monteren van de ringen was een hele opgave omdat de propellers mooi in het center moeten zitten zodat die de ring niet raakt. En de vrij grote tolerantie op de ringen maakt het daardoor niet gemakkelijker. Het eerste idee was om aluminium platte strips te plooien om de ringen aan te bevestigen. Dit hebben we gemaakt en getest, maar de strip boog te veel door, dus we zijn dan maar opnieuw beginnen zoeken naar een oplossing. De strip op z’n kant zetten en een gedraaide plooi waar de ring met een bout bevestigd zat werd de oplossing. De

strips zelf werden met zelf borende schroeven aan het frame vastgezet. De ringen werden met stukjes draadstangen, moeren en rondsels vastgezet. We hebben ook een ring getest in onze proefstand, met de ring zorgde dit voor een stijging van de hefkracht met 12% tegenover zonder ring.

13.3 Mogelijke verbeteringen

Indien de ringen hoger zouden zijn zal het effect nog groter zijn, maar het was moeilijker om nog dikkere isolatieplaten te vinden. Ook het snijden ervan zou nog moeilijker zijn. Afhankelijk van de rendementsverhoging zou het interessant zijn om de ringen toch hoger te maken als het gewicht ervan niet opweegt tegen de extra hefkracht die je kunt maken. Ook de montage ervan zou beter kunnen indien er een stevigere bodem aan de ringen zou hangen zodat het een vaster geheel wordt. Eventueel op zoek gaan naar een ander materiaal om de ringen in een mal de kunnen maken door te gieten.
Door eventueel de buitenzijde van de ring dezelfde venturie vorm te geven als de binnenkant zal het effect hoogstwaarschijnlijk groter zijn, vooral tijdens het snel opstijgen maar we hebben dat bewust niet gedaan omdat het monteren ervan nog een stuk moeilijker zou worden en ons frame zou moeten aangepast worden.
Zo zie je maar dat je heel ver kan gaan in het maken van de “perfecte” ringen maar het moet wel haalbaar blijven.



Figuur 4: verschillende doorsneden voor ringen

14. Motor

14.1 Inleiding

Onze bedoeling is om een volledig elektrisch vliegtoestel te vervaardigen, dus maken we natuurlijk gebruik van elektromotoren.

14.2 De elektromotor

Een elektromotor is een machine die elektrische energie omzet in mechanische energie. Met deze mechanische energie kan er dan iets worden aangedreven. Er bestaan zeer veel verschillende soorten elektromotoren, maar ze kunnen worden onderverdeeld in twee grote groepen: de gelijkstroom- en wisselstroommotoren.

De werking van een elektromotor is gebaseerd op elektromagnetisme. De motor bestaat uit twee delen: een stator en een rotor. De stator is het vaste onderdeel en de rotor het bewegende onderdeel. Een van deze twee is uitgevoerd als elektromagneet terwijl de ander, afhankelijk van het type motor, uitgevoerd is als een permanente magneet, elektromagneet of slechts van magnetisch materiaal. Door de krachtwerking van magnetische polen op elkaar, of door inductiewerking, gaat de rotor draaien.

14.3 Gebruik elektromotor

- Huishoudelijke apparaten
  - Wasmachines
  - Videorecorders
  - Koelkasten
  - Stofzuigers
  - …
- Computers
  - Ventilator die processor koelt
  - …
- Industrie
  - Kranen
  - Lopende banden
  - Pompen
  - Compressoren
  - …

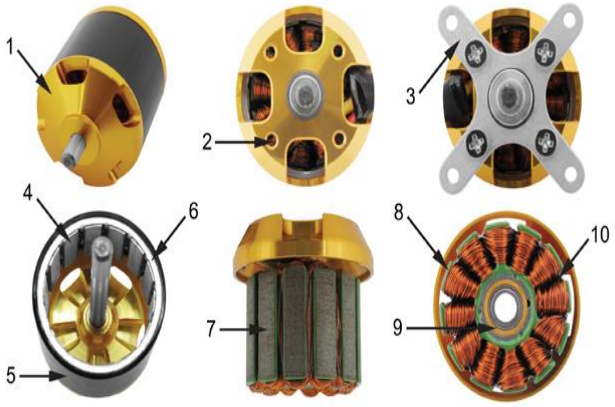
14.4 Onze motor

Wij gebruiken borstelloze gelijkstroommotor of elektronicamotor. Ze worden wel gelijkstroommotoren genoemd, maar eigenlijk hebben ze niets met gelijkstroommotoren te maken, want er zitten geen borstels en collectoren in. Onze motoren zijn outrunners. Hiermee duidt men erop dat het bewegende deel (de rotor) vanbuiten zit en de stator binnenin. De rotor bestaat uit een permanente magneet.

De naam elektronicamotor komt van het feit dat de gelijkstroom die we van onze batterijen verkrijgen nog naar een wisselstroom moet worden omgevormd. Hiervoor heeft elke borstelloze gelijkstroommotor een bijbehorende elektronische stuurschakeling. Deze schakeling bevindt zich, in ons geval, in de snelheidsregelaar.

14.5 Samenstelling

1. behuizing (rotor)
2. Bevestiging op motor
3. Bevestigingskruis
4. Magneten (Neodymium)
5. Isolatie
6. Geleiding
7. Statorkern
8. Spoelen
9. Wiellager



15. Lipo

15.1 Inleiding

Een lithium-ion-polymeer-accu, beter bekend als een lithium-polymeer-accu of kortweg Lipo-accu is een oplaadbare batterij. De batterij is een betere variant van de lithium-ion-accu.
Een Lipo-accu wordt vooral in de modelbouw gebruikt vanwege het grote vermogen per gewicht. Ook hebben deze accu's een lage interne weerstand waardoor ze een hoge stroom af kunnen geven. Een Lipo-cel heeft geen last van het geheugeneffect zoals bij een NiCd-cel.
Het laden van een Lipo-accu gaat vrij snel: in ongeveer 1 uur is een Lipo-accu opgeladen. Het is wel belangrijk dat het opladen van een Lipo-accu met de juiste lader gebeurt. Lipo-accu's kunnen bij verkeerd laden in brand vliegen of exploderen. Er zijn dan ook speciale Lipo-celladers verkrijgbaar.
Een Lipo-cel heeft een nominale spanning van 3,7 V, bijna drie keer zo hoog als die van NiCD- en NiMH-cellen. Bij het ontladen mag de spanning van een Lipo-cel niet onder de 3 V komen, anders is de kans groot dat de accu daarna niet meer te laden is.
Lipo-cellen kunnen in serie worden geschakeld. Als de cellen ook in serie worden geladen, dient de lader uiteraard geschikt te zijn voor het laden van het juiste aantal in serie geschakelde Lipo-cellen. Ook is het mogelijk om Lipo-cellen parallel te schakelen. De totaal opgenomen stroom van de belasting wordt dan evenredig verdeeld over de parallel geschakelde cellen.

15.2 Het gebruik

En lipo-accu gebruik je best in een omgeving met temperaturen van 15 tot 40°C. Indien het kouder is wordt het sterk aangeraden om de accu’s eerst even op te warmen, zodat ze toch al warm hebben van vooraf.

15.3 Laden

Lipo accu's laden is moeilijk, omdat je rekening moet houden met de individuele cellen van de accu, de capaciteit van de accu en zeker niet mag overladen want dit geeft het risico op brand en/of explosie. Gelukkig zijn er vele laders op de markt, dus hoeven we ons geen zorgen te maken.

Een lader heeft minimum tweeladers:

- een tweepolige connecctor die op de 'hoofdaansluiting' van de batterij wordt aangesloten. Het type aansluiting varieert per batterij, maar adapters zijn eenvoudig te maken en ook kan er een andere connector aan de batterij worden gezet.
- Een SIL connector, waarop alle cellen individueel worden aangesloten. Het aantal pennen van deze connector is het maximaal aantal cellen dat de lader aankan + 1.

De lader is automatisch: aan het begin een hoge laadstroom, die later zakt naar 10% van de maximale stroom en aan het einde worden de cellen 'gebalanceerd' om te zorgen dat alle cellen helemaal geladen zijn. Het laden gebeurt in principe met maximum "1C". Een accu van 1000 mAh wordt dus maximaal geladen met 1 A. Sommige accu's kunnen een grotere laadstroom verwerken, bijvoorbeeld 2C. Als geen laadstroom wordt opgegeven, is 1C een veilige aanname. Daarnaast mag ook de laadspanning nooit over de 4,2 V/cel gaan. Daarom zakt de laadstroom naar het einde van het laden. Het spreekt voor zich dat het een slecht idee is om zelf een lader te maken. Lipo’s hebben geen ingebouwde temperatuurbeveiliging, en ook is het bij sommige laders mogelijk om een verkeerd laadprogramma te starten. Daarom steeds een oogje in het zeil houden. De laadtijd van 80% ontladen cellen bedraagt ca. 1 uur indien de laadstroom 1C bedraagt.

Ondanks al deze snufjes hoeft zo'n lader helemaal niet duur te zijn voor $30 tot $50 vind je in Hong Kong prima toestellen. Wil je echter het neusje van de zalm en ga je in de modelbouw speciaalzaak om de hoek, dan ben je al gauw het dubbele tot drievoud kwijt.

15.4 Ontladen

Lipo accu's zijn veel gevoeliger voor diep-ontlading dan lood- of NiCd accu's. Als een Lipo cel onder de 3V komt, kan deze mogelijk niet meer geladen worden. Het is daarom belangrijk de spanning van de accu in de gaten te houden. Hiervoor zijn zeer goedkoop modules te verkrijgen. Deze modules worden op de balance-connector aangesloten en geven per cel met een rode (<3,3V) of groene (>3,6V) led aan wat de status is. En zodra er een rode led aangaat, gaat ook de buzzer aan.

Het idee is om zo'n module aan te sluiten op je modelvliegtuig zodat je hoort wanneer het tijd is om te landen, maar zo'n module is natuurlijk ook prima bruikbaar voor een robot. In veel gevallen zal het volstaan om vooraf even te controleren of alle cellen op groen staan. Een alternatief is een beveiligingscircuit dat de accu loskoppelt als de spanning te laag wordt. Deze circuits moeten de grote ontlaadstromen van de Lipo accu kunnen verwerken, waardoor ze wat duurder zijn.

15.5 Bewaren

Een Lipo accu moet je niet leeg bewaren. Als de accu binnenkort (1-2 weken) opnieuw gaat gebruiken, is het best deze gewoon vol te laden voor je deze in de kast legt. Als ze voor langere tijd bewaard worden, kun je ze met een speciaal 'storage' programma in je lader klaarmaken voor opslag. In praktijk betekent dit dat de Lipo's ontladen of bijgeladen worden tot 3,75V per cel. Daarna kan je ze voor een langere tijd wegleggen. Wat wel aangeraden wordt is af en toe te checken dat de celspanning niet onder de 3V daalt. Ze moeten droog en op kamer temperatuur bewaard worden.

15.6 Onze keuze

Voor onze multicopter hebben we gekozen voor de Zippy 6s 5000 mAh 15C. dit zijn lipo's van 22,2V nominale spanning. We kochten 8 accu's aan waarvan er reeds 1 stuk is. Toen we er nog 1 hadden bij besteld kregen we de spijtige boodschap dat deze accu's niet meer te verkrijgen waren. Nu vliegen we met 7 werkende accu's en 1 kapotte om het evenwicht te kunnen behouden. Volgens berekeningen zouden we ongeveer 15 minuten kunnen vliegen met 8 accu's. De langste vlucht die we tot nu toe hebben uitgevoerd was ongeveer 5 minuten lang. De accus waren nog niet zoveel gedaald in capaciteit. Voor de sturing hebben we een Zippy 4s 3000 mAh 25C. deze accu wordt rechtstreeks naar een spanningsomvormer gevoerd die ons 12VDC voor de LEDs en andere toepassingen heeft. Ook zorgt deze accu voor de 5VDC voor de Scratchy.

Als lader voor deze accu's hebben we gekozen voor een B6 ultimate 2x200W (Sky RC). Het grote voordeel van deze lader is dat we twee accu's op het zelfde moment kunnen opladen, zodat we de mogelijkheid hebben om alle accu's te laden in minder dan 4 uur. Met deze lader is het ook mogelijk om de lipo van de sturing te laden. Om hiermee te laden wordt er gebruik gemaakt van een 12 VDC lood accu uit de autoindustrie.

15.7 Foto's

Figuur 1: Lipo

Figuur 2: Lipo lader

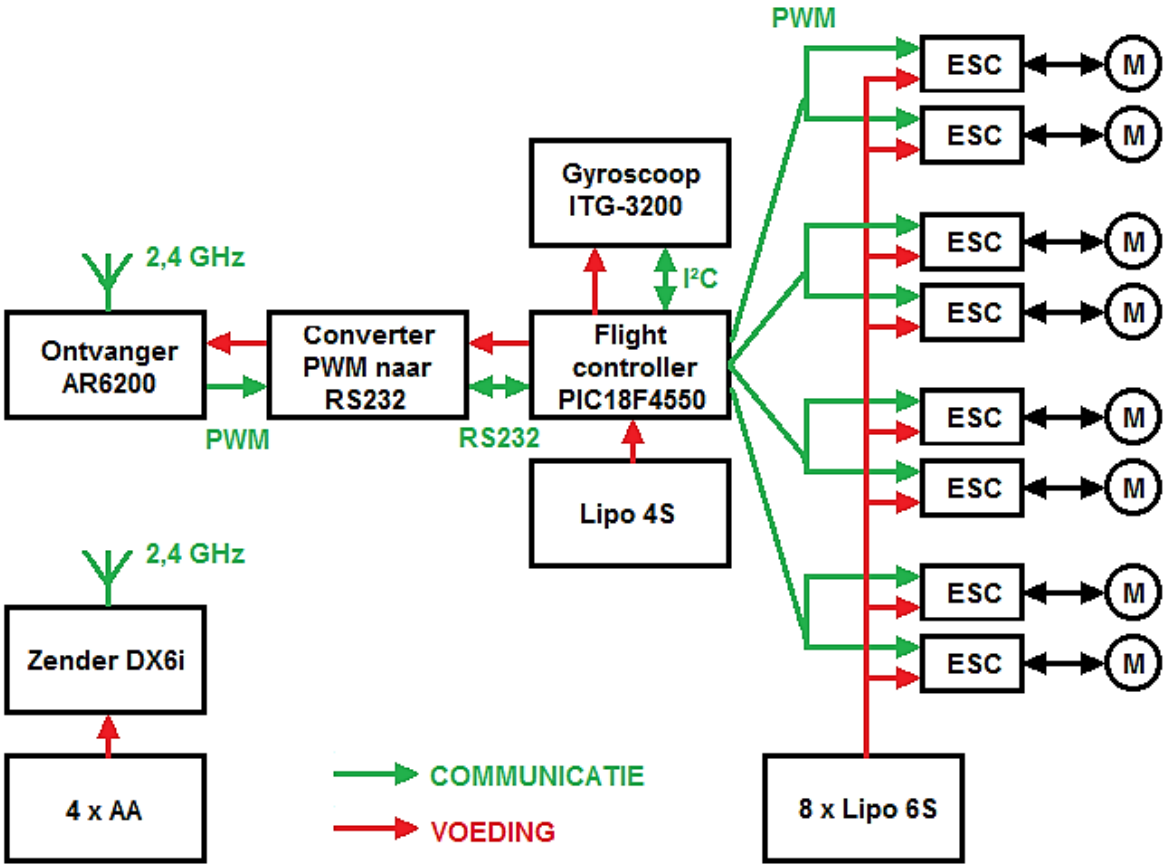
16. Sturing

16.1 Algemeen

Onder de naam sturing verstaan we het geheel van alle elektronica die ervoor zorgt dat onze octocopter bestuurbaar is. De sturing bestaat dus uit een geheel van meerdere apparaten, namelijk:

- De zender met ontvanger
- De PWM naar RS232 convertor
- De flight controller
- De gyroscoop
- De acht ESC's
- De relaiskaart

Al deze apparaten moeten één geheel vormen, dit gebeurt als volgt:



Figuur 1: principeschema sturing

In deze figuur is de relaiskaart niet opgenomen omdat de relaiskaart niet essentieel is voor de bestuurbaarheid van onze octocopter, deze dient enkel voor de verlichting.
In dit hoofdstuk wordt zeer kort de functie van alle apparaten in de sturing uitgelegd, de specifieke informatie van elk afzonderlijk apparaat is te raadplegen in het betreffende hoofdstuk.

16.2 Zender en ontvanger

Deze verzorgen samen de draadloze verbinding tussen de bestuurder en de elektronica op de octocopter.
Verdere gegevens van de zender en de ontvanger zijn te raadplegen in hoofdstuk 17.

16.3 PWM naar RS232 convertor

Deze printplaat zet de PWM signalen die de ontvanger levert om in RS232 signaal type, deze printplaat zorgt dus ook voor vermindering in draden. De zes draden afkomstig van de ontvanger worden gereduceerd tot 4 draden die vervolgens aangesloten zijn op de flightcontroller.
Verdere gegevens van de PWM naar RS232 convertor zijn te raadplegen in hoofdstuk 18.

16.4 De flightcontroller

Deze printplaat vormt het moederbord van onze octocopter. Deze is opgebouwd rond de PIC18F4550 die de nodige firmware[11] bevat.
Verdere gegevens van de flightcontroller zijn te raadplegen in hoofdstuk 19.

16.5 De gyroscoop

De gyroscoop is de sensor in onze sturing die ervoor zorgt dat we niet sturen maar regelen. Deze meet de hoeksnelheid en communiceert met de flightcontroller aan de hand van I^2C.
Verdere gegevens van de gyroscoop zijn te raadplegen in hoofdstuk 20.

16.6 De ESC's

Dit zijn de snelheidsregelaar, Electronic Speed Controller. Deze vormen de gelijkspanning afkomstig van de Lipo packs om naar een driefasige wisselspanning met regelbare frequentie en spanning zodat het toerental van onze motoren te sturen is.
Verdere gegevens van deze ESC's zijn te raadplegen in hoofdstuk 21.

[11]Firmware is software die in hardware geprogrammeerd is, in mensen taal betekent dit dat firmware het programma is die in microcontroller geprogrammeerd is.

16.7 De relaiskaart

Deze printplaat zorgt ervoor dat we met het lichtkanaal van de flight controller 1 A kunnen schakelen in plaats van 0,1 A, tegelijk zorgt deze ervoor dat het de uitgangsspanning niet de Lipo pack spanning is maar 12 VDC.
Verdere gegevens van de relaiskaart zijn te raadplegen in hoofdstuk 22.

17. Zender en ontvanger

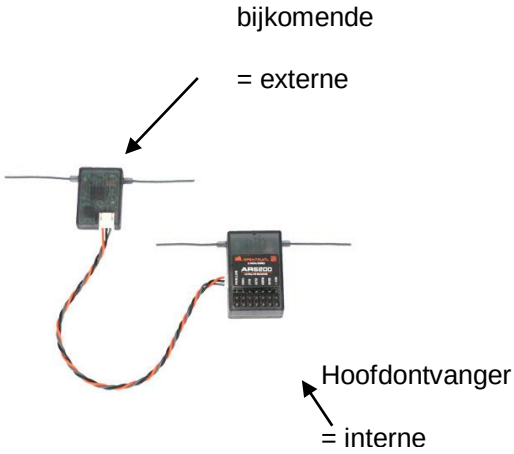
17.1 Onze zender en ontvanger

Om met onze multicopter te kunnen vliegen, moeten we hem natuurlijk kunnen besturen. Dit doen we met behulp van een zender en een ontvanger. Je hebt veel verschillende merken die zenders en ontvangers ontwikkelen. Futaba, Spektrum en Graupner zijn hiervoor nog steeds de marktleiders. Wij hebben al een zender aangekocht, het is een spektrum dx6i geworden. We wilden eerst de dx5e kopen, maar omdat ons werd verteld dat het maar 20 euro extra was om een zender te krijgen met 6 kanalen in plaats van 5 was onze keuze snel gemaakt. Hierbij werd een ontvanger met 6 kanalen bijgeleverd, namelijk de AR6200.

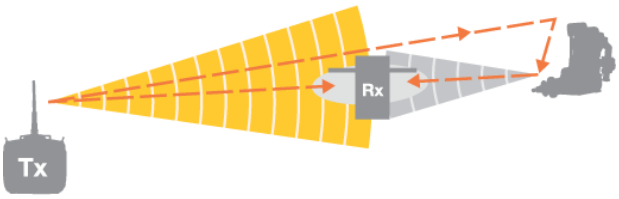
17.2 De ontvanger

Wij hebben dus zoals eerder vermeld de AR6200 aangeschaft. Deze ontvanger kan zelfs gebruikt worden voor een 7 kanaals zender en JR 2.4 GHz radio's. Deze ontvanger combineert een externe en interne ontvanger. De interne ontvanger wordt gemonteerd op de hoofdprintplaat en de externe ontvanger wordt gemonteerd op het frame op minstens 5 cm verwijderd van de hoofdontvanger (interne ontvanger) met dubbelzijdige "foam" tape (kleefband met een schuimlaagje tussen). Daarbij is het zeer belangrijk dat beide ontvangers loodrecht ten opzichte van elkaar worden gemonteerd, vooral bij grote afstanden tussen zender en ontvanger. Er zijn twee typische gevaren bij zender-ontvanger communicatie met één ontvanger. Het eerste gevaar is de gereflecteerde signalen. Hierbij wordt een signaal gestuurd naar de ontvanger, maar gaat het zelfde signaal ook langs de ontvanger en wordt teruggekaatst door het frame. Als het teruggekaatste signaal toevallig in tegenfase toekomt bij de ontvanger als het directe signaal. Dit zorgt voor een annulering van het signaal. Dit is een zeer kort moment, maar de kleinste fout bij een multicopter kan het ergste veroorzaken. Het tweede gevaar is dat er blinde vlekken optreden. Dat houdt in dat er signaalverlies voorkomt, omdat de ontvanger te ver van de zender verwijderd is en er misschien een voorwerp tussen de verbinding staat. Beide problemen zijn op te lossen met behulp van een hoofdontvanger en bijkomende ontvangers. In ons geval 1 hoofdontvanger en 1 bijkomende ontvanger.

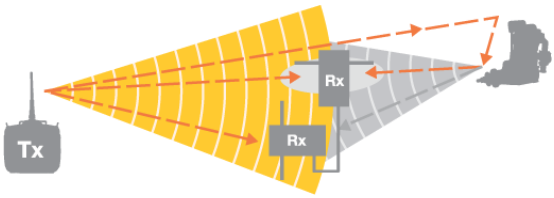
Figuur 1: DX6i



Oplossing reflectieprobleem



Figuur 2: reflectie met hoofdontvanger



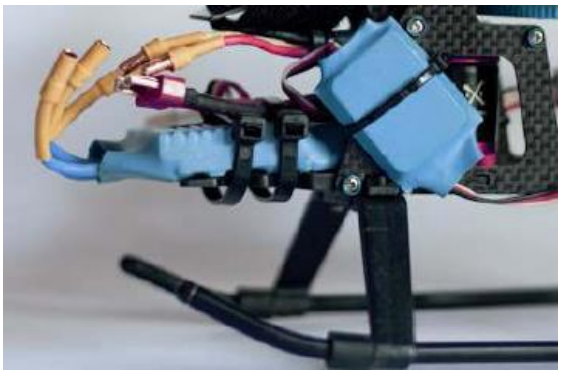
Figuur 3: reflectie met bijkomende ontvanger

17.3 De zender aan de ontvanger koppelen

Voordat de zender samenwerkt met een ontvanger moeten beiden aan elkaar bekend gemaakt worden. Dit heet “binding”. Binding is het delen van identificatiecodes tussen de ontvanger en het actieve geheugen van de zender. Eenmaal gebonden maakt de ontvanger alleen nog contact met de zender wanneer het eerder gebonden modelgeheugen is geselecteerd. Als een ander modelgeheugen wordt geselecteerd, zal de zender geen verbinding maken met de ontvanger. Deze functie heet Model Match en voorkomt vliegen met een model op basis van een ander modelgeheugen.

17.3.1 Voorzorgsmaatregelen

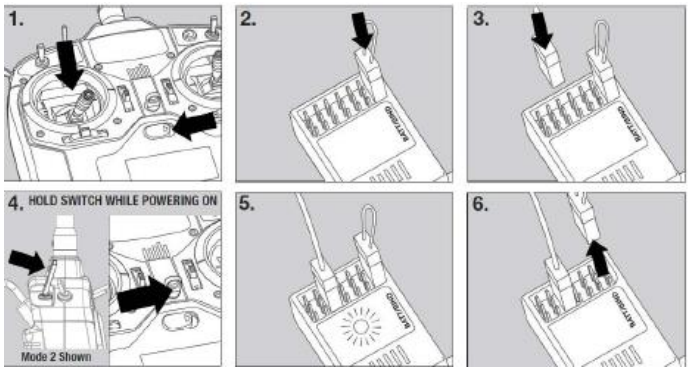
Voor je begint met het aansluiten van de ontvanger en het programmeren van de dx6i maak je minstens twee van de drie draden die de motor verbinden met de ESC los. Onderstaande foto toont bedoelde draden waarvan er twee zijn losgemaakt. Zo kan je veilig tewerk gaan.



Figuur 4: loskoppelen motor

17.3.2 Het binden

In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe je de zender met de ontvanger bindt.



Figuur 5: binden zender aan ontvanger

Het delen van de identificatiecodes tussen de ontvanger en het actieve geheugen van de zender doe je als volgt:

1. Maak minstens twee van de drie draden die de motor verbinden met de stroomverdeler (ESC) los, om ongelukken te voorkomen;
2. Zet de zender aan en selecteer de geheugenplaats waaraan je de ontvanger wilt binden;
3. Zet de zender uit (1) en trek de throttle stick (1) geheel naar je toe;
4. Plaats de bindplug in de ontvanger (2) op de aangegeven plaats (BATT/BIND);
5. Steek het stekkertje van de accu in de ontvanger, in één van de andere aansluitpunten (3). De LED van de ontvanger gaat nu knipperen;
6. Trek de Trainer/Bind-schakelaar (4) naar je toe. Houd hem daar en zet de zender aan (4);
7. Wacht totdat de LED van de ontvanger continu brandt (5) en laat pas dan de Trainer/Bind-schakelaar los;
8. Maak vervolgens de accu los van de ontvanger, zet de zender uit en verwijder de bindplus (6). Doe dat in deze volgorde
   Om problemen te voorkomen, maak dan dat je de zender dicht genoeg bij de ontvanger houdt.

17.4 Werking zender-ontvanger communicatie

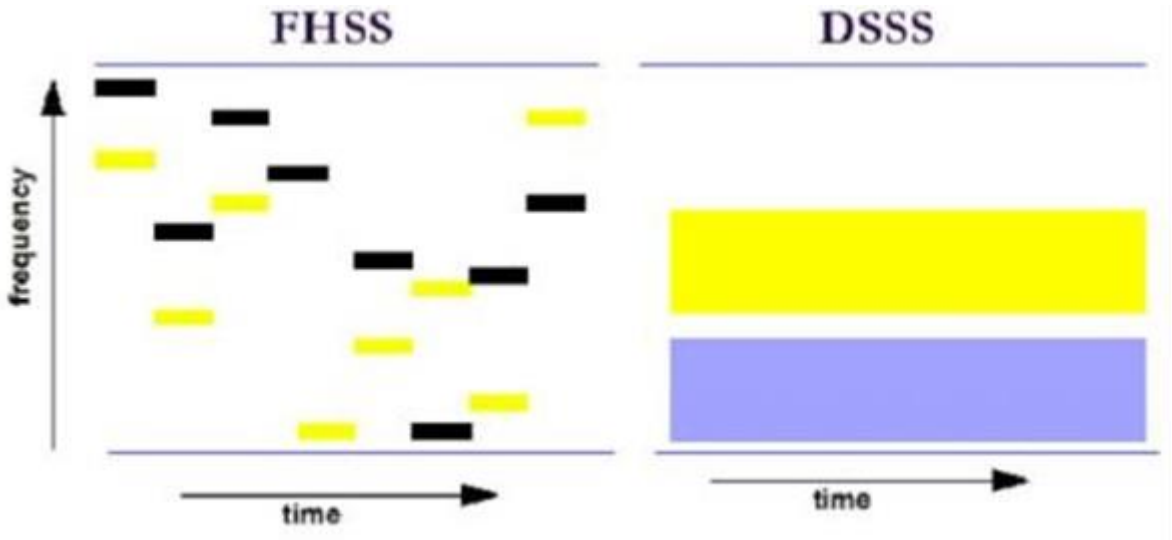
Er wordt informatie doorgestuurd naar de ontvanger over een frequentie. In de tijd zijn er al verschillende manieren geweest om deze informatie door te sturen.
De traditionele RC-systemen werken aan de hand van de “narrowband” technologie. Dit was zo’n 50 jaar geleden. Deze technologie werkt op specifieke frequenties waarbij ze de bandbreedte zo “dun” mogelijk proberen te houden. (bv. 27, 35, 36, 40, 41 en 72 MHz). Je kan deze technologie vergelijken met met je fiets op een zeer dun pad rijden. Hierbij zal je merken dat je niet snel kan rijden of je valt. Je bent ook zeer gevoelig voor wind of andere obstakels. Bij de narrowband technologie is dit ook zo. Het kan zijn informatie niet snel versturen en het is enorm gevoelig aan storingen van buitenaf.

Een andere technologie is de DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) technologie.
Dit kan je best vergelijken met een leger. Een leger op het moderne slagveld zal zich verspreiden. Zo zijn ze veel sterker dan dat ze samen blijven, want dan kunnen ze al uitgeschakeld worden door 1 enkele granaat. Dus is de kans dat iemand geraakt wordt door een willekeurige kogel veel kleiner als ze zich verspreiden. Dit is ook het geval bij de DSSS technologie. Hierbij zal de informatie in heel kleine stukjes worden verdeeld en verstuurd worden over een veel grotere bandbreedte. Zo is de kans op storing veel kleiner. Je kan jezelf nu de vraag stellen wat als er iemand een DSSS zender op dezelfde frequentie opzet? Nu is het zo dat het leger zo verspreid is dat er makkelijk nog een peloton van een ander land kan tussen lopen. Dit is de reden dat er meerdere DSSS systemen naast elkaar op dezelfde frequentie kunnen werken.
De derde belangrijke technologie is de FHSS technoligie (Frequenty Hopping Spread Spectrum).

Deze kan je best vergelijken met een autosnelweg. Hierbij verandert de auto constant van rijvak, en dit volgens een vast patroon. Als we dit bekijken in de RC wereld zien we dat alle informatie gegroepeerd is, maar dat deze informatie constant verandert (hopt) van frequentie. Zo'n 500 keer per seconde. Dit volgens een vooraf bepaald patroon, dit wordt bepaald door een algoritme. Hierbij wordt de kans op storingen van buitenaf miniem.

Nu is het zo dat onze zender (dx6i) nog een andere technologie gebruikt. Namelijk de DSM2 technologie. Dit houdt in dat ze een combinatie maakt van de DSSS en de FHSS technologie. Dus wordt de informatie zeer sterk verspreid en verandert ze eveneens constant van frequentie. Dit zorgt voor een nog betere communicatie.

Figuur 6: manieren van informatie verspreiding

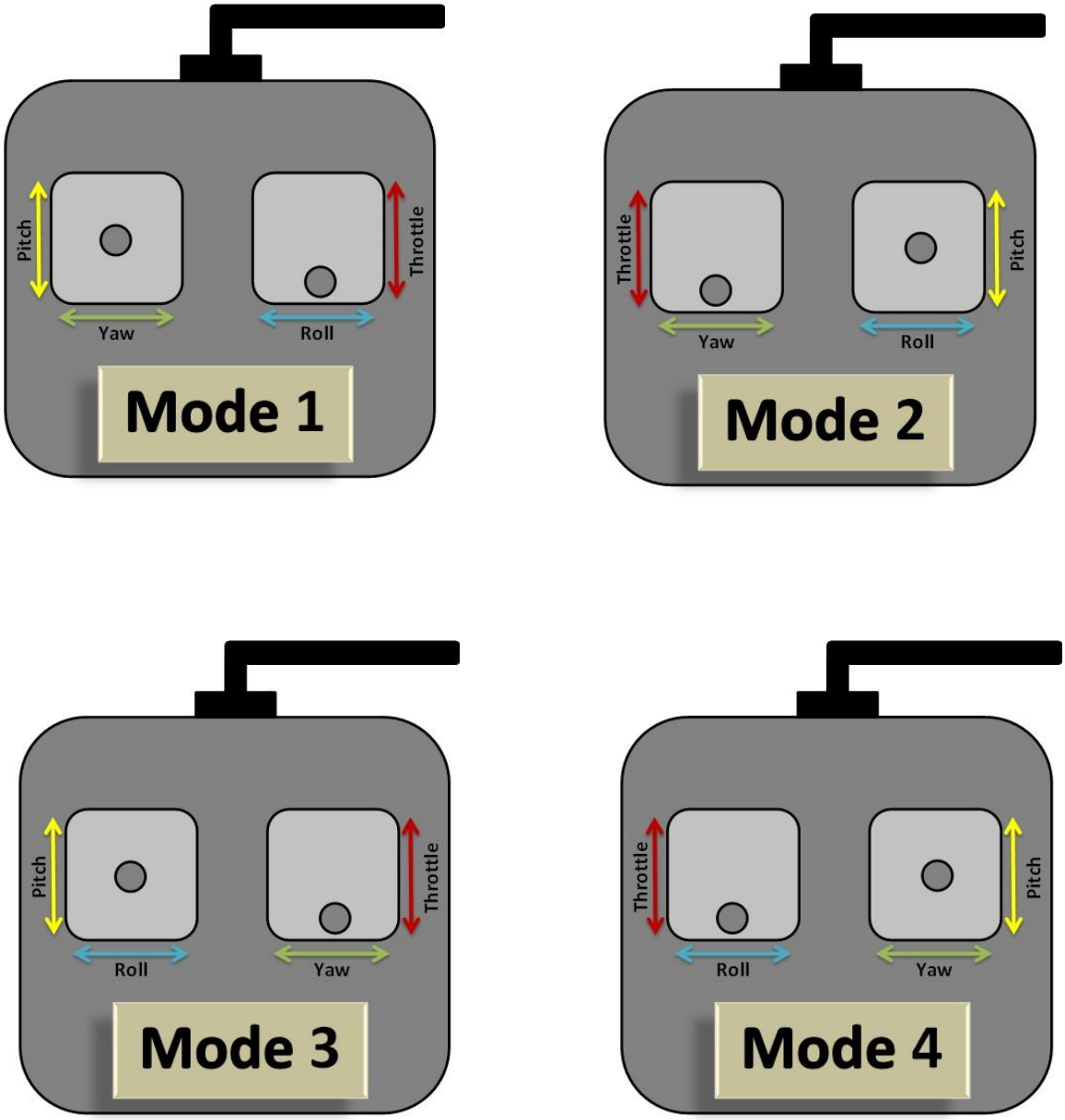


Informatie verspringt constant van frequentie

De informatie is zo verspreid dat het als het ware overal is.

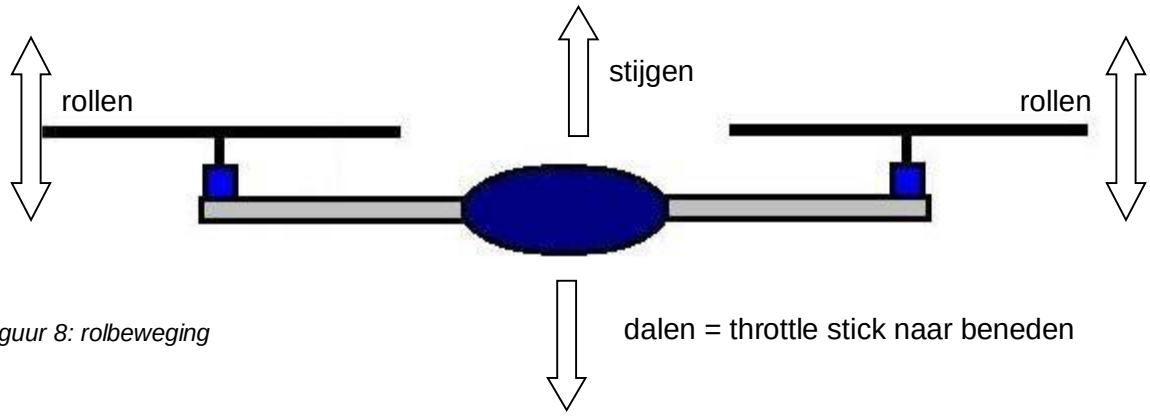
17.5 Kanalen

Een zender heeft een vast aantal kanalen. Ieder kanaal dient voor 1 handeling. Wanneer we dit toepassen op multicopter, hebben we minstens 4 kanalen nodig. Met deze 4 kanalen kunnen we de multicopter doen knikken (nick, pitch), doen rollen (roll), doen gieren (yaw) en doen opstijgen (throttle). Het is ook niet onbelangrijk in welke mode je sturing is ingesteld. Er zijn 4 modes. Het verschil zit hem in welke stick welke functie heeft. Wij zullen voornamelijk vliegen in mode 2.



Figuur 7: verschillende modes

vooraanzicht

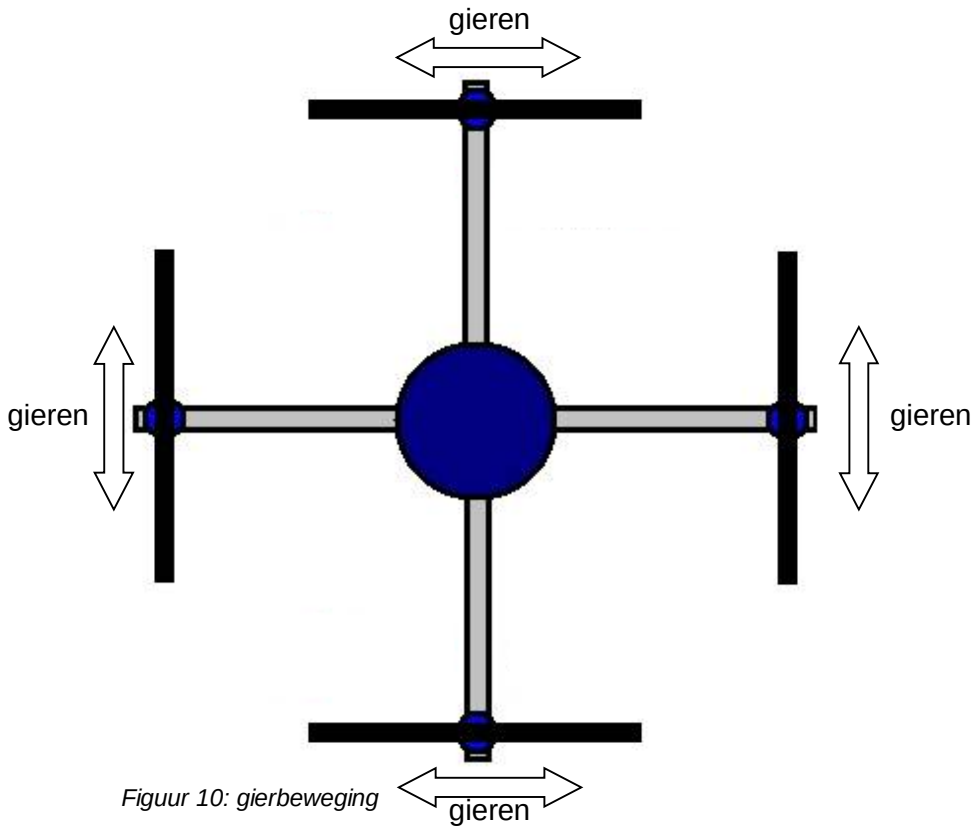


Figuur 8: rolbeweging

zijaanzicht

Figuur 9: knikbeweging

bovenaanzicht



Figuur 10: gierbeweging

17.6 Bereik

Op 27 mei 2013 hebben we een meting gedaan rond het maximum bereik van de zender. Deze meting is niet volledig verlopen zoals we gedacht hadden. We hebben de multicopter in de 035 laten staan. Dit is op het 3de verdieping. Dan zijn er 2 mensen naar beneden gegaan met de zender. Ze belden constant met een derde persoon die in de 035 stond bij de multicopter. De 2 mensen beneden deden de LED verlichting constant aan en uit gaan. De persoon in de 035 liet dan telkens weten of de lichtjes brandden of niet. Wat opviel uit deze meting is dat het bereik zeer sterk afhankelijk is van obstakels tussen de zender en de ontvanger. Zo hebben we waargenomen dat de verbinding verstoord werd wanneer we even linksaf moesten slaan om de weg te volgen en zo achter een gebouw kwamen te staan. Dit hadden we al snel door, dus besloten we om nog verder te lopen tot we weer in het zicht van de multicopter kwamen. Van het moment dat we het raam van de 035 weer konden zien bleek dat de zender de ontvanger ook weer kon bereiken. We konden jammer genoeg niet verder gaan, omdat we ziezo achter een gebouw zouden vastraken. 275m is de verste afstand dat we de verlichting hebben aan- en afgelegd. Hierbij hebben we geleerd dat het bereik die verteld wordt op sites (tussen de 1 en 3km) enkel en alleen geldt wanneer je in open veld staat.

Wat gebeurt er als de multicopter al vliegend niet meer in contact staat met de zender?
Dit is een zeer belangrijke vraag bij het vliegen met een multicopter. Ook al is het niet de bedoeling om zo hoog te vliegen dat de multicopter niet meer in contact staat met de zender. We hebben dus getest wat er gebeurd wanneer het toch zou gebeuren als het contact verbroken wordt. We hebben dit getest door de motoren te laten draaien wanneer er een persoon met de zender wegliep tot buiten het bereik. We hielden voortdurend telefonisch contact met elkaar. We constateerden dat wanneer het contact verbroken werd de motoren onmiddellijk uitvielen. Dat is goed, omdat hij dan automatisch terug naar beneden komt. Stel je maar eens voor dat de motoren op hol slaan en de multicopter alleen de lucht in schiet. Wat nog veel beter is, is dat als je terug in contact komt met de ontvanger (door dichterbij te komen) starten de motoren automatisch terug op. Dit is zeer goed, omdat je dan misschien nog de kans krijgt om hem terug onder controle te krijgen in de lucht.

17.7 Simulatie

Er is één groot probleem met een multicopter. Je kan er normaal gezien maar één keer mee crashen. Om dat te voorkomen is het noodzakelijk dat men eerst oefent op een flight simulator. Het voordeel ervan is dat je zoveel kan crashen zoals je wilt. Je kan gratis een amateurversie kopen via het internet. En je kunt de simulator besturen via de zender die je gekocht hebt voor je multicopter zelf. Hiervoor moet je wel een speciaal aangepast kabeltje kopen om verbinding te maken tussen de zender en je pc. Je kan ook een dummy zender kopen, dit houdt in dat je een pakket koopt die een zender met draad en een software pakket bevat. Dit is ook relatief goedkoop. Dat hebben wij dan ook aangekocht, we hebben een flight simulator genaamd FMS gekocht.

18. PWM naar RS232 convertor

18.1 Functie

De functie van de convertor is het omvormen van de PWM signalen, afkomstig van de ontvanger, naar een RS232 signaal. Dit heeft ook als resultaat dat het aantal draden verminderd van zes naar vier. Er is gekozen om gebruik te maken van RS232 dit omdat de I²C bus als sterk belast is door de gyroscoop en omdat dit de mogelijkheid biedt om later de zender en de ontvanger te veranderen door bluetooth.

18.2 PWM

De ontvanger (in ons geval de AR6200) levert per kanaal een afzonderlijk PWM signaal als uitgangssignaal, er is dus 1 draad nodig voor de gemeenschappelijke massa en 4 draden voor de PWM signalen. Wanneer je gaat gaan kijken aan de ingangszijde van de convertor zal je 6 draden tellen, deze bijkomende draad is gewoon de voeding van de ontvanger. Deze PWM signalen zijn zoals beschreven in aansturing ESC op p. 129, een puls en de stand van het kanaal wordt duidelijk gemaakt aan de hand van de puls lengte. Standaard genomen zendt men een puls met een gestabiliseerde spanning van 5 V en volgende puls lengtes:

- 1 ms = Kanaal staat op minimum, 0 % dus
- 2 ms = Kanaal staat op maximum, 100 % dus

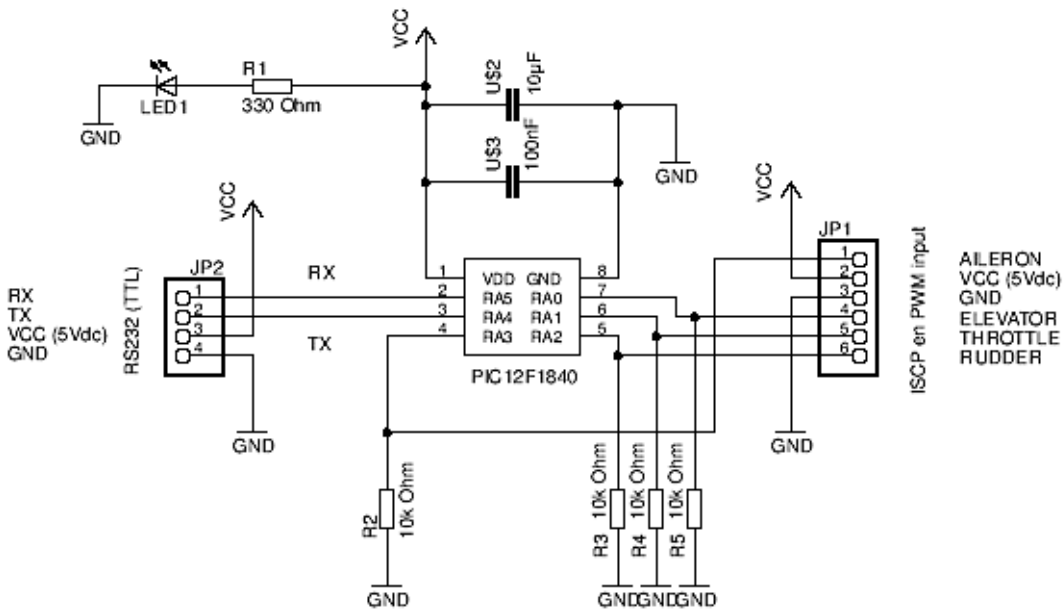
Dit geldt enkel wanneer de zender juist getrimd is.

18.3 RS232

RS232 is een asynchrone seriële communicatie methode ontwikkeld in 1969 door de Electronic Industries Association in samenwerking met de telefoonmaatschappij Bell en met de fabrikanten van communicatieapparatuur. Deze manier van communicatie is bekend van de vroegere seriële poort op computers die diende voor het aansluiten van bv. een printer. Het woord serieel betekent dat de informatie bit voor bit wordt verzonden. Asynchroon leert ons, dat de informatie niet op vooraf afgesproken momenten wordt verzonden wat betekent dat er hier geen sprake is van een kloksignaal zoals bij I²C. Het verzenden van data kan op elk willekeurig moment starten en het is de taak van de ontvanger om te detecteren wanneer een boodschap start en eindigt. Deze data wordt verzonden in bittreinen, dit is een opeenvolging van bits, het is dan ook belangrijk dat zowel de ontvanger als de zender ingesteld zijn op een zelfde lengte van de bittreinen. Indien dit niet het geval is kan binnenkomende informatie fout worden geïnterpreteerd, of zelfs helemaal niet worden herkend. De bits in een bittrein volgen elkaar op met een bepaalde tijd tussentijd, een bepaalde frequentie dus. Deze frequentie wordt ook wel de baudrate genoemd (bij ons 115 200 Hz) en dient op zowel de ontvanger als de zender op dezelfde waarde worden ingesteld. Hierdoor kan de ontvanger

berekenen wanneer de volgende bit komt. Naast de data bevat elke bittrein ook nog een start- en stop bit en een pariteitsbit[12]. Om de communicatie te starten zend de zender een start bit, dit is gewoon een laag signaal en kan gemakkelijk door de ontvanger herkend worden doordat de lijnspanning van de lijn in pauze normaal gezien hoog is. Vervolgens wordt de data verzonden gevolgd door een pariteitsbit. Na de pariteitsbit komt de stop bit, dit is een hoog signaal en kan tot meerdere bits lang zijn.
Bij deze manier van communicatie kan de zender (TX) en de ontvanger (RX) niet wisselen zoals bvb. wel kan bij I²C. Daarom bevat onze sturing twee datalijnen, zodat de convertor en de flightcontroller zowel zender als ontvanger zijn.

18.4 Schema



Figuur 1: elektrisch schema convertor

18.5 Bespreking schema

Het schema is opgebouwd rond de PIC12F1840, naast deze microcontroller bevat het schema nog 4 pull-up weerstanden[13] om de PWM lijnen hoog te houden wanneer er geen signalen zijn zodat de spanning niet kan gaan zweven. Het schema bevat ook nog een indicatie led en enkele condensatoren.

[12]Pariteitsbit: bit die ervoor zorgt dat transmissiefouten kunnen gedetecteerd worden
[13] Pull-up weerstand: zorgt ervoor dat wanneer een uitgang van een microcontroller in rust is dat de spanning de voedingsspanning is, dit om te voorkomen dat de spanning gaat gaan zweven.

18.6 Firmware

Hier vind u een deel van de firmware die in de microcontroller is opgenomen, dit programma is geschreven in C.

```
//Gedeelte van de hoofdlus
        while(1)
        {
                //'watchdogTimer resetten'
                postscalerTimer0 = 0;

                #if defined SPEKTRUM
                        //Kanaal volgorde: throttle - aileron - elevator - rudder
                        //Meten van pulsbreedte kanaal 3 (throttle).
                        while(PWM3==0);
                        //interrupts RX uitschakelen
                        RCIE = 0;
                        resetTimer1();
                        timer1On();
                        while(PWM3==1);
                        timer1Off();
                        pwm[2] = TMR1H*256 + TMR1L;

                        //Meten van pulsbreedte kanaal 1 (aileron).
                        while(PWM1==0);
                        resetTimer1();
                        timer1On();
                        while(PWM1==1);
                        timer1Off();
                        pwm[0] = TMR1H*256 + TMR1L;

                        //Meten van pulsbreedte kanaal 2 (elevator).
                        while(PWM2==0);
                        resetTimer1();
                        timer1On();
                        while(PWM2==1);
                        timer1Off();
                        pwm[1] = TMR1H*256 + TMR1L;

                        //Meten van pulsbreedte kanaal 4 (rudder).
                        while(PWM4==0);
                        resetTimer1();
                        timer1On();
                        while(PWM4==1);
                        timer1Off();
                        pwm[3] = TMR1H*256 + TMR1L;
                #endif
                //interrupts RX inschakelen
                RCIE = 1;

                //Herschalen van de gemeten waardes
                for(pointer = 0; pointer < 4; pointer++)
                {
                        tempPwm = (signed long)pwm[pointer];
```

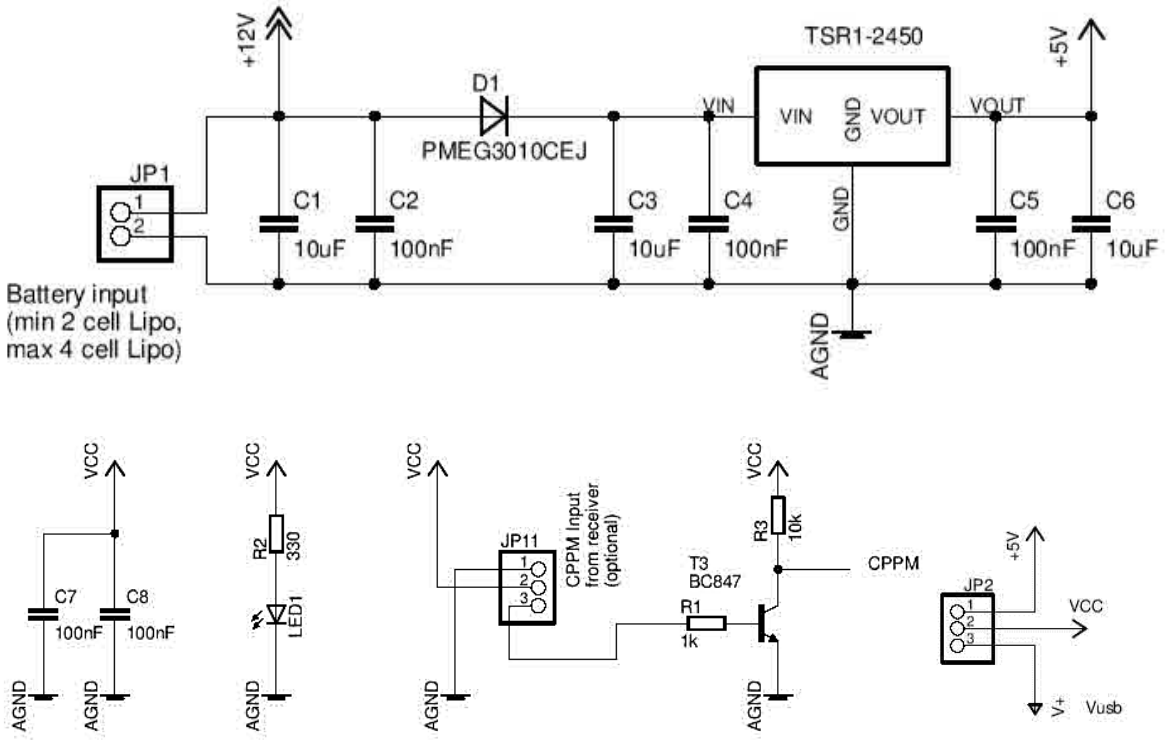
```
                        tempPwm = tempPwm - 8000;                                   //
        1ms = 8000 pulsen
                        if(tempPwm<0)
                                tempPwm = 0;
                        tempPwm = (unsigned long)tempPwm/31;   //        8000/256 ~ 31 ~ 1
byte tussen 0 en 1 ms.

                        if(tempPwm>255)
                                tempPwm = 255;

                        channel[pointer] = (unsigned char)tempPwm;
                }
        }



        //Gedeelte van de interrupt routine
        if(RCIF == 1)
        {
                if((FERR == 1) || (OERR == 1))
                {
                        //error opvangen
                        tempRx = RCREG;
                        tempRx = 0;

                        SPEN = 0;               //errors resetten
                        NOP();
                        SPEN = 1;
                }
                else
                {
                        //1 byte ontvangen, stuur antwoord terug
                        tempRx = RCREG;
                        if(tempRx < 4)
                        {
                                if(TXIF == 1)                                   //zendmodule
klaar met vorige versturen van byte?
                                        TXREG = channel[tempRx];  //stuur   gevraagde   data
terug
                        }
                        else
                        {
                                if(TXIF == 1)                                   //zendmodule
klaar met vorige versturen van byte?
                                        TXREG = 0;                                      //stuur     0
indien een kanaal hoger dan 4 opgevraagd wordt
                        }
                }
        }
```

19. De flightcontroller

19.1 Algemeen

Net zoals het moederbord bij de computer is de flightcontroller bij ons het hart van de sturing. Deze flightcontroller is ontworpen voor quadcopters, hij bezit dus slechts vier uitgangskanalen. Wij hebben dit opgelost met twee motoren aan te sturen vanop één kanaal, eerst gingen we dit doen door beide motoren op één en dezelfde ESC aan te sluiten maar dit gaat niet. Daarom heeft elke motor nu zijn eigen ESC maar de aansturing van de ESC's staan per twee in parallel zodanig dat het mogelijk is beide motoren te besturen aan de hand van één kanaal. Dit gaf eerst een probleem doordat de fligtcontroller niet genoeg stroom per uitgangskanaal kon leveren, maar dit probleem werd verholpen door de firmware aan te passen, een andere oplossing wordt besproken in hoofdstuk 23: Versterkerprintje. Omdat onze multicopter (eigenlijk octocopter met de sturing van een quadcopter) ook zou kunnen gieren is het noodzakelijk dat beide motoren op dezelfde arm van het frame in dezelfde richting draaien, indien dit niet het geval is dan is het resulterend moment per arm nul waardoor de multicopter dit niet kan. De flightcontroller hebben we zelf niet ontworpen en geprogrammeerd maar heeft Dhr. Ruben Buysschaert gedaan, dit omdat we zelf te weinig kennis hebben van programmeren. In dit hoofdstuk vindt u een overzicht van hoe en wat de flightcontroller doet. In de elektronische bijlage 3: handleiding flightcontroller vindt u de handleiding van deze flightcontroller.

19.2 Schema voeding



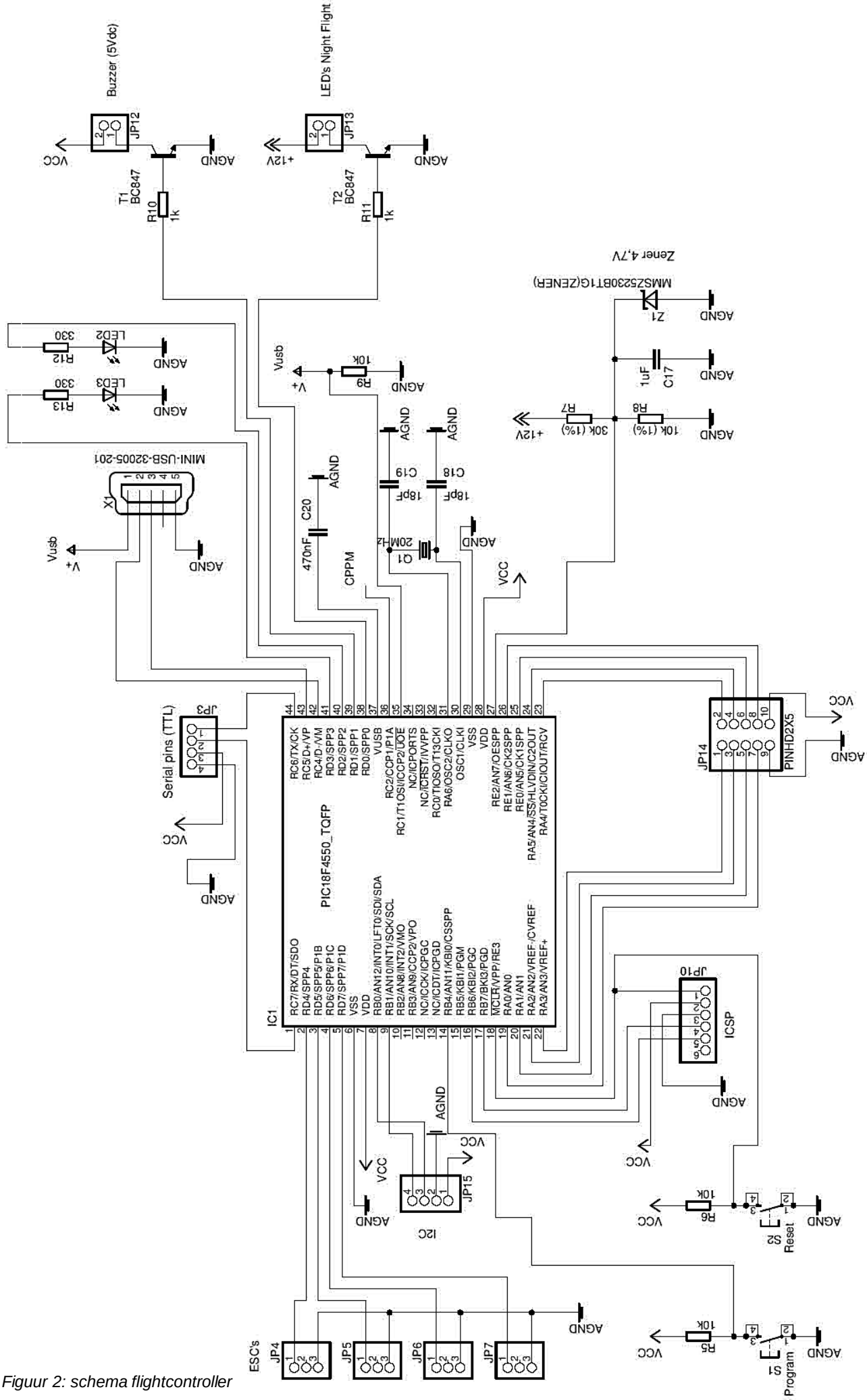
Figuur 1: schema voeding flightcontroller

19.3 Bespreking schema voeding

Het schema is opgebouwd rond de DC to DC convertor TSR1-2450. Deze DC to DC convertor kan maximum 1 A leveren bij een spanning van 5 V. In het schema is er ook een diode opgenomen, dit is een beveiliging tegen ompoling. Naast deze noodzakelijke elementen bevat het schema ook nog onstoringscondensatoren[14] en een indicatieled. Er is ook een jumpertje voorzien deze dient om te kiezen tussen het voeden van de sturing door de DC to DC convertor of door de USB poort. De gebruikte DC to DC convertor heeft een maximum ingangsspanning van 36 VDC alhoewel deze spanning zo hoog ligt is de maximum toegelaten spanning op de flightcontroller slechts 16,8 V (wat overeen komt met een volgeladen 4S Lipo pack) dit komt door de gebruikte zenerdiode in de maximumspanningsbeveiliging. (zie p. 99). Deze DC to DC convertor dient niet enkel om de hardware op de flightcontroller te voeden maar is, na enkele kleine aanpassingen van ons, ook verantwoordelijk voor het voeden van de elektronica in de ESC's doordat dit niet gebeurd door de Lipo's, zie p. 125.

19.4 Schema

[14]Zie p. 133



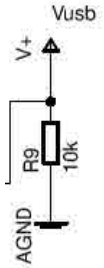
Figuur 2: schema flightcontroller

19.5 Bespreking schema

Het schema is opgebouwd rond de PIC18F4550_TQFP microcontroller, de verkorte datasheet van deze microcontroller is te vinden in bijlage 4: Microcontroller. Het eerste deel van de naam, dus PIC18F4550, duidt op het type microcontroller, het tweede deel van de naam, dus TQFP, duidt op het type behuizing van de microcontroller, hier een SMD 44 pins behuizing.

19.5.1 USB detectie

Het schema bevat een USB detectie, deze is aangesloten op poot 35.



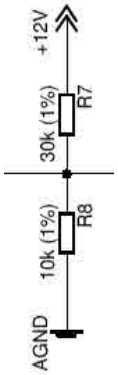
Figuur 3: USB detectie flightcontroller

De werking is vrij simpel, wanneer er iets aan de USB poort wordt gekoppeld dan zal V_{USB} 5 V bedragen dit komt overeen met een hoog signaal op poot 35. De weerstand R9 zorgt ervoor dat er een verbruiker is anders zou de voeding van de USB kortgesloten worden. Wanneer de USB poort nergens aan gekoppeld is, dan is V_{USB} 0 V wat overeen komt met een laag signaal op poot 35. Deze functie is bedoeld om automatisch te disarmen wanneer de USB wordt aangesloten, dit om te voorkomen dat de motoren en propellers ongewild beginnen te draaien wanneer men zich dicht bij de multicopter bevindt. Dit staat in het programma onder volgende code:

```
//Indien usb-kabel verbonden, disarmen! Je wil geen losliggende vingertoppen op je bureau!
                if((VUSB == 1) && (kalibrate == 0))
                        armed = 0;
```

19.5.2 Lipo detectie

Wanneer er een Lipo gekoppeld wordt aan de flightcontroller dan zal de buzzer verschillende keren beepen om aan te geven welke Lipo is aangesloten, wanneer hij bvb. drie keer beept is er een 3S Lipo aangesloten. Omdat de microcontroller de buzzer zou kunnen aansturen moet hij eerst weten welke Lipo aangesloten is, dit gebeurd met een meting op de spanningsdeler die aangesloten is op poot 27.



Figuur 4: Lipo detectie flightcontroller

Deze spanningsdeler is noodzakelijk doordat de maximum toegelaten spanning op een poot V_{DD} + 0,3 V bedraagt, in ons geval dus 5,3 V. De spanning die gemeten wordt door de microcontroller is door de spanningsdeler slechts ¼ van de aangesloten spanning op de flightcontroller. Deze spanning is voor elke type Lipo anders en bedraagt bij nominaal gebruik:

- Voor een 2S, 1,85 V
- Voor een 3S, 2,775 V
- Voor een 4S, 3,7 V

Door deze spanning te meten weet de microcontroller welk type Lipo is aangesloten en kan hij de buzzer aansturen. In het programma is dit te vinden onder volgende code:

```
//Bepaal het aantal lipo cellen
        #if defined LIPO_AUTO_DETECTION
                #if defined DIVIDE_BY_4
                        #define ondergrens_2C 281          //5,5/4    =>  1,375/5  =>
0,275*1023 = 281
                        #define grens_2C 317                       //6,2/4   =>  1,55/5
=> 0,31*1023 = 317
                        #define bovengrens_2C 491
                        #define ondergrens_3C 491
                        #define grens_3C 491                       //9,6/4    =>  2,4/5
=> 0,48*1023 = 491
                        #define bovengrens_3C 655
                        #define ondergrens_4C 655
                        #define grens_4C 655                       //12,8/4  =>  3.2/5
=> 0,64*1023 = 655
                #endif
```

⇨ Bepalen grenzen voor een 2S, 3S en 4S Lipo.

```
                minBatLevel = adConversieBatterijNiveau();
                                //nominale spanning 1 cel = 3,7V
                if(minBatLevel    >=    ondergrens_2C    &&    minBatLevel    <
bovengrens_2C)                  //indien spanning > 5,5V en < 9V
                        minBatLevel = grens_2C;
                                                //stel grens in op 6,2V => 2 cellen grens
                else
```

```
                    if(minBatLevel >= ondergrens_3C && minBatLevel <
bovengrens_3C)      //indien spanning > 9V en < 12V
                        minBatLevel = grens_3C;
                                //stel grens in op 9,6V => 3 cellen grens
                    else
                        if(minBatLevel >= ondergrens_4C)
                        //indien spanning > 12V
                            minBatLevel = grens_4C;
                                //stel grens in op 12,8V => 4 cellen
grens
                        else
                            minBatLevel = 1024;
                                //stel grens in op maximum + 1, zodat
alarm beep te horen is (tijdens main loop)
```

⇨ Bepalen welke Lipo is aangesloten

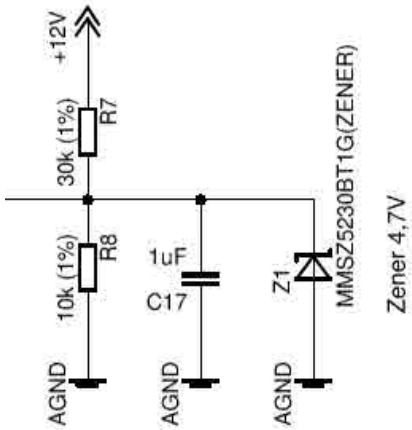
```
//Beep twee maal voor twee cellen
if(minBatLevel == grens_2C)
{
    BUZZER = 1;
    LED1 = 1;
    LED2 = 1;
    BeepWait();
    BUZZER = 0;
    LED1 = 0;
    LED2 = 0;
    BeepWait();
    BUZZER = 1;
    LED1 = 1;
    LED2 = 1;
    BeepWait();
    BUZZER = 0;
    LED1 = 0;
    LED2 = 0;
}

//Beep drie maal voor drie cellen
if(minBatLevel == grens_3C)
{
    BUZZER = 1;
    LED1 = 1;
    LED2 = 1;
    BeepWait();
    BUZZER = 0;
    LED1 = 0;
    LED2 = 0;
    BeepWait();
    BUZZER = 1;
    LED1 = 1;
    LED2 = 1;
    BeepWait();
    BUZZER = 0;
    LED1 = 0;
    LED2 = 0;
    BeepWait();
    BUZZER = 1;
```

```
                LED1 = 1;
                LED2 = 1;
                BeepWait();
                BUZZER = 0;
                LED1 = 0;
                LED2 = 0;
        }

        //Beep vier maal voor vier cellen
        if(minBatLevel == grens_4C)
        {
                BUZZER = 1;
                LED1 = 1;
                LED2 = 1;
                BeepWait();
                BUZZER = 0;
                LED1 = 0;
                LED2 = 0;
                BeepWait();
                BUZZER = 1;
                LED1 = 1;
                LED2 = 1;
                BeepWait();
                BUZZER = 0;
                LED1 = 0;
                LED2 = 0;
                BeepWait();
                BUZZER = 1;
                LED1 = 1;
                LED2 = 1;
                BeepWait();
                BUZZER = 0;
                LED1 = 0;
                LED2 = 0;
                BeepWait();
                BUZZER = 1;
                LED1 = 1;
                LED2 = 1;
                BeepWait();
                BUZZER = 0;
                LED1 = 0;
                LED2 = 0;
        }
#endif
```

⇨ Laten weten dat Lipo gedetecteerd is door het aantal cellen weer te geven aan de hand van de buzzer.

19.5.3 Spanningsbeveiliging

De spanningsbeveiliging is aangesloten op poot 27. Deze spanningsbeveiliging bestaat uit zowel een minimumspanningsbeveiliging als een maximumspanningsbeveiliging.



Figuur 5: spanningsbeveiliging flightcontroller

Het linkse deel van de figuur is de minimumspanningsbeveiliging en bestaat uit een spanningsdeler, deze spanningsdeler wordt ook gebruikt voor de Lipo detectie. Het rechtse deel van de figuur is de maximum-spanningsbeveiliging en bestaat uit een zenerdiode en weerstand R7.

Poot 27 van de microcontroller meet voortdurend de spanning, de gemeten spanning moet boven een bepaalde waarde liggen. Deze waarde is afhankelijk van wel type Lipo aangesloten is op de flightcontroller en bedraagt:

- Voor een 2S, 1,5 V
- Voor een 3S, 2,25 V
- Voor een 4S, 3 V

Aangezien de microcontroller weet welke Lipo is aangesloten (zie Lipo detectie) weet hij ook boven welke waarde de gemeten spanning zeker moet blijven. Wanneer de spanning nu te klein wordt zal de buzzer beginnen beepen en zal de verlichting beginnen knipperen.

De maximumspanningbeveiliging maakt gebruik van de minimumspanningsbeveiliging. Wanneer de spanning te hoog wordt, dus de spanning over de zenerdiode meer dan 4,7 V bedraagt, wat overeenkomt met een Lipo spanning van 18,8 V dan zal de zenerdiode in geleiding gaan. Dit heeft als gevolg dat de volledige Lipo spanning over de weerstand R7 gaat gaan staan waardoor de gemeten spanning door poot 27 0 V bedraagt wat ervoor zorgt dat de minimumspanningsbeveiliging in werking treedt. Het is door deze zenerdiode dat er maximum een 4S Lipo mag aangesloten worden aangezien de spanning bij een volgeladen 5S Lipo zou resulteren in

een spanning van 5,25 V over de zenerdiode. In het programma is de spanningsbeveiliging te vinden onder volgende code:

```
//Indien niet bezig met de arming-procedure, meet het
spanningsniveau van de batterij en
		//laat de beeper horen indien de spanning te laag wordt.
		if(armedCounter == 0)
		{
			#if defined(ONBOARD_PWM_MEASUREMENT)
				#define flashLightsCounter 2
			#else
				#if
defined(EXTERNAL_PWM_MEASUREMENT_RS232)
					#define flashLightsCounter 15
				#endif
			#endif

			lowBat = checkBatLevel();
			BUZZER = lowBat;

			if(lowBat == 1)
			{
				flashTimer++;
				if(flashTimer > flashLightsCounter)
				{
					flashTimer = 0;
					FLIGHT_LIGHTS = !FLIGHT_LIGHTS;
				}
			}
			else
			{
				flashTimer = 0;

				if(FLIGHT_LIGHTS_VAR == 1)
					FLIGHT_LIGHTS = 1;
				else
					FLIGHT_LIGHTS = 0;
			}
		}
```

19.6 Firmware

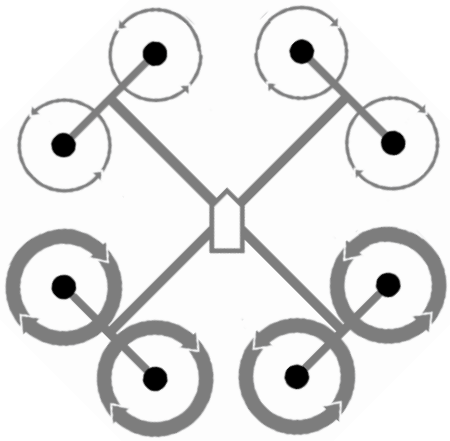
19.6.1 Algemeen

Hier vindt u een overzicht van de bewegingen die de multicopter kan maken, telkens met de daarbij horende informatie betreffende de motoren.

Wanneer de bestuurder meer gas geeft dan zal de pulslengte van het throttle kanaal langer worden, dit moet de flightcontroller omzetten naar een langere pulslengte over alle vier de kanalen. Dit resulteert in het sneller draaien van alle motoren.

Wanneer de bestuurder de multicopter wil naar voor laten knikken dan zal dit resulteren in een langere/kortere pulslengte van het pitch/ nick kanaal, dit moet de flightcontroller omzetten naar een langere pulslengte voor de kanalen van de achterste motoren.

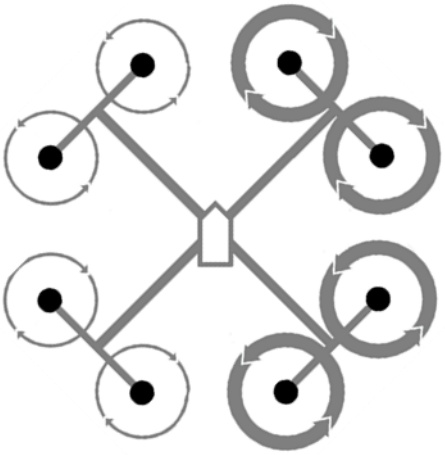
Figuur 6: knikbeweging



Figuur 7: motoren bij knikbeweging

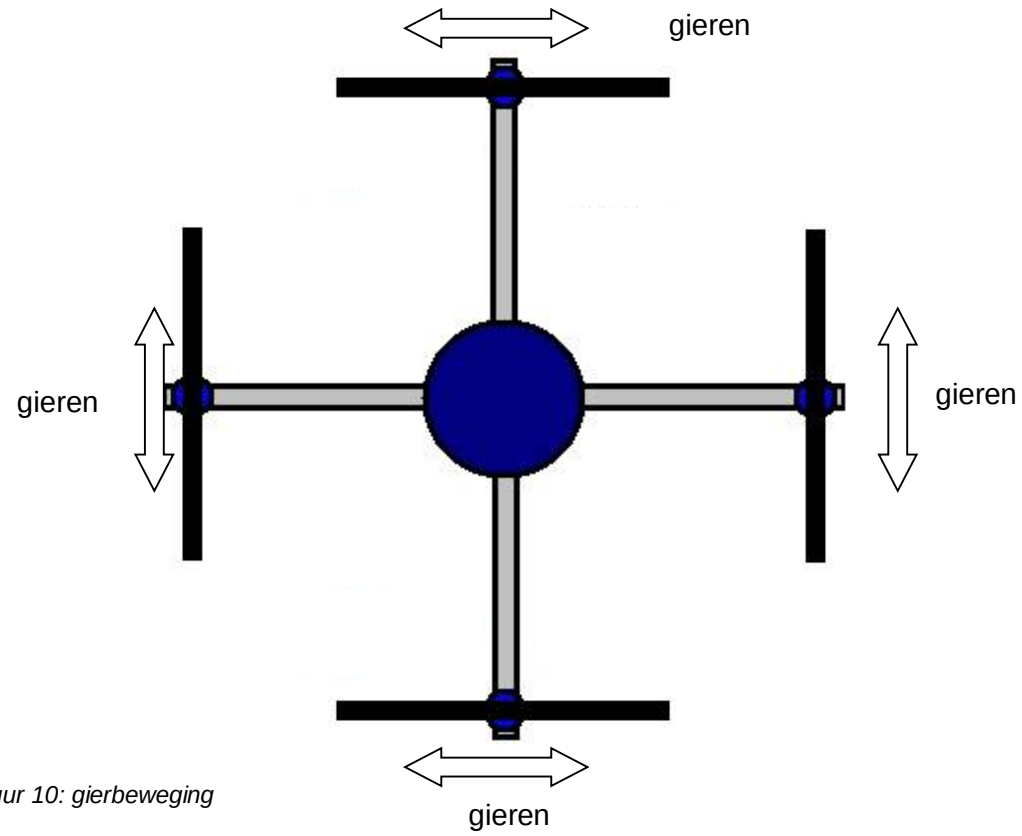
Wanneer de bestuurder de multicopter naar links wil laten rollen dan zal dit resulteren in een langere/kortere pulslengte van het roll kanaal, dit moet de flightcontroller omzetten naar een langere pulslengte voor de kanalen van de rechtse motoren.

Figuur 8: rolbeweging

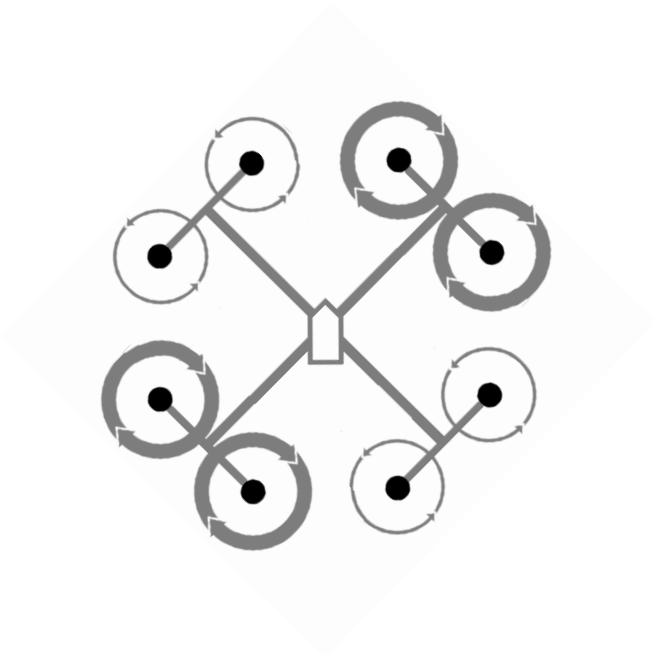


Figuur 9: motoren bij rolbeweging

Wanneer de bestuurder de multicopter wil laten tegen de klok gieren dan zal dit resulteren in een langere/kortere pulslengte van het yaw kanaal, dit moet de flightcontroller omzetten naar een langere pulslengte voor de kanalen van de motoren die mee met de klok draaien.



Figuur 10: gierbeweging

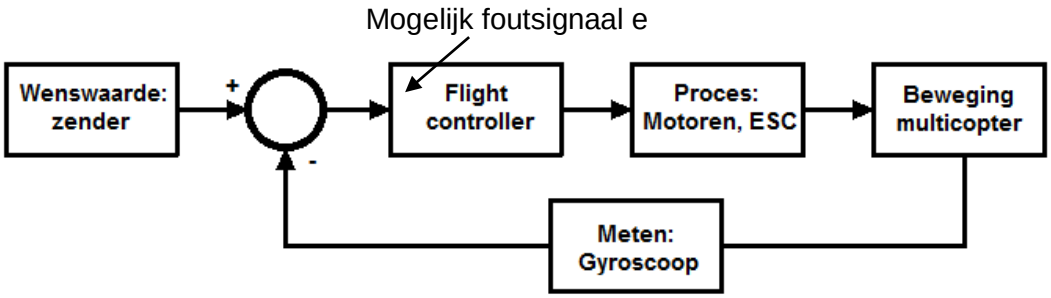


Figuur 11: motoren bij gierbeweging

De refreshtijd van de flightcontroller bedraagt 5 ms, dus om de 5 ms krijgen de ESC's een nieuw signaal.

19.6.2 PID-regelkring

Doordat de gyroscoop opgenomen is in onze sturing, sturen we niet maar regelen we. Sturen is gaan en blijven, regelen is gaan achter je kijken en verder gaan wanneer alles naar wens is. Bij regelen is er dus sprake van een terugkoppeling, in ons geval de gyroscoop, dit leidt tot volgend blokschema:



Figuur 12: principeschema regelkring

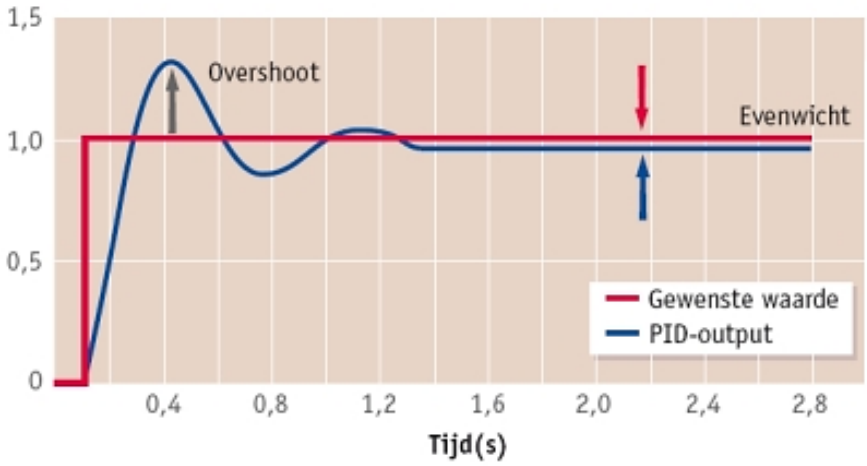
Wanneer de gyroscoop een ongewenst signaal uitstuurt, wat betekend dat de multicopter een ongewenste beweging maakt, zal de flightcontroller dit herkennen als fout en zal dit resulteren in een foutsignaal e. Dit foutsignaal wordt aan de hand van de PID regelkring versterkt tot en met het foutsignaal weg is, het versterkte signaal wordt u genoemd. De PID regelkring bestaat uit drie verschillende manieren van versterken:

1. Proportioneel regelen: $u = e \times K_r$
   Het foutsignaal e wordt eenvoudig versterkt om het stuursignaal u voor het systeem te genereren. De P-actie komt bij bijna alle regelaars terug. Hoeveel het foutsignaal e versterkt wordt is afhankelijk van de ingestelde K_r. Wanneer de Kr wordt ingesteld moet er rekening mee gehouden worden dat een te kleine Kr resulteert in geen ruisonderdrukking en dat een te grote Kr resulteert in een te hevige reactie. Het nadeel van een P-regelaar is dat er steeds een fout overblijft.

2. Integrerend regelen: $u(t) = \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt$
   Hier is de mate waarmee het foutsignaal e wordt versterkt afhankelijk van de tijd, dit zorgt ervoor dat de statische fout wordt weggewerkt.

3. Differentieel regelen: $u(t) = T_d \times \frac{de(t)}{dt}$
   Hier is het versterkte signaal afhankelijk van de afgeleide van het foutsignaal e. Bij het instellen van de differentiatietijdconstante moet men oppassen dat men geen te grote waarde instelt want dan zal de multicopter zo heftig reageren dat er opnieuw een fout is waardoor hij weer te heftig gaat reageren en zo blijft de multicopter ongewenst in beweging.

Grafisch ziet de PID regelaar er als volgt uit:



Figuur 13: PID regelaar

In het programma kan de PID regelaar gevonden worden onder volgende code:

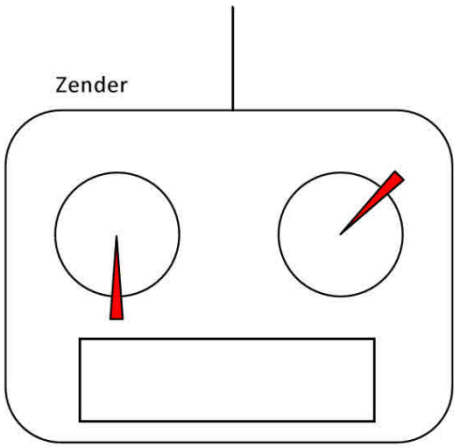
```
#if defined(NO_AUTO_LEVEL)
	#if defined(plus_mode)
		WensWaardeNick = - nick * (short long)Knick;
	#elif defined(X_mode)
		WensWaardeNick = - nick * (short long)Knick + roll *
(short long)Kroll;
	#endif
#endif
ErrorWaardeNickTrend = ErrorWaardeNick;
ErrorWaardeNick = WensWaardeNick - FeedbackWaardeGyroNick;
ErrorWaardeNickTrend = ErrorWaardeNick - ErrorWaardeNickTrend;
ErrorWaardeNickCumulatief += ErrorWaardeNick;
if(ErrorWaardeNickCumulatief < -cumulGrens)
	ErrorWaardeNickCumulatief = -cumulGrens;
if(ErrorWaardeNickCumulatief > cumulGrens)
	ErrorWaardeNickCumulatief = cumulGrens;
RegelWaardeNick = 0;
if(KpNick>0)
	RegelWaardeNick = ErrorWaardeNick/(short long)KpNick;
if(KiNick>0)
	RegelWaardeNick += ErrorWaardeNickCumulatief/(short
long)KiNick;
if(KdNick>0)
	RegelWaardeNick += ErrorWaardeNickTrend/(short
long)KdNick;


//Regelkring Roll
#if defined(NO_AUTO_LEVEL)
	#if defined(plus_mode)
		WensWaardeRoll = - roll * (short long)Kroll;
	#elif defined(X_mode)
		WensWaardeRoll = - roll * (short long)Kroll - nick *
(short long)Knick;
```

```
                #endif
        #endif
        ErrorWaardeRollTrend = ErrorWaardeRoll;
        ErrorWaardeRoll = WensWaardeRoll - FeedbackWaardeGyroRoll;
        ErrorWaardeRollTrend = ErrorWaardeRoll - ErrorWaardeRollTrend;
        ErrorWaardeRollCumulatief += ErrorWaardeRoll;
        if(ErrorWaardeRollCumulatief < -cumulGrens)
                ErrorWaardeRollCumulatief = -cumulGrens;
        if(ErrorWaardeRollCumulatief > cumulGrens)
                ErrorWaardeRollCumulatief = cumulGrens;
        RegelWaardeRoll = 0;
        if(KpRoll>0)
                RegelWaardeRoll = ErrorWaardeRoll/(short long)KpRoll;
        if(KiRoll>0)
                RegelWaardeRoll += ErrorWaardeRollCumulatief/(short
long)KiRoll;
        if(KdRoll>0)
                RegelWaardeRoll += ErrorWaardeRollTrend/(short
long)KdRoll;

        //Regelalgoritme voor de yaw-as (gyroscoop = Z-as)
        WensWaardeYaw = -yaw * (short long)Kyaw;
        ErrorWaardeYawTrend = ErrorWaardeYaw;
        ErrorWaardeYaw = WensWaardeYaw - FeedbackWaardeGyroYaw;
        ErrorWaardeYawTrend = ErrorWaardeYaw - ErrorWaardeYawTrend;

        ErrorWaardeYawCumulatief += ErrorWaardeYaw;
        if(ErrorWaardeYawCumulatief < -cumulGrens)
                ErrorWaardeYawCumulatief = -cumulGrens;
        if(ErrorWaardeYawCumulatief > cumulGrens)
                ErrorWaardeYawCumulatief = cumulGrens;
        RegelWaardeYaw = 0;
        if(KpYaw>0)
                RegelWaardeYaw = ErrorWaardeYaw/(short long)KpYaw;
        if(KiYaw>0)
                RegelWaardeYaw += ErrorWaardeYawCumulatief/(short
long)KiYaw;
        if(KdYaw>0)
                RegelWaardeYaw += ErrorWaardeYawTrend/(short
long)KdYaw;
```

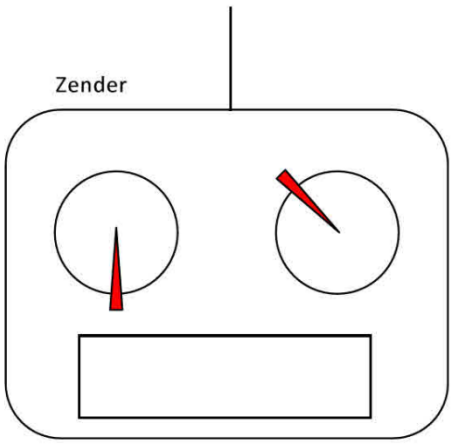
Deze PID regelkring wordt ingesteld aan de hand van een programma, dit programma is te vinden in hoofdstuk 24: software. De instellingen van de PID regelkring zijn afhankelijk van het gewicht, de grote van de multicopter en het type ESC's (geflasht of niet geflasht).

19.6.3 Flight lights

De flight lights is de LED verlichting die onze multicopter bevat. Deze verlichting wordt bediend door volgende stickinstelling 3 seconden aan te houden:



Figuur 14: inschakelen LED verlichting



Figuur 15: uitschakelen LED verlichting

Dit wordt vertaald in het programma door volgende code:

```
//lights gedeelte start
                        #if defined(ONBOARD_PWM_MEASUREMENT)
                                #define lightsCounterLimit 50
                        #else
                                #if
defined(EXTERNAL_PWM_MEASUREMENT_RS232)
                                        #define lightsCounterLimit 200
                                #endif
                        #endif
                        if((pwmChannel[0] < 12) && (pwmChannel[1] > 242))
        //indien pitch < 5% en nick > 95% en roll < 5%, lights on
                        {
                                if(lightsCounter >= lightsCounterLimit)
                                {
                                        FLIGHT_LIGHTS_VAR = 0;
                                }
                                else
                                        lightsCounter++;
                        }
                        else
                        {
                                if((pwmChannel[0] > 242) && (pwmChannel[1] > 242))
                //indien pitch < 5% en nick > 95% en roll < 5%, lights on
                                {
                                        if(lightsCounter >= lightsCounterLimit)
                                        {
                                                FLIGHT_LIGHTS_VAR = 1;
                                        }
                                        else
                                                lightsCounter++;
                                }
```

```
                    else
                        lightsCounter = 0;
                }
                //lights gedeelte einde
```

Deze verlichting mag alleen maar in-/ uitgeschakeld worden wanneer de multicopter niet vliegt en zorgt ervoor dat er een duidelijk verschil is tussen de voor- en achterkant van onze multicopter. Naast deze functie bevat de flight lights nog andere functies zoals het beginnen knipperen wanneer de Lipo spanning te laag word, zie spanningsbeveiliging. Een andere functie is het knipperen om aan te geven dat de microcontroller in bootload mode is gestart.

19.6.4 Beveiliging

Vooraleer het mogelijk is de multicopter te besturen moet deze worden gearmd. Indien dit niet gebeurd dan zal er ook niets gebeuren.

```
//arming code
#if defined(ONBOARD_PWM_MEASUREMENT)
        #define armedCounterLimitOn 50
        #define armedCounterLimitOff 75
#else
        #if defined(EXTERNAL_PWM_MEASUREMENT_RS232)
                #define armedCounterLimitOn 200
                #define armedCounterLimitOff 250
        #endif
#endif

if(pwmChannel[2] < 12)                  //indien pitch onder de
5%
{
        //arming gedeelte start
        if(pwmChannel[3] > 242)         //indien yaw boven de
95%, armen
        {
                if(armedCounter == armedCounterLimitOn)
                {
                        armed = 1;
```

Het is absoluut noodzakelijk dat de multicopter stil staat tijdens het armen dit is omdat de gyroscoop gekalibreerd wordt tijdens het armen. De multicopter moet zelfs niet horizontaal staan want de gyroscoop meet hoeksnelheid en ziet dus niet hoe de multicopter staat.

De volledige firmware kan gevonden worden in de elektronische bijlage 4: firmware.

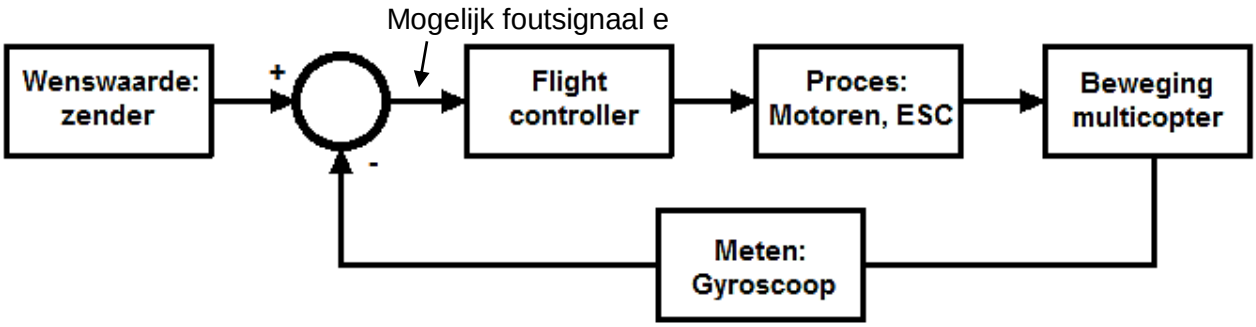
20. De gyroscoop

20.1 Algemeen

Een gyroscoop is een apparaat dat gebruikt wordt voor metingen van hoeksnelheid en navigatie. De naam gyroscoop is afkomstig van de Griekse woorden “gyros” en “skopein”, die respectievelijk “cirkel” en “zien” betekenen. Een gyroscoop kan voorkomen als een apparaat bestaand uit een draaiende massa in een cardanische ophanging, dit zijn de rotatiegyroscopen, dit was het eerste type gyroscoop. Een ander type gyroscoop is de vibratiegyroscoop, deze bestaat uit een trillende massa. Het laatste type gyroscoop is de optische gyroscoop en wordt gekenmerkt doordat deze geen bewegende onderdelen bezit.

20.2 Functie

In onze opstelling zorgt de gyroscoop ervoor dat we regelen in plaats van sturen. Met sturen wordt bedoeld gaan en blijven gaan. Regelen is gaan, achter je kijken en verder gaan als alles in orde is. Bij regelen vindt er dus een terugkoppeling plaats, hier de gyroscoop.
Wanneer de multicopter een ongewenste beweging uitvoert ten gevolge van bijvoorbeeld een windstoot zal dit resulteren in een ongewenste hoeksnelheid. De gyroscoop zelf weet niet dat deze hoeksnelheid ongewenst is, hij levert enkel een uitgangssignaal evenredig met de gemeten hoeksnelheid. Het is de flight controller die zal zeggen dat deze beweging ongewenst is en zal dan ook een foutsignaal e geven. Dit signaal wordt vervolgens versterkt aan de hand van een PID regelkring[15] die opgenomen is in de flight controller zodanig dat de multicopter weer zijn gewenste positie inneemt.



Figuur 1: principeschema regelkring

De functie van de gyroscoop is dus enkel het meten van de hoeksnelheid, dit heeft als gevolg dat de gyroscoop niet weet in welke positie de multicopter zich bevindt. Daarom wordt er soms in de sturing nog een accelerometer opgenomen, deze dient dan om de horizon te bepalen.

[15] PID regelkring: zie p.104

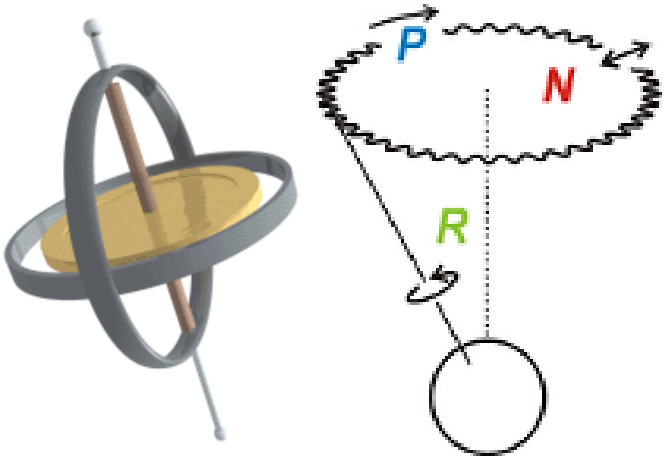
20.3 Rotatiegyroscopen

20.3.1 Algemeen

Populair gezegd is een rotatiegyroscoop een soort van tol. Dit type van gyroscoop werd uitgevonden door Léon Foucault in 1845 en diende om te bewijzen dat de aarde rond zijn as draait.

20.3.2 Opbouw

Een rotatiegyroscoop bestaat uit een zeer snel draaiende massa opgehangen in een cardanische ophanging[16]. Wanneer de cardanische ophanging bestaat uit drie ringen wordt dit aangegeven door TDF (Two Degrees of Freedom). Wanneer de cardanische ophanging bestaat uit twee ringen wordt dit aangegeven door SDF (Single Degree of Freedom). De werking van rotatie gyroscopen berust op het behoud van het impulsmoment.



R: rotatie massa

P: precessie

N: nutatie, bibberbeweging ten gevolge van massaverdeling in massa

Figuur 2: rotatiegyroscoop

20.3.3 Werking

Zoals reeds gezegd berust de werking op de wet van behoud van impulsmoment, deze zegt dat het impulsmoment van een systeem zal behouden worden zolang er geen uitwendig moment optreedt. Het impulsmoment van een systeem is een maat voor de “hoeveelheid draaibeweging” en kan berekend worden aan de hand van volgende formule:

$L = r \times p$ Met $p = m \times v$

⇨ $L = r \times m \times v$ Met r is de plaatsvector
m is de massa van het lichaam
v is de omtreksnelheid van het lichaam

[16]Cardanisch ophanging: Ophanging die bestaat uit ringen, elke ring geeft het voorwerp een extra bewegingsrichting. Voorbeeld: ophanging van een wereldbol.

Door het behoud van het impulsmoment behoudt de as waarrond de massa draait dezelfde positie in de ruimte, dit heet standvastigheid. Dit betekent dat de cardanische ophanging niet beweegt, het enige wat beweegt is de massa. Wanneer er nu een uitwendige kracht inwerkt op de gyroscoop dan ontstaat het verschijnsel gyroscopische precessie. Precessie is de beweging die de rotatieas van een roterende massa maakt onder invloed van een uitwendige kracht. Het eenvoudigste voorbeeld van precessie is een draaiende tol. Als de tol niet precies rechtop staat, zal de zwaartekracht proberen om de rotatieas 'om te laten vallen'. Dat gebeurt echter niet, in plaats daarvan draait de rotatieas rond om een verticale. Het is deze precessie die gemeten wordt.

20.3.4 Problemen

Bij dit type van gyroscopen kunnen er twee grote problemen optreden die er voor zorgen dat de gemeten waarden niet correct zijn.
Het eerste problemen dat zorgt voor fouten in de metingen noemt glimbal lock, dit houdt in dat tenminste twee ringen van de cardanische ophangingen parallel in elkaar gaan gaan staan. Zodra dat gebeurt, verlies je een vrij draaiende ring met de daarbij horende vrijheidsas. Hierdoor verlies je dus een bewegingsrichting en wordt bijvoorbeeld een TDF gyroscoop een SDF gyroscoop.
Het ander probleem dat zorgt voor fouten in de metingen is drift. Drift ontstaat door wrijving tussen de cardanische ringen, wat resulteert in een kracht die op zijn beurt resulteert in precessie.

20.3.5 Toepassingen

Vandaag de dag wordt dit type van gyroscoop meestal gebruikt in ruwe omgeving die onderworpen is aan schokken en continue trilling. Doordat dit type van gyroscoop bewegende onderdelen bevat is dit type van gyroscoop redelijk groot in omvang.

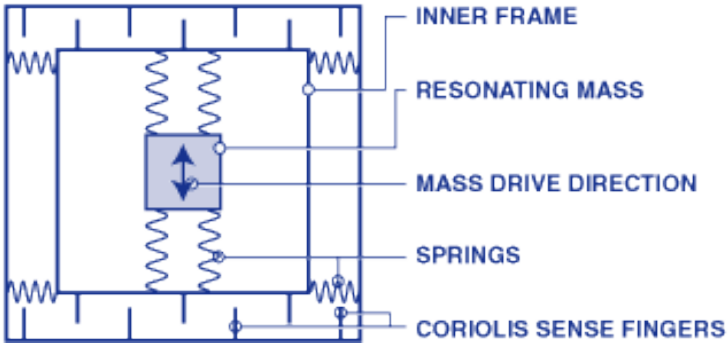
20.4 Vibratiegyroscopen

20.4.1 Algemeen

Dit type gyroscoop is het meest gebruikte type. Dit type werkt aan de hand van een trillende massa in plaats van een roterende massa. De werking berust hier op het corioliseffect.

20.4.2 Opbouw

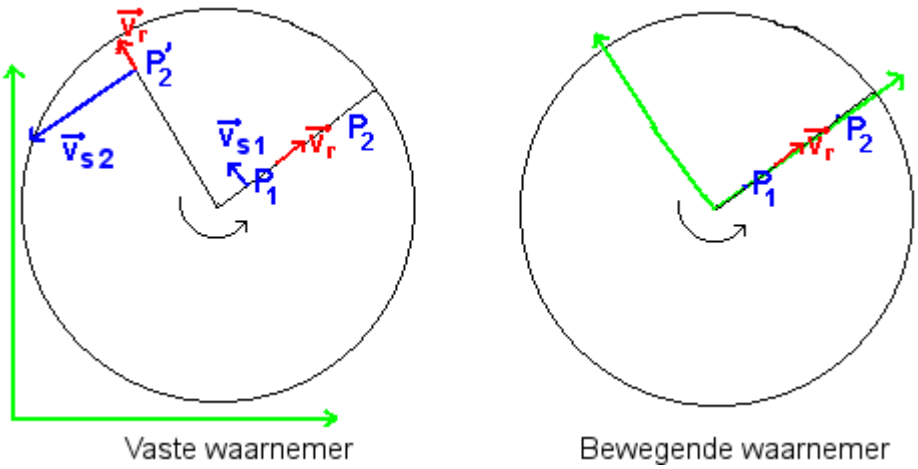
Een vibratiegyroscoop is opgebouwd uit een massa opgehangen in een kader aan de hand van veren, dit kader is op zijn beurt ook opgehangen aan de hand van veren aan een kader die bevestigd is op een printplaat.



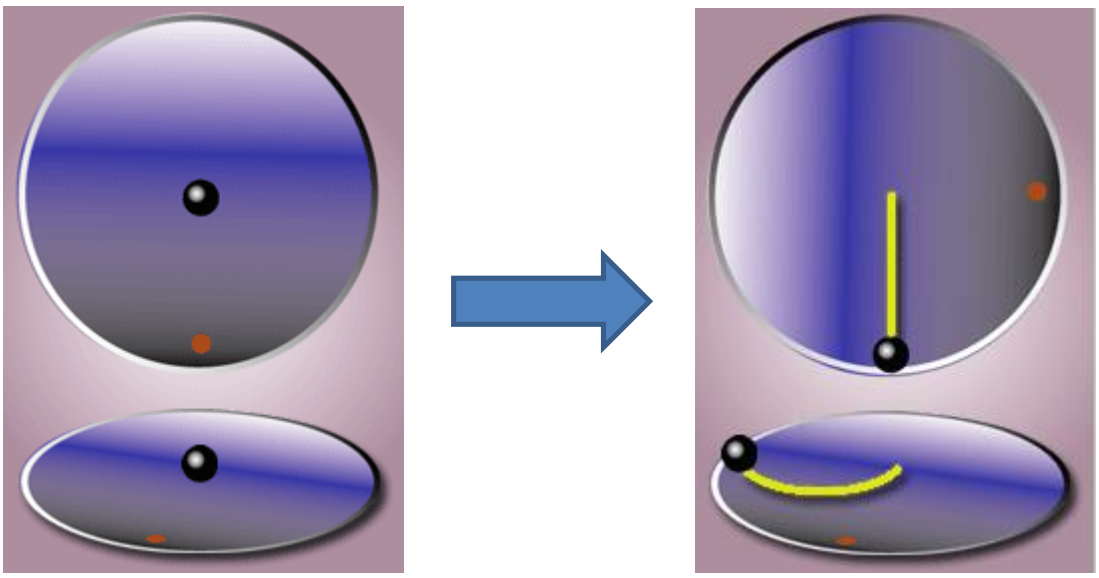
Figuur 3: Opbouw vibratiegyroscoop

20.4.3 Werking

Zoals reeds gezegd berust de werking van een vibratiegyroscoop op het corioliseffect. Het corioliseffect kan het best verklaard worden aan de hand van een persoon op een draaimolen.



Figuur 4: corioliseffect vectoren



Figuur 5: corioliseffect afgelegde weg

Wanneer de persoon van in P1 naar P2 wandelt, zal zijn omtreksnelheid toenemen, namelijk van V_{s1} tot V_{s2}. In de gyroscoop komt deze beweging overeen met de trilling van de massa, dit omdat de massa een oscillator is. Een toename van snelheid is slechts mogelijk wanneer er een versnelling is, deze wordt gegeven door:

$$a_{vs} = \frac{\Delta\, v_s}{\Delta t} = \frac{(r_2 \times \omega) - (r_1 \times \omega)}{\frac{(r_2 - r_1)}{v_r}} = \frac{(r_2 - r_1) \times \omega \times v_r}{(r_2 - r_1)} = \omega \times v_r$$

Maar niet enkel de omtreksnelheid verandert, voor een waarnemer buiten de draaimolen lijkt het of de richting waarin de persoon stapt verandert, zie figuur 5. Dit vraagt opnieuw een versnelling:

$$a_r = \frac{\Delta\, v_r}{\Delta t} = \frac{2 \times v_r \times \sin\frac{\omega \times \Delta t}{2}}{\Delta\, t}$$

Voor kleine hoeken is de waarde berekent uit de sinus van de hoek zo goed als gelijk aan de waarde van de hoek, daardoor kunnen we het volgende schrijven:

$$a_r = \frac{2 \times v_r \times \frac{\omega \times \Delta t}{2}}{\Delta\, t} = \omega \times v_r$$

Het totaal van deze versnellingen noemt men de complementaire versnelling en wordt dus gegeven door:

$$a_{com} = a_{vs} + a_r = 2 \times \omega \times v_r$$

De complementaire versnelling is de versnelling die waargenomen wordt door de persoon buiten de draaimolen, want voor hem lijkt het op de persoon op de draaimolen een beweging uitvoert zoals weergegeven in de onderste afbeelding van figuur 5. De persoon op de draaimolen ziet iets heel anders,

voor hem lijkt het of hij een rechtlijnige beweging uitvoert. Hij neemt dus geen versnelling waar, dit betekent dat er gezien vanuit zijn positie nog een tweede maar tegengestelde versnelling heerst, deze versnelling noemt men de coriolisversnelling en wordt dus gegeven door:

$$a_{coriolis} = -a_{com} = -2 \times \omega \times v_r$$

De kracht die deze coriolisversnelling veroorzaakt noemt men de corioliskracht. De waarde van deze corioliskracht wordt vervolgens gemeten, dit kan op twee manieren gebeuren:

- De massa in de vibratiegyroscoop botst tegen de rand van het kader waarin hij opgehangen is, dit zorgt ervoor dat er over deze massa een spanning ontstaat volgens het piëzo-elektrisch principe. Deze spanning is dus afhankelijk van hoe snel de gyroscoop draait en geeft dus de hoeksnelheid aan.
- Het kader waarin de massa is opgehangen verschuift ten opzichte van het buitenste kader, zie opbouw. Daardoor verandert de waarde van de condensatoren tussen de twee kaders, deze condensatoren zijn aangegeven met de verticale streepjes op beide kaders in figuur 3. Deze waarde is dus opnieuw afhankelijk van hoe snel de gyroscoop draait en geeft dus de hoeksnelheid aan.

20.4.4 Toepassingen

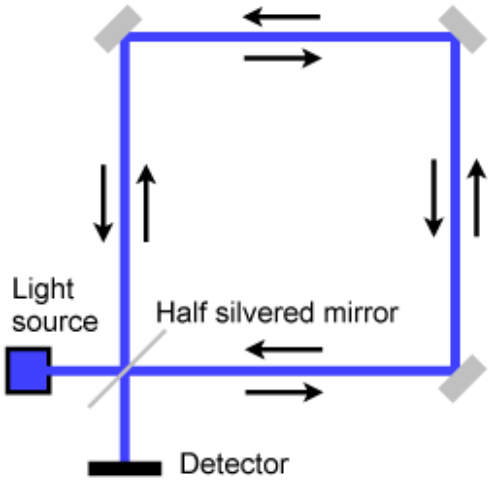
Doordat dit type van gyroscoop zeer klein in omvang is en bovendien nog gemakkelijk beschikbaar en betaalbaar is, is dit type van gyroscoop het meest gebruikte type. Het wordt gebruikt in toepassingen zoals de stabilisatie van het beeld van een camera, airbags, spelconsoles enz. Dit is dan ook het type van gyroscoop dat onze multicopter bevat.

20.5 Optische gyroscopen

20.5.1 Algemeen

Dit is het enige type van gyroscoop dat geen bewegende onderdelen bevat, dit is dan ook meteen het grootste voordeel van optische gyroscopen. Deze gyroscopen werken aan de hand van lichtstralen, ze zijn dan ook kort na het ontdekken van de laser ontwikkeld. De werking berust op het Sagnac-effect.

20.5.2 Opbouw



Figuur 6: opbouw optische gyroscoop

De optische gyroscoop bestaat minstens uit een lichtbron en een detector. Wanneer de gyroscoop verder uit drie spiegels en één halfdoorlatende spiegel bestaat, spreekt men van Ring Laser Gyro (RLG). De gyroscoop kan ook verder bestaan uit een optische kabel, wanneer dit het geval is spreekt men van Fibre Optic Gyro (FOG). Deze optische kabel maakt dan meestal verschillende wikkelingen zodat de afgelegde weg van de lichtstralen langer is wat resulteert in een betere nauwkeurigheid.

20.5.3 Werking

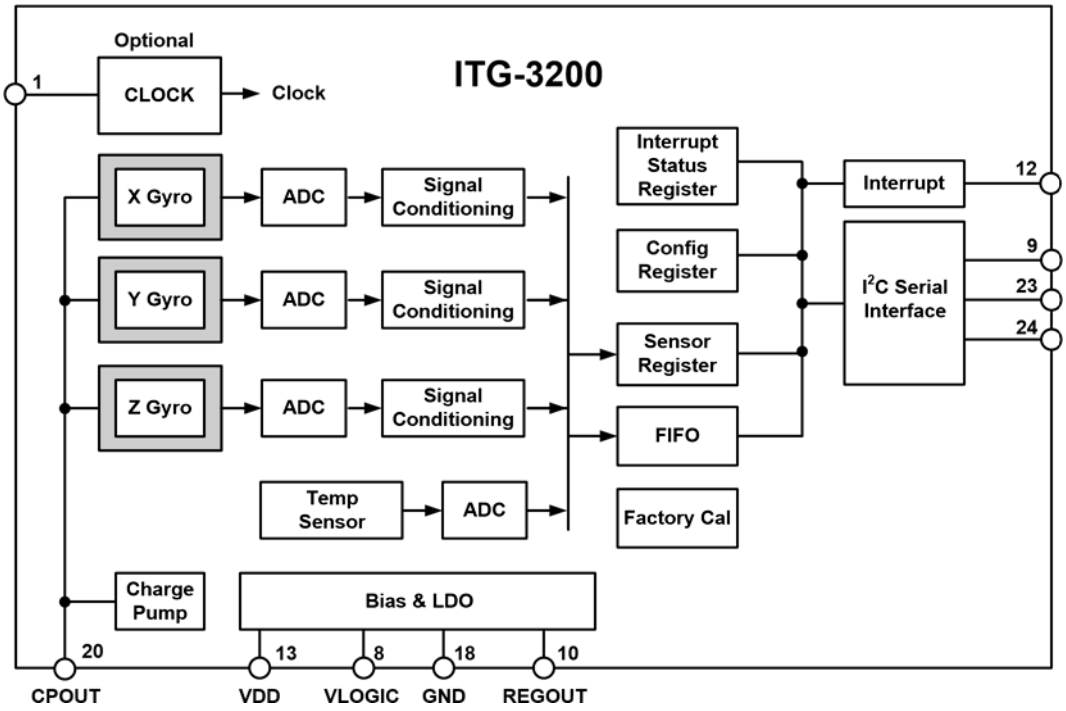
Zoals reeds vermeld berust de werking op het Sagnac-effect. Dit effect beschrijft de verschijnselen die ontstaan wanneer twee lichtstralen vertrekkend vanuit één lichtbron in verschillende richting dezelfde weg beschrijven. Wanneer het systeem niet beweegt zullen beide lichtstralen dezelfde weg afleggen maar in verschillende richting, dit betekent dus dat ze beide op hetzelfde moment op de sensor schijnen. Wanneer het systeem nu draait, zal de lichtstraal die meebeweegt met de draaibeweging van het systeem pas veel later op de sensor schijnen. Het tijdsverschil tussen het invallen van beide lichtstralen is dus een maat voor de hoeksnelheid van het systeem.

20.5.4 Toepassingen

Dit type van gyroscoop is redelijk groot in omvang en kostbaar, wat ervoor zorgt dat ze niet makkelijk te verkrijgen zijn in de handel. Ze worden vooral gebruikt voor navigatie van onderzeeërs, vliegtuigen en ruimtevaartuigen.

20.6 Opbouw gyroscoop

Een gyroscoop ondergebracht in een IC behuizing bevat veel meer dan enkel en alleen een gyroscoop. In onderstaande figuur ziet u het blokschema van onze gyroscoop.



Figuur 7: blokschema gyroscoop

20.6.1 Gyroscopen

De ITG-3200 bestaat uit drie gyroscopen die respectievelijk de hoeksnelheid rond de X, de Y en de Z-as meten. Het signaal afkomstig van de condensatoren in de gyroscoop wordt versterkt en gefilterd. Dit signaal is evenredig met de gemeten hoeksnelheid en dus ook een analoog signaal.

20.6.2 ADC's

Het analoog signaal wordt vervolgens omgezet aan de hand van ADC's [17], de snelheid van de uitgangssignalen van deze ADC's kan ook ingesteld worden. In de ITG-3200 zijn dit on-chip 16 bit ADC's. Naast de drie ADC's nodig voor de gyroscoop bevat de ITG-3200 nog een vierde ADC die het signaal van de temperatuur sensor digitaliseert.

20.6.3 Temperatuur sensor

De meeste gyroscopen uitgezonderd de optische bevatten een temperatuur sensor, dit omdat de kleine bewegende onderdelen redelijk onderhevig zijn aan temperatuur. Door deze sensor wordt de gyroscoop nog betrouwbaarder.

20.6.4 Sensor register

De sensor data register bevat de laatste gyroscoop en temperatuur data. Dit register kan enkel gelezen worden, dit gebeurt door de I²C verbinding. Dit kan gebeuren op elk moment, indien er nieuwe data is en de I²C verbinding dus deze data moet doorspelen zal een interrupt [18] het uitlezen van het sensor register pauzeren.

20.6.5 I²C interface

Staat in voor de communicatie met de master.

20.6.6 Charge pump

Dit is enkel en alleen te vinden in vibratie gyroscopen en creëert een hoge spanning (25V). Deze spanning is nodig om de oscillator te laten trillen. De uitgang van de charge pump is via een condensator op CPOUT (pin 20) aan de GND geconnecteerd.

De vraag is hoe men dit alles in een behuizing krijgt van slechts 4x4x0,9 mm, het antwoord is MEMS. MEMS staat voor Micro Electronic Mechanical Systems. Het systeem is gemaakt om elektronica te kunnen verkleinen zodat een apparaat met dezelfde grootte veel krachtiger en veelzijdiger wordt. Het maken van zo'n systeem

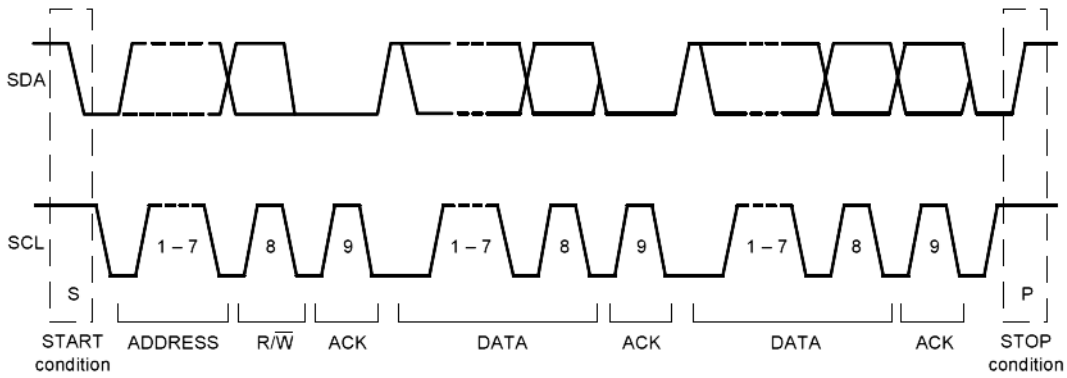
[17] ADC: analog to digital convertor
[18] Interrupt: een soort van macro die een stukje programma bevat

komt neer op het laag voor laag structuurtjes aan te brengen en gedeelten weg te etsen, dit wordt de CMOS technologie genoemd en wordt gebruikt voor het maken van chips. Wanneer men deze technologie combineert met het maken van sensoren en actuatoren bekomt men de MEMS technologie.

20.7 Communicatie met flight controller

De communicatie met de flight controller gebeurt via I²C of voluit inter-integrated circuit. Deze manier van communiceren werd in 1982 door Philips ontwikkeld, en wordt onder andere gebruikt om meer 1/0 poorten te creëren aan de hand van een expander IC. I²C is dus een datacommunicatie tussen microprocessors en IC's, meestal bevindt al de hardware zich op één en dezelfde printplaat. De verbinding tussen beiden bestaat uit 2 draden. Over de SDA (Serial DAta line) draad wordt de data verzonden, terwijl er over de SCL (Serial CLock line) draad een kloksignaal wordt verzonden. Beide lijnen worden hoog gehouden door een pull-up weerstand van 4,7 kΩ. Dit kloksignaal wordt genereert door de master, in ons geval de flight controller meer bepaald de PIC18F4550, en zorgt ervoor dat alle aangesloten hardware synchroon loopt met de master. Naast het kloksignaal genereert de master ook het start- en stopsignaal. De aangesloten IC's op de master zijn de slaven. Om meerdere slaven op een en dezelfde bus aan te sluiten en toch elke slaaf afzonderlijk te kunnen sturen bezit elke slaaf een adres, dit adres is bepaald door het type IC en door het niveau van de adresseerpinnen. Onze gyroscoop bezit slechts 1 adresseerpin, het is dus maar mogelijk om 2 gyroscopen van ons type op een en dezelfde bus aan te sluiten. De adresseerpin van onze gyroscoop (pin 9) is aangesloten op de ground dit betekent dat het getal bepaald door het niveau van de adresseer pin 0 is, dit getal is het laatste getal in het adres. Het adres van onze gyroscoop is 1101000.

Om de communicatie tussen de master en de slaaf te starten zendt de master een signaal uit dat van hoog naar laag gaat dit doet hij wanneer het kloksignaal hoog is. De maximum spanning van het signaal is de spanning aangesloten op pin 8 en noemt V_{logic}, in onze opstelling bedraagt die 3,3 V net zoals de voedingsspanning van de gyroscoop. Vervolgens zendt de master het adres van de gewenste slaaf uit, gevolgd door een read/ write bit. Het adres en de read/write bit zijn samen 8 bit lang en vormen dus een byte. Elke byte wordt gevolgd door een acknowledge signaal, dit signaal is laag terwijl het kloksignaal hoog is. Na deze opstartprocedure wordt de data verzonden in bytes telkens gevolgd door het acknowledge signaal. Wanneer de communicatie moet stoppen zendt de master het stopsignaal. Dit signaal gaat van laag naar hoog terwijl het kloksignaal hoog is.



Figuur 8: complete I²C data communicatie

20.8 Aankoop van een gyroscoop

Wanneer je een gyroscoop koopt moet je zeker op volgende zaken letten:

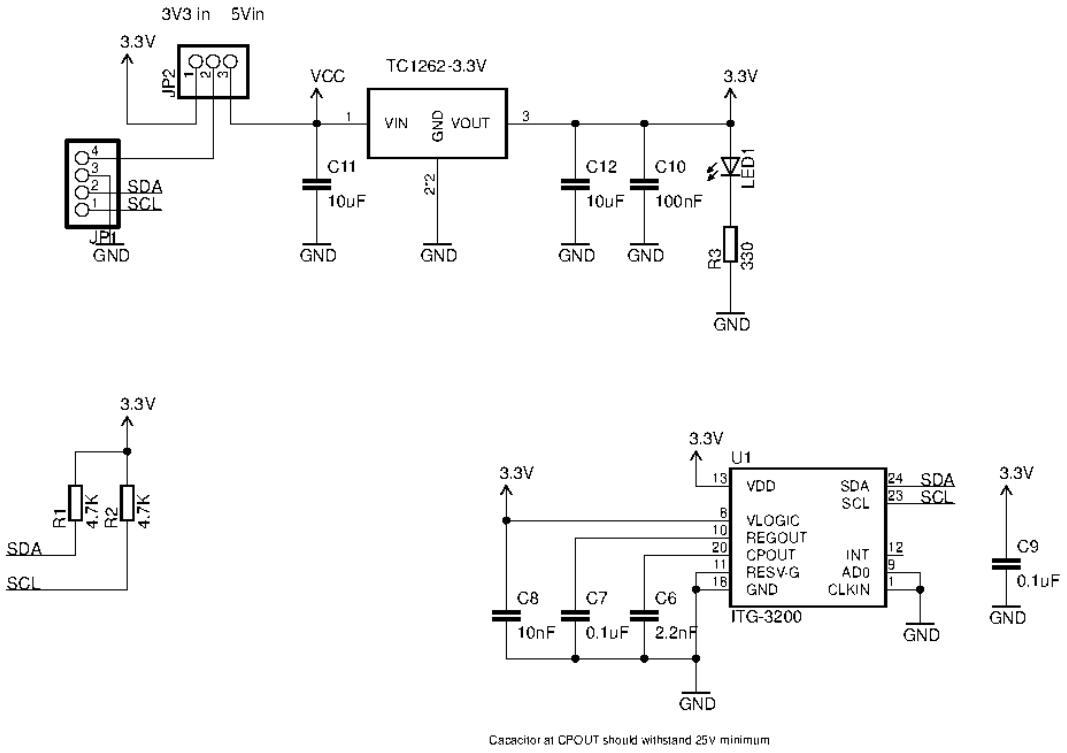
- Meetbereik: Hoeveel graden dat hij maximum per seconde kan meten
- Aantal assen
- Temperatuur bereik
- Spanningsbereik
- Weerstand tegen schokken, bv. 10 000 g (g=aardversnelling)

20.9 Onze gyroscoop:

In onze sturing is de ITG-3200 opgenomen. Dit is werelds eerste drie assige gyroscoop ondergebracht in een IC met digitale uitgang. De datasheet van deze gyroscoop is te vinden in bijlage 5: gyroscoop.

- 14,375 LSB's per °/sec
- Kan tot ±2000°/sec meten
- Weerstaat schokken tot 10 000 g.
- Bevat drie 16-bit ADC's zodat uitgang digitaal is
- Bevat temperatuursensor zodat kalibratie minder nodig is
- Verbruikt slechts 6,5 mA zodat de batterij langer meegaat
- Variabele voedingsspanning: 2,1 V tot 3,6 V
- Variabele V_{logic} : 1,71 V tot VDD
- Stand-by verbruik: 5 µA
- Beperkte grootte: 4x4x0,9 mm
- Aanschakeltijd: 50 ms
- Snelle I²C (400 kHz)

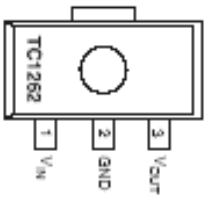
20.10 Elektrisch schema



Figuur 9: elektrisch schema gyroscoop

20.11 Voeding

Doordat de voedingsspanning van de gyroscoop en de spanning gebruikt voor de communicatie (V_{Logic}) maar maximum 3,6 V mag bedragen bezit het elektrische schema een spanningsregelaar. Deze zet dus de 5 V afkomstig van de DC to DC convertor op de flightcontroller om naar een constante 3,3 V. Het verschil tussen beide bedraagt maar 1,7 V dat betekent dat er geen gebruik kan gemaakt worden van een standaard spanningsregelaar want deze hebben een drop-out[19] spanning van ± 3V, daarom wordt hier gebruikt gemaakt van de TC1262-3,3V. Deze spanningsregelaar heeft een maximum drop-out spanning van slechts 650 mV en kan maximum 500 mA leveren. Deze spanningsregelaar kan onder verschillende vormen voorkomen maar wij maken gebruik van de 3-Pin SOT-223, dit type wordt aan de printplaat gesoldeerd en ligt dus in plaats van recht te staan.

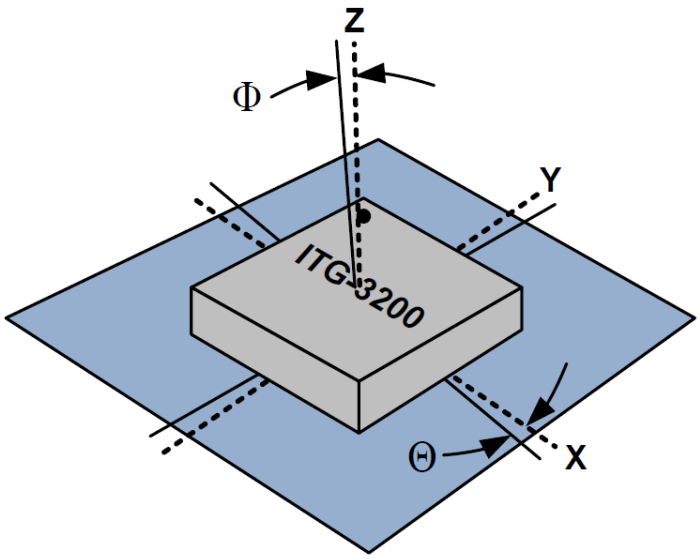


Figuur 10: 3-Pin SOT-223

[19] Drop-out spanning: minimum spanningsverschil tussen ingang en uitgang.

20.12 Uitlijnen gyroscoop

Wanneer je de sturing van je multicopter monteert moet je er goed op letten dat de gyroscoop perfect is uitgelijnd. Dit betekent dat de X-as en de Y-as van de gyroscoop dezelfde richting heeft als de armen van je frame en dat de gyroscoop perfect waterpas staat. Elk graad die je ernaast zit resulteert in een fout.



Orientation Error (θ or Φ)	Cross-Axis Sensitivity (sinθ or sinΦ)
0 °	0 %
0,5 °	0,87 %
1 °	1,75 %

Figuur 11: uitlijnen gyroscoop

21. De ESC's

21.1 Algemeen

De snelheidsregelaar meestal ESC (Electronic speed controller) genoemd, dient om de gelijkspanning van de Lipo packs om te vormen naar een 3-fasige wisselspanning met regelbare frequentie en spanning. Deze is nodig om het toerental van de motor te kunnen wijzigen. Een ESC sluit je aan volgens het hiernaast getekend schema.

Figuur 1: aansluitschema ESC

21.2 Functie

Zoals al eerder vermeld dient een ESC om een motor aan te sturen, dit gebeurt door de frequentie te regelen want:

$$n_r = \frac{f}{p}$$

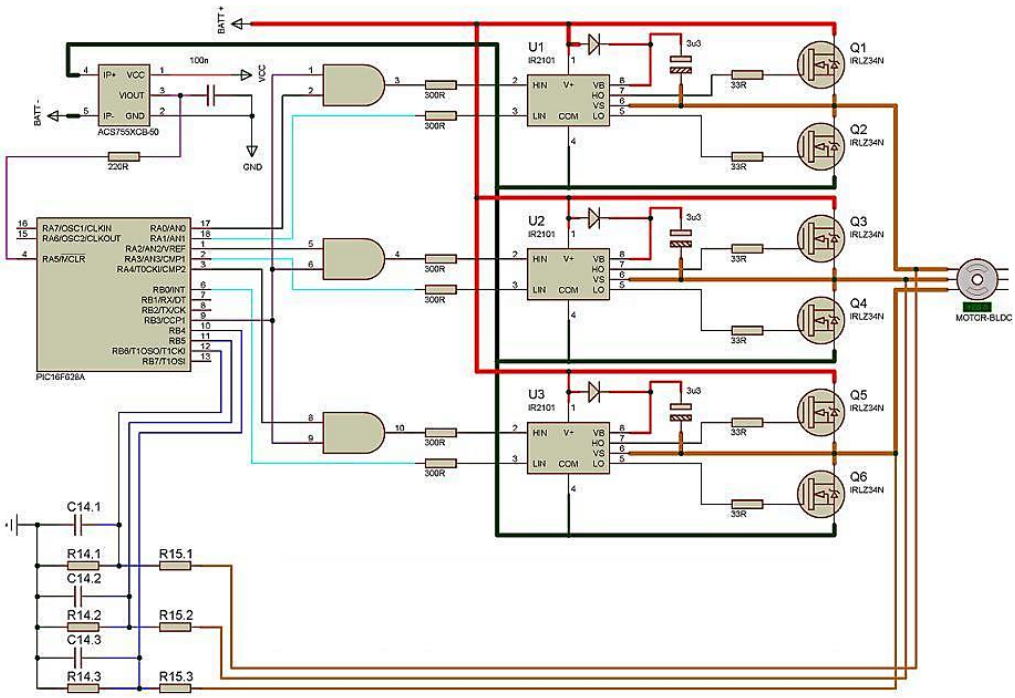
Naast de frequentie dient ook de spanning geregeld te worden, want de motor bestaat uit spoelen waarvan de impedantie wordt gegeven door:

$$Z = 2\pi \times f \times L$$

Wanneer de frequentie dus laag is zal de impedantie ook laag zijn waardoor er enorme stromen zouden vloeien wat de motor zou aantasten.

21.3 Elektrisch

Een ESC kan je in 2 aparte kringen indelen, de vermogenskring en de elektronica. Het elektronica gedeelte zullen wij niet bespreken omdat we te weinig kennis hebben betreffende elektronica, wel zullen we de vermogenskring bespreken. Het schema van een ESC ziet er als volgt uit:

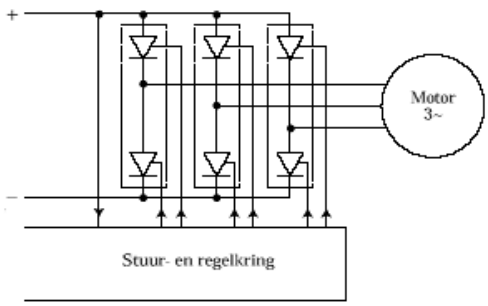


Figuur 2: elektrische schema ESC

Zoals je op de figuur kan zien bestaat de vermogenskring uit slechts 1 soort component, namelijk transistors, deze zijn aangegeven als Q1 tot en met Q6. Al deze transistors samen vormen een wisselrichter, dit is het omgekeerde als een gelijkrichter en dient om een wisselspanning te creëren. Transistors zijn eigenlijk een soort van elektrisch schakelaars, in de ESC worden ze aangestuurd via de IC's U1, U2 en U3 en schakelen ze de gelijkspanning. Doordat ze enorme stromen moeten schakelen stijgt de temperatuur, dit verklaart waarom ESC's voor grote stromen meestal een ventilator bevatten (er bestaan er zelfs die water gekoeld zijn). Het type van de transistors die de ESC bevat bepaalt grotendeels de eigenschappen van de ESC, de hoofdeigenschappen van een ESC zijn namelijk:

- de toegelaten spanning uitgedrukt in aantal Lipo cellen
- de constant toegelaten stroom
- de maximum stroom

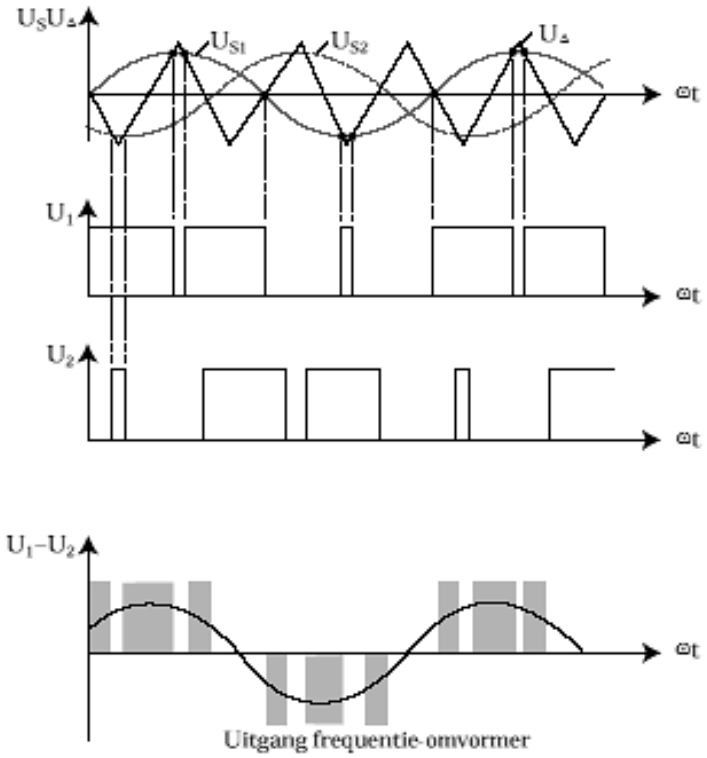
We kunnen dus het elektrisch schema vereenvoudigen tot:



Figuur 3: vereenvoudigd elektrisch schema ESC

21.4 Werking

De werking berust op PBM of voluit puls breedte modulatie, dit principe berust op het sturen van pulsen. Door de verhouding van de pulslengte tot de pauzelengte te veranderen regelt men de spanning en door het aantal pulsen per tijdseenheid te veranderen kan men de frequentie wijzigen.
Wanneer de transistors moeten schakelen wordt op volgende wijze achterhaald:

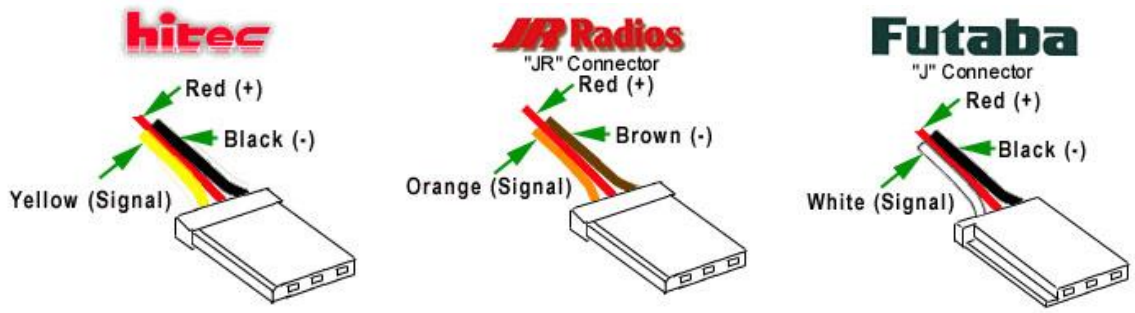


Figuur 4: principe PBM

Dit gebeurt in de ESC 3 keer, met telkens een onderlinge faseverschuiving van 120° en zo is het uitgangssignaal dus een 3-fasige wisselspanning met variabele frequentie en spanning.

21.5 Aansturing

Een ESC wordt aangestuurd door 3 draden, de kleurencode van deze draden is afhankelijk van welk merk de ESC is:



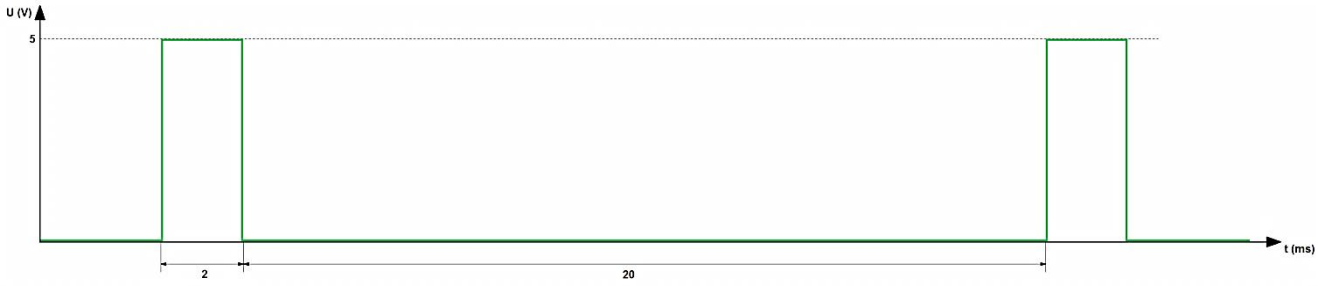
Figuur 5: kleurencode aansturing ESC

- rood = 4 tot 6 V DC (voeding ESC)
- zwart (of bruin) = ground
- wit (of oranje, of geel) = signaal

De ESC wordt gestuurd door een signaal namelijk een puls, de lengte van deze puls bepaalt de snelheid van de motor. Die puls dient om een TTL-chip (Transistor-transistorlogica) aan te sturen, die op zijn beurt de transistors aanstuurt. Standaard genomen zendt men een puls met een gestabiliseerde spanning van 5 V en volgende puls lengtes:

- 1 ms = motor staat stil
- 2 ms = motor draait op max. toerental

De draairichting kan gewijzigd worden door het wisselen van 2 lijndraden van de motor, bij de ESC's die wij gebruiken kan de draairichting van de motor veranderd worden door de instellingen van de ESC te wijzigen. Deze puls moet samen met de pauzelengte 15 tot 25 ms duren, in frequentie uitgedrukt is dit 60 tot 40 Hz. Bij het instellen van deze pauzelengte moet wel rekening gehouden worden dat elke berekening die de ESC moet maken tijd vraagt, dus wanneer je berekening 4 ms kost moet je niet 25 ms instellen als pauzelengte want dan krijgt de ESC te weinig bruikbare pulsen waardoor er niets gebeurt. Het steeds herhalen van een puls gevolgd door een pauze wordt een puls trein genoemd.
Grafisch ziet dat er als volgt uit:



Figuur 6: aansturingspuls

Aangezien dat deze puls een TTL-chip aanstuurt moet hij voldoen aan het TTL-niveau, dit betekent dat de spanning maximum 0,5 V mag zijn voor een logische 0 en minimum 4,5 V voor een logische 1.
Wanneer men wil dat de ESC en dus ook de motor sneller reageert, kan men de ESC flashen. Dit houdt in dat de ESC gereset wordt en vervolgens herprogrammeerd wordt zodat de ESC werkt met korte ingangssignalen. De lengte van deze ingangssignalen kan men zelf kiezen maar een veel gebruikte waarde is een lengte van 5 ms dit komt overeen met een frequentie 200 Hz. Wanneer men de ESC flasht moet de sturing ook geflasht worden anders krijgt de ESC te weinig ingangspulsen.

21.6 Verschillen tussen ESC's

Om een ESC te kiezen die goed bij je project past moet je rekening houden met onderstaande verschillen.

21.6.1 Hoofdeigenschappen

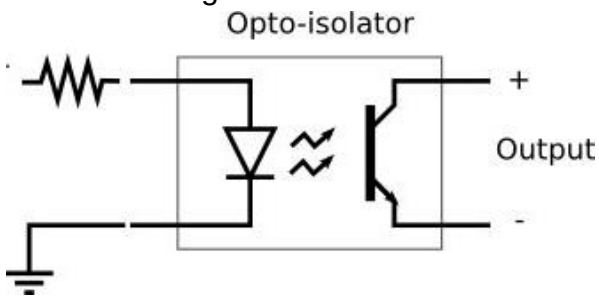
Dit is het grootste verschil tussen ESC's. Kies altijd een ESC waarvan de maximum stroom groter is dan de maximum toegelaten stroom van de motor, dit om te voorkomen dat de ESC kokend heet wordt of zelfs in het ergste geval gewoon doorbrand.

21.6.2 Lage spanningsbewaking

Met lage spanningsbewaking wordt bedoeld dat de ESC een ingebouwde spanningsmeter bevat. Deze spanningsmeter meet de lipo pack spanning, wanneer deze spanning te klein wordt zal de ESC ervoor zorgen dat de motor trager gaat gaan draaien totdat de multicopter landt. Daarom is het belangrijk dat wanneer je meerdere Lipo packs gebruikt deze allemaal in parallel zet, anders zou(den) enkel de motor(en) vertragen waarvan de Lipo pack bijna leeg is waardoor de multicopter zou gaan scheef hangen met crashen als gevolg. Een andere belangrijke opmerking is dat wanneer je de minimumspanning kan instellen je er rekening mee moet houden dat niet elke cel in een Lipo pack gelijk is. Daarom reken je best niet met een minimumspanning van 3 V per cel want dan kan het gebeuren dat bijvoorbeeld 1 cel een spanning heeft van 3,2 V terwijl de andere 2,8V heeft wat betekent dat de lipo pack stuk is.

21.6.3 Opto

Een opto(coupler) in een ESC is bedoeld om een volkomen galvanische scheiding tussen accu, ESC en motor te bewerkstelligen. De reden daarvan is, dat er dan op geen enkele manier storingen via de bedrading de ontvanger kunnen bereiken. Deze storingen ontstaan door het schakelen van de transistors in de ESC, naarmate de motor meer stroom afneemt nemen deze storingen toe. Een voorwaarde is wel dat je een aparte lipo pack gebruikt voor de aansturing van de ESC.



Figuur 7: optocoupler

21.6.4 Sensored / sensorless

Een sensored ESC brengt een belangrijk voordeel met zich mee: het werkt vloeiender. Omdat een brushless motor werkt door middel van 3 draden moet er een goede timing zitten tussen de stroompulsen die worden afgegeven door de ESC. Op hoge toerentallen is geen verschil merkbaar tussen sensored en sensorless, maar op lage toerentallen, dus bij het optrekken en het maken van bochten geeft het hebben van een sensored ESC hierbij een aanzienlijk voordeel. Sensorless opstellingen hebben hier vaak last van het "cogging" effect. Dit wil zeggen dat ze op lage toerentallen kunnen gaan haperen, totdat ze weer op snelheid zijn. Dit is eigenlijk niet iets om je zorgen over te maken als je een sensorless ESC met sensorless motor hebt, omdat het normaal is, maar het geeft wel een nadeel in acceleratiesnelheid en in het bochtenwerk. Het grootste voordeel van een sensorless ESC met motor is dat het aanzienlijk goedkoper is dan een sensored combinatie en daardoor voor beginners interessant is.

21.6.5 BEC

Bec staat voor Battery Eliminator Circuit. Zoals de naam al zegt is het een schakeling die ervoor zorgt dat je geen aparte Lipo pack nodig hebt voor de sturing, wanneer de sturing een aanzienlijk lagere spanning nodig heeft dan de motoren. Dus wanneer je sturing 14,8 V nodig heeft en de motoren ook dan heb je helemaal geen nood aan een BEC. Een BEC kan op twee manieren voorkomen: ofwel als een apart apparaatje, ofwel ingebouwd in de ESC. Wanneer je een ESC hebt met ingebouwde BEC dan wordt de sturing gevoed door de ESC in plaats van andersom.

- Zonder BEC:

- Met BEC:

Figuur 8: principe BEC

Dit zorgt er wel voor dat je alle voordelen van een opto ingang verliest. De spanning gecreëerd door een BEC is meestal 5 V maar er bestaan er ook waarvan de spanning 5,5 V of 6 V is. De maximale stroom gecreëerd door een BEC is standaard genomen 5 A. Een BEC bestaat in twee varianten:

- SBEC: Een lineair BEC is een soort van automatische weerstand die zorgt dat de uitgangspanning altijd stabiel is. Het nadeel van het weerstand principe is dat het spanning verschil omgezet wordt in warmte. Dit is jammer, vooral bij een Lipo pack met hoge spanning want hier wordt heel veel vermogen omgezet in warmte.
  Voor een Lipo pack 6S wordt het dus:

  $$U_w = U_{lipo} - U_{BEc} = 22{,}2\ V - 5\ V = 17{,}2\ V$$
  $$I_w = 5\ A$$
  $$P_w = U_w \times I_w = 17{,}2\ V \times 5\ A = 86\ W$$

  Juist hierdoor raken veel SBEC systemen overbelast en vallen ze uit of branden ze door waardoor je de volledige controle over de multicopter verliest.

- UBEC: Een geschakelde BEC werkt veel efficiënter. Door heel snel uit en aan te schakelen wordt de uitgangspanning minder dan de accu spanning. Dit schakelen wordt geregeld door een chip. Hier zit direct het grootste nadeel. Het schakelen zorgt voor storing op de uitgangsspanning wat de ontvanger kan beïnvloeden. Een goede

UBEC (bijna allen tegenwoordig) heeft filters en zijn afgeschermd zodat er erg weinig ruis overblijft. Een UBEC heeft daarom ook altijd een ferriet kern (metalen ring om de kabel voor de aansturing) wat een goede filter is voor hoog frequent ruis.

21.6.6 Motor timing

Omdat het toerental van een motor niet alleen gewijzigd wordt door de frequentie maar ook door het aantal polenparen in de motor is het belangrijk dat de ESC weet hoeveel polenparen de motor heeft, dit kan automatisch gedetecteerd worden door de ESC maar wanneer de ESC programmeerbaar is kan deze waarde zelf ingegeven worden. Hoe meer polenparen de motor bevat hoe groter de waarde, standaard gezien neemt men:

- 2°, 8°: geschikt voor de meeste in-runner motoren
- 15°, 22°: geschikt voor motoren met 6 of meer polen, algemene out-runners dus
- 30°: geschikt voor meerpolige motoren

Bij twijfel kan de juiste motor timing altijd opgezocht worden in de gegevens van de motor.

21.6.7 Remfunctie

De remfunctie remt de motor wanneer het gashendel in de laagste stand staat, deze functie wordt vooral gebruikt wanneer er gebruikt wordt gemaakt van inklapbare propellers. Hoe sterk de motor wordt afgeremd moet ingesteld worden, daarom bezitten alleen programmeerbare ESC deze functie.

21.6.8 Programmeerbaar

Sommige ESC's zijn programmeerbaar. Je kunt dan zaken veranderen zoals:

- waarde spanning bij inschakelen lage spanningsbewaking
- type laagspanningsbeveiliging
- motor timing: Dit heeft te maken met het aantal polenparen
- soft starter
- vermogen bij aanzet, uitgedrukt in procent
- type batterij
- soort remfunctie
- waarde van BEC spanning

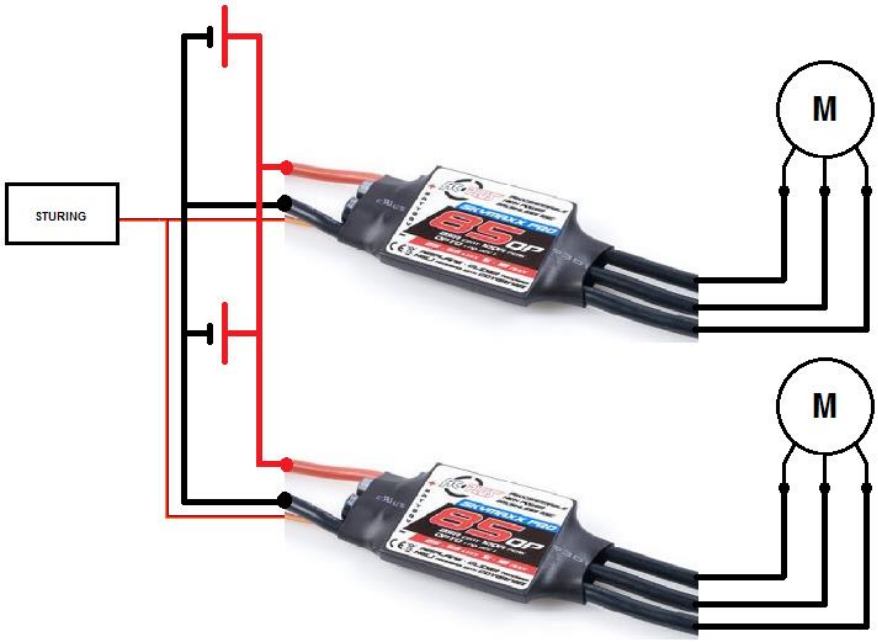
De ESC wordt geprogrammeerd met behulp van een programmeerkaart. Dit kan een printje zijn met een paar drukknoppen maar evengoed een klein apparaatje met een LCD scherm. Het is wel belangrijk te weten dat je best zo weinig mogelijk verandert want het is nog altijd de sturing die het voor het zeggen heeft en niet de snelheidsregelaar.

21.6.9 Kostprijs

De prijzen van een ESC kunnen heel uitlopend zijn, maar je doet er goed aan om geen zeer goedkope ESC aan te kopen. Dit is namelijk van Chinese makelij en heeft nogal vaak de neiging om door te branden. Een ander probleem is ook dat hiervan meestal geen handleidingen of programmeerkaarten te vinden zijn waardoor het instellen onmogelijk wordt.

21.7 Het schakelen van een ESC

Een ESC kan maar op één correcte manier geschakeld worden en dat is zoals in figuur 9. Wanneer je toch meerdere motoren op één kanaal wilt schakelen moet je de aansturing van de ESC's parallel schakelen:



Figuur 9: schakelen van twee ESC's

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat wanneer beide ESC's BEC bevatten de rode draad in de aansturing van één van de ESC's moet ontkoppeld worden.

21.8 Onze ESC

Wij hebben gekozen voor de SKYMAXX PRO 85 85A - 2-6S - OPTO (RC-SKX-085-O) Onze keuze is naar deze ESC uit gegaan omdat ze een ingebouwde spanningsmeter heeft en ook qua prijs goed meevalt. Zoals al vermeld in de naam is de nominaal toegelaten stroom 85 A. De maximum toegelaten stroom is zelf 100 A wat zeker voldoende is als je weet dat de maximum toegelaten stroom van 1 motoren 72 A bedraagt. Zoals ook in de naam vermeld heeft deze ESC een OPTO ingang.
Verdere gegevens van deze ESC zijn te raadplegen in bijlage 6: onze ESC.

Figuur 10: onze ESC

21.9 Evolutie

1. Om metingen te doen hebben we gebruikt van de ESC 100 A 900-serie Roxxy. We hebben gekozen om deze ESC niet te gebruiken op de multicopter omdat hij te duur is en niet genoeg stroom kon schakelen. Dat hij niet genoeg stroom kon schakelen kwam doordat we toen nog het idee hadden om twee motoren te regelen aan de hand van één ESC.
2. Vervolgens was het plan om gebruik te maken van ESC's afkomstig van Hobbyking, deze ESC's waren zeer goedkoop, maar handleidingen en programmeerkaarten van deze ESC's ontbraken dus dit was geen optie.
3. Na heel wat vergelijken van ESC's hadden we besloten gebruik te maken van vier SKYMAXX PRO 125 125A - 2-6S – SBEC ESC's. De eerste ervaringen met dit type ESC's was zeer slecht want de eerste ESC die we probeerde gaf al meteen de geest.
4. Op dinsdag 5 maart werd duidelijk dat het idee om twee motoren met één ESC aan te sturen een zeer slecht idee was. We hebben dan ook meteen omgeschakeld naar één ESC per motor.
5. De volgende dag al, woensdag 6 maart, werd besloten om gebruik te maken van de ESC's die we nu effectief gebruiken.

22. De relaiskaart

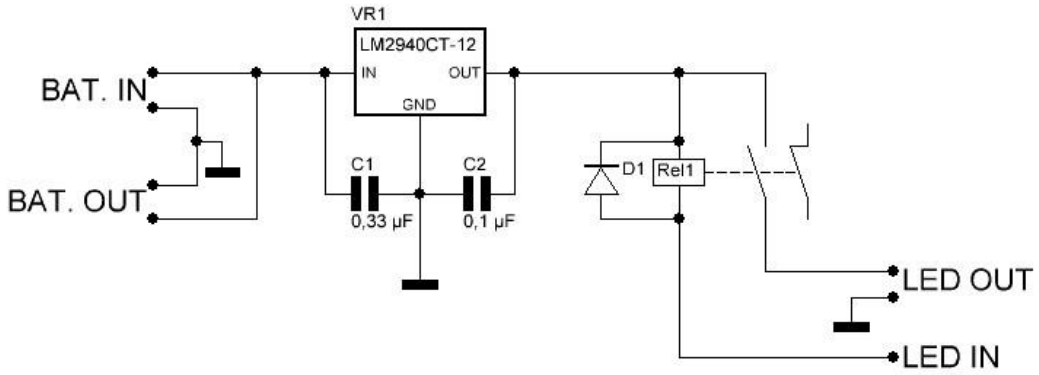
22.1 Functie

De relaiskaart zoals wij hem noemen heeft 2 functies:

- Er voor zorgen dat we 1 A kunnen schakelen met het kanaal voor de LED verlichting in plaats van 100 mA
- Er voor zorgen dat de LED verlichting gevoed wordt door een constante gelijkspanning van 12 V.

22.2 Schema

Het schema van de relaiskaart is zeer eenvoudig en ziet er als volgt uit.



Figuur 1: Schema relaiskaart

22.3 Bespreking schema

Wanneer je een Lipo pack aansluit op BAT. IN zal de Lipo pack spanning omgevormd worden naar een constante gelijkspanning van 12 V, dit gebeurt door VR1. Deze spanning is aangesloten op de spoel en het schakelelement van Rel 1, wanneer nu de massa is aangesloten op de spoel van Rel 1 zal het relais schakelen en meet men aan LED OUT12 V. De massa aan de spoel van Rel 1 schakelen gebeurt door een NPN transistor die in de sturing is opgenomen. Zoals je in het schema kan zien bezit het schema ook een BAT. OUT deze zorgt ervoor dat we niet meerdere draden in een en dezelfde printkroonsteen moeten steken.

22.4 Bespreking componenten

22.4.1 Spanningsregelaar

In het schema is een LM 2940 CT 12 spanningsregelaar opgenomen deze dient om de Lipo pack spanning om te vormen naar een constante gelijkspanning van 12V. We hebben voor deze spanningsregelaar gekozen omdat dit een low drop spanningsregelaar is, dit betekent dat de drop-out spanning[20] maar 0,5 V is in plaats van de standaard 3 V. Dit is nodig omdat de Lipo pack spanning in gewoon gebruik varieert tussen 16,8 V en 13 V, normaal gezien mag de Lipo pack zelfs ontladen worden tot 12 V maar dit gebeurt niet omdat de tijdsduur van de andere Lipo packs veel korter is. Op deze spanningsregelaar is een koellichaam geplaatst omdat de spanningsregelaar bij een vol geladen Lipo pack een redelijk vermogen moet omzetten in warmte, namelijk

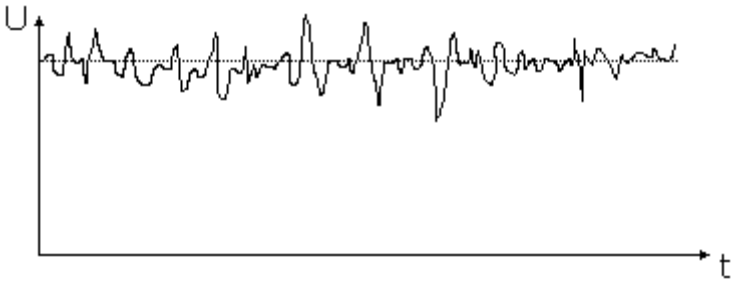
$P_s = (U_{in} - U_{uit}) \times I$

$P_s = (16{,}8\,V - 12{,}0\,V) \times 1\,A$

$P_s = 4{,}8\,W$

22.4.2 Condensatoren

Deze condensatoren zorgen er voor dat ons uitgangssignaal geen hoogfrequent ruis bevat. Wanneer deze condensatoren niet zouden opgenomen zijn in het schema zou ons uitgangssignaal er als volgt uit zien:



Figuur 2: functie onstoringscondensatoren

22.4.3 Relais

Het relais dient gewoon als schakelelement. In plaats van het relais kon er gebruik gemaakt zijn van een PNP transistor.

[20]Drop-out spanning: De spanningsval over de spanningsregelaar

22.4.4 Diode

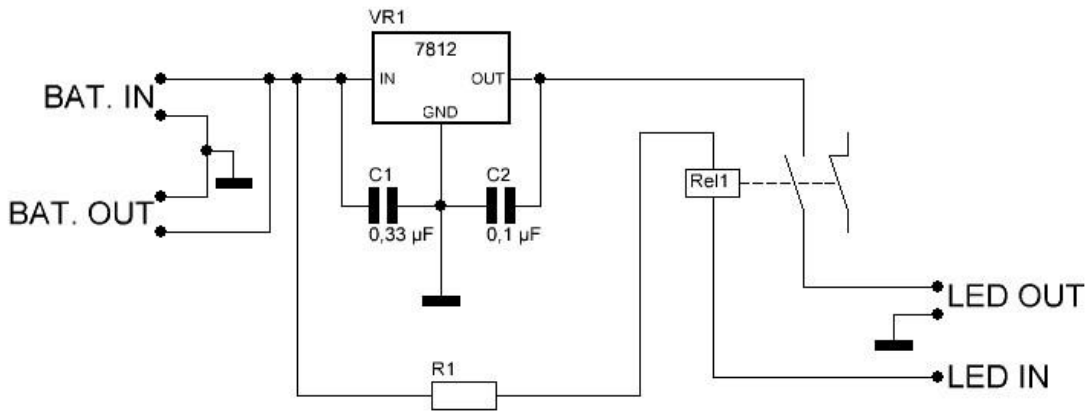
De diode, in deze functie ook wel vliegwiel- of vrijloopdiode genoemd dient om de inductiespanning van de spoel in het relais kort te sluiten. Volgens de wet van Lenz zal een spoel zich verzetten tegen een stroomverandering door de spoel, dit doet hij door een inductiespanning op te wekken. Deze inductiespanning is tegengesteld aan de aangelegde spanning en zal dus gesperd worden door de CE diode in de transistor. Hoewel de tijdsduur van zo'n spanningspiek relatief kort is kan deze inductiespanning al snel boven de 400 V uitkomen wat er voor zorgt dat de CE diode in de transistor doorslaat.

22.5 Componenten lijst

Naam	Benaming in schema	Type	Aantal
Spanningsregelaar	VR1	LM 2940 CT 12	1
Bipolaire condensator	C1	0,33 µF	1
	C2	0,1 µF	1
Diode	D1	1N4007	1
Relais	Rel 1	OMRON G2E-184P-M	1
Koellichaam	/	/	1
2- polige printkroonsteen	/	/	3
Moer + schroef	/	M3 Schroef met cilinderkop	1
Koelpasta	/	/	1

22.6 Evolutie

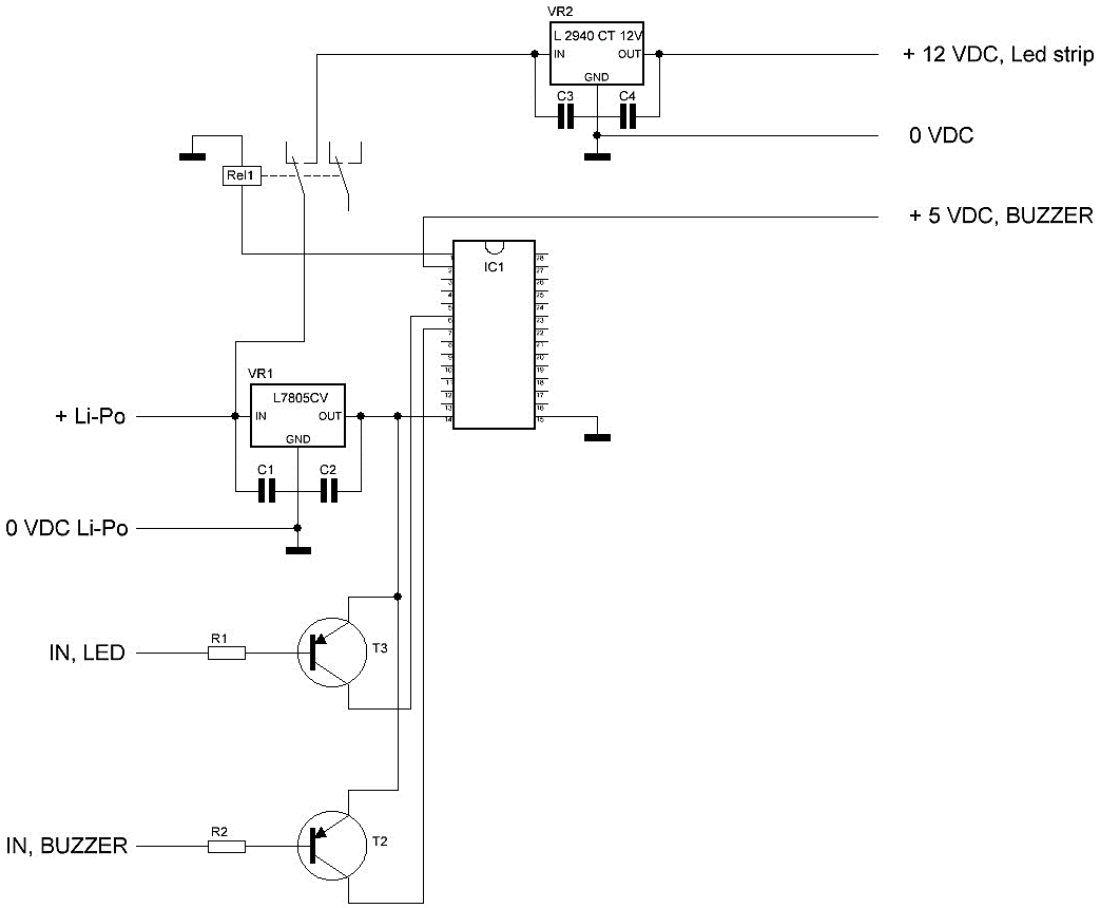
1. Dit was het eerste schema van de relaiskaart:



Figuur 3: eerste schema relaiskaart

In dit schema was de spanningsregelaar verkeerd gekozen omdat er maar zelden 12 V uit de spanningsregelaar gaat komen doordat de low-drop spanning 3 V bedraagt. Ook was de vrijloop- of vliegwieldiode over de spoel van het relais vergeten, wat fataal geweest ging zijn voor de transistor in de sturing. Een laatste fout was de relais voeden aan de hand van de Lipo pack spanning in de plaats van de uitgangsspanning van de spanningsregelaar.

2. Het volgende schema is ontstaan toen we vernamen dat er een buzzer werkt wanneer de lipo pack spanning te laag wordt. Op dit buzzerkanaal wilden we LED verlichting aansluiten maar dezelfde LED verlichting wilden we gebruiken voor de gewone verlichting.



Figuur 4: tweede schema relaiskaart

Dit schema was opgebouwd rond de ECIO28. De werking was al volgt:

IN, LED	IN, Buzzer	LED verlichting
0	0	0
0	1	knipperen
1	0	1
1	1	knipperen

In dit schema was opnieuw de vrijloop-of vliegwieldiode vergeten.

3. Uiteindelijk vernamen we dat de LED verlichting ook een signaal geeft wanneer de Lipo pack spanning te laag worden en toen ontstond het schema zoals we het nu kennen.

23. Versterkerprintje

23.1 Algemeen

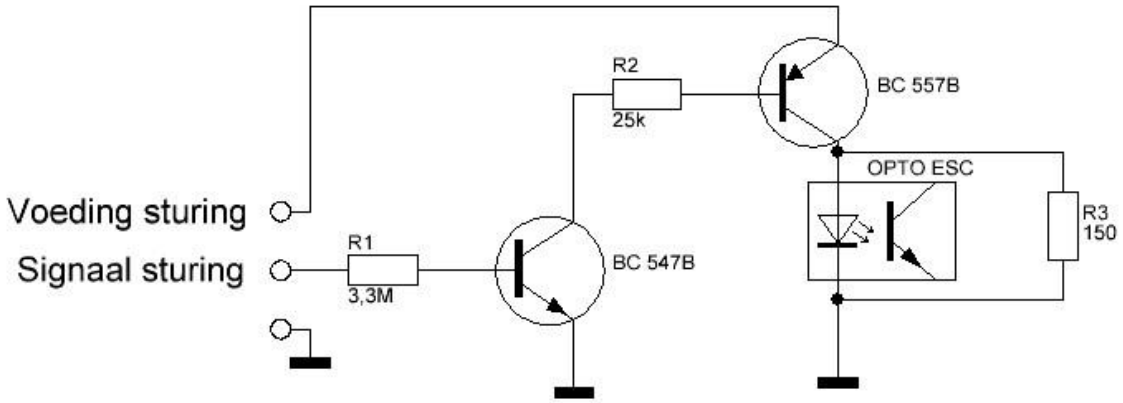
Het versterkerprintje zoals wij het noemen was bedoeld om het PWM signaal die uit de flightcontroller komt te versterken. Dit was nodig doordat de flightcontroller eerst te weinig stroom per kanaal kon leveren, uiteindelijk heeft Dhr. Ruben Buysschaert ontdekt dat het een fout was in de firmware van de flightcontroller, waardoor we de flightcontroller nu toch kunnen gebruiken zonder dit printje.

23.2 Functie

De functie van dit versterkerprintje was ervoor zorgen dat er een grotere stroom per uitgangskanaal van de flightcontroller geleverd kon worden. Dit gebeurde door de voeding van de sturing te schakelen.

23.3 Schema:

Het schema van het versterkerprintje is zeer eenvoudig.



Figuur 1: schema versterkerprintje

23.4 Bespreking schema

Dit schema is vier keer, voor elk kanaal één keer, toegepast op het versterkerprintje. Het schema is opgebouwd rond een PNP en een NPN transistor dit om ervoor dat op het einde van het schema de voeding van de sturing wordt geschakeld, want indien we enkel met een NPN transistor zouden werken dan zou de massa geschakeld worden wat niet de bedoeling is. Dit hadden we ook kunnen doen aan de hand van een inverter IC. Zoals te zien is in het schema voedt deze schakeling niet alleen de OPTO in de ESC maar ook de weerstand R3, deze weerstand is een pull-up weerstand en zorgt ervoor dat de spanning niet kan gaan zweven.

23.5 Berekeningen

23.5.1 Transistor 2

- PNP
- BC 557 B ➔ h_{FE} = 291 (zie bijlage 8: Transistor BC557B)
- Berekenen basisstroom:
  I_c = 45 mA
  $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{45\ mA}{291} = 0{,}155\ mA$
- Berekenen weerstandswaarde:

$$R_2 = \frac{U}{I_B} = \frac{5\ V}{0{,}155\ \times\ 10^{-3}} = \ 32\ 333\ \Omega = 32{,}33\ \ k\Omega$$

23.5.2 Transistor 1

- NPN
- BC 547B ➔ h_{FE} = 250 (zie bijlage 7: Transistor BC547B)
- Berekenen basisstroom:
  I_c = 0,155 mA
  $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{0{,}155\ mA}{250} = 6{,}186\ \times 10^{-4} mA = 0{,}619\ \mu A$
- Berekenen weerstandswaarde:

$$R_1 = \frac{U}{I_B} = \frac{5\ V}{0{,}619\ \times\ 10^{-6}} = \ 8\ 083\ 333{,}33\ \Omega = 8{,}08\ M\Omega$$

Dit zijn de weerstandswaarden waarbij de transistoren nog versterken, maar het is de bedoeling dat de transistoren schakelen, satureren dus. Daarom hebben voor R2 27 kΩ gekozen en voor R1 3,3 MΩ gekozen.

23.6 Componenten lijst

Naam	Benaming in schema	Type	Aantal
Transistor	BC 547B	BC 547B	4
	BC 557B	BC 557B	4
weerstand	R1	27 kΩ, 0,25 W	4
	R2	3,3 MΩ, 0,25 W	4
	R3	150 Ω, 0,25 W	4
Pinheader	/	1x12 pins M	1
	/	male	4

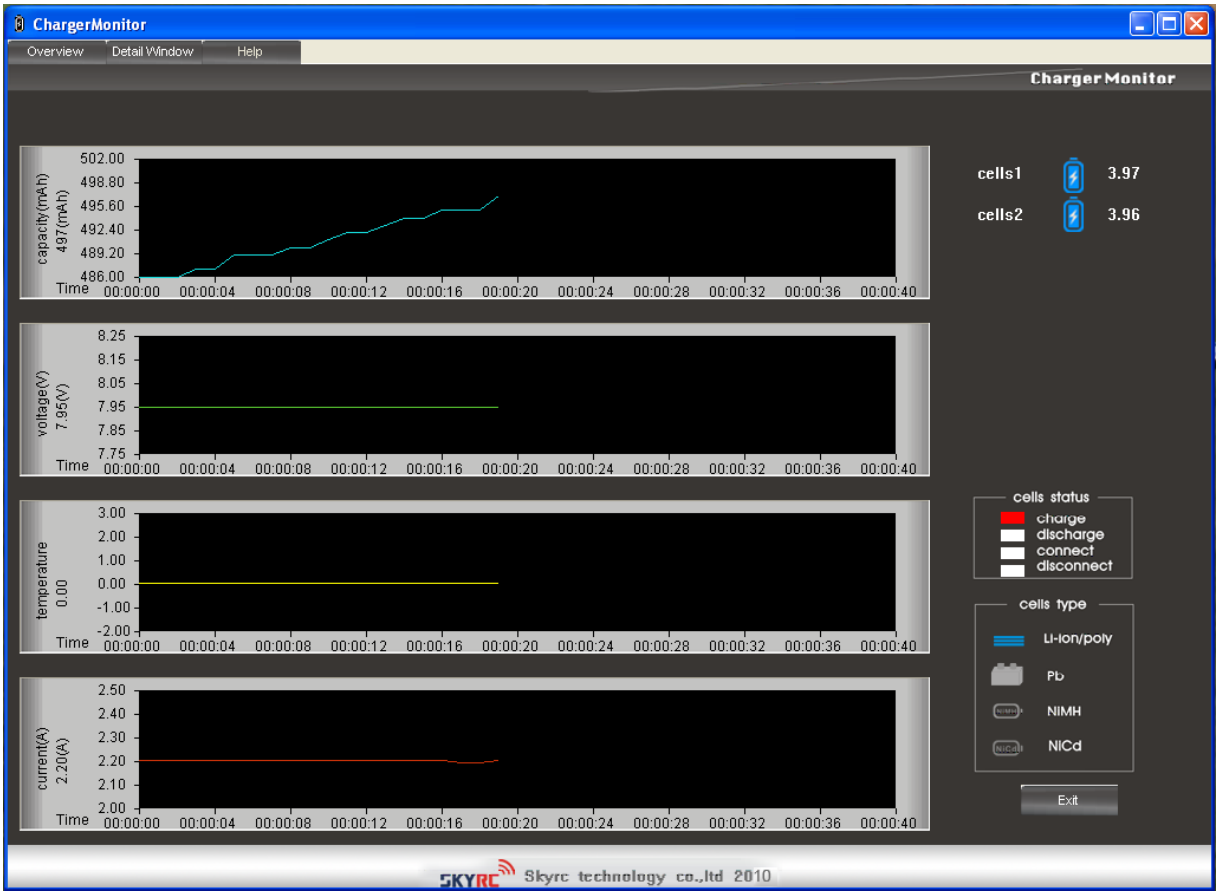
24. Software

24.1 Functie

Bij onze multicopter horen drie programma's, één programma voor de Lipo lader en twee voor het instellen van onze flightcontroller. De programma's die bij de flightcontroller horen kunnen gedownload worden van www.multicopter.katho.be.

24.2 Charger monitor

Dit is een programma die bij onze Lipo lader hoort, dit programma heeft de mogelijkheid de laadkarakteristiek van elke afzonderlijke cel in de Lipo te bekijken.



Figuur 1: charger monitor

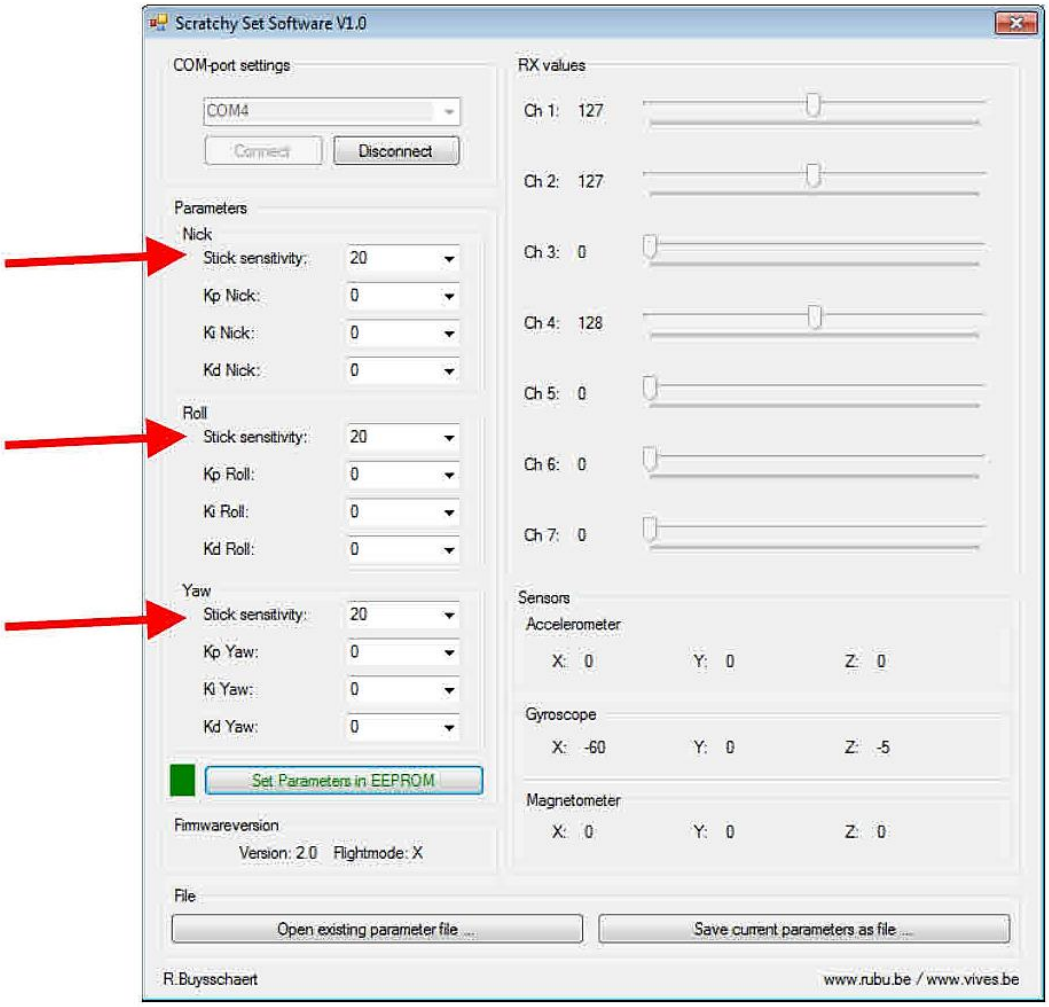
24.3 Scratchy Set Beta

24.3.1 Algemeen

Dit programma hoort bij onze flightcontroller en is dan ook geschreven door Dhr. Ruben Buysschaert. Het programma is geschreven in visual studio 2010, de code is C#. Het programma maakt gebruik van de virtuele COM-poort van onze flightcontroller. Het wordt gebruikt om de PID regelkring en de gevoeligheid van de sticks van de zender in te stellen. Hoe meer ervaring de piloot heeft, hoe agressievere de multicopter kan ingesteld worden. Vooraleer het programma te kunnen gebruiken moet u een USB kabel aansluiten op de flightcontroller en het jumpertje op de flightcontroller instellen op V_{usb}. Vervolgens kunt u in het programma een COM-poort selecteren, doet dit dan ook en druk vervolgens op connect.

24.3.2 Instellen stick gevoeligheid

De beginnende piloten beginnen best met een ‘stick sensitivity’ van rond de 20. Meer ervaren piloten kunnen dit getal opdrijven tot rond de 70, let wel steeds op dat u niet overdrijft.



Figuur 2: scratchy set beta

Wanneer u de instellingen hebt gewijzigd is het nodig op de knop ‘Set Parameters in EEPROM’ te duwen, dit om de gegevens weg te schrijven in de flightcontroller.

24.3.3 Instellen PID regelkring

Bij het instellen van de PID moet er opgelet worden dat hoe kleiner de regelparameters zijn, hoe agressiever de multicopter is. Voor het instellen van onze regelparameters hebben we gebruik gemaakt van een frame waarin onze multicopter kan schommelen, dit rond de rol-as. Doordat onze multicopter symmetrisch is gebouwd, dus het gewicht is mooi verdeeld waardoor het zwaartepunt in het midden valt, zijn onze regelparameters van de rol-as gelijk aan de regelparameters van de knik-as. Om de regelparameters voor de gier-as in te stellen hebben we de multicopter laten hoveren en dat heeft dan direct geleidt tot onze eerste vlucht.
Begin met de proportionele parameters in te stellen, dit doet u door te beginnen met een waarde van 10 en deze steeds te verkleinen totdat de multicopter reageert zoals gewenst. Wanneer u de regelparameters wijzigt moet u steeds nadien op de knop ‘Set Parameters in EEPROM’ drukken, dit om de gegevens weg te schrijven in de flightcontroller.
Vervolgens stelt u de differentiële parameters in, dit doet u zoals bij de proportionele parameters. Doe dit zodat de multicopter juist niet oscilleert, indien hij altijd oscilleert dan kunt u de D-regelkring uitschakelen door een waarde 0 in te stellen.
Als laatst stelt u de integrerende parameters in. Begin hier met een waarde van 255 en verklein telkens opnieuw. Een realistische waarde ligt tussen 50 en 255. Indien de multicopter blijft oscilleren kan deze I-regelkring uitgeschakeld worden door een waarde 0 in te stellen, dit is enkel nodig in uitzonderlijke gevallen.
Wanneer u de ingestelde waarden wilt opslaan voor later gebruik dan kan dit door op de knop ‘save current parameters as file’ te drukken. Later kan u deze dan weer openen door op de knop ‘open existing parameters file’ te drukken.

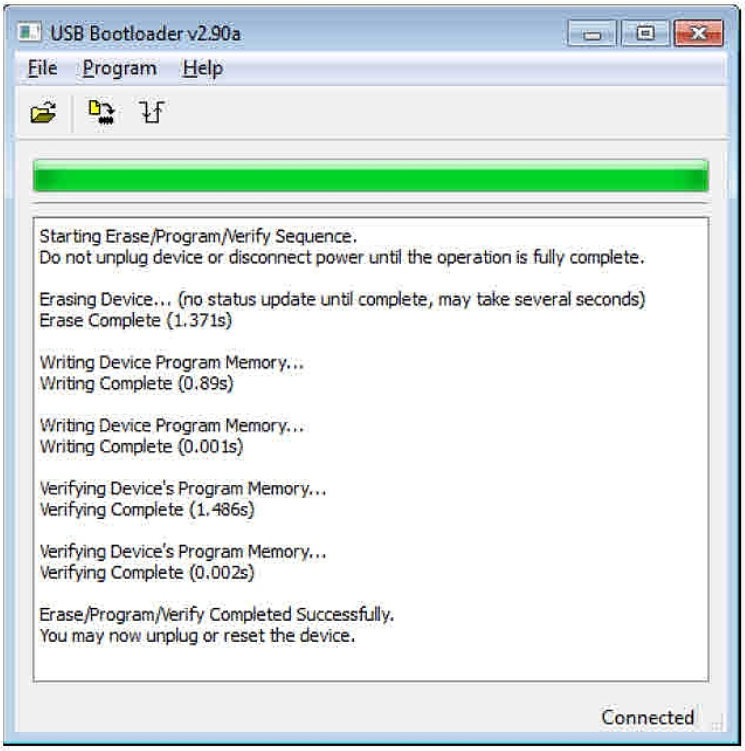
24.3.4 Controleren zender en ontvanger

Met dit programma kunt ook de waarden van uw zender uitlezen, dit zijn de waarden bij RX values in figuur 2. Wanneer alle sticks perfect in het midden staan dan moeten de waarden voor ch. 1, ch. 2, ch. 3 en ch. 4 127 bedragen, is dit niet het geval dan is de zender verkeerd getrimd. U moet er ook op letten dat u zender is ingesteld over het volledige bereik, dit betekend dat u de waarden 0 en 255 moet kunnen nemen. Indien dit niet het geval is dan zal u de multicopter nooit gearmd krijgen. Indien u een zender heeft met meer dan vier kanalen dan kunt de waarden van de overige kanalen niet uitlezen want de waarden voor ch. 5, ch. 6 en ch. 7 blijven altijd nul. Dit komt

doordat deze kanalen niet zijn aangesloten op de flightcontroller doordat de convertor maar vier kanalen kan omzetten.

24.4 HID Bootloader:

De HID bootloader is het programma waarmee u nieuwe firmware in de flightcontroller kan laden. Vooraleer dit programma te kunnen gebruiken moet u de flightcontroller voeden aan de hand van de 4S Lipo en USB connectie maken. Wanneer u dit heeft gedaan moet u de flightcontroller opstarten in bootload, dit houdt in dat u de knop op de flightcontroller inhoudt en vervolgens eventjes op de reset knop duwt. Wanneer u dit juist heeft gedaan zal de buzzer beginnen piepen en de verlichting beginnen knipperen. Vervolgens kan u het programma opstarten, dit programma kan u vinden onder C:\Program Files\VIVES\Scracthy Set Software\HID Bootloader, maar enkel en alleen wanneer u de software van de site www.multicopter.katho.be heeft gedownload. Wanneer het programma is geopend, klikt u op 'open file' en selecteert u de gewenste firmware. Let op: wanneer u de firmware heeft vernieuwd zijn alle regelparameters gewist het is dan ook nodig deze opnieuw in te stellen aan de hand van Scratchy set software.



Figuur 3: HID bootloader

25. Financiën

Onze GIP is van redelijke omvang en bezit dan ook een mooi prijskaartje, hier vindt u een overzicht van alle inkomsten en uitgaven.

25.1 Inkomsten

Omdat het school niet alles zou moeten bekostigen hebben we zelf gezorgd voor de nodige inbreng, deze bestaat uit enkele sponsors en de opbrengst van onze pannenkoekenverkoop. Een andere reden waarom we ons eigen spaarpotje wouden hebben is omdat dit vlotter werkt, zeker als er zaken moeten aangekocht worden via het internet.

25.1.1 Pannenkoekenverkoop

Begin het schooljaar hebben we een pannenkoekenverkoop georganiseerd waarvan de opbrengst integraal naar onze GIP ging, dit was goed voor zo'n 490,50 euro, wat overeenkomt met zo'n 21,5 %.

25.1.2 Meneer Verhaeghe

Meneer Verhaeghe heeft een reünie georganiseerd voor alle oud IW leerlingen. Dit was de eerste keer dat hij dit organiseerde maar het was direct een groot succes. Een deel van de opbrengst heeft hij aan onze GIP geschonken, dit was goed voor zo'n 220 euro wat overeenkomt met zo'n 7,78 %.

25.1.3 Landbouwwerken Dirk & Martine Soete-Feys

We hebben ook 100 euro, wat overeenkomt met zo'n 3,54 %, gekregen van het bedrijf van Andy's vader. Dit is een zelfstandig loonwerkbedrijf, hun voornaamste activiteiten zijn hakselen van maïs en gras, persen van voordroog, hooi en stro en het zaaien van verschillende gewassen.

25.1.4 Cafralu

Dit bedrijf is van Dieter's vader, zij hebben het frame, de proefopstellingen, het PID-frame en de bakjes voor de Lipo's bekostigd. Dieter zelf heeft dit alles gemaakt in het bedrijf van zijn vader maar we moesten niets betalen voor de materialen.

25.2 Overzicht eigen uitgaven

Hier vind u een overzicht van de uitgaven die betaald zijn met het door ons ingezamelde geld, in het totaal goed voor zo'n 34,30 % van de totale kostprijs.

Inkomsten						
Pannenkoekenverkoop		€ 490,50				
Sponsering Bram		€ 0,60				
Sponsering Meneer Verhaeghe		€ 180,00				
Sponsering vader Andy		€ 100,00				
Uitgaven						
Reeds gebeurd						
	Wat	Wanneer	WAAR	bedrag per stuk	Hoe-veelheid	Totaal bedrag
1.	Lipo voor sturing	8.12.2012	Hobbyking	€ 23,61	1	€ 23,61
2.	Lipo voor motoren	28.12.2012	Hobbyking	€ 39,61	8	€ 316,87
3.	kabel voor flight sim	8.01.2013	Ebay	€ 6,63	1	€ 6,63
4.	10 x connectoren voor Lipo's	10.01.2013	Ebay	€ 10,12	1	€ 10,12
5.	10 x verlengkabels aansturing ESC	15.01.2013	Ebay	€ 6,65	1	€ 6,65
6.	Draden, krimpkous, ogen	17.01.2013	Telehome Burg Torhout	€ 27,32	1	€ 27,32
7.	2x connectoren voor Lipo's	4.02.2013	Ebay	€ 5,19	1	€ 5,19
8.	Spanningregelaar LM2940 CT 12V + Male connector RM	10.02.2013	Conrad	€ 3,38	1	€ 3,38
9.	Opvulmiddel: Superlight	27.02.2013	Euroshop	€ 6,70	3	€ 20,10
10.	Polyfoam (5cm)	/	NV Deketelaere	€ 10,04	6	€ 60,22
11.	Ebook over DX6i	6.03.2013	/	€ 5,54	1	€ 5,54
12.	Kabel + krimpkous	8.03.2013	Telehome Burg Torhout	€ 16,00	1	€ 16,00
13.	Propellers (5x 17x8L, 5x17x8R)	22.04.2013	Hobbyking	€ 73,45	1	€ 73,45
14.	2 x Motor 4999	22.04.2013	Lindiger	€ 192,65	1	€ 192,65
					Totaal	€ 767,73
Gepland						
	Wat	bedrag per stuk	Hoeveelheid	Totaal bedrag		
1.	Inbundelen GIP-boek					
2.	Kleine attentie voor …					
Nog over		€ 3,37				

Tabel 28: overzicht eigen uitgaven

In dit overzicht is de kostprijs voor het inbundelen van ons GIP-boek en de kostprijs van onze kleine attenties nog niet in rekening gebracht. Het tekort is wordt door ons betaald.

25.3 Overzicht uitgaven school

Hier vind u een overzicht van de uitgaven die betaald zijn door onze school. In dit overzicht is ook de Lipo lader opgenomen ook als dit geen uitgave die enkel en geschikt is voor onze GIP, deze Lipo lader zal volgend jaar waarschijnlijk zijn vaste plaats krijgen in de 012.

Bestelling 1:						
	Wat	Wanneer	WAAR	bedrag per stuk	Hoe-veelheid	Totaal bedrag
1.	ESC 100 A 900-serie Roxxy	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 197,70	1	€ 197,70
2.	stuurkaart voor ESC 900-serie Roxxy	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 19,00	1	€ 19,00
3.	motor 4664 (1500W)	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 119,90	1	€ 119,90
4.	motor 4999 (1050 W)	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 99,90	1	€ 99,90
5.	motor 4998 (700 W)	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 74,90	1	€ 74,90
6.	motor 4996 (480 W)	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 69,90	1	€ 69,90
7.	propeller 8x8	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	1	€ 6,67
8.	propeller 13x4	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	1	€ 6,67
9.	propeller 13x6	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	1	€ 6,67
10.	propeller 13x6,5	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	1	€ 6,67
11.	propeller 15x8	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	1	€ 6,67
12.	propeller 17x8	22.10.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	1	€ 6,67
	Korting	1	€ -40,03			
					Totaal	€ 581,27
Bestelling 2:						
	Wat	Wanneer	WAAR	bedrag per stuk	Hoe-veelheid	Totaal bedrag
1.	motor 4999 (1050 W)	19.12.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 87,50	5	€ 437,50
2.	links draaiende propeller 17x8	7.01.2013	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	0	€ 0,00
3.	rechts draaiende propeller 17x8	7.01.2013	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	0	€ 0,00
4.	programmeerkaart voor ESC	7.01.2013	Verbrugghe modelbouw	€ 10,00	1	€ 10,00
5.	DX6i zender met ontvanger	6.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ 149,99	1	€ 149,99
6.	SKYMAXX PRO 85 85A - 2-6S - OPTO (RC-SKX-085-O)	6.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ 51,00	8	€ 408,00
7.	propeller 16x8	6.12.2012	Verbrugghe modelbouw	€ 6,67	1	€ 6,67
8.	teruggave ESC	6.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ -168,05	1	€ -168,05

9.	Teruggave motor 4664	7.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ -101,91	1	€ -101,91
10.	Teruggave stuurkaart	8.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ -16,15	1	€ -16,15
11.	Teruggave motor 4998	9.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ -63,66	1	€ -63,66
12.	Kabeltje esc	10.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ 2,00	1	€ 2,00
13.	Vervoerskosten	11.03.2013	Verbrugghe modelbouw	€ 20,00	1	€ 20,00
	Korting	1				
					Totaal	€ 640,00
Bestelling 3:						
	Wat	Wanneer	WAAR	bedrag per stuk	Hoe-veelheid	Totaal bedrag
1.	Sturing	9.02.2013	KATHO	€ 145,00	1	€ 145,00
Bestelling 4:						
	Wat	Wanneer	WAAR	bedrag per stuk	Hoe-veelheid	Totaal bedrag
1.	Lipo lader	4.02.2013	Ebay	€ 104,47	1	€ 104,47
Totaal uitgaven school		€ 1.470,74				

Tabel 29: overzicht uitgaven school

25.4 Totaal

In het totaal heeft onze GIP 2.282,85 euro gekost, dit bedrag houd alles in dus ook de Lipo lader. De materiaalkost van onze multicopter bedraagt zo'n 1.989,37 euro let wel dat wanneer we nog een multicopter maken we gebruik zouden kunnen maken van dezelfde zender en dat hier wel het frame zou moeten betaald worden.

26. Onze multicopter

In dit hoofdstuk vindt u een overzicht van onze multicopter. Onze multicopter is een octocopter maar heeft de sturing van een quadcopter, hoe dit in elkaar zit is te vinden op p. 92.

26.1 Flightcontroller

De flightcontroller is samen met de gyroscoop, de PWM to RS232 convertor en de software aangekocht aan Dhr. Ruben Buysschaert.

26.2 ESC's

De gebruikte ESC's zijn de SKYMAXX PRO 85 85A - 2-6S - OPTO (RC-SKX-085-O). Deze ESC's hebben elk een maximum van 100 A, wat zeker genoeg is als u weet dat de piekstromen van de motoren 72 A bedragen. Onze octocopter bezit acht van deze ESC's

26.3 Motoren

De gebruikte motoren zijn de ROXXY 4999. Dit type motor heeft 1050 W aan elektrisch vermogen en kan in samenwerking met een propeller 4,150 kg heffen. Dit betekent dat onze multicopter een vermogen heeft van zo'n 8,4 kW.

26.4 Propellers

Onze multicopter bevat 4 rechts- en 4 linksdraaiende propellers elk met een diameter van 17 inch, of 433,18 mm, en een pitch van 8 inch, of 203,2 mm. Met deze pitch is het mogelijk de multicopter te laten stijgen met een maximum snelheid van 22,73 m/s of zo'n 81,83 km/h.

26.5 Lipo's motoren

De gebruikte Lipo's zijn 6S 5000mAh 15C. Deze Lipo's kunnen continu een stroom van 75 A en piekstromen van 125 A leveren, samen is dit een continue stroom van 600 A en een piekstroom van 1000 A. Alle Lipo's samen hebben dus een capaciteit van 40 Ah, wat resulteert in:

Gebruikt vermogen in %	Gebruikt vermogen in W	Hefkracht in kg	Belasting in kg	Vliegduur in min. Ideaal	Vliegduur (90%)	Vliegduur (80%)
28,57	2400	15,875	0	22,2	19,98	17,76
50	4200	22,4	6,525	12,7	11,43	10,16
75	6300	29,2	13,325	8,5	7,65	6,8
100	8400	33,2	17,325	6,3	5,67	5,04

Tabel 30: vliegduur

Dit zijn berekende waardes, een meting gaf als resultaat dat de multicopter 19 kg kan heffen op vol vermogen. De vermelde 80% en 90% zijn omdat het best is de Lipo's nooit volledig te ontladen, want dit is zeer slecht voor de levensduur van de Lipo's. Deze berekeningen zijn wel zonder rekening te houden met het straalbuis effect van de ringen, dit omdat we geen metingen hebben gedaan op het effect van de ringen.

26.6 Lipo sturing

Dit is een 4S 3000 mAh 25C Lipo.

26.7 Ringen

Rond de propellers zijn ringen gemonteerd, deze ringen voorkomen wervelingen aan de toppen van de propellers waardoor de hefkracht toeneemt. De ringen zijn ook voor de veiligheid want hierdoor ziet u waar de propeller zich bevindt want een propellers die 8000 toeren/min draait ziet u niet meer.

26.8 Zender en ontvanger

De gebruikte zender is de DX6i en de gebruikte ontvanger de AR6200. De overige 2 kanalen kunnen later nog gebruikt worden voor het aansturen van een camera of andere zaken.

27. Handleiding

Hier vind u de nodige stappen om het vliegen met onze multicopter tot een succesvol einde te brengen. Weet wel dat onze multicopter levensgevaarlijk is wanneer u zich niet houdt aan de volgende regels:

1. Zorg ervoor dat u genoeg ervaring hebt betreffend het besturen van multicopters, oefenen op een flightsimulator is niet genoeg!
2. Zorg voor genoeg ruimte, liefst met weinig tot geen wind.
3. Kom nooit dicht in de buurt wanneer de multicopter gearmd is (zie besturen).
4. Vlieg nooit boven publiek!
5. Hanteer de Lipo's rustig, laat ze in geen geval vallen.
6. Vlieg nooit tot de spanningsbeveiliging van de ESC's in werking treedt, dit kunt u voorkomen door in hoofdstuk 26 de vliegduur van onze multicopter op te zoeken.

Vooraleer de multicopter aan te steken en te besturen is het nodig om volgende controles te doen. Sla geen enkele controle over, dit kan leiden tot levensgevaarlijke situaties!

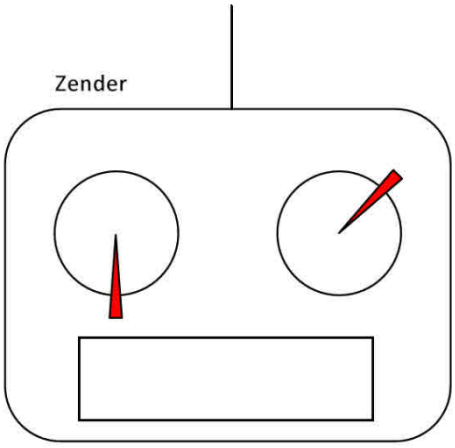
27.1 Controles

1. Controleer steeds of de Lipo's genoeg opgeladen zijn, zowel de Lipo's voor de motoren als de Lipo voor de sturing. Wanneer u één of meerdere van de Lipo's voor een andere toepassing heeft gebruikt is het nodig alle Lipo's volledig op te laden, dit is nodig omdat alle Lipo's evenveel ontladen moeten zijn.
2. Controleer steeds of de Lipo's in goede staat zijn, wanneer er twijfel bestaat gebruik ze dan niet en berg deze op in een metalen behuizing.
3. Controleer ook of de batterijen van de zender nog voldoende spanning hebben. Dit doet u door de zender aan te steken en vervolgens op het LCD scherm de batterijspanning af te lezen, wanneer de spanning rond de 4,3 V bedraagt, is het nodig de batterijen te vervangen.
4. Monteer steeds de beschermkap over de elektronica!
5. Controleer of alles nog goed vast zit want u wilt geen motoren, propellers of andere zaken verliezen.
6. Controleer of er geen enkel licht voorwerp of afval in de buurt te bespeuren is, want dit kan de propellers beschadigen.

27.2 Aansteken

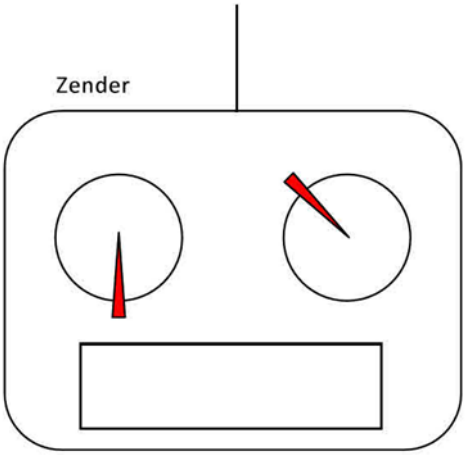
Wanneer alle controles grondig overlopen zijn kunt u overgaan tot het aansteken van de multicopter. Dit houdt volgende stappen in:

1. Steek de zender aan, wanneer u pieptonen hoort en de tekst: “MIX OFF” op het scherm ziet verschijnen, duidt dit erop dat één of meerdere van de schakelaars op de zender mis staat, zet deze dan ook in de juiste positie.
2. Bevestig de Lipo’s, zorg er steeds voor dat ze goed vastzitten.
3. Verbind de Lipo’s van de motoren, zorg er steeds voor dat de connectoren goed in elkaar zitten. Wanneer u dit heeft gedaan zullen de ESC’s beginnen piepen, de eerste reeks piepen moet zes pieptonen bevatten dit duidt op de aangesloten 6S Lipo’s. De tweede reeks piepen moet twee pieptonen bevatten, dit betekend dat de ESC’s paraat staan.
4. Verbind de Lipo voor de sturing. Wanneer u dit heeft gedaan zal de buzzer vier keer piepen, dit duidt op de aangesloten 4S Lipo.
5. Steek de LED verlichting aan, dit doet u door volgende stickinstelling 3 seconden aan te houden:



Figuur 1: aansteken LED verlichting

Uitschakelen kan door:

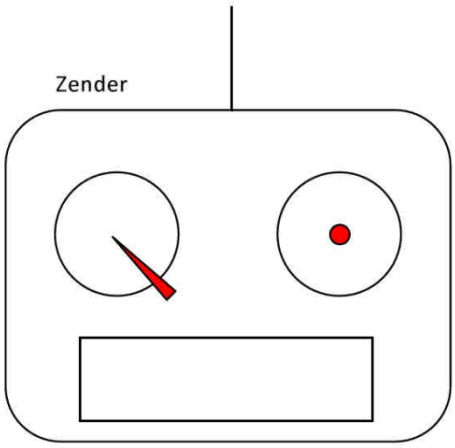


Figuur 2: uitschakelen LED verlichting

Schakel de LED verlichting nooit in / uit terwijl de multicopter vliegt.

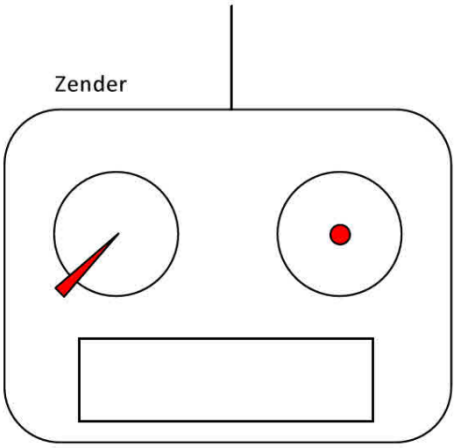
27.3 Besturen:

Vooraleer het mogelijk is de multicopter te besturen moet hij gearmd (gewapend) zijn. Dit gebeurd door volgende stickinstelling 3 seconden aan te houden:



Figuur 3: armen multicopter

Disarmen gebeurd door:



Figuur 4: disarmen multicopter

Het is belangrijk dat de multicopter stil staat wanneer u hem armt. Dit is nodig omdat de waarde die de gyroscoop dan uitstuurt dient als zogezegd nulpunt.
Zo nu is de multicopter vlieg klaar, u kunt gas geven.

27.4 Problemen

1. Wanneer u merkt dat de multicopter ongewenste zaken doet, stop dan meteen en laat een deskundige het probleem verhelpen.
2. Wanneer er één of meerdere van de motoren niet draait neem dan het gas terug en probeer het nogmaals.
3. Wanneer het vermogen van de motoren automatisch verminderd dan is dit de spanningsbeveiliging van de ESC's die in werking treedt. Als dit gebeurd moet u zo snel mogelijk de multicopter laten landen.
4. De LED verlichting begint te knipperen, dit duidt erop dat de Lipo van de sturing bijna leeg is, het is dan ook noodzakelijk zo snel mogelijk de multicopter te laten landen.

27.5 Laden

Het laden van Lipo's vereist een speciale lader. Ons type is een "SKY RC B6 Ultimate 200W x 2 Dual Charger".

Figuur 5: Lipo lader

1. Sluit deze klemmen aan op een externe bron die min 30A kan leveren bij een spanning van 12 V tot 18 V (bvb auto accu).

Figuur 6: aansluitconnectoren Lipo lader

2. Stel in welk type accu u wilt laden "Lipo (3,7 V)" 6S voor de Lipo's van de motoren en 4S voor de Lipo van de sturing.

3. Stel de laadstroom in waarmee je de Lipo wil laden, hoe hoger hoe sneller de Lipo zal geladen zijn, maar te hoge laadstromen verkorten de levensduur van de Lipo's, laadt daarom bij voorkeur met een stroom die gelijk is aan de capaciteit van de Lipo's. Dit betekent dat de Lipo's van de motoren moeten geladen worden met een stroom van 5 A, terwijl de Lipo voor de sturing geladen moet worden met een stroom van 3 A.
4. Verbind de balansklem van de Lipo met de voorziene aansluiting op de lader, voor de 4S Lipo is een verloopstukje vereist. Sluit vervolgens het verloopstuk aan op de output, als laatst sluit u de Lipo aan op het verloopstuk.
5. Wanneer dit gebeurd is druk dan 3 seconden op de Start knop.
6. De lader controleert nu ook nog eens of het aantal cellen klopt, als beide getallen hetzelfde zijn druk je op start, anders op Batt type.
7. Nu is de Lipo aan het laden, als het laden voltooid is hoor je een geluidssignaal.

Figuur 7: aansluitingen Lipo lader

28. Bibliografie

28.1 Geschiedenis

Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci) (2012-11-05)

Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/Helikopter) (2012-11-05)

Wikipedia (http://les.canisius.nl/web/vakken/anw/anw%20website/biografie/davinci.htm) (2012-11-05)

Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/Paul_Cornu) (2012-05-11)

Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/Igor_Sikorsky) (2012-05-11)

28.2 Propeller

Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/Propeller) (2012-12-29)

Dhr.KuN, De Spin, Natuurkunde (http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=466223) (2013-01-19)

Rien Wesselink en Krijn Lenferink, Helicopter, algemene natuur wetenschappen (http://les.canisius.nl/web/vakken/anw/anw%20website/uitvinding/heli.htm) (2013-01-09)

Peter J.J van Hout, de heli in zijn elementen (http://members.chello.nl/p-vanhout/heli_in_zijn_element.htm) (2013-02-11)

Bevestiging prop op een brushless motor, Modelbouwforum (http://www.modelbouwforum.nl/forums/electro-vliegtuigen/21420-bevestiging-prop-op-een-brushless-motor.html) (2013-02-13)

Ongelofelijk noobpropsaver vraag, Modelbouwforum (http://www.modelbouwforum.nl/forums/multicopters/171676-ongelooflijke-noob-propsaver-vraag.html) (2013-02-14)

Thomas, Propellar saver, WebX (http://www.webx.dk/rc/prop-saver.htm) (2013-02-14)

28.3 Lipo

(http://nl.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion-polymeer-accu) (2013-04-17)

(http://members.chello.nl/p-vanhout/lipo_accu.htm) (2013-04-17)

(http://wiki.robotmc.org/index.php?title=LiPo) (2013-04-17)

28.4 Zender en ontvanger:

(http://www.spektrumrc.com/ProdInfo/Files/SPMAR6200.pdf) (2013-05-12)

pagina 2 tot en met 22, (http://www.spektrumrc.com/ProdInfo/Files/SPM6600-Manual_DX6i.pdf) (2013-05-12)

artikels: multilink, DSS, DSMX, DSMR, DSM2, dualink, Bind-n-fly (http://www.spektrumrc.com/Technology/AirWare.aspx) (2013-05-12)

artikel: 2.4GHz Radio Control Explained (http://www.rcmodelreviews.com/spreadspectrum01.shtml) (2013-05-12)
artikel: 2.4GHz Radio Control Explained

28.5 Convertor

RS232 specificaties en standaard, Lammert Bies, (http://www.lammertbies.nl/comm/info/nl_RS-232_specs.html) (2013-05-10)

RS-232, Wikipedia, (http://nl.wikipedia.org/wiki/RS-232) (2013-05-10)

28.6 Flightcontroller

Dhr. Johan Baeten, beknopte inleiding tot regeltechniek (http://sts.bwk.tue.nl/7y500/readers/.%5CBasiskennisregeltechniek.pdf) (2013/05/12)

28.7 De gyroscoop

Fietswiel vergeet zwaartekracht, Dumpert (http://www.dumpert.nl/mediabase/478071/bcc5ec2a/fietswiel_vergeet_zwaartekracht.html) (2013-04-05)

Gyroscoop (filmpje), Modelbouwformum (http://www.modelbouwforum.nl/forums/heli-pilots-mess/81381-gyroscoop-filmpje.html) (2013-04-05)

Gyroscoop systemen, InfoNu (http://wetenschap.infonu.nl/luchtvaart/75057-gyroscoop-systemen.html) (2013-04-05)

Gyroscope, SensorWiki (http://www.sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope) (2013-04-05)

Impulsmoment, Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/Impulsmoment) (05/04/2013)

Corioliseffect, Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/Corioliseffect) (05/04/2013)

Dhr. Willems Benoît, Optische Gyroscopen (http://hannah2.be/optische_communicatie/Studieopdrachten/STUDIEOPDRACHTEN_Archief/2006_2007/optische_gyroscopen.pdf)(2013-04-14)

interrupts, elektor, (http://www.elektor.nl/forum/forum/algemene-forums/microcontrollers/interrupts.255362.lynkx) (07/05/2013)

Wat is MEMS technologie?, InfoNu (http://wetenschap.infonu.nl/techniek/46695-wat-is-mems-technologie.html) (09/05/2013)

28.8 De ESC's

Stan1, Simpele ESC (Electronic Speed Controlle) voor Brushless Motoren, circuitsonline (http://www.circuitsonline.net/forum/view/98871) (2012-11-03)

Servo aansturen, modelbouwforum (http://www.modelbouwforum.nl/forums/model-elektronica/19199-servo-aansturing.html) (2012-11-05)

Ali Kaichouhi, servo motoren (http://duteela.et.tudelft.nl/~elca/XilinxTutor/documents/servohack.pdf) (2012-11-05)

R/C servo's, R/C madbul site (http://users.skynet.be/smasher/rcinfo/rcstuff/elek/servo/rcelekservo.htm) (2012-11-18)

Frequentieomvormers (http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/9548BE4D-325E-4E4C-A728-6C5FCDC8AAEB/0/WetenswaardighedenFrequentieomvormers.pdf) (2012-12-23)

Kort uitgelegd : BEC, Lineair en geschakeld... , Modelbouwforum (http://www.modelbouwforum.nl/forums/electro-vliegtuigen/63000-kort-uitgelegd-bec-lineair-en-geschakeld.html) (2013-01-26)

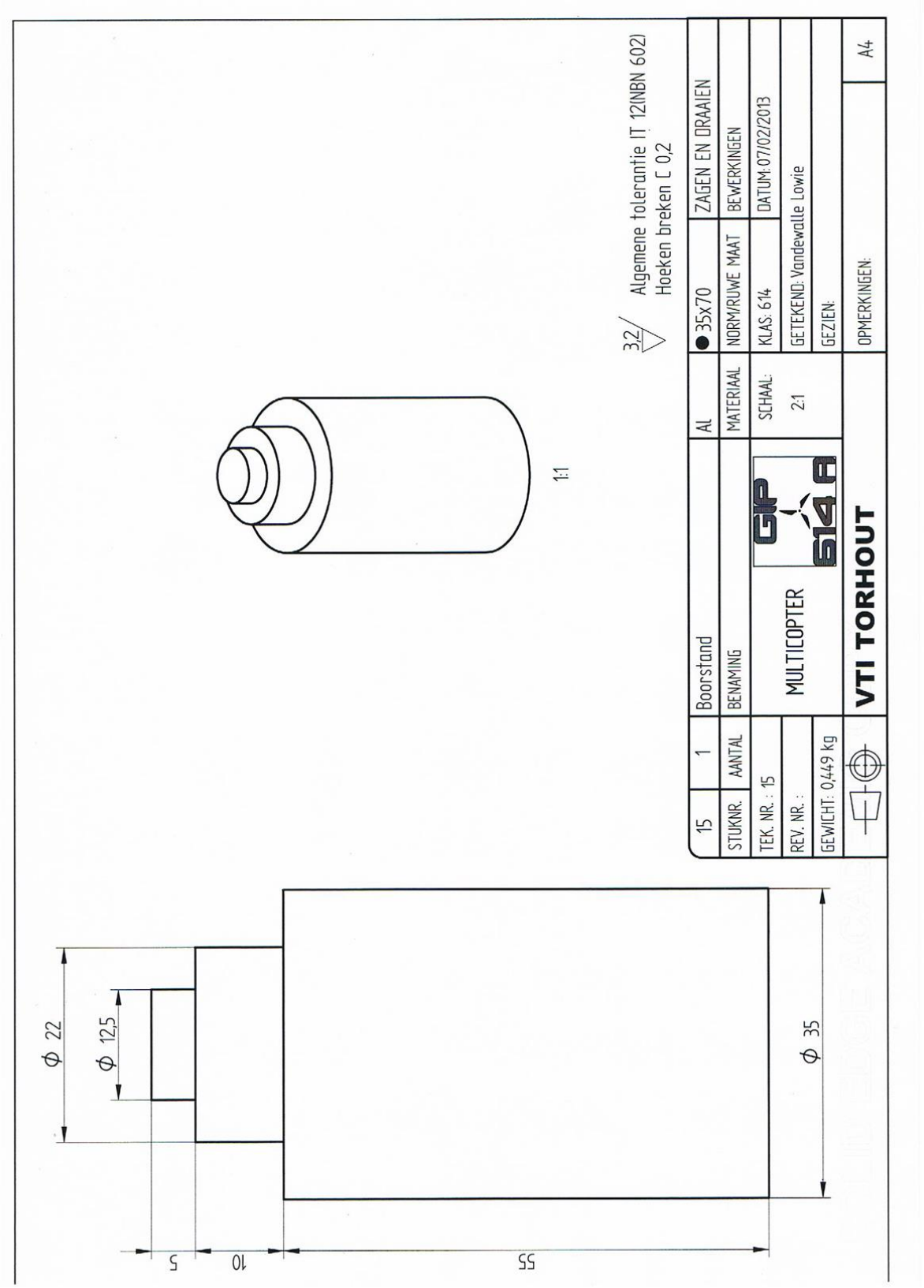
Dhr. Jens Waschk, Snelheidsregelaar (ESC), RC CarsExplained (http://www.erceracing.nl/uitleg-over-rc-auto-s-onderdelen/snelheidsregelaar-esc) (2013-01-26)

28.9 De relaiskaart

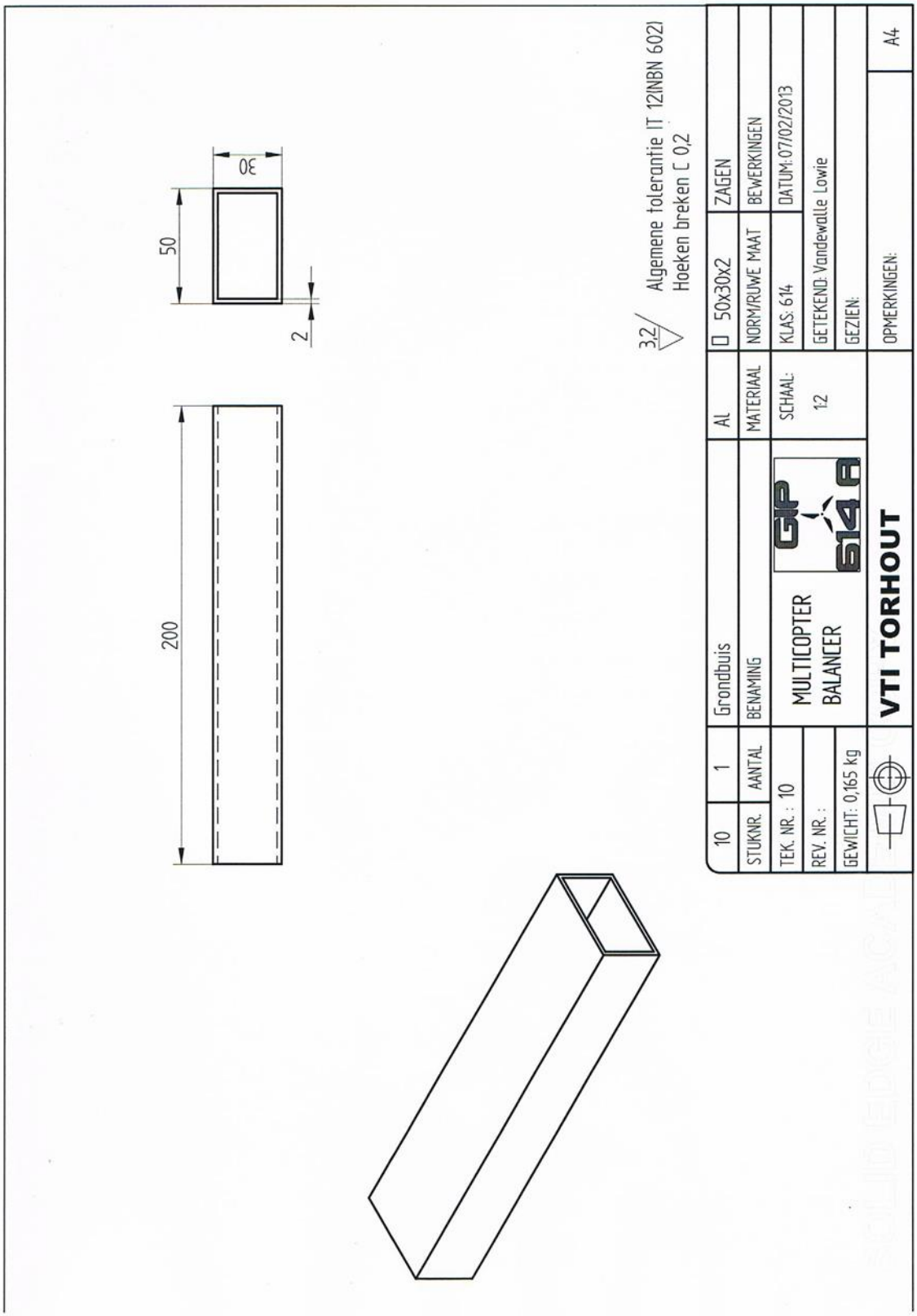
78xx-spanningsregelaar, Wikipedia (http://nl.wikipedia.org/wiki/78xx-spanningsregelaar) (2013-03-10)

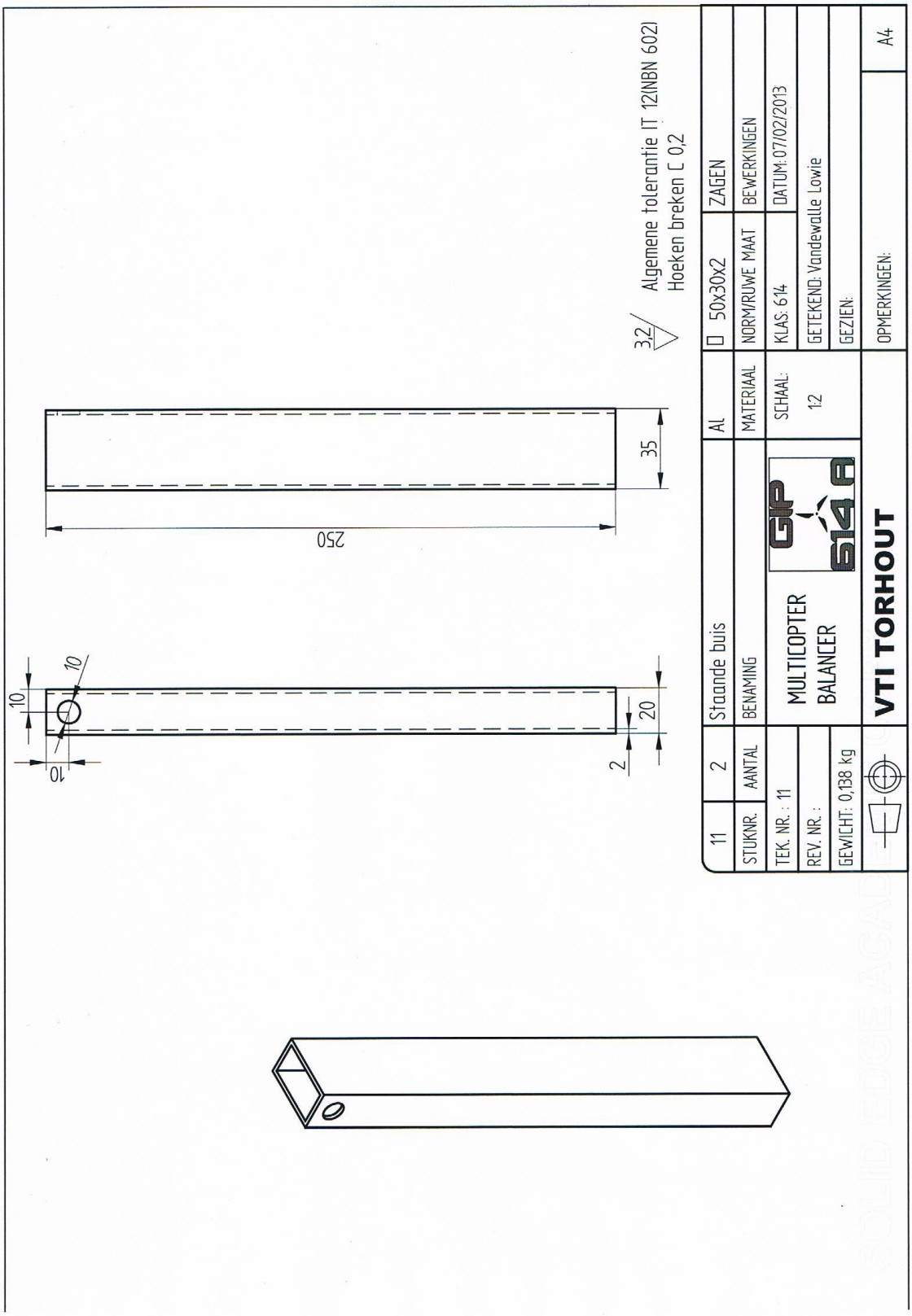
29. Bijlagen

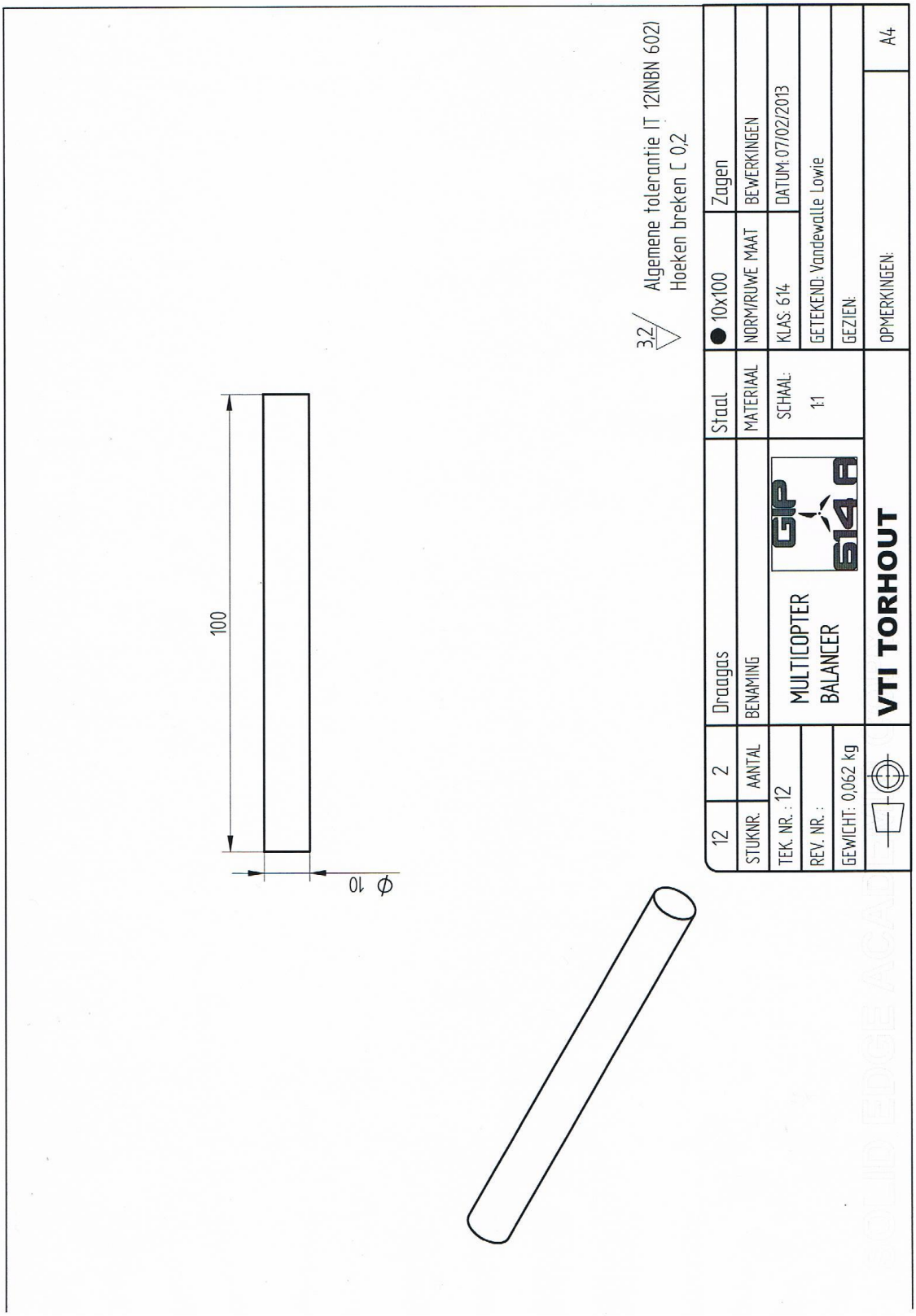
29.1 Bijlage 1: tekening uitboren propeller

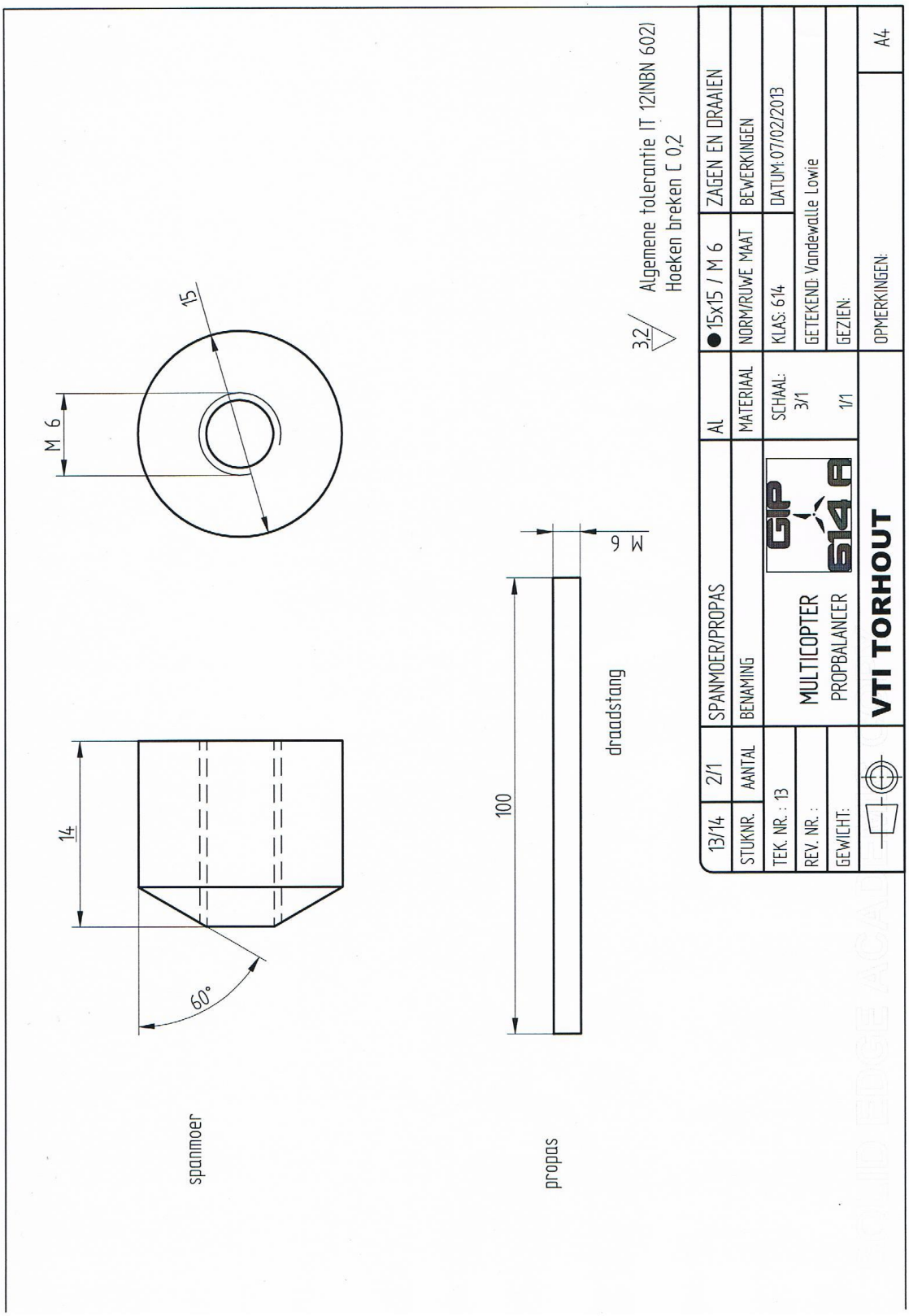


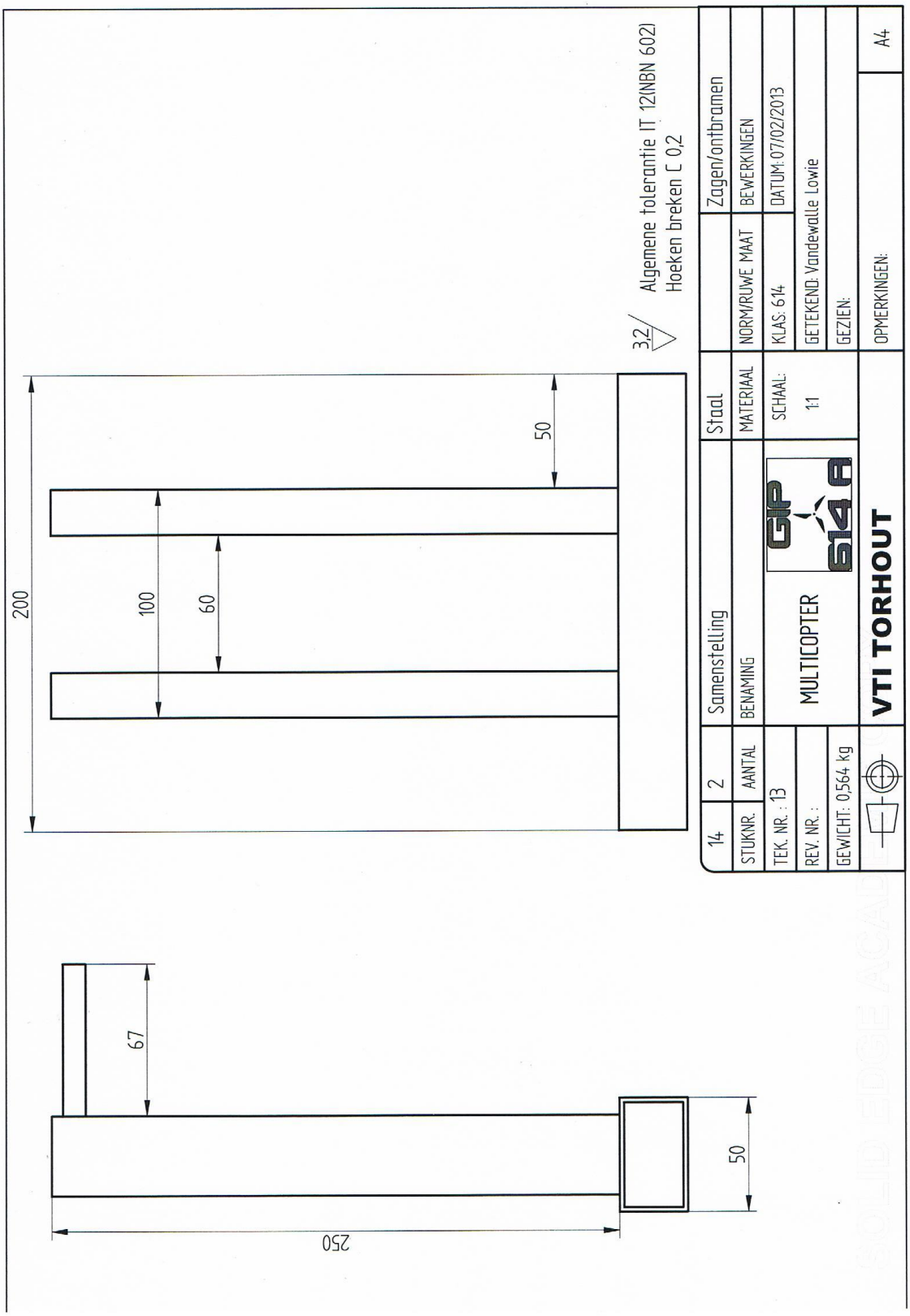
29.2 Bijlage 2: prop balancer




Algemene tolerantie IT 12(NBN 602)
Hoeken breken C 0,2
3,2
250
35
10
10
10
20
2
11
2
Staande buis
AL
□ 50x30x2
ZAGEN
STUKNR.
AANTAL
BENAMING
MATERIAAL
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
TEK. NR.: 11
REV. NR.:
GEWICHT: 0,138 kg
MULTICOPTER
BALANCER
SCHAAL:
1:2
KLAS: 614
DATUM: 07/02/2013
GETEKEND: Vandewalle Lowie
GEZIEN:
OPMERKINGEN:
VTI TORHOUT
A4

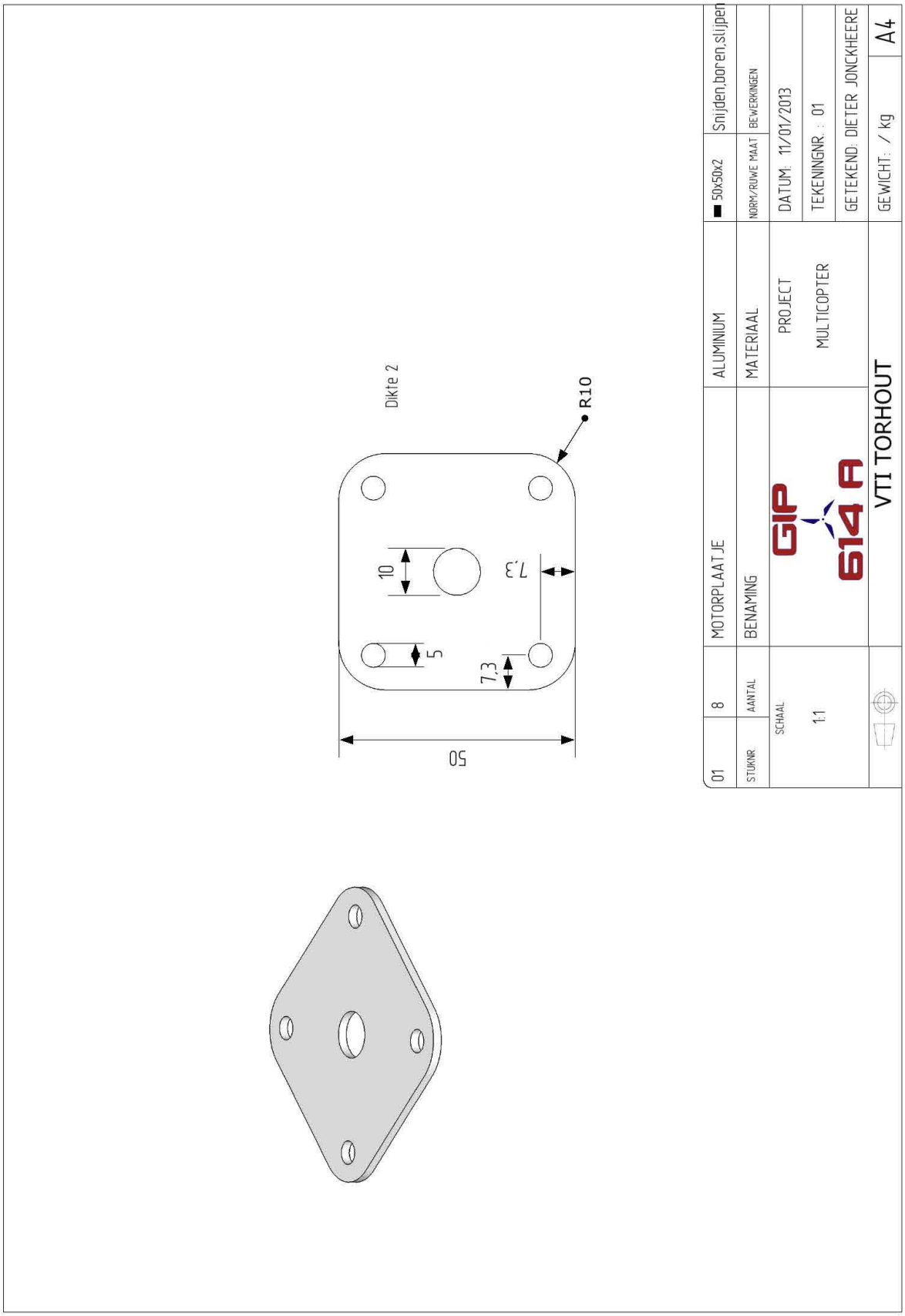

100
Ø 10
3,2
Algemene tolerantie IT 12(NBN 602)
Hoeken breken C 0,2
12
Draagas
Staal
10x100
Zagen
STUKNR.
AANTAL
BENAMING
MATERIAAL
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
TEK. NR.: 12
MULTICOPTER
BALANCER
SCHAAL:
1:1
KLAS: 614
DATUM: 07/02/2013
GETEKEND: Vandewalle Lowie
REV. NR.:
GEWICHT: 0,062 kg
GEZIEN:
VTI TORHOUT
OPMERKINGEN:
A4

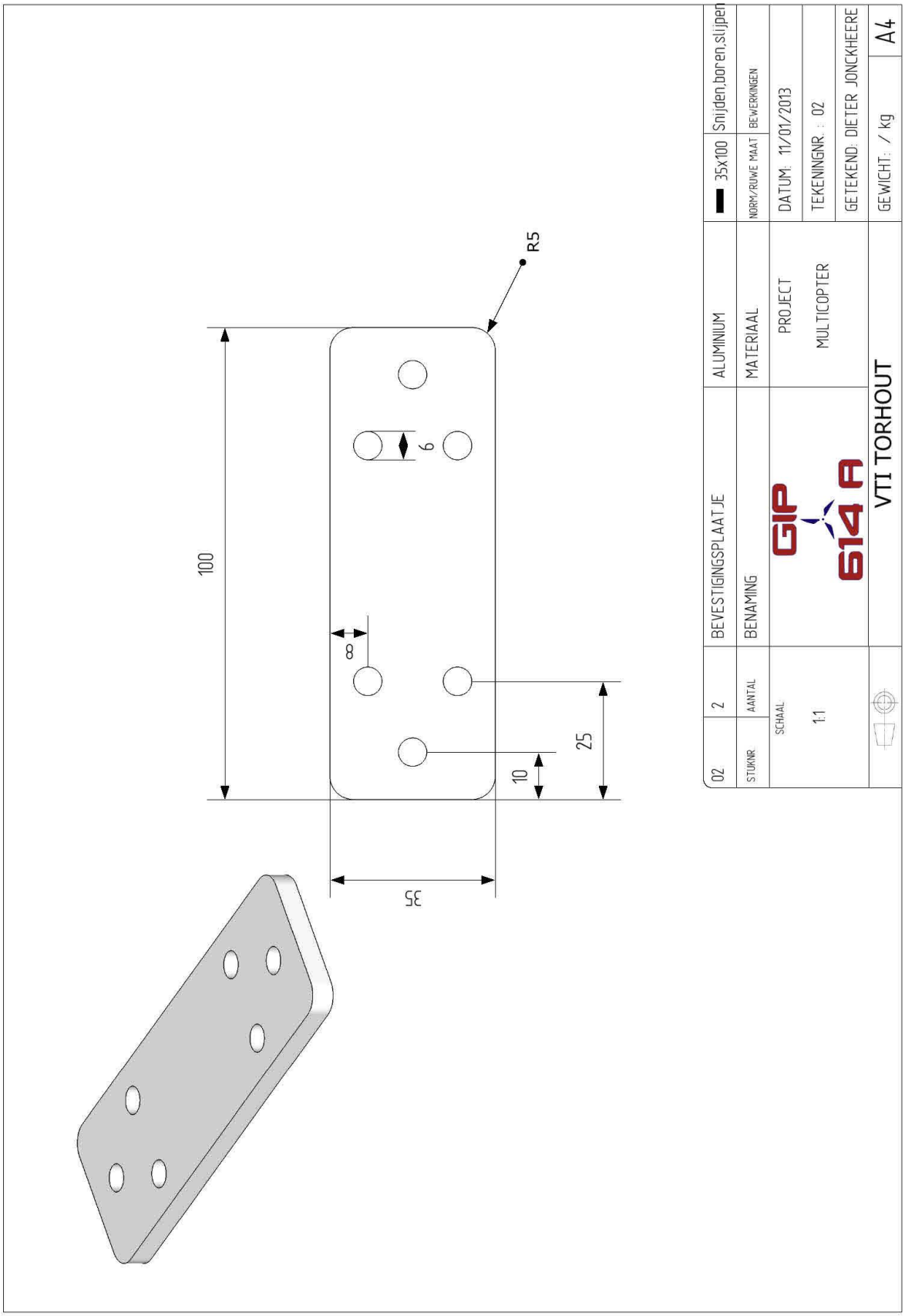

15
M 6
14
60°
spanmoer
100
6
draadstang
propas
3,2
Algemene tolerantie IT 12(NBN 602)
Hoeken breken C 0,2
13/14
2/1
SPANMOER/PROPAS
AL
15x15 / M 6
ZAGEN EN DRAAIEN
STUKNR.
AANTAL
BENAMING
MATERIAAL
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
TEK. NR. : 13
MULTICOPTER
PROPBALANCER
SCHAAL: 3/1
KLAS: 614
DATUM: 07/02/2013
REV. NR. :
GETEKEND: Vandewalle Lowie
GEWICHT:
1/1
GEZIEN:
VTI TORHOUT
OPMERKINGEN:
A4

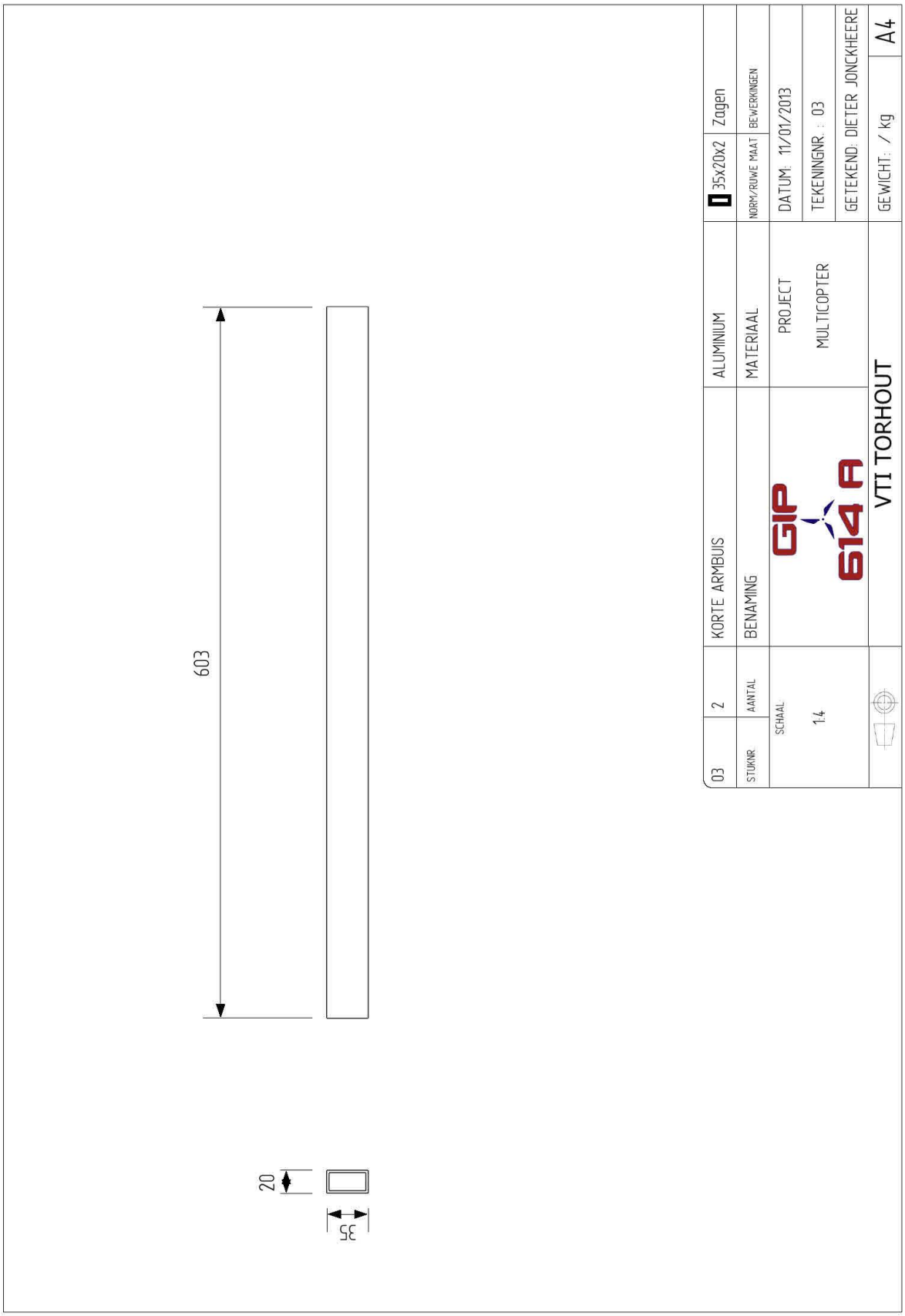

200
100
60
50
67
250
50
3,2
Algemene tolerantie IT 12(NBN 602)
Hoeken breken C 0,2
Zagen/ontbramen
BEWERKINGEN
DATUM: 07/02/2013
GETEKEND: Vandewalle Lowie
GEZIEN:
OPMERKINGEN:
A4
Staal
MATERIAAL
NORM/RUWE MAAT
KLAS: 614
SCHAAL: 1:1
Samenstelling
BENAMING
MULTICOPTER
GIP
614 A
VTI TORHOUT
14
STUKNR.
2
AANTAL
TEK. NR. : 13
REV. NR. :
GEWICHT: 0,564 kg

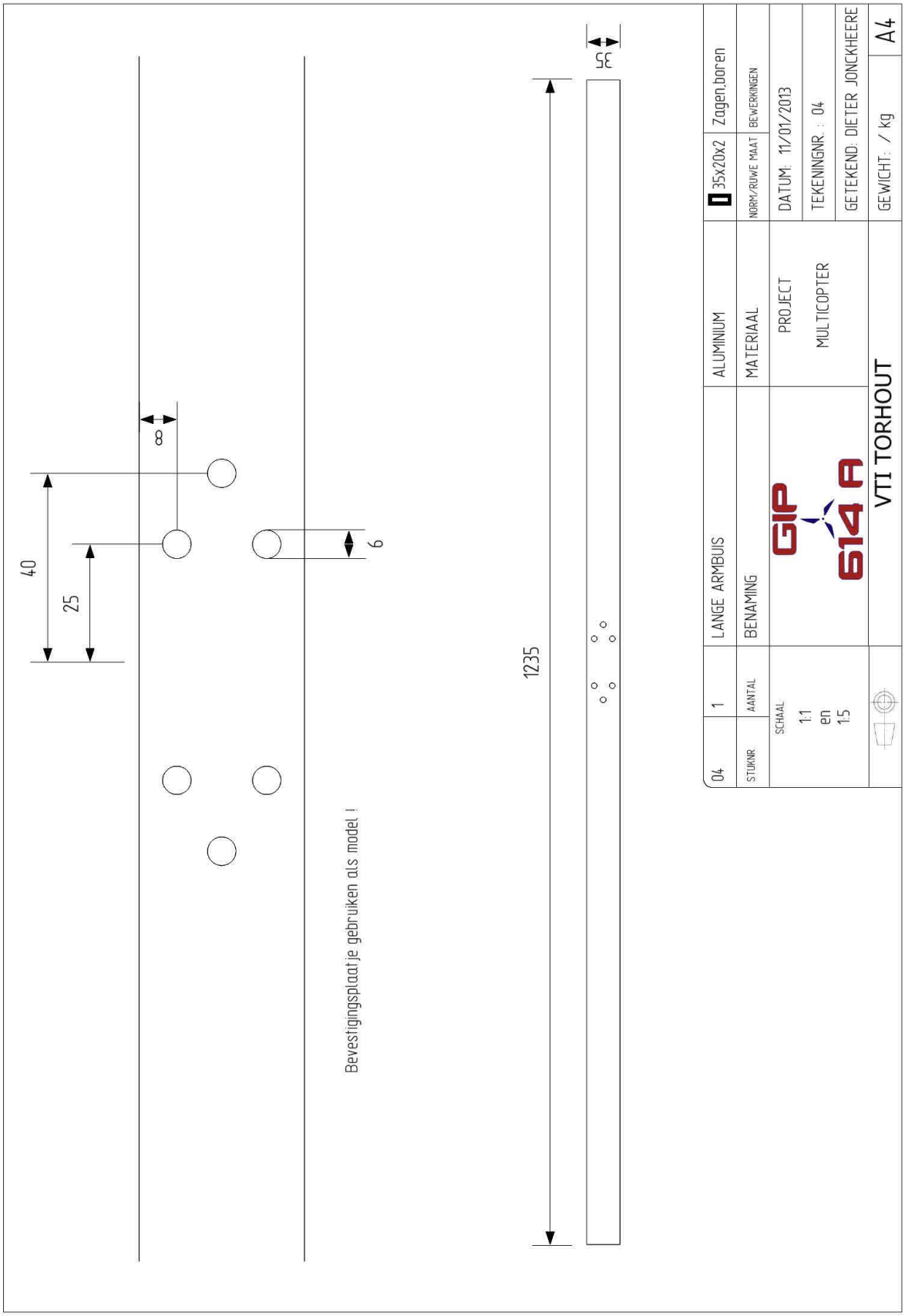
29.3 Bijlage 3: frame

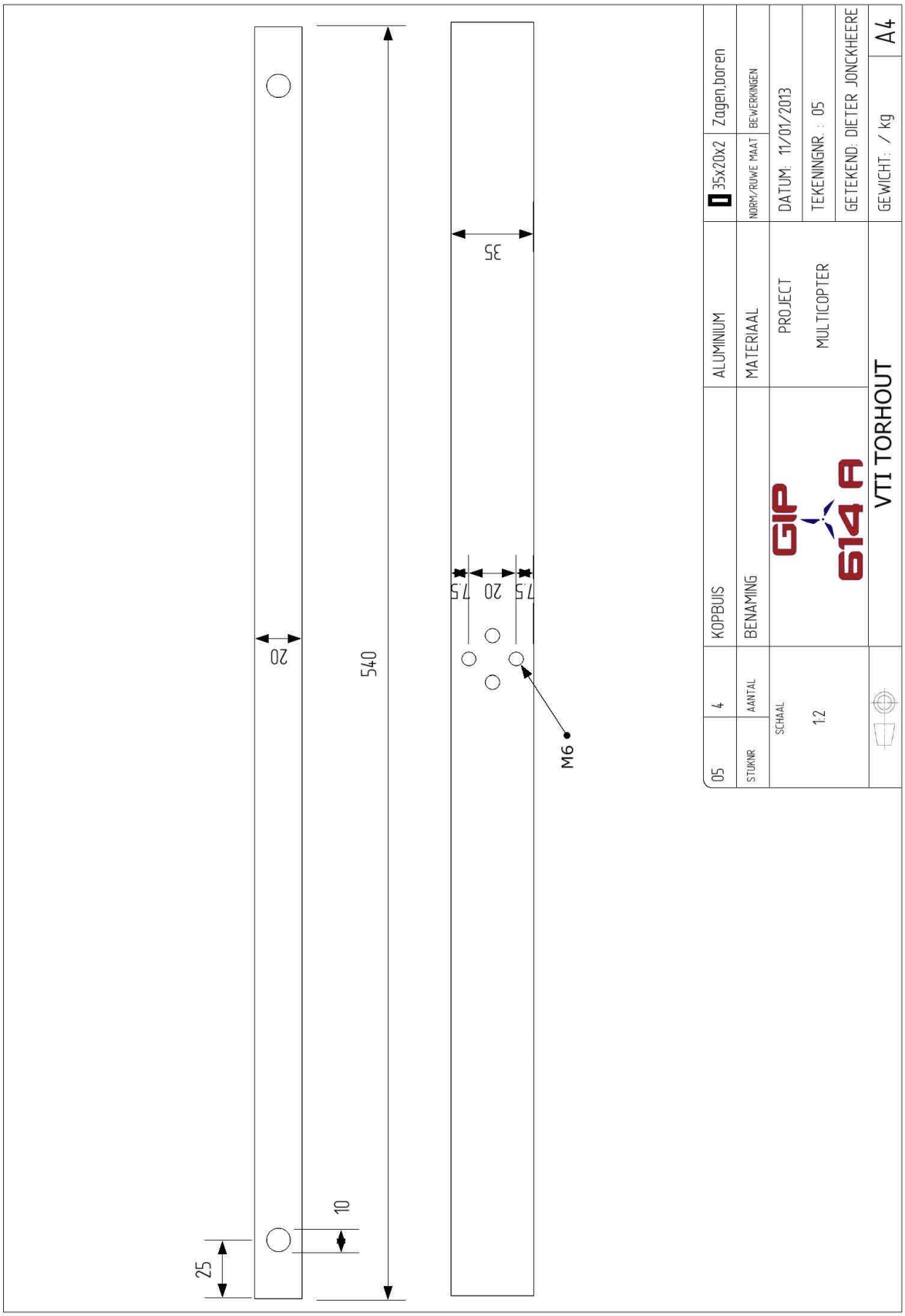
STUKKENLIJST						
Project: Elektrische multicopter						
stuknr.	**2D nr.**	**aantal**	**benaming**	**materiaal**	**lengte/maat**	**opmerkingen**
01	01	8	Motorplaatje	Al		SketchUp PRO
02	02	2	Bevestigingsplaatje	Al		SketchUp PRO
03	03	2	Korte armbuis	Al		SketchUp PRO
04	04	1	Lange armbuis	Al		SketchUp PRO
05	05	4	Kop buis	Al		SketchUp PRO
06	06	4	Poot	Al		SketchUp PRO
07	07	1	Samenstelling	Al		SketchUp PRO
08	08	1	Snijdraad ringen	S 235 JR		SketchUp PRO
09	09	8	Ringen	Al		SketchUp PRO
10	10	1	Grondbuis	Al		Solid Edge ST
11	11	2	Staande buis	Al		Solid Edge ST
12	12	2	Draagas	Al		Solid Edge ST
13	13	2	Spanmoer/propas	Al		Solid Edge ST
14	14		Samenstelling	Al		Solid Edge ST
15	15	1	Boorstand	Al		Solid Edge ST
16	16	2	Bakje geplooid	Al		Solid Edge ST
16	17	2	Bakje ontplooid	Al		Solid Edge ST
17	18	2	Deksel geplooid	Al		Solid Edge ST
17	19	2	Deksel ontplooid	Al		Solid Edge ST

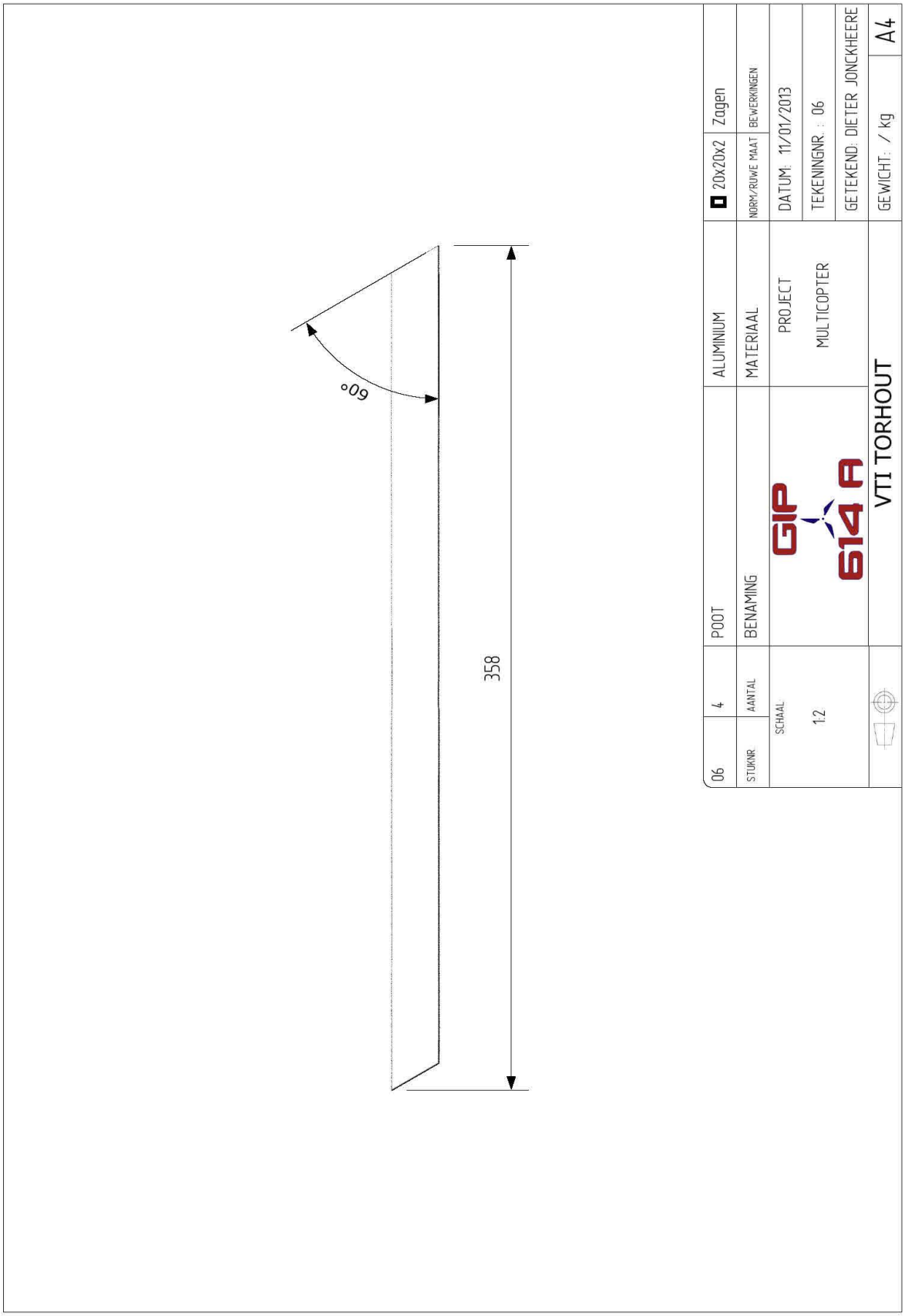

Dikte 2
R10
50
10
5
7.3
7.3
01
STUKNR
8
AANTAL
SCHAAL
1:1
MOTORPLAATJE
BENAMING
ALUMINIUM
MATERIAAL
PROJECT
MULTICOPTER
50x50x2
NORM/RUWE MAAT
Snijden,boren,slijpen
BEWERKINGEN
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 01
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
GEWICHT: / kg
A4
GIP
614 A
VTI TORHOUT

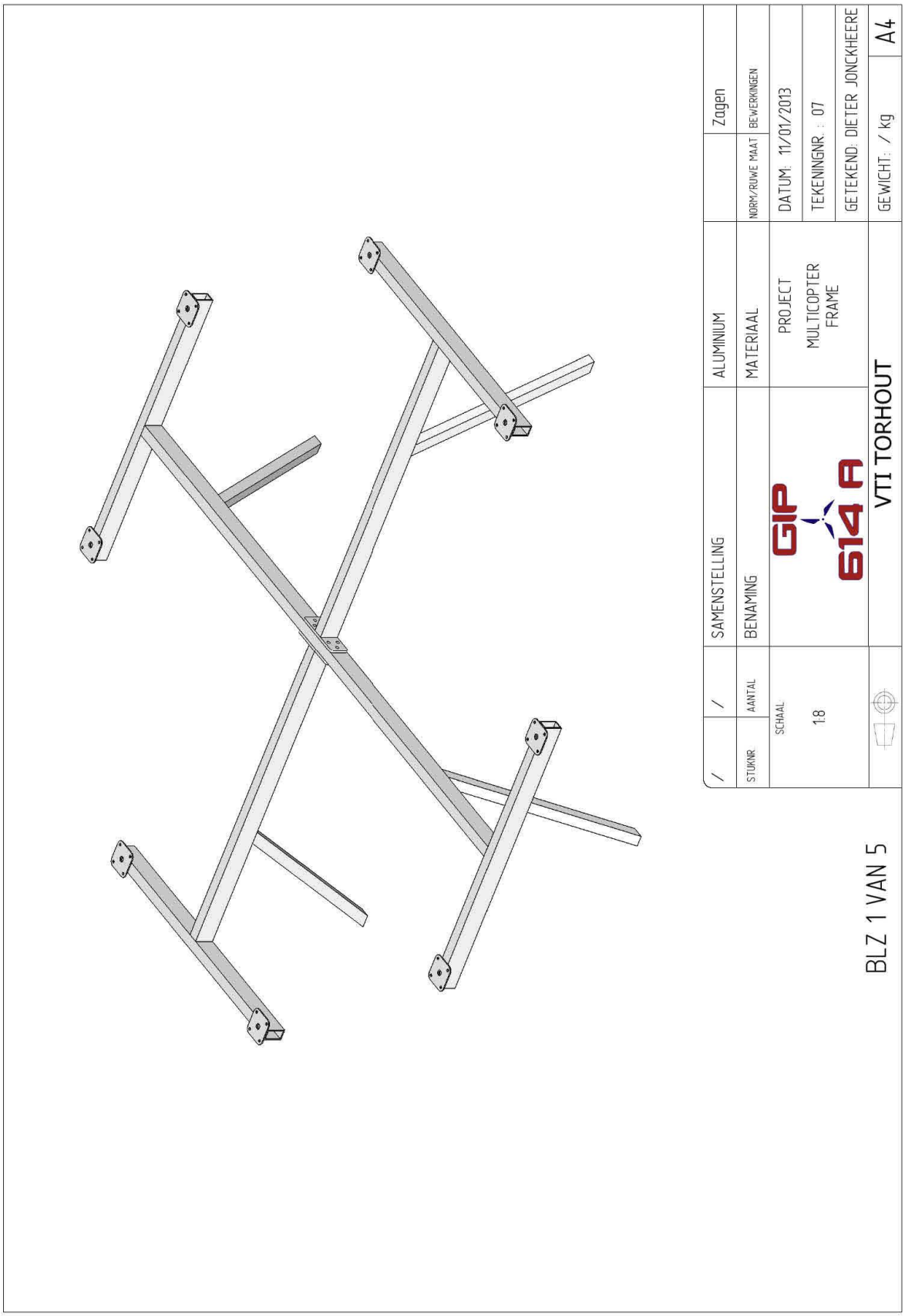

R5
100
6
8
25
10
35
02
2
BEVESTIGINGSPLAATJE
ALUMINIUM
35x100
Snijden,boren,slijpen
STUKNR.
AANTAL
BENAMING
MATERIAAL
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
SCHAAL
1:1
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 02
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
VTI TORHOUT
GEWICHT: / kg
A4

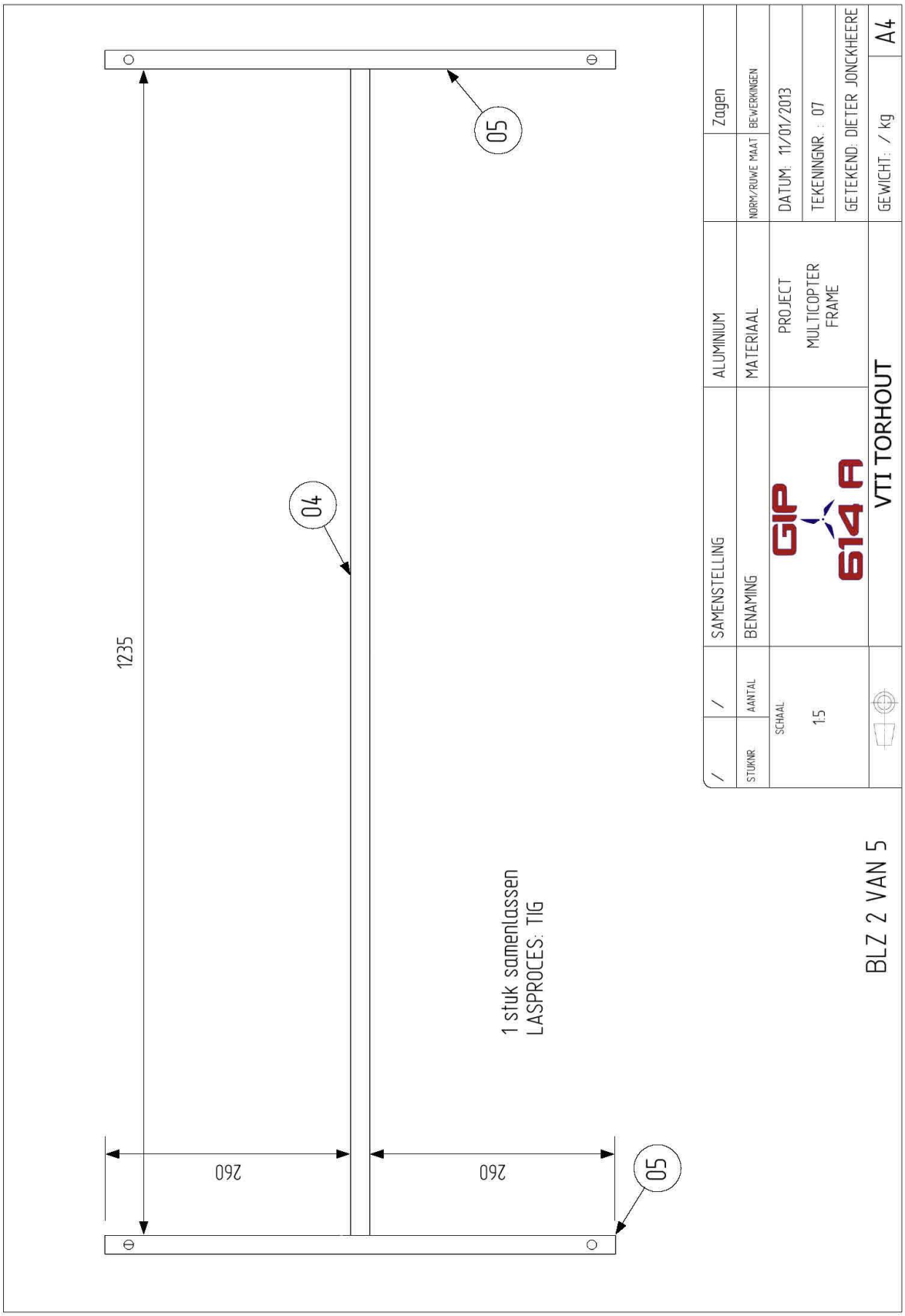

603
20
35
03
STUKNR
2
AANTAL
KORTE ARMBUIS
BENAMING
ALUMINIUM
MATERIAAL
35x20x2
NORM/RUWE MAAT
Zagen
BEWERKINGEN
SCHAAL
1:4
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 03
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
VTI TORHOUT
GEWICHT: / kg
A4

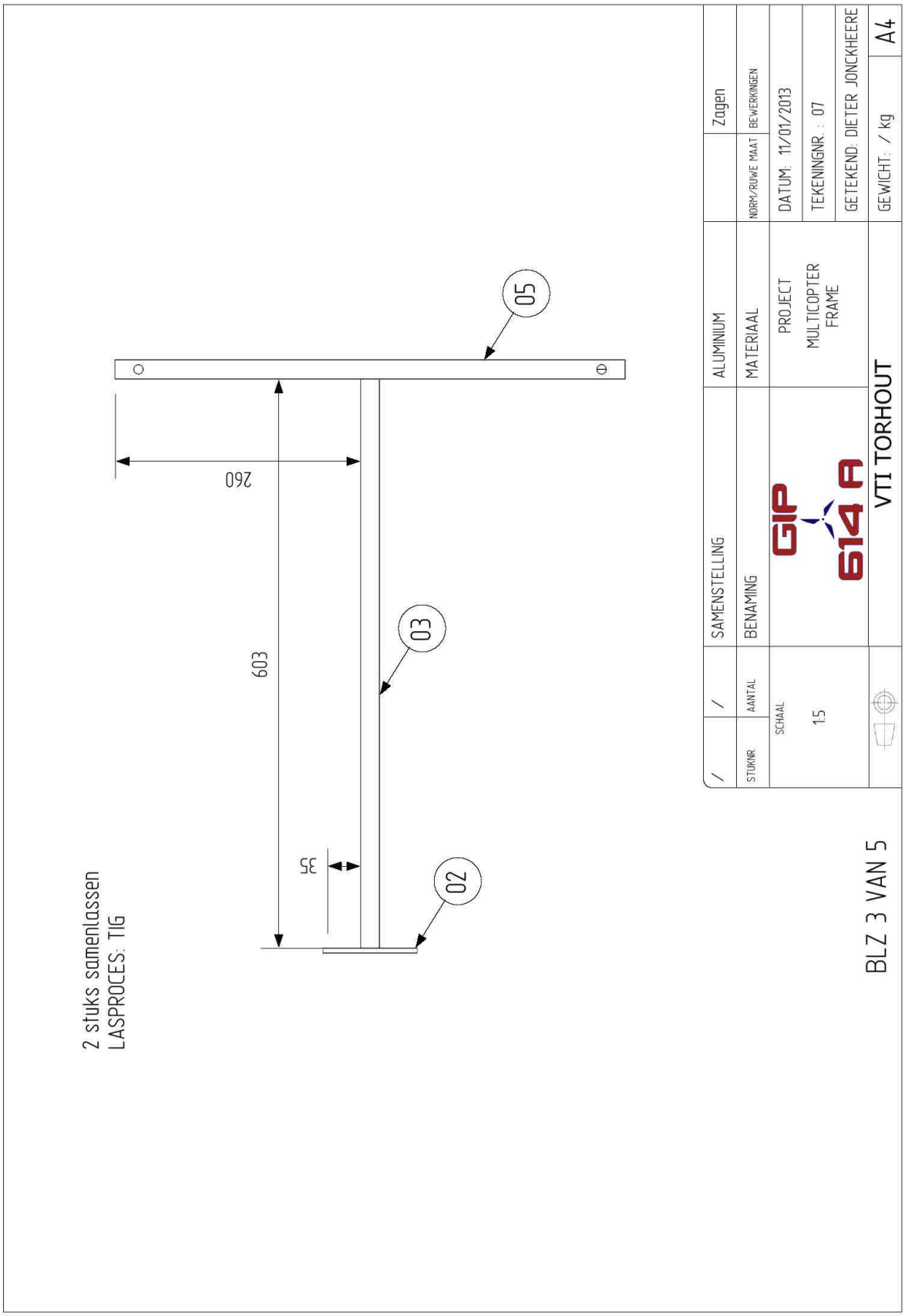

40
25
8
6
Bevestigingsplaatje gebruiken als model !
1235
35
04
STUKNR.
1
AANTAL
SCHAAL
1:1
en
1:5
LANGE ARMBUIS
BENAMING
ALUMINIUM
MATERIAAL
35x20x2
NORM/RUWE MAAT
Zagen,boren
BEWERKINGEN
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 04
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
VTI TORHOUT
GEWICHT: / kg
A4


25
10
20
540
35
7.5
20
7.5
M6
05
STUKNR
4
AANTAL
KOPBUIS
BENAMING
ALUMINIUM
MATERIAAL
35x20x2
NORM/RUWE MAAT
Zagen,boren
BEWERKINGEN
SCHAAL
12
PROJECT
MULTICOPTER
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 05
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
GEWICHT: / kg
A4
GIP
614 A
VTI TORHOUT


60°
358
06
STUKNR.
4
AANTAL
POOT
BENAMING
SCHAAL
1:2
ALUMINIUM
MATERIAAL
PROJECT
MULTICOPTER
GIP
614 A
VTI TORHOUT
20x20x2
NORM/RUWE MAAT
Zagen
BEWERKINGEN
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 06
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
GEWICHT: / kg
A4


/
/
SAMENSTELLING
ALUMINIUM
Zagen
STUKNR
AANTAL
BENAMING
MATERIAAL
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
SCHAAL
18
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
FRAME
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 07
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
GEWICHT: / kg
A4
VTI TORHOUT
BLZ 1 VAN 5


1235
260
260
04
05
05
1 stuk samenlassen
LASPROCES: TIG
/
STUKNR
/
AANTAL
SAMENSTELLING
BENAMING
ALUMINIUM
MATERIAAL
Zagen
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
SCHAAL
1:5
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
FRAME
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 07
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
GEWICHT: / kg
A4
VTI TORHOUT
BLZ 2 VAN 5


2 stuks samenlassen
LASPROCES: TIG
260
603
35
05
03
02
/
/
STUKNR
AANTAL
SAMENSTELLING
BENAMING
ALUMINIUM
MATERIAAL
Zagen
NORM/RUWE MAAT
BEWERKINGEN
SCHAAL
1:5
GIP
614 A
PROJECT
MULTICOPTER
FRAME
DATUM: 11/01/2013
TEKENINGNR. : 07
GETEKEND: DIETER JONCKHEERE
GEWICHT: / kg
A4
VTI TORHOUT
BLZ 3 VAN 5

WERKVOLGORDE:

1. Zagen van alle stukken
2. Boren en ontbramen van alle stukken
3. Samenlassen van de verschillende onderdelen
4. Doorboren en tappen van gaten motorplaatjes
5. Monteren van motorplaatjes met cilinderkopschroef met zaaggleuf M5x12, borgmiddel gebruiken !
6. Samenstellen van beide stukken met zeskantbouten M6x40, borgmoeren gebruiken!

/	/	SAMENSTELLING	ALUMINIUM		Zagen
STUKNR.	AANTAL	BENAMING	MATERIAAL	NORM/RUWE MAAT	BEWERKINGEN
SCHAAL		GIP 614 A	PROJECT MULTICOPTER FRAME	DATUM: 11/01/2013	
				TEKENINGNR. : 07	
				GETEKEND: DIETER JONCKHEERE	
		VTI TORHOUT		GEWICHT: / kg	A4

BLZ 5 VAN 5

29.4 Bijlage 4: Microcontroller

MICROCHIP

PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin High-Performance, Enhanced Flash USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant SIE
- Low-speed (1.5 Mb/s) and full-speed (12 Mb/s)
- Supports control, interrupt, isochronous and bulk transfers
- Supports up to 32 endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte dual access RAM for USB
- On-board USB transceiver with on-chip voltage regulator
- Interface for off-chip USB transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 µA typical
- Sleep current down to 0.1 µA typical
- Timer1 oscillator: 1.1 µA typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 µA typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Five Crystal modes, including High-Precision PLL for USB
- Two External RC modes, up to 4 MHz
- Two External Clock modes, up to 40 MHz
- Internal oscillator block:
  - 8 user selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
  - User tunable to compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor
  - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High current sink/source: 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
  - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns (TCY/16)
  - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (TCY)
  - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
  - Multiple output modes
  - Selectable polarity
  - Programmable dead-time
  - Auto-Shutdown and Auto-Restart
- Addressable USART module:
  - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI™ (all 4 modes) and I^{2}C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channels Analog-to-Digital Converter module (A/D) with programmable acquisition time
- Dual analog comparators with input multiplexing

Special Microcontroller Features:

- C compiler optimized architecture with optional extended instruction set
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle data EEPROM memory typical
- Flash/data EEPROM retention: > 40 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
  - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)

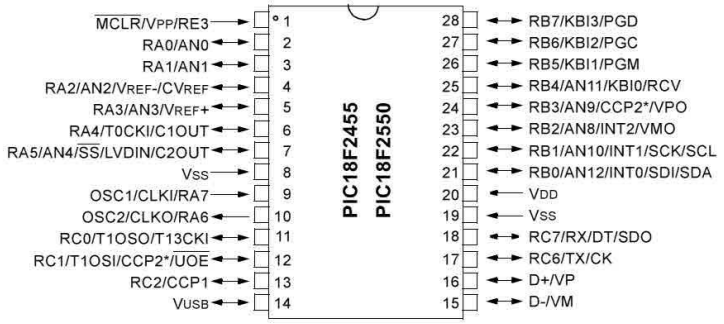
Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EAUSART	Comparators	Timers 8/16-bit
	FLASH (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I^{2}C			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

© 2003 Microchip Technology Inc. Advance Information DS39617A-page 1

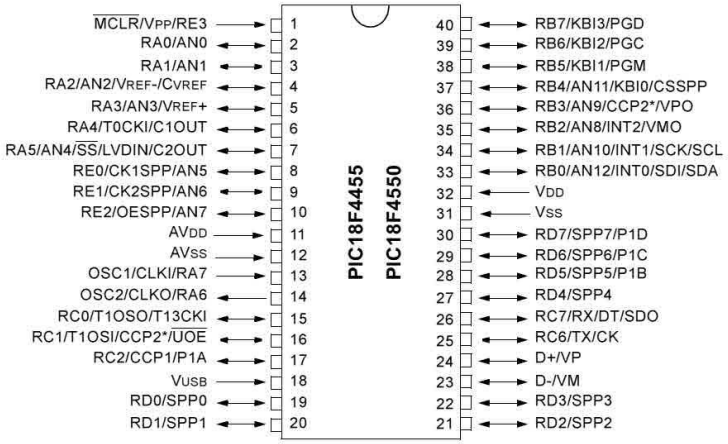
PIC18F2455/2550/4455/4550

Pin Diagrams

28-Pin SDIP, SOIC



40-Pin PDIP



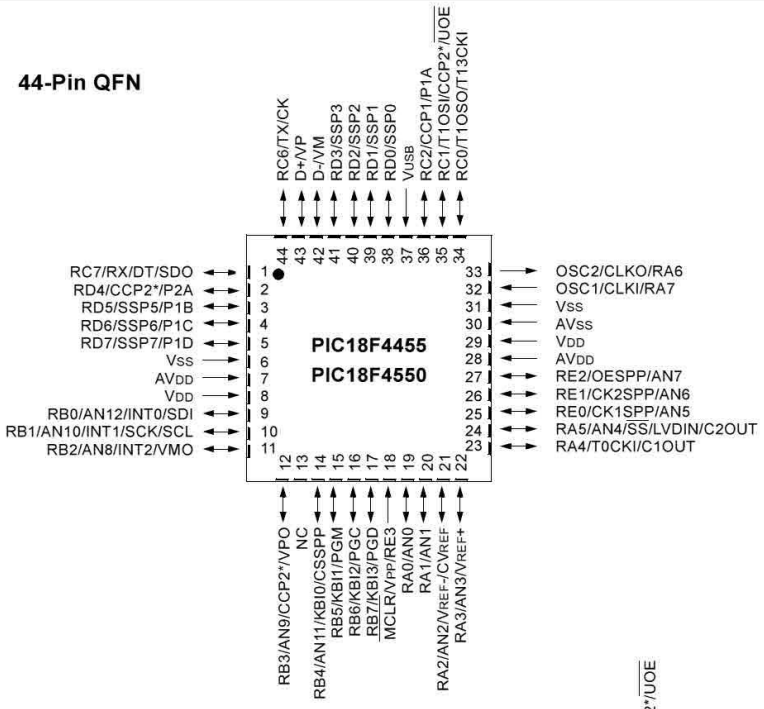
Note: Pinouts are subject to change.

* Assignment of this feature is dependent on device configuration.

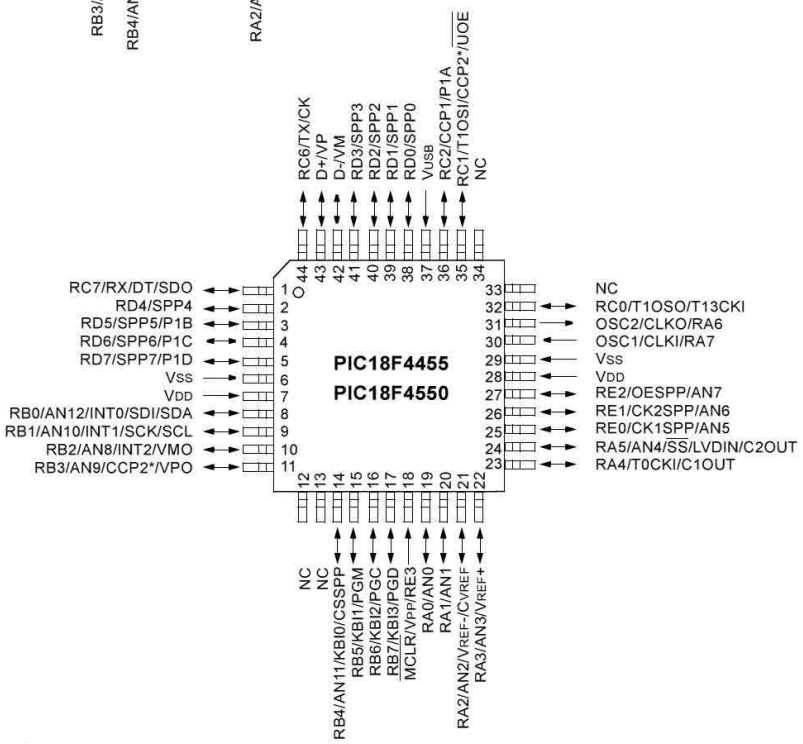
 © 2003 Microchip Technology Inc.

Pin Diagrams (Continued)

44-Pin QFN



44-Pin TQFP



Note: Pinouts are subject to change.

* Assignment of this feature is dependent on device configuration.

Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is intended through suggestion only and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. No representation or warranty is given and no liability is assumed by Microchip Technology Incorporated with respect to the accuracy or use of such information, or infringement of patents or other intellectual property rights arising from such use or otherwise. Use of Microchip's products as critical components in life support systems is not authorized except with express written approval by Microchip. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any intellectual property rights.

Trademarks

The Microchip name and logo, the Microchip logo, dsPIC, KEELOQ, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PRO MATE and PowerSmart are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

FilterLab, microID, MXDEV, MXLAB, PICMASTER, SEEVAL and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Accuron, Application Maestro, dsPICDEM, dsPICDEM.net, ECONOMONITOR, FanSense, FlexROM, fuzzyLAB, In-Circuit Serial Programming, ICSP, ICEPIC, microPort, Migratable Memory, MPASM, MPLIB, MPLINK, MPSIM, PICC, PICkit, PICDEM, PICDEM.net, PowerCal, PowerInfo, PowerMate, PowerTool, rfLAB, rfPIC, Select Mode, SmartSensor, SmartShunt, SmartTel and Total Endurance are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

Serialized Quick Turn Programming (SQTP) is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2003, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

Printed on recycled paper.

Microchip received QS-9000 quality system certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona in July 1999 and Mountain View, California in March 2002. The Company's quality system processes and procedures are QS-9000 compliant for its PICmicro® 8-bit MCUs, KEELOQ® code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, non-volatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001 certified.

MICROCHIP

WORLDWIDE SALES AND SERVICE

AMERICAS

Corporate Office
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7200
Fax: 480-792-7277
Technical Support: 480-792-7627
Web Address: http://www.microchip.com

Atlanta
3780 Mansell Road, Suite 130
Alpharetta, GA 30022
Tel: 770-640-0034
Fax: 770-640-0307

Boston
2 Lan Drive, Suite 120
Westford, MA 01886
Tel: 978-692-3848
Fax: 978-692-3821

Chicago
333 Pierce Road, Suite 180
Itasca, IL 60143
Tel: 630-285-0071
Fax: 630-285-0075

Dallas
4570 Westgrove Drive, Suite 160
Addison, TX 75001
Tel: 972-818-7423
Fax: 972-818-2924

Detroit
Tri-Atria Office Building
32255 Northwestern Highway, Suite 190
Farmington Hills, MI 48334
Tel: 248-538-2250
Fax: 248-538-2260

Kokomo
2767 S. Albright Road
Kokomo, IN 46902
Tel: 765-864-8360
Fax: 765-864-8387

Los Angeles
18201 Von Karman, Suite 1090
Irvine, CA 92612
Tel: 949-263-1888
Fax: 949-263-1338

Phoenix
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7966
Fax: 480-792-4338

San Jose
2107 North First Street, Suite 590
San Jose, CA 95131
Tel: 408-436-7950
Fax: 408-436-7955

Toronto
6285 Northam Drive, Suite 108
Mississauga, Ontario L4V 1X5, Canada
Tel: 905-673-0699
Fax: 905-673-6509

ASIA/PACIFIC

Australia
Suite 22, 41 Rawson Street
Epping 2121, NSW
Australia
Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

China - Beijing
Unit 915
Bei Hai Wan Tai Bldg.
No. 6 Chaoyangmen Beidajie
Beijing, 100027, No. China
Tel: 86-10-85282100
Fax: 86-10-85282104

China - Chengdu
Rm. 2401-2402, 24th Floor,
Ming Xing Financial Tower
No. 88 TIDU Street
Chengdu 610016, China
Tel: 86-28-86766200
Fax: 86-28-86766599

China - Fuzhou
Unit 28F, World Trade Plaza
No. 71 Wusi Road
Fuzhou 350001, China
Tel: 86-591-7503506
Fax: 86-591-7503521

China - Hong Kong SAR
Unit 901-6, Tower 2, Metroplaza
223 Hing Fong Road
Kwai Fong, N.T., Hong Kong
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

China - Shanghai
Room 701, Bldg. B
Far East International Plaza
No. 317 Xian Xia Road
Shanghai, 200051
Tel: 86-21-6275-5700
Fax: 86-21-6275-5060

China - Shenzhen
Rm. 1812, 18/F, Building A, United Plaza
No. 5022 Binhe Road, Futian District
Shenzhen 518033, China
Tel: 86-755-82901380
Fax: 86-755-8295-1393

China - Shunde
Room 401, Hongjian Building
No. 2 Fengxiangnan Road, Ronggui Town
Shunde City, Guangdong 528303, China
Tel: 86-765-8395507 Fax: 86-765-8395571

China - Qingdao
Rm. B505A, Fullhope Plaza,
No. 12 Hong Kong Central Rd.
Qingdao 266071, China
Tel: 86-532-5027355 Fax: 86-532-5027205

India
Divyasree Chambers
1 Floor, Wing A (A3/A4)
No. 11, O'Shaugnessey Road
Bangalore, 560 025, India
Tel: 91-80-2290061 Fax: 91-80-2290062

Japan
Benex S-1 6F
3-18-20, Shinyokohama
Kohoku-Ku, Yokohama-shi
Kanagawa, 222-0033, Japan
Tel: 81-45-471- 6166 Fax: 81-45-471-6122

Korea
168-1, Youngbo Bldg. 3 Floor
Samsung-Dong, Kangnam-Ku
Seoul, Korea 135-882
Tel: 82-2-554-7200 Fax: 82-2-558-5932 or 82-2-558-5934

Singapore
200 Middle Road
#07-02 Prime Centre
Singapore, 188980
Tel: 65-6334-8870 Fax: 65-6334-8850

Taiwan
Kaohsiung Branch
30F - 1 No. 8
Min Chuan 2nd Road
Kaohsiung 806, Taiwan
Tel: 886-7-536-4818
Fax: 886-7-536-4803

Taiwan
Taiwan Branch
11F-3, No. 207
Tung Hua North Road
Taipei, 105, Taiwan
Tel: 886-2-2717-7175 Fax: 886-2-2545-0139

EUROPE

Austria
Durisolstrasse 2
A-4600 Wels
Austria
Tel: 43-7242-2244-399
Fax: 43-7242-2244-393

Denmark
Regus Business Centre
Lautrup hoj 1-3
Ballerup DK-2750 Denmark
Tel: 45-4420-9895 Fax: 45-4420-9910

France
Parc d'Activite du Moulin de Massy
43 Rue du Saule Trapu
Batiment A - ler Etage
91300 Massy, France
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

Germany
Steinheilstrasse 10
D-85737 Ismaning, Germany
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

Italy
Via Quasimodo, 12
20025 Legnano (MI)
Milan, Italy
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

Netherlands
P. A. De Biesbosch 14
NL-5152 SC Drunen, Netherlands
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

United Kingdom
505 Eskdale Road
Winnersh Triangle
Wokingham
Berkshire, England RG41 5TU
Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820

07/28/03

 © 2003 Microchip Technology Inc.

29.5 Bijlage 5: Gyroscoop

InvenSense	**InvenSense Inc.** 1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A. Tel: +1 (408) 988-7339 Fax: +1 (408) 988-8104 Website: www.invensense.com	Document Number: PS-ITG-3200A-00-01.4 Revision: 1.4 Release Date: 03/30/2010

ITG-3200
Product Specification
Revision 1.4

CONTENTS

1 DOCUMENT INFORMATION 4
1.1 REVISION HISTORY 4
1.2 PURPOSE AND SCOPE 5
1.3 PRODUCT OVERVIEW 5
1.4 APPLICATIONS 5
2 FEATURES 6
3 ELECTRICAL CHARACTERISTICS 7
3.1 SENSOR SPECIFICATIONS 7
3.2 ELECTRICAL SPECIFICATIONS 8
3.3 ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED 9
3.4 ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED 10
3.5 I^2C TIMING CHARACTERIZATION 11
3.6 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS 12
4 APPLICATIONS INFORMATION 13
4.1 PIN OUT AND SIGNAL DESCRIPTION 13
4.2 TYPICAL OPERATING CIRCUIT 14
4.3 BILL OF MATERIALS FOR EXTERNAL COMPONENTS 14
4.4 RECOMMENDED POWER-ON PROCEDURE 15
5 FUNCTIONAL OVERVIEW 16
5.1 BLOCK DIAGRAM 16
5.2 OVERVIEW 16
5.3 THREE-AXIS MEMS GYROSCOPE WITH 16-BIT ADCS AND SIGNAL CONDITIONING 16
5.4 I^2C SERIAL COMMUNICATIONS INTERFACE 17
5.5 CLOCKING 17
5.6 SENSOR DATA REGISTERS 17
5.7 INTERRUPTS 17
5.8 DIGITAL-OUTPUT TEMPERATURE SENSOR 17
5.9 BIAS AND LDO 17
5.10 CHARGE PUMP 17
6 DIGITAL INTERFACE 18
6.1 I^2C SERIAL INTERFACE 18
7 REGISTER MAP 22
8 REGISTER DESCRIPTION 23
8.1 REGISTER 0 – WHO AM I 23
8.2 REGISTER 21 – SAMPLE RATE DIVIDER 23
8.3 REGISTER 22 – DLPF, FULL SCALE 24
8.4 REGISTER 23 – INTERRUPT CONFIGURATION 26
8.5 REGISTER 26 – INTERRUPT STATUS 26
8.6 REGISTERS 27 TO 34 – SENSOR REGISTERS 27
8.7 REGISTER 62 – POWER MANAGEMENT 27
9 ASSEMBLY 29
9.1 ORIENTATION 29
9.2 PACKAGE DIMENSIONS 30
9.3 PACKAGE MARKING SPECIFICATION 31
9.4 TAPE & REEL SPECIFICATION 31

9.5 LABEL 33
9.6 PACKAGING 33
9.7 SOLDERING EXPOSED DIE PAD 34
9.8 COMPONENT PLACEMENT 34
9.9 PCB MOUNTING AND CROSS-AXIS SENSITIVITY 34
9.10 MEMS HANDLING INSTRUCTIONS 35
9.11 GYROSCOPE SURFACE MOUNT GUIDELINES 35
9.12 REFLOW SPECIFICATION 35
9.13 STORAGE SPECIFICATIONS 37

10 RELIABILITY 38

10.1 QUALIFICATION TEST POLICY 38
10.2 QUALIFICATION TEST PLAN 38

1 Document Information

1.1 Revision History

Revision Date	Revision	Description
10/23/09	1.0	Initial Release
10/28/09	1.1	Edits for readability
02/12/2010	1.2	• Changed full-scale range and sensitivity scale factor (Sections 2, 3.1, 5.3, and 8.3) • Changed sensitivity scale factor variation over temperature (Section 3.1) • Changed total RMS noise spec (Section 3.1) • Added range for temperature sensor (Section 3.1) • Updated VDD Power-Supply Ramp Rate specification (Sections 3.2 and 4.4) • Added VLOGIC Voltage Range condition (Section 3.2) • Added VLOGIC Reference Voltage Ramp Rate specification (Sections 3.2 and 4.4) • Updated Start-Up Time for Register Read/Write specification (Section 3.2) • Updated Input logic levels for AD0 and CLKIN (Section 3.2) • Updated Level I_{OL} specifications for the I^2C interface (Section 3.3) • Updated Frequency Variation Over Temperature specification for internal clock source (Section 3.4) • Updated VLOGIC conditions for I^2C Characterization (Section 3.5) • Updated ESD specification (Section 3.6) • Added termination requirements for CLKIN if unused (Section 4.1) • Added recommended power-on procedure diagram (Section 4.4) • Changed DLPF_CFG setting 7 to reserved (Section 8.3) • Changed Reflow Specification description (Section 9.12) • Removed errata specifications
03/05/2010	1.3	• Updated temperature sensor linearity spec (Section 3.1) • Updated VDD Power-Supply Ramp Rate timing figure (Sections 3.2 and 4.4) • Updated VLOGIC Reference Voltage timing figure (Section 4.4) • Added default values to registers (all of Section 8) • Updated FS_SEL description (Section 8.3) • Updated package outline drawing and dimensions (Section 9.2) • Updated Reliability (Section 10.1 and 10.2) • Removed Environmental Compliance (Section 11)
03/30/2010	1.4	• Removed confidentiality mark

1.2 Purpose and Scope

This document is a preliminary product specification, providing a description, specifications, and design related information for the ITG-3200™. Electrical characteristics are based upon simulation results and limited characterization data of advanced samples only. Specifications are subject to change without notice. Final specifications will be updated based upon characterization of final silicon.

1.3 Product Overview

The ITG-3200 is the world's first single-chip, digital-output, 3-axis MEMS gyro IC optimized for gaming, 3D mice, and 3D remote control applications. The part features enhanced bias and sensitivity temperature stability, reducing the need for user calibration. Low frequency noise is lower than previous generation devices, simplifying application development and making for more-responsive remote controls.

The ITG-3200 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyro outputs, a user-selectable internal low-pass filter bandwidth, and a Fast-Mode I^2C (400kHz) interface. Additional features include an embedded temperature sensor and a 2% accurate internal oscillator. This breakthrough in gyroscope technology provides a dramatic 67% package size reduction, delivers a 50% power reduction, and has inherent cost advantages compared to competing multi-chip gyro solutions.

By leveraging its patented and volume-proven Nasiri-Fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the ITG-3200 package size down to a revolutionary footprint of 4x4x0.9mm (QFN), while providing the highest performance, lowest noise, and the lowest cost semiconductor packaging required for handheld consumer electronic devices. The part features a robust 10,000*g* shock tolerance, as required by portable consumer equipment.

For power supply flexibility, the ITG-3200 has a separate VLOGIC reference pin, in addition to its analog supply pin, VDD, which sets the logic levels of its I^2C interface. The VLOGIC voltage may be anywhere from 1.71V min to VDD max.

1.4 Applications

- Motion-enabled game controllers
- Motion-based portable gaming
- Motion-based 3D mice and 3D remote controls
- "No Touch" UI
- Health and sports monitoring

2 Features

The ITG-3200 triple-axis MEMS gyroscope includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyros) on one integrated circuit with a sensitivity of 14.375 LSBs per °/sec and a full-scale range of ±2000°/sec
- Three integrated 16-bit ADCs provide simultaneous sampling of gyros while requiring no external multiplexer
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Low frequency noise lower than previous generation devices, simplifying application development and making for more-responsive motion processing
- Digitally-programmable low-pass filter
- Low 6.5mA operating current consumption for long battery life
- Wide VDD supply voltage range of 2.1V to 3.6V
- Flexible VLOGIC reference voltage allows for I^2C interface voltages from 1.71V to VDD
- Standby current: 5µA
- Smallest and thinnest package for portable devices (4x4x0.9mm QFN)
- No high pass filter needed
- Turn on time: 50ms
- Digital-output temperature sensor
- Factory calibrated scale factor
- 10,000 *g* shock tolerant
- Fast Mode I^2C (400kHz) serial interface
- On-chip timing generator clock frequency is accurate to +/-2% over full temperature range
- Optional external clock inputs of 32.768kHz or 19.2MHz to synchronize with system clock
- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

3 Electrical Characteristics

3.1 Sensor Specifications

Typical Operating Circuit of Section 4.2, VDD = 2.5V, VLOGIC = 1.71V to VDD, T_A=25°C.

Parameter	Conditions	Min	Typical	Max	Unit	Note
GYRO SENSITIVITY						
Full-Scale Range	FS_SEL=3		±2000		°/s	4
Gyro ADC Word Length			16		Bits	3
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=3		14.375		LSB/(°/s)	3
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-6		+6	%	1
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			±10		%	2
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	6
Cross-Axis Sensitivity			2		%	6
GYRO ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)						
Initial ZRO Tolerance			±40		°/s	1
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±40		°/s	2
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.2V		0.2		°/s	5
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.2V		0.2		°/s	5
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.2V		4		°/s	5
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		°/s/g	6
GYRO NOISE PERFORMANCE	**FS_SEL=3**					
Total RMS noise	100Hz LPF (DLPFCFG=2)		0.38		°/s-rms	1
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.03		°/s/√Hz	2
GYRO MECHANICAL FREQUENCIES						
X-Axis		30	33	36	kHz	1
Y-Axis		27	30	33	kHz	1
Z-Axis		24	27	30	kHz	1
Frequency Separation	Between any two axes	1.7			kHz	1
GYRO START-UP TIME	**DLPFCFG=0**					
ZRO Settling	to ±1°/s of Final		50		ms	6
TEMPERATURE SENSOR						
Range			-30 to +85		°C	2
Sensitivity			280		LSB/°C	2
Temperature Offset	35°C		-13,200		LSB	1
Initial Accuracy	35°C		TBD		°C	
Linearity	Best fit straight line (-30°C to +85°C)		±1		°C	2, 5
TEMPERATURE RANGE						
Specified Temperature Range		-40		85	°C	

Notes:

1. Tested in production
2. Based on characterization of 30 pieces over temperature on evaluation board or in socket
3. Based on design, through modeling and simulation across PVT
4. Typical. Randomly selected part measured at room temperature on evaluation board or in socket
5. Based on characterization of 5 pieces over temperature
6. Tested on 5 parts at room temperature

3.2 Electrical Specifications

Typical Operating Circuit of Section 4.2, VDD = 2.5V, VLOGIC = 1.71V to VDD, T_A=25°C.

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
VDD POWER SUPPLY						
Operating Voltage Range		2.1		3.6	V	2
Power-Supply Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value (see Figure in Section 4.4)	0		5	ms	2
Normal Operating Current			6.5		mA	1
Sleep Mode Current			5		µA	5
VLOGIC REFERENCE VOLTAGE						
Voltage Range	VLOGIC must be ≤VDD at all times	1.71		VDD	V	
VLOGIC Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value (see Figure in Section 4.4)			1	ms	6
Normal Operating Current			100		µA	
START-UP TIME FOR REGISTER READ/WRITE			20		ms	5
I^2C ADDRESS	AD0 = 0		1101000			6
	AD0 = 1		1101001			6
DIGITAL INPUTS (AD0, CLKIN)						
V_{IH}, High Level Input Voltage		0.9*VLOGIC			V	5
V_{IL}, Low Level Input Voltage				0.1*VLOGIC	V	5
C_I, Input Capacitance				5	pF	7
DIGITAL OUTPUT (INT)						
V_{OH}, High Level Output Voltage	OPEN=0, Rload=1MΩ	0.9*VLOGIC			V	2
V_{OL}, Low Level Output Voltage	OPEN=0, Rload=1MΩ			0.1*VLOGIC	V	2
$V_{OL.INT1}$, INT Low-Level Output Voltage	OPEN=1, 0.3mA sink current			0.1	V	2
Output Leakage Current	OPEN=1		100		nA	4
t_{INT}, INT Pulse Width	LATCH_INT_EN=0		50		µs	4

Notes:

1. Tested in production
2. Based on characterization of 30 pieces over temperature on evaluation board or in socket
4. Typical. Randomly selected part measured at room temperature on evaluation board or in socket
5. Based on characterization of 5 pieces over temperature
6. Guaranteed by design

3.3 Electrical Specifications, continued

Typical Operating Circuit of Section 4.2, VDD = 2.5V, VLOGIC = 1.71V to VDD, T_A=25°C.

Parameters	Conditions	Typical	Units	Notes
I^2C I/O (SCL, SDA)				
V_{IL}, LOW-Level Input Voltage		-0.5 to 0.3*VLOGIC	V	2
V_{IH}, HIGH-Level Input Voltage		0.7*VLOGIC to VLOGIC + 0.5V	V	2
V_{hys}, Hysteresis		0.1*VLOGIC	V	2
V_{OL1}, LOW-Level Output Voltage	3mA sink current	0 to 0.4	V	2
I_{OL}, LOW-Level Output Current	V_{OL} = 0.4V V_{OL} = 0.6V	3 6	mA mA	2 2
Output Leakage Current		100	nA	4
t_{of}, Output Fall Time from V_{IHmax} to V_{ILmax}	Cb bus cap. in pF	20+0.1Cb to 250	ns	2
C_I, Capacitance for Each I/O pin		10	pF	5

Notes:

2. Based on characterization of 5 pieces over temperature.
4. Typical. Randomly selected part measured at room temperature on evaluation board or in socket
5. Guaranteed by design

3.4 Electrical Specifications, continued

Typical Operating Circuit of Section 4.2, VDD = 2.5V, VLOGIC = 1.71V to VDD, T_A=25°C.

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
INTERNAL CLOCK SOURCE	**CLKSEL=0, 1, 2, or 3**					
Sample Rate, Fast	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8		kHz	4
Sample Rate, Slow	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1		kHz	4
Clock Frequency Initial Tolerance	CLKSEL=0, 25°C	-2		+2	%	1
	CLKSEL=1,2,3; 25°C	-1		+1	%	1
Frequency Variation over Temperature	CLKSEL=0		-15 to +10		%	2
	CLKSEL=1,2,3		+/-1		%	2
PLL Settling Time	CLKSEL=1,2,3		1		ms	3
EXTERNAL 32.768kHz CLOCK	**CLKSEL=4**					
External Clock Frequency			32.768		kHz	3
External Clock Jitter	Cycle-to-cycle rms		1 to 2		µs	3
Sample Rate, Fast	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8.192		kHz	3
Sample Rate, Slow	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1.024		kHz	3
PLL Settling Time			1		ms	3
EXTERNAL 19.2MHz CLOCK	**CLKSEL=5**					
External Clock Frequency			19.2		MHz	3
Sample Rate, Fast	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8		kHz	3
Sample Rate, Slow	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1		kHz	3
PLL Settling Time			1		ms	3
Charge Pump Clock Frequency						
Frequency	1st Stage, 25°C		8.5		MHz	5
	2nd Stage, 25°C		68		MHz	5
	Over temperature		+/-15		%	5

Notes:

1. Tested in production
2. Based on characterization of 30 pieces over temperature on evaluation board or in socket
3. Based on design, through modeling and simulation across PVT
4. Typical. Randomly selected part measured at room temperature on evaluation board or in socket
5. Based on characterization of 5 pieces over temperature.

InvenSense	ITG-3200 Product Specification	Document Number: PS-ITG-3200A-00-01.4 Revision: 1.4 Release Date: 03/30/2010

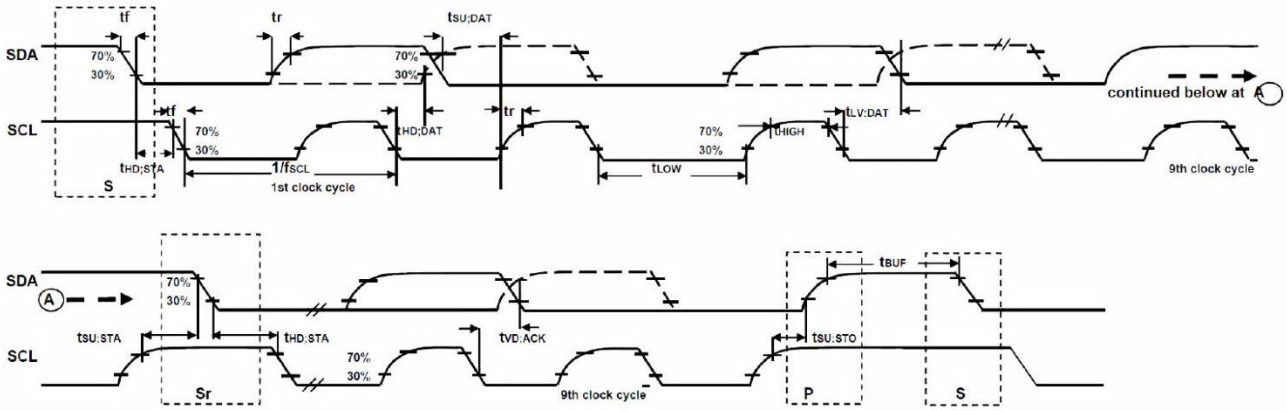
3.5 I²C Timing Characterization

Typical Operating Circuit of Section 4.2, VDD = 2.5V, VLOGIC = 1.8V±5%, 2.5V±5%, 3.0V±5%, or 3.3V±5%, T_A=25°C.

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
I²C TIMING	**I²C FAST-MODE**					
f_{SCL}, SCL Clock Frequency		0		400	kHz	1
$t_{HD.STA}$, (Repeated) START Condition Hold Time		0.6			us	1
t_{LOW}, SCL Low Period		1.3			us	1
t_{HIGH}, SCL High Period		0.6			us	1
$t_{SU.STA}$, Repeated START Condition Setup Time		0.6			us	1
$t_{HD.DAT}$, SDA Data Hold Time		0			us	1
$t_{SU.DAT}$, SDA Data Setup Time		100			ns	1
t_r, SDA and SCL Rise Time	Cb bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1Cb		300	ns	1
t_f, SDA and SCL Fall Time	Cb bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1Cb		300	ns	1
$t_{SU.STO}$, STOP Condition Setup Time		0.6			us	1
t_{BUF}, Bus Free Time Between STOP and START Condition		1.3			us	1
C_b, Capacitive Load for each Bus Line				400	pF	2
$t_{VD.DAT}$, Data Valid Time				0.9	us	1
$t_{VD.ACK}$, Data Valid Acknowledge Time				0.9	us	1

Notes:

1. Based on characterization of 5 pieces over temperature on evaluation board or in socket
2. Guaranteed by design



I²C Bus Timing Diagram

3.6 Absolute Maximum Ratings

Stresses above those listed as "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these conditions is not implied. Exposure to the absolute maximum ratings conditions for extended periods may affect device reliability.

Absolute Maximum Ratings

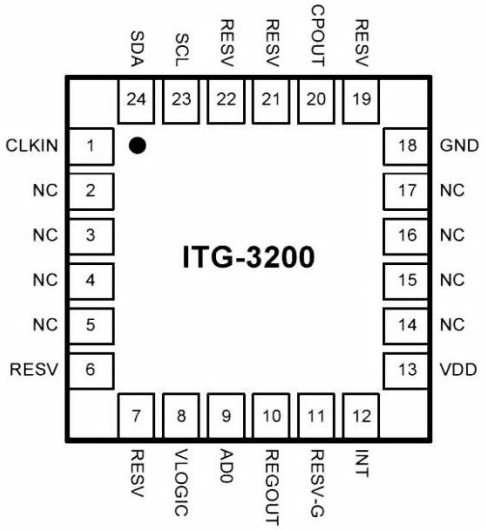
Parameter	Rating
Supply Voltage, VDD	-0.5V to +6V
VLOGIC Input Voltage Level	-0.5V to VDD + 0.5V
REGOUT	-0.5V to 2V
Input Voltage Level (CLKIN, AD0)	-0.5V to VDD + 0.5V
SCL, SDA, INT	-0.5V to VLOGIC + 0.5V
CPOUT (2.1V ≤ VDD ≤ 3.6V)	-0.5V to 30V
Acceleration (Any Axis, unpowered)	10,000*g* for 0.3ms
Operating Temperature Range	-40°C to +105°C
Storage Temperature Range	-40°C to +125°C
Electrostatic Discharge (ESD) Protection	1.5kV (HBM); 200V (MM)

4 Applications Information

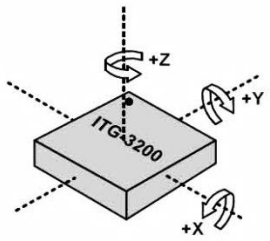
4.1 Pin Out and Signal Description

Number	Pin	Pin Description
1	CLKIN	Optional external reference clock input. Connect to GND if unused.
8	VLOGIC	Digital IO supply voltage. VLOGIC must be ≤ VDD at all times.
9	AD0	I^2C Slave Address LSB
10	REGOUT	Regulator filter capacitor connection
12	INT	Interrupt digital output (totem pole or open-drain)
13	VDD	Power supply voltage
18	GND	Power supply ground
11	RESV-G	Reserved - Connect to ground.
6, 7, 19, 21, 22	RESV	Reserved. Do not connect.
20	CPOUT	Charge pump capacitor connection
23	SCL	I^2C serial clock
24	SDA	I^2C serial data
2, 3, 4, 5, 14, 15, 16, 17	NC	Not internally connected. May be used for PCB trace routing.

Top View

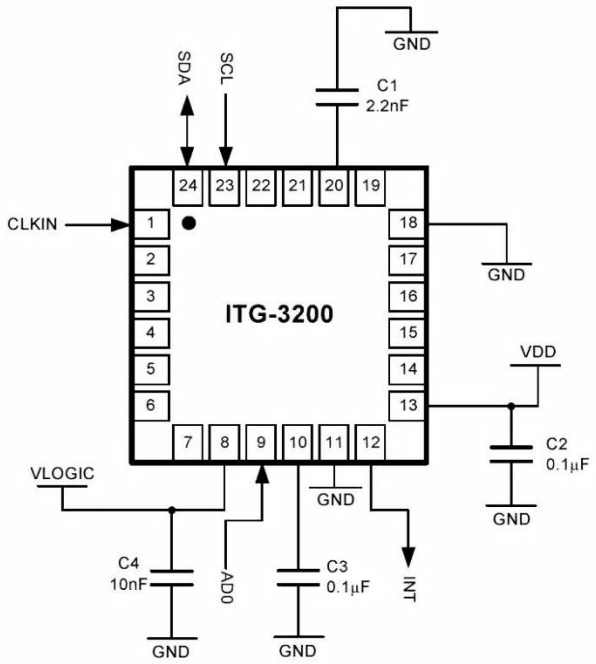


QFN Package
24-pin, 4mm x 4mm x 0.9mm



Orientation of Axes of Sensitivity and Polarity of Rotation

4.2 Typical Operating Circuit

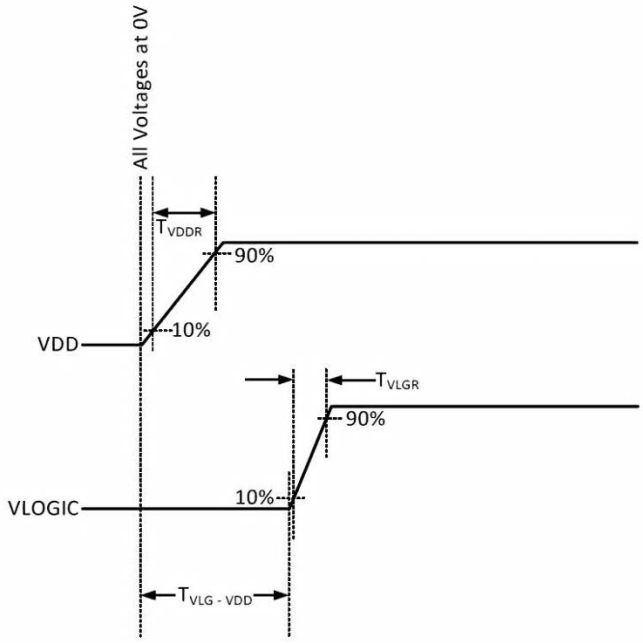


Typical Operating Circuit

4.3 Bill of Materials for External Components

Component	Label	Specification	Quantity
Charge Pump Capacitor	C1	Ceramic, X7R, 2.2nF ±10%, 50V	1
VDD Bypass Capacitor	C2	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 4V	1
Regulator Filter Capacitor	C3	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 2V	1
VLOGIC Bypass Capacitor	C4	Ceramic, X7R, 10nF ±10%, 4V	1

4.4 Recommended Power-On Procedure

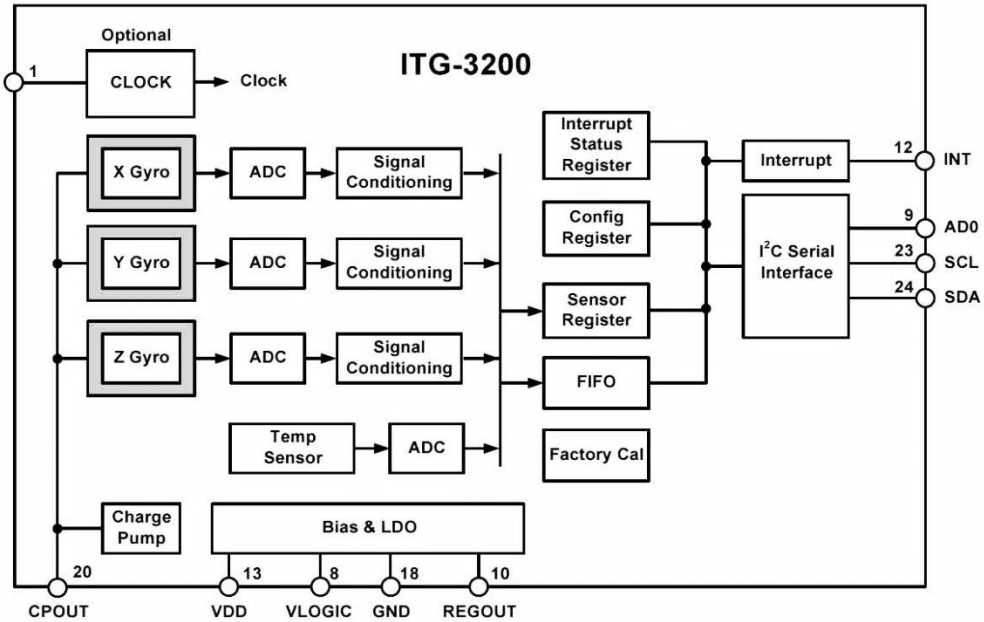


Power-Up Sequencing

1. T_{VDDR} is VDD rise time: Time for VDD to rise from 10% to 90% of its final value
2. T_{VDDR} is ≤5msec
3. T_{VLGR} is VLOGIC rise time: Time for VLOGIC to rise from 10% to 90% of its final value
4. T_{VLGR} is ≤1msec
5. $T_{VLG-VDD}$ is the delay from the start of VDD ramp to the start of VLOGIC rise
6. $T_{VLG-VDD}$ is 0 to 20msec but VLOGIC amplitude must always be ≤VDD amplitude
7. VDD and VLOGIC must be monotonic ramps

5 Functional Overview

5.1 Block Diagram



5.2 Overview

The ITG-3200 consists of the following key blocks and functions:

- Three-axis MEMS rate gyroscope sensors with individual 16-bit ADCs and signal conditioning
- I^2C serial communications interface
- Clocking
- Sensor Data Registers
- Interrupts
- Digital-Output Temperature Sensor
- Bias and LDO
- Charge Pump

5.3 Three-Axis MEMS Gyroscope with 16-bit ADCs and Signal Conditioning

The ITG-3200 consists of three independent vibratory MEMS gyroscopes, which detect rotational rate about the X (roll), Y (pitch), and Z (yaw) axes. When the gyros are rotated about any of the sense axes, the Coriolis Effect causes a deflection that is detected by a capacitive pickoff. The resulting signal is amplified, demodulated, and filtered to produce a voltage that is proportional to the angular rate. This voltage is digitized using individual on-chip 16-bit Analog-to-Digital Converters (ADCs) to sample each axis.

The full-scale range of the gyro sensors is preset to ±2000 degrees per second (°/s). The ADC output rate is programmable up to a maximum of 8,000 samples per second down to 3.9 samples per second, and user-selectable low-pass filters enable a wide range of cut-off frequencies.

5.4 I²C Serial Communications Interface

The ITG-3200 communicates to a system processor using the I²C serial interface, and the device always acts as a slave when communicating to the system processor. **The logic level for communications to the master is set by the voltage on the VLOGIC pin.** The LSB of the of the I²C slave address is set by pin 9 (AD0).

5.5 Clocking

The ITG-3200 has a flexible clocking scheme, allowing for a variety of internal or external clock sources for the internal synchronous circuitry. This synchronous circuitry includes the signal conditioning, ADCs, and various control circuits and registers. An on-chip PLL provides flexibility in the allowable inputs for generating this clock.

Allowable internal sources for generating the internal clock are:

- An internal relaxation oscillator (less accurate)
- Any of the X, Y, or Z gyros' MEMS oscillators (with an accuracy of ±2% over temperature)

Allowable external clocking sources are:

- 32.768kHz square wave
- 19.2MHz square wave

Which source to select for generating the internal synchronous clock depends on the availability of external sources and the requirements for clock accuracy. There are also start-up conditions to consider. When the ITG-3200 first starts up, the device operates off of its internal clock until programmed to operate from another source. This allows the user, for example, to wait for the MEMS oscillators to stabilize before they are selected as the clock source.

5.6 Sensor Data Registers

The sensor data registers contain the latest gyro and temperature data. They are read-only registers, and are accessed via the Serial Interface. Data from these registers may be read at any time, however, the interrupt function may be used to determine when new data is available.

5.7 Interrupts

Interrupt functionality is configured via the Interrupt Configuration register. Items that are configurable include the INT pin configuration, the interrupt latching and clearing method, and triggers for the interrupt. Items that can trigger an interrupt are (1) Clock generator locked to new reference oscillator (used when switching clock sources); and (2) new data is available to be read from the Data registers. The interrupt status can be read from the Interrupt Status register.

5.8 Digital-Output Temperature Sensor

An on-chip temperature sensor and ADC are used to measure the ITG-3200 die temperature. The readings from the ADC can be read from the Sensor Data registers.

5.9 Bias and LDO

The bias and LDO sections take in an unregulated VDD supply from 2.1V to 3.6V and generate the internal supply and the references voltages and currents required by the ITG-3200. The LDO output is bypassed by a capacitor at REGOUT. Additionally, the part has a VLOGIC reference voltage which sets the logic levels for its I²C interface.

5.10 Charge Pump

An on-board charge pump generates the high voltage (25V) required to drive the MEMS oscillators. Its output is bypassed by a capacitor at CPOUT.

6 Digital Interface

6.1 I²C Serial Interface

The internal registers and memory of the ITG-3200 can be accessed using I²C at up to 400kHz.

Serial Interface

Pin Number	Pin Name	Pin Description
8	VLOGIC	Digital IO supply voltage. VLOGIC must be ≤ VDD at all times.
9	AD0	I²C Slave Address LSB
23	SCL	I²C serial clock
24	SDA	I²C serial data

6.1.1 I²C Interface

I²C is a two wire interface comprised of the signals serial data (SDA) and serial clock (SCL). In general, the lines are open-drain and bi-directional. In a generalized I²C interface implementation, attached devices can be a master or a slave. The master device puts the slave address on the bus, and the slave device with the matching address acknowledges the master.

The ITG-3200 always operates as a slave device when communicating to the system processor, which thus acts as the master. SDA and SCL lines typically need pull-up resistors to VDD. The maximum bus speed is 400kHz.

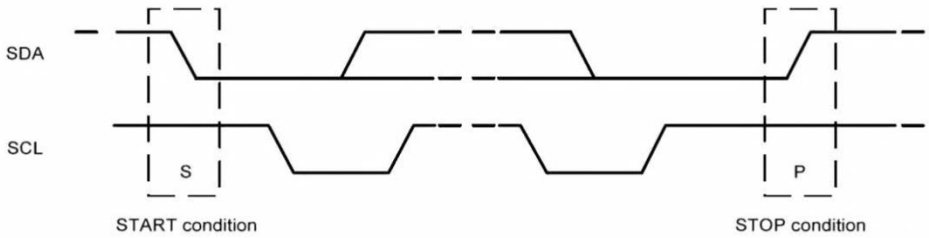
The slave address of the ITG-3200 devices is b110100X which is 7 bits long. The LSB bit of the 7 bit address is determined by the logic level on pin 9. This allows two ITG-3200 devices to be connected to the same I²C bus. When used in this configuration, the address of the one of the devices should be b1101000 (pin 9 is logic low) and the address of the other should be b1101001 (pin 9 is logic high). The I²C address is stored in register 0 (WHO_AM_I register).

I²C Communications Protocol

START (S) and STOP (P) Conditions

Communication on the I²C bus starts when the master puts the START condition (S) on the bus, which is defined as a HIGH-to-LOW transition of the SDA line while SCL line is HIGH (see figure below). The bus is considered to be busy until the master puts a STOP condition (P) on the bus, which is defined as a LOW to HIGH transition on the SDA line while SCL is HIGH (see figure below).

Additionally, the bus remains busy if a repeated START (Sr) is generated instead of a STOP condition.

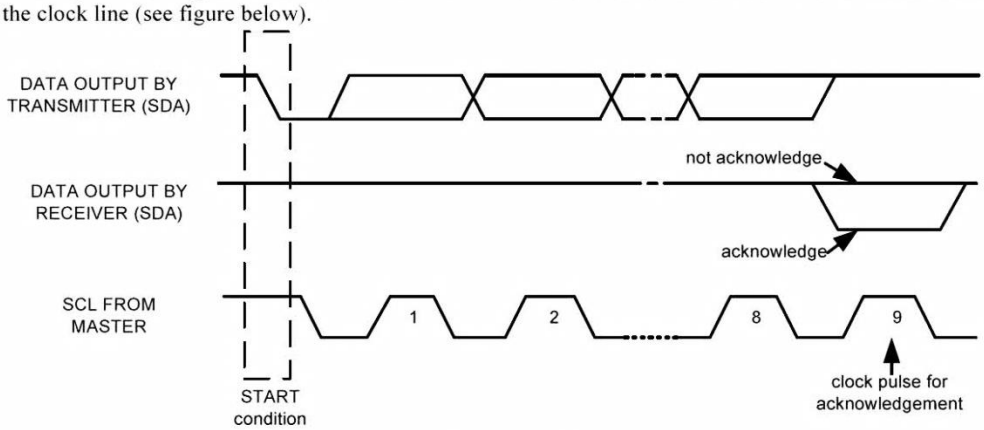


START and STOP Conditions

Data Format / Acknowledge

I^2C data bytes are defined to be 8 bits long. There is no restriction to the number of bytes transmitted per data transfer. Each byte transferred must be followed by an acknowledge (ACK) signal. The clock for the acknowledge signal is generated by the master, while the receiver generates the actual acknowledge signal by pulling down SDA and holding it low during the HIGH portion of the acknowledge clock pulse.

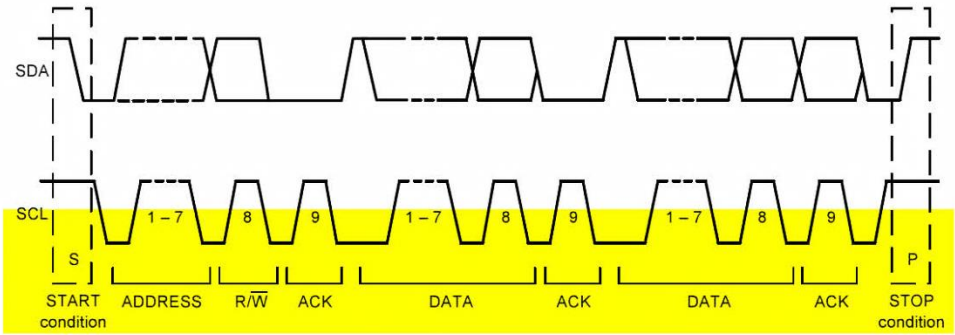
If a slave is busy and cannot transmit or receive another byte of data until some other task has been performed, it can hold SCL LOW, thus forcing the master into a wait state. Normal data transfer resumes when the slave is ready, and releases the clock line (see figure below).



Acknowledge on the I^2C Bus

Communications

After beginning communications with the START condition (S), the master sends a 7-bit slave address followed by an 8th bit, the read/write bit. The read/write bit indicates whether the master is receiving data from or is writing to the slave device. Then, the master releases the SDA line and waits for the acknowledge signal (ACK) from the slave device. Each byte transferred must be followed by an acknowledge bit. To acknowledge, the slave device pulls the SDA line LOW and keeps it LOW for the high period of the SCL line. Data transmission is always terminated by the master with a STOP condition (P), thus freeing the communications line. However, the master can generate a repeated START condition (Sr), and address another slave without first generating a STOP condition (P). A LOW to HIGH transition on the SDA line while SCL is HIGH defines the stop condition. All SDA changes should take place when SCL is low, with the exception of start and stop conditions.



Complete I^2C Data Transfer

To write the internal ITG-3200 device registers, the master transmits the start condition (S), followed by the I^2C address and the write bit (0). At the 9th clock cycle (when the clock is high), the ITG-3200 device acknowledges the transfer. Then the master puts the register address (RA) on the bus. After the ITG-3200 acknowledges the reception of the register address, the master puts the register data onto the bus. This is followed by the ACK signal, and data transfer may be concluded by the stop condition (P). To write multiple bytes after the last ACK signal, the master can continue outputting data rather than transmitting a stop signal. In this case, the ITG-3200 device automatically increments the register address and loads the data to the appropriate register. The following figures show single and two-byte write sequences.

Single-Byte Write Sequence

Master	S	AD+W		RA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK	

Burst Write Sequence

Master	S	AD+W		RA		DATA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK		ACK	

To read the internal ITG-3200 device registers, the master first transmits the start condition (S), followed by the I^2C address and the write bit (0). At the 9th clock cycle (when clock is high), the ITG acknowledges the transfer. The master then writes the register address that is going to be read. Upon receiving the ACK signal from the ITG-3200, the master transmits a start signal followed by the slave address and read bit. As a result, the ITG-3200 sends an ACK signal and the data. The communication ends with a not acknowledge (NACK) signal and a stop bit from master. The NACK condition is defined such that the SDA line remains high at the 9th clock cycle. To read multiple bytes of data, the master can output an acknowledge signal (ACK) instead of a not acknowledge (NACK) signal. In this case, the ITG-3200 automatically increments the register address and outputs data from the appropriate register. The following figures show single and two-byte read sequences.

Single-Byte Read Sequence

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		

Burst Read Sequence

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			ACK		NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		DATA		

I^2C Terms

Signal	Description
S	Start Condition: SDA goes from high to low while SCL is high
AD	Slave I^2C address
W	Write bit (0)
R	Read bit (1)
ACK	Acknowledge: SDA line is low while the SCL line is high at the 9th clock cycle
NACK	Not-Acknowledge: SDA line stays high at the 9th clock cycle
RA	ITG-3200 internal register address
DATA	Transmit or received data
P	Stop condition: SDA going from low to high while SCL is high

7 Register Map

Addr Hex	Addr Decimal	Register Name	R/W	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
0	0	WHO_AM_I	R/W	-	ID						-
15	21	SMPLRT_DIV	R/W	SMPLRT_DIV							
16	22	DLPF_FS	R/W	-	-	-	FS_SEL		DLPF_CFG		
17	23	INT_CFG	R/W	ACTL	OPEN	LATCH_ INT_EN	INT_ ANYRD_ 2CLEAR	-	ITG_RDY _EN	-	RAW_ RDY_EN
1A	26	INT_STATUS	R	-	-	-	-	-	ITG_RDY	-	RAW_ DATA_ RDY
1B	27	TEMP_OUT_H	R	TEMP_OUT_H							
1C	28	TEMP_OUT_L	R	TEMP_OUT_L							
1D	29	GYRO_XOUT_H	R	GYRO_XOUT_H							
1E	30	GYRO_XOUT_L	R	GYRO_XOUT_L							
1F	31	GYRO_YOUT_H	R	GYRO_YOUT_H							
20	32	GYRO_YOUT_L	R	GYRO_YOUT_L							
21	33	GYRO_ZOUT_H	R	GYRO_ZOUT_H							
22	34	GYRO_ZOUT_L	R	GYRO_ZOUT_L							
3E	62	PWR_MGM	R/W	H_RESET	SLEEP	STBY_XG	STBY_YG	STBY_ZG	CLK_SEL		

8 Register Description

This section details each register within the InvenSense ITG-3200 gyroscope. Note that any bit that is not defined should be set to zero in order to be compatible with future InvenSense devices.

The register space allows single-byte reads and writes, as well as burst reads and writes. When performing burst reads or writes, the memory pointer will increment until either (1) reading or writing is terminated by the master, or (2) the memory pointer reaches certain reserved registers between registers 33 and 60.

8.1 Register 0 – Who Am I

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
0	0	-	ID						-

Description:
This register is used to verify the identity of the device.
Parameters:
ID Contains the I^2C address of the device, which can also be changed by writing to this register.

The Power-On-Reset value of Bit6: Bit1 is 110 100.

8.2 Register 21 – Sample Rate Divider

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	Default Value
15	21	SMPLRT_DIV								00h

Description:
This register determines the sample rate of the ITG-3200 gyros. The gyros outputs are sampled internally at either 1kHz or 8kHz, determined by the *DLPF_CFG* setting (see register 22). This sampling is then filtered digitally and delivered into the sensor registers after the number of cycles determined by this register. The sample rate is given by the following formula:

$F_{sample} = F_{internal} / (divider+1)$, where $F_{internal}$ is either 1kHz or 8kHz

As an example, if the internal sampling is at 1kHz, then setting this register to 7 would give the following:

$F_{sample} = 1kHz / (7 + 1) = 125Hz$, or 8ms per sample

Parameters:
SMPLRT_DIV Sample rate divider: 0 to 255

8.3 Register 22 – DLPF, Full Scale

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	Default Value
16	22	-			FS_SEL		DLPF_CFG			00h

Description:

This register configures several parameters related to the sensor acquisition.

The *FS_SEL* parameter allows setting the full-scale range of the gyro sensors, as described in the table below. The power-on-reset value of *FS_SEL* is 00h. **Set to 03h for proper operation.**

FS_SEL

FS_SEL	Gyro Full-Scale Range
0	Reserved
1	Reserved
2	Reserved
3	±2000°/sec

The *DLPF_CFG* parameter sets the digital low pass filter configuration. It also determines the internal sampling rate used by the device as shown in the table below.

DLPF_CFG

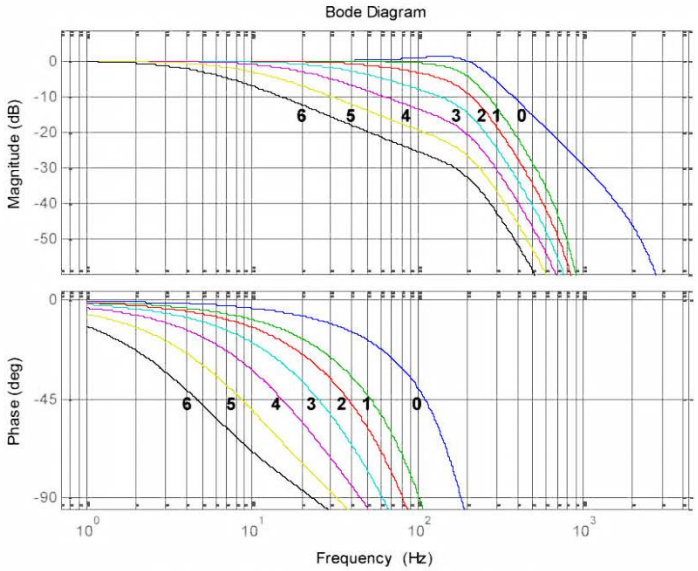
DLPF_CFG	Low Pass Filter Bandwidth	Internal Sample Rate
0	256Hz	8kHz
1	188Hz	1kHz
2	98Hz	1kHz
3	42Hz	1kHz
4	20Hz	1kHz
5	10Hz	1kHz
6	5Hz	1kHz
7	Reserved	Reserved

Parameters:

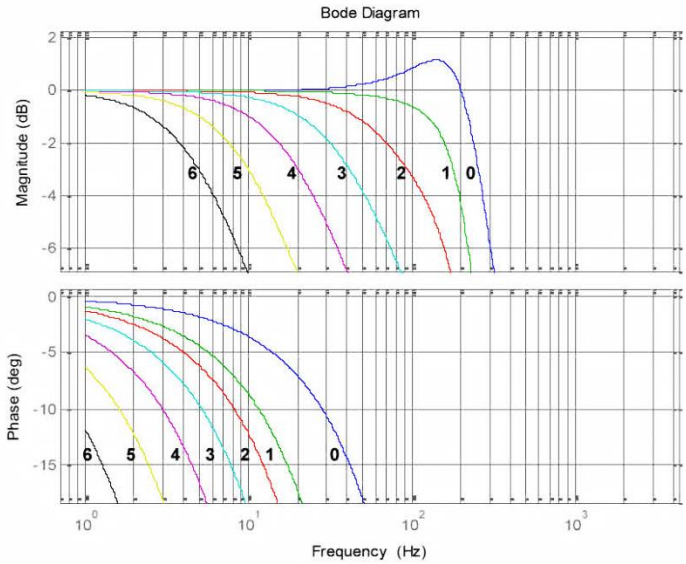
FS_SEL Full scale selection for gyro sensor data

DLPF_CFG Digital low pass filter configuration and internal sampling rate configuration

DLPF Characteristics: The gain and phase responses of the digital low pass filter settings (*DLPF_CFG*) are shown below:



Gain and Phase vs. Digital Filter Setting



Gain and Phase vs. Digital Filter Setting, Showing Passband Details

8.4 Register 23 – Interrupt Configuration

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	Default Value
17	23	ACTL	OPEN	LATCH_ INT_EN	INT_ ANYRD_ 2CLEAR	0	ITG_RDY_ EN	0	RAW_ RDY_ EN	00h

Description:

This register configures the interrupt operation of the device. The interrupt output pin (INT) configuration can be set, the interrupt latching/clearing method can be set, and the triggers for the interrupt can be set.

Note that if the application requires reading every sample of data from the ITG-3200 part, it is best to enable the raw data ready interrupt (*RAW_RDY_EN*). This allows the application to know when new sample data is available.

Parameters:

ACTL	Logic level for INT output pin – 1=active low, 0=active high
OPEN	Drive type for INT output pin – 1=open drain, 0=push-pull
LATCH_INT_EN	Latch mode – 1=latch until interrupt is cleared, 0=50us pulse
INT_ANYRD_2CLEAR	Latch clear method – 1=any register read, 0=status register read only
ITG_RDY_EN	Enable interrupt when device is ready (PLL ready after changing clock source)
RAW_RDY_EN	Enable interrupt when data is available
0	Load zeros into Bits 1 and 3 of the Interrupt Configuration register.

8.5 Register 26 – Interrupt Status

Type: Read only

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	Default Value
1A	26	-	-	-	-	-	ITG_RDY	-	RAW_ DATA_ RDY	00h

Description:

This register is used to determine the status of the ITG-3200 interrupts. Whenever one of the interrupt sources is triggered, the corresponding bit will be set. The polarity of the interrupt pin (active high/low) and the latch type (pulse or latch) has no affect on these status bits.

Use the Interrupt Configuration register (23) to enable the interrupt triggers. If the interrupt is not enabled, the associated status bit will not get set.

In normal use, the *RAW_DATA_RDY* interrupt is used to determine when new sensor data is available in either the sensor registers (27 to 32).

Interrupt Status bits get cleared as determined by INT_ANYRD_2CLEAR in the interrupt configuration register (23).

Parameters:

ITG_RDY	PLL ready
RAW_DATA_RDY	Raw data is ready

8.6 Registers 27 to 34 – Sensor Registers

Type: Read only

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
1B	27	TEMP_OUT_H							
1C	28	TEMP_OUT_L							
1D	29	GYRO_XOUT_H							
1E	30	GYRO_XOUT_L							
1F	31	GYRO_YOUT_H							
20	32	GYRO_YOUT_L							
21	33	GYRO_ZOUT_H							
22	34	GYRO_ZOUT_L							

Description:
These registers contain the gyro and temperature sensor data for the ITG-3200 parts. At any time, these values can be read from the device; however it is best to use the interrupt function to determine when new data is available.

Parameters:

TEMP_OUT_H/L	16-bit temperature data (2's complement format)
GYRO_XOUT_H/L	16-bit X gyro output data (2's complement format)
GYRO_YOUT_H/L	16-bit Y gyro output data (2's complement format)
GYRO_ZOUT_H/L	16-bit Y gyro output data (2's complement format)

8.7 Register 62 – Power Management

Type: Read/Write

Register (Hex)	Register (Decimal)	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	Default Value
3E	62	H_RESET	SLEEP	STBY_XG	STBY_YG	STBY_ZG	CLK_SEL			00h

Description:
This register is used to manage the power control, select the clock source, and to issue a master reset to the device.

Setting the *SLEEP* bit in the register puts the device into very low power sleep mode. In this mode, only the serial interface and internal registers remain active, allowing for a very low standby current. Clearing this bit puts the device back into normal mode. To save power, the individual standby selections for each of the gyros should be used if any gyro axis is not used by the application.

The *CLK_SEL* setting determines the device clock source as follows:

CLK_SEL

CLK_SEL	Clock Source
0	Internal oscillator
1	PLL with X Gyro reference
2	PLL with Y Gyro reference
3	PLL with Z Gyro reference
4	PLL with external 32.768kHz reference
5	PLL with external 19.2MHz reference
6	Reserved
7	Reserved

On power up, the ITG-3200 defaults to the internal oscillator. It is highly recommended that the device is configured to use one of the gyros (or an external clock) as the clock reference, due to the improved stability.

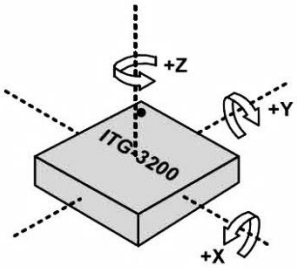
Parameters:

H_RESET	Reset device and internal registers to the power-up-default settings
SLEEP	Enable low power sleep mode
STBY_XG	Put gyro X in standby mode (1=standby, 0=normal)
STBY_YG	Put gyro Y in standby mode (1=standby, 0=normal)
STBY_ZG	Put gyro Z in standby mode (1=standby, 0=normal)
CLK_SEL	Select device clock source

9 Assembly

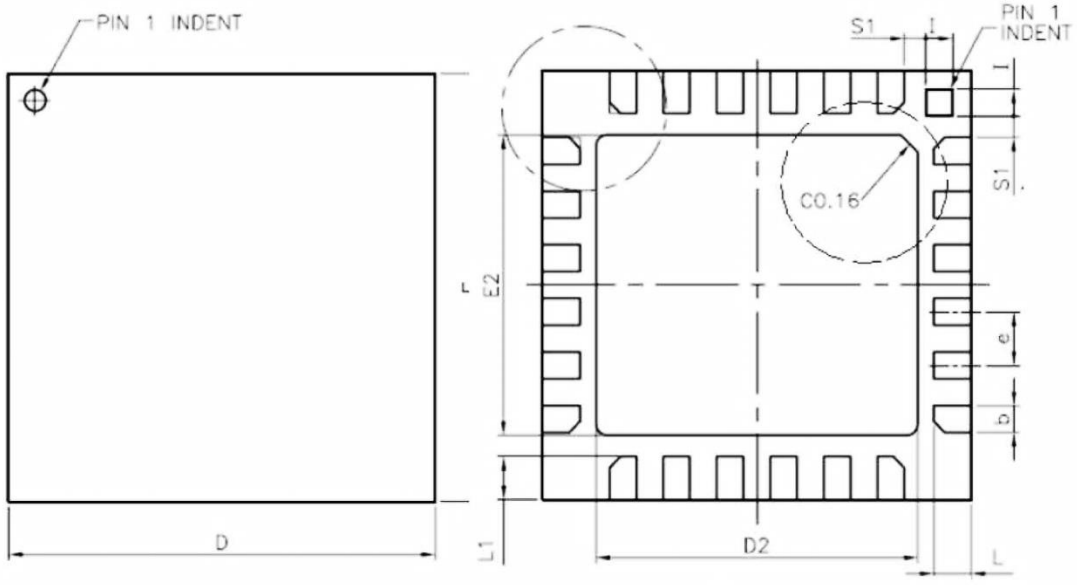
9.1 Orientation

The diagram below shows the orientation of the axes of sensitivity and the polarity of rotation.



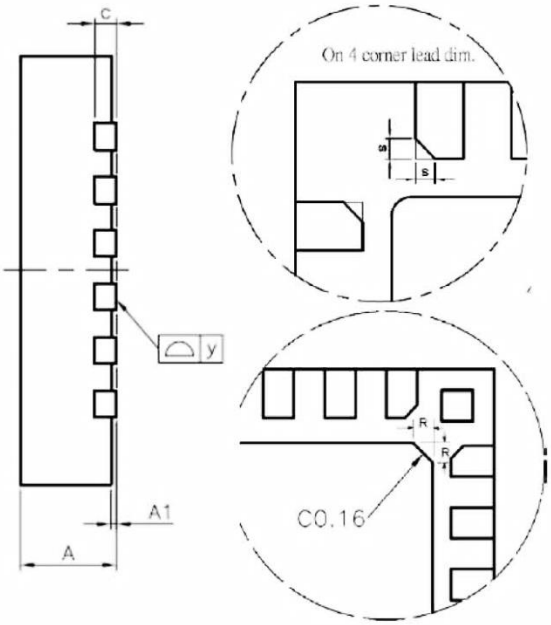
Orientation of Axes of Sensitivity and Polarity of Rotation

9.2 Package Dimensions



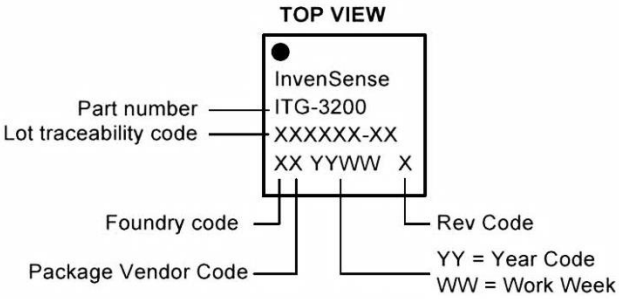
Top View **Bottom View**

SYMBOLS	DIMENSIONS IN MILLIMETERS		
	MIN	NOM	MAX
A	0.85	0.90	0.95
A1	0.00	0.02	0.05
b	0.18	0.25	0.30
c	---	0.20 REF.	---
D	3.90	4.00	4.10
D2	2.95	3.00	3.05
E	3.90	4.00	4.10
E2	2.75	2.80	2.85
e	---	0.50	---
L	0.30	0.35	0.40
L1	0.35	0.40	0.45
I	0.20	0.25	0.30
R	0.085	---	0.145
s	0.05	---	0.15
S1	0.15	0.20	0.25
y	0.00	---	0.075



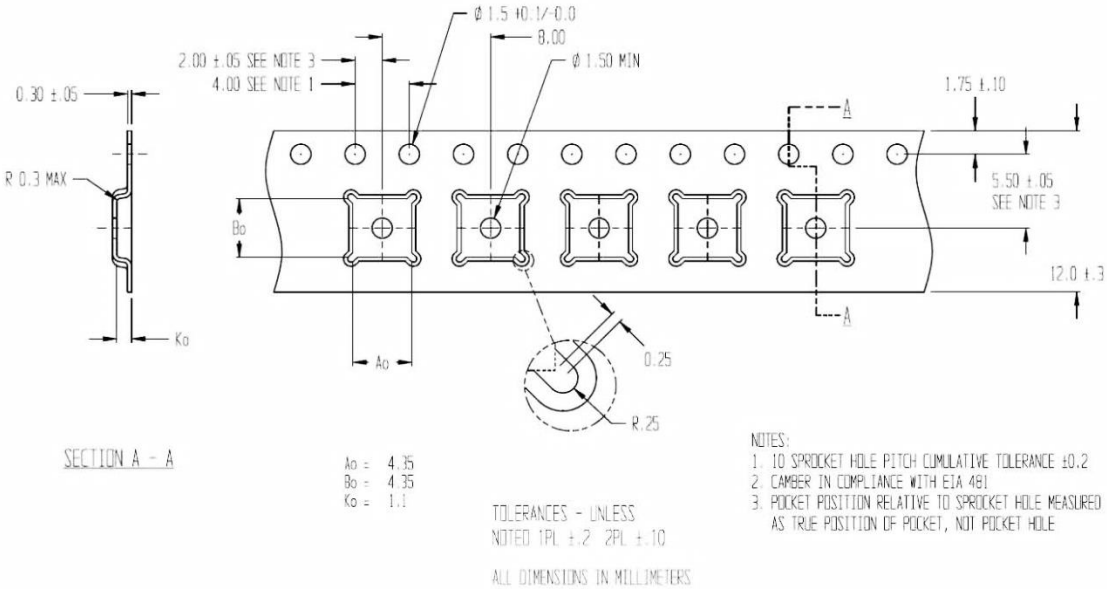
Package Dimensions

9.3 Package Marking Specification



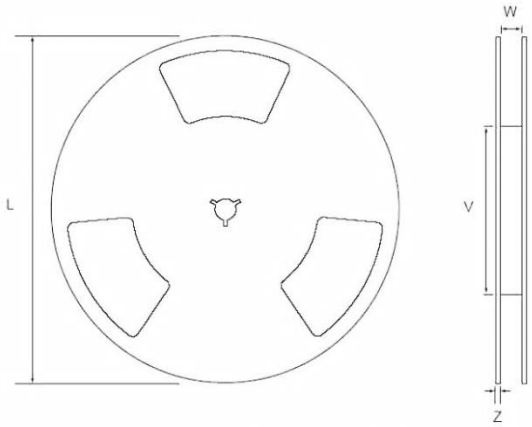
Package Marking Specification

9.4 Tape & Reel Specification



Tape Dimensions

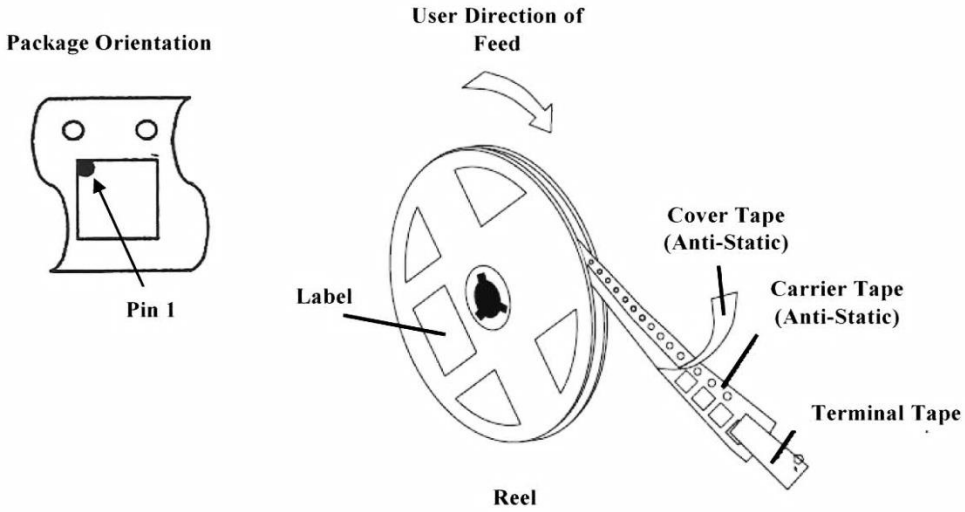
InvenSense	ITG-3200 Product Specification	Document Number: PS-ITG-3200A-00-01.4 Revision: 1.4 Release Date: 03/30/2010



Reel Outline Drawing

Reel Dimensions and Package Size

PKG SIZE	REEL (mm)			
	L	V	W	Z
4x4	330	100	13.2	2.2



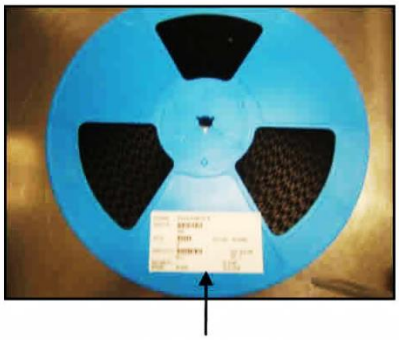
Tape and Reel Specification

Reel Specifications

Quantity Per Reel	5,000
Reels per Box	1
Boxes Per Carton (max)	3 full pizza boxes packed in the center of the carton, buffered by two empty pizza boxes (front and back).
Pcs/Carton (max)	15,000

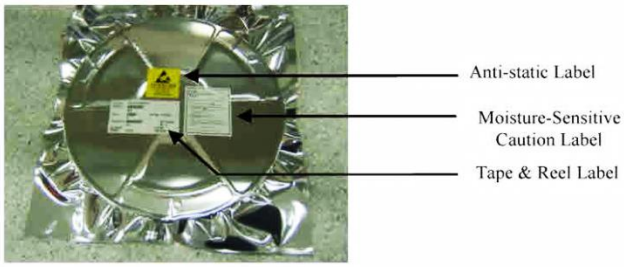
InvenSense	ITG-3200 Product Specification	Document Number: PS-ITG-3200A-00-01.4 Revision: 1.4 Release Date: 03/30/2010

9.5 Label



Location of Label

9.6 Packaging



Moisture Barrier Bag With Labels

Caution
This bag contains
MOISTURE-SENSITIVE DEVICES

LEVEL

1. Calculated shelf life in sealed bag: 12 months at <40°C and <90% relative humidity (RH)
2. Peak package body temperature: _____ °C
If blank, see adjacent bar code label
3. After bag is opened, devices that will be subjected to reflow solder or other high temperature process must
a) Mounted within: _____ hours of factory conditions
If blank, see adjacent bar code label
<30°C/60% RH, OR
b) Stored at <10% RH
4. Devices require bake, before mounting, if:
a) Humidity Indicator Card is >10% when read at 23 ± 5°C
b) 3a or 3b not met
5. If baking is required, devices may be baked for 48 hours at 125 ± 5°C
Note: If device containers cannot be subjected to high temperature or shorter bake times are desired, reference IPC/JEDEC J-STD-033 for bake procedure
Bag Seal Date: _____
If blank, see adjacent bar code label
Note: Level and body temperature defined by IPC/JEDEC J-STD-020

Moisture-Sensitive Caution Label

Reel in Box

Box with Tape & Reel Label

9.7 Soldering Exposed Die Pad

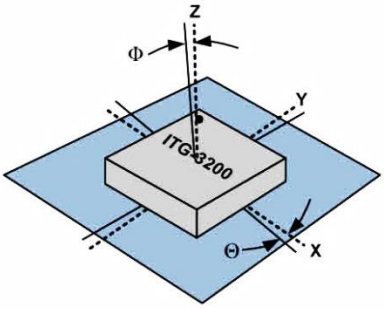
The ITG-3200 has very low active and standby current consumption. The exposed die pad is not required for heat sinking, and should not be soldered to the PCB since soldering to it contributes to performance changes due to package thermo-mechanical stress.

9.8 Component Placement

Testing indicates that there are no specific design considerations other than generally accepted industry design practices for component placement near the ITG-3200 multi-axis gyroscope to prevent noise coupling, and thermo-mechanical stress.

9.9 PCB Mounting and Cross-Axis Sensitivity

Orientation errors of the gyroscope mounted to the printed circuit board can cause cross-axis sensitivity in which one gyro responds to rotation about another axis, for example, the X-axis gyroscope responding to rotation about the Y or Z axes. The orientation mounting errors are illustrated in the figure below.



Package Gyro Axes (----------) Relative to PCB Axes (———) with Orientation Errors (Θ and Φ)

The table below shows the cross-axis sensitivity as a percentage of the specified gyroscope's sensitivity for a given orientation error.

Cross-Axis Sensitivity vs. Orientation Error

Orientation Error (θ or Φ)	Cross-Axis Sensitivity (sinθ or sinΦ)
0°	0%
0.5°	0.87%
1°	1.75%

The specification for cross-axis sensitivity in Section 3 includes the effect of the die orientation error with respect to the package.

9.10 MEMS Handling Instructions

MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) are a time-proven, robust technology used in hundreds of millions of consumer, automotive and industrial products. MEMS devices consist of microscopic moving mechanical structures. They differ from conventional IC products even though they can be found in similar packages. Therefore, MEMS devices require different handling precautions than conventional ICs prior to mounting onto printed circuit boards (PCBs).

The ITG-3200 gyroscope has a shock tolerance of 10,000*g*. InvenSense packages its gyroscopes as it deems proper for protection against normal handling and shipping. It recommends the following handling precautions to prevent potential damage.

- Individually packaged or trays of gyroscopes should not be dropped onto hard surfaces. Components placed in trays could be subject to *g*-forces in excess of 10,000*g* if dropped.
- Printed circuit boards that incorporate mounted gyroscopes should not be separated by manually snapping apart. This could also create *g*-forces in excess of 10,000*g*.

9.11 Gyroscope Surface Mount Guidelines

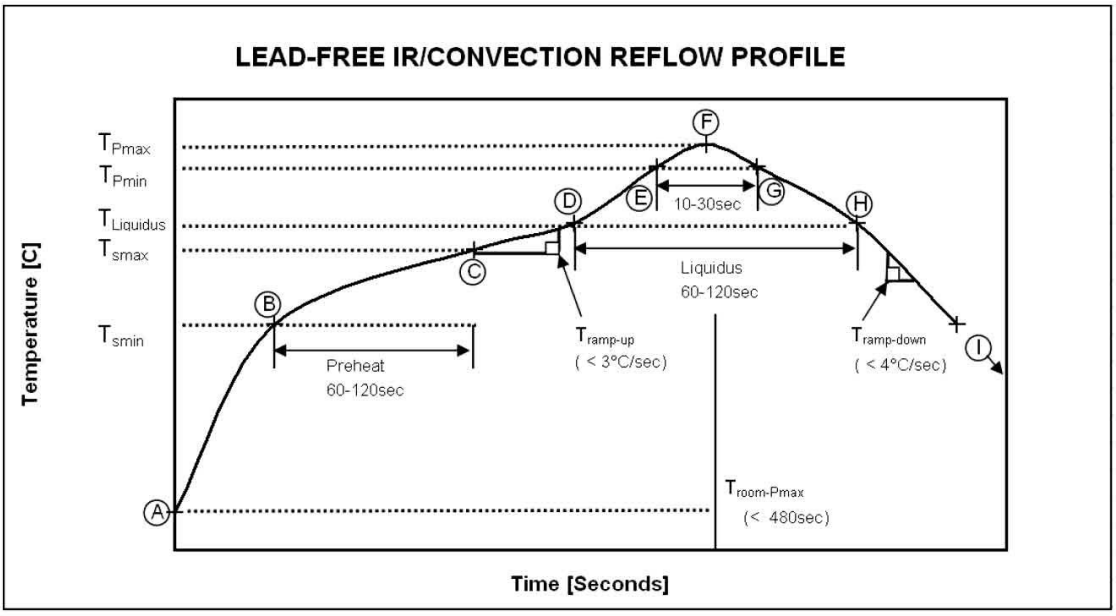
Any material used in the surface mount assembly process of the MEMS gyroscope should be free of restricted RoHS elements or compounds. Pb-free solders should be used for assembly.

In order to assure gyroscope performance, several industry standard guidelines need to be considered for surface mounting. These guidelines are for both printed circuit board (PCB) design and surface mount assembly and are available from packaging and assembly houses.

When using MEMS gyroscope components in plastic packages, package stress due to PCB mounting and assembly could affect the output offset and its value over a wide range of temperatures. This is caused by the mismatch between the Coefficient Temperature Expansion (CTE) of the package material and the PCB. Care must be taken to avoid package stress due to mounting.

9.12 Reflow Specification

The approved solder reflow curve shown in the figure below conforms to IPC/JEDEC J-STD-020D.01 (Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices) with a maximum peak temperature (Tc = 260°C). This is specified for component-supplier reliability qualification testing using lead-free solder for package thicknesses less than 1.6 mm. The reliability qualification pre-conditioning used by InvenSense incorporates three of these conforming reflow cycles. All temperatures refer to the topside of the QFN package, as measured on the package body surface. Customer solder-reflow processes should use the solder manufacturer's recommendations, making sure to never exceed the constraints listed in the table and figure below, as these represent the maximum tolerable ratings for the device. For optimum results, production solder reflow processes should use lower temperatures, reduced exposure times to high temperatures, and lower ramp-up and ramp-down rates than those listed below.



Approved IR/Convection Solder Reflow Curve

Temperature Set Points for IR / Convection Reflow Corresponding to Figure Above

Step	Setting	CONSTRAINTS		
		Temp (°C)	Time (sec)	Rate (°C/sec)
A	T_{room}	25		
B	T_{Smin}	150		
C	T_{Smax}	200	$60 < t_{BC} < 120$	
D	$T_{Liquidus}$	217		$r_{(TLiquidus-TPmax)} < 3$
E	T_{Pmin} [< TPmax-5°C, 250°C]	255		$r_{(TLiquidus-TPmax)} < 3$
F	T_{Pmax} [< TPmax, 260°C]	260	$t_{AF} < 480$	$r_{(TLiquidus-TPmax)} < 3$
G	T_{Pmin} [< TPmax-5°C, 250°C]	255	$t_{EG} < 30$	$r_{(TPmax-TLiquidus)} < 4$
H	$T_{Liquidus}$	217	$60 < t_{DH} < 120$	
I	T_{room}	25		

9.13 Storage Specifications

The storage specification of the ITG-3200 gyroscope conforms to IPC/JEDEC J-STD-020C Moisture Sensitivity Level (MSL) 3.

Storage Specifications for ITG-3200

Calculated shelf-life in moisture-sealed bag	12 months -- Storage conditions: <40°C and <90% RH
After opening moisture-sealed bag	168 hours -- Storage conditions: ambient ≤30°C at 60% RH

10 Reliability

10.1 Qualification Test Policy

InvenSense's products complete a Qualification Test Plan before being released to production. The Qualification Test Plan follows the JEDEC 47D Standards, "Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits," with the individual tests described below.

10.2 Qualification Test Plan

Accelerated Life Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
High Temperature Operating Life (HTOL/LFR)	JEDEC JESD22-A108C, Dynamic, 3.63V biased, Tj>125°C [read-points 168, 500, 1000 hours]	3	77	(0/1)
Steady-State Temperature Humidity Bias Life (1)	JEDEC JESD22-A101C, 85°C/85%RH [read-points 168, 500 hours], Information Only 1000 hours]	3	77	(0/1)
High Temperature Storage Life	JEDEC JESD22-A103C, Cond. A, 125°C Non-Bias Bake [read-points 168, 500, 1000 hours]	3	77	(0/1)

Device Component Level Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
ESD-HBM	JEDEC JESD22-A114F, Class 2 (1.5KV)	1	3	(0/1)
ESD-MM	JEDEC JESD22-A115-A, Class B (200V)	1	3	(0/1)
Latch Up	JEDEC JESD78B Level 2, 125C, +/- 100mA	1	6	(0/1)
Mechanical Shock	JEDEC JESD22-B104C, Mil-Std-883, method 2002, Cond. D, 10,000*g's*, 0.3ms, ±X,Y,Z – 6 directions, 5 times/direction	3	5	(0/1)
Vibration	JEDEC JESD22-B103B, Variable Frequency (random), Cond. B, 5-500Hz, X,Y,Z – 4 times/direction	3	5	(0/1)
Temperature Cycling (1)	JEDEC JESD22-A104D Condition N, -40°C to +85°C, Soak Mode 2, 100 cycles	3	77	(0/1)

Board Level Tests

TEST	Method/Condition/	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
Board Mechanical Shock	JEDEC JESD22-B104C,Mil-Std-883, method 2002, Cond. D, 10,000*g's*, 0.3ms, +-X,Y,Z – 6 directions, 5 times/direction	1	5	(0/1)
Board T/C	JEDEC JESD22-A104D Condition N, -40°C to +85°C, Soak Mode 2, 100 cycles	1	40	(0/1)

(1) – Tests are preceded by MSL3 Preconditioning in accordance with JEDEC JESD22-A113F

This information furnished by InvenSense is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by InvenSense for its use, or for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications are subject to change without notice. InvenSense reserves the right to make changes to this product, including its circuits and software, in order to improve its design and/or performance, without prior notice. InvenSense makes no warranties, neither expressed nor implied, regarding the information and specifications contained in this document. InvenSense assumes no responsibility for any claims or damages arising from information contained in this document, or from the use of products and services detailed therein. This includes, but is not limited to, claims or damages based on the infringement of patents, copyrights, mask work and/or other intellectual property rights.

Certain intellectual property owned by InvenSense and described in this document is patent protected. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of InvenSense. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. Trademarks that are registered trademarks are the property of their respective companies. InvenSense sensors should not be used or sold in the development, storage, production or utilization of any conventional or mass-destructive weapons or for any other weapons or life threatening applications, as well as in any other life critical applications such as medical equipment, transportation, aerospace and nuclear instruments, undersea equipment, power plant equipment, disaster prevention and crime prevention equipment.

InvenSense, InvenSense logo, ITG, and ITG-3200 are trademarks of InvenSense, Inc.

©2009 InvenSense, Inc. All rights reserved.

29.6 Bijlage 6: Onze ESC

RC PLUS

SKYMAXX PRO

VLIEGTUIG & HELI regelaars
met GOVERNOR functie

SKYMAXX PRO 35 BEC

SKYMAXX PRO 85 OPTO

SKYMAXX PRO 155 SBEC

Nederlands

GEBRUIKSAANWIJZING

TECHNISCHE GEGEVENS

SKYMAXX PRO 6 BEC

Cont. Current:	6A
Burst Current:	8A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 10 Li-xx 2 - 3
BEC:	5V / 1A
Dim.:	13 x 21 x 4mm
Weight:	5.0g

SKYMAXX PRO 12 BEC

Cont. Current:	12A
Burst Current:	16A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 12 Li-xx 2 - 4
BEC:	5V / 1A
Dim.:	21 x 22 x 4mm
Weight:	13.0g

SKYMAXX PRO 25 BEC

Cont. Current:	25A
Burst Current:	35A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 12 Li-xx 2 - 4
BEC:	5V / 2A
Dim.:	28 x 28 x 8mm
Weight:	30.0g

SKYMAXX PRO 35 BEC

Cont. Current:	35A
Burst Current:	45A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 12 Li-xx 2 - 4
BEC:	5V / 3A
Dim.:	28 x 38 x8mm
Weight:	35.0g

SKYMAXX PRO 45 SBEC

Cont. Current:	45A
Burst Current:	65A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	5V • 5.5V • 6.0V / 5A
Dim.:	30 x 56 x 11mm
Weight:	58.0g

SKYMAXX PRO 65 SBEC

Cont. Current:	65A
Burst Current:	85A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	5V • 5.5V • 6.0V / 5A
Dim.:	30 x 56 x 11mm
Weight:	58.0g

SKYMAXX PRO 85 OPTO

Cont. Current:	85A
Burst Current:	100A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	OPTO, no BEC
Dim.:	34 x 46 x 12mm
Weight:	60.0g

SKYMAXX PRO 85 SBEC

Cont. Current:	85A
Burst Current:	100A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	5V • 5.5V • 6.0V / 5A
Dim.:	34 x 46 x 13mm
Weight:	63.0g

SKYMAXX PRO 115 OPTO

Cont. Current:	115A
Burst Current:	130A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	OPTO, no BEC
Dim.:	34 x 46 x 13mm
Weight:	60.0g

SKYMAXX PRO 115 SBEC

Cont. Current:	115A
Burst Current:	130A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	5V • 5.5V • 6.0V / 5A
Dim.:	34 x 46 x 13mm
Weight:	63.0g

SKYMAXX PRO 125 SBEC

Cont. Current:	125A
Burst Current:	150A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	5V • 5.5V • 6.0V / 5A
Dim.:	55 x 72 x 17mm
Weight:	150.0g

SKYMAXX PRO 155 SBEC

Cont. Current:	155A
Burst Current:	200A
N° of Cells:	Ni-xx 5 - 18 Li-xx 2 - 6
SBEC:	5V • 5.5V • 6.0V / 5A
Dim.:	55 x 72 x 17mm
Weight:	150.0g

SKYMAXX PRO 90 HV

Cont. Current:	90A
Burst Current:	100A
N° of Cells:	Ni-xx 18 - 38 Li-xx 6 - 12
SBEC:	OPTO, no BEC
Dim.:	55 x 72 x 17mm
Weight:	135.0g

SKYMAXX PRO 120 HV

Cont. Current:	120A
Burst Current:	150A
N° of Cells:	Ni-xx 18 - 38 Li-xx 6 - 12
SBEC:	OPTO, no BEC
Dim.:	55 x 72 x 17mm
Weight:	145.0g

Garantiebepaling
Wij garanderen dat dit product vrij is van fabricage en/of montage fouten voor de periode van één jaar vanaf de datum van aankoop. Dit heeft geen invloed op uw wettelijke rechten. De garantie geldt alleen voor materiaal defecten of functionele gebreken, welke aanwezig zijn op het moment van aankoop. Gedurende deze garantie periode zal het betroffen product zonder verdere reparatiekosten worden hersteld of, indien van toepassing, gratis worden vervangen. Om aanspraak te kunnen maken op de garantie zal een factuur of ontvangstbewijs moeten worden overlegd.

Deze garantie geldt niet voor schade of vervolgschade die is ontstaan als gevolg van misbruik, wijziging of voor schade of gevolgschade die is ontstaan als gevolg van het niet naleven van de procedures zoals in deze handleiding zijn beschreven. Het gebruik van dit product geschiedt volledig onder eigen verantwoordelijkheid van de gebruiker.

Gelieve in acht te houden dat, ondanks alle inspanningen die zijn verricht om een zo goed mogelijk product met bijbehorende instructies te verkrijgen, fouten kunnen optreden waarbij noch RC-PLUS als ook de distributeurs verantwoordelijk gesteld kunnen worden voor enig verlies of schade die voortvloeit uit het gebruik van dit product of voor enig verlies of schade voortvloeiend uit onnauwkeurigheden in de bijbehorende instructies van dit product.
We behouden het recht om het ontwerp van dit product, inhoud en/of handleidingen zonder voorafgaande kennisgeving te wijzigen.

De SKYMAXX regelaars met hun high power BEC zijn speciaal ontwikkeld om te kunnen voldoen aan alle eisen die gesteld worden bij het maken van extreme vlieg figuren en het kunnen leveren van de gevraagde (piek) vermogens , welke daaraan verbonden kunnen zijn, zonder dat er sprake is van plotselinge uitval door overbelastingen.
Daarnaast zijn de SKYMAXX regelaars voorzien om bij gelijktijdig gebruik van meerdere zware servo's te kunnen blijven voeden wat typisch is bij oa CCPM uitgeruste 3D helicopters.

AANSLUITEN VAN DE KABELS
De regelaar kan rechtstreeks op de motor worden gesoldeerd of via hoogwaardige stekkers worden aangesloten. Gebruik altijd nieuwe stekkers, welke op de juiste wijze gesoldeerd dienen te worden en ter voorkoming van kortsluiting voorzien moeten zijn van krimpkous.
De verbindingskabels met de akku dienen niet langer te zijn dan 15cm

- Verbind de regelaar en motor door middel van een goede soldeer verbinding.
- Maak gebruik van goede hoogwaardige stekkers en soldeer deze op de juiste wijze.
- Zorg dat alle solderingen goed geisoleerd zijn dmv krimpkous.
- De servo stekker dient op het gas kanaal aangesloten te worden.
- Controleer of de rode (plus+) kabel van de regelaar juist zijn verbonden met de rode (plus+) kabel van de motor. Idem voor de zwarte (massa -_ kabels)

SPECIFICATIONS

Type	Cont.\Piek Amperage	Battery cell NiXX/LiPo	Gewicht (g)	BEC Output	Afmetingen lxLxH (mm)	Program
SKYMAXX PRO 6 BEC	6A\8A	5-10NC\2-3Lipo	5	5V/1A	13x21x4	Ja
SKYMAXX PRO 12 BEC	12A\16A	5-12NC\2-4Lipo	13	5V/1A	21x22x4	Ja
SKYMAXX PRO 25 BEC	25A\35A	5-12NC\2-4Lipo	30	5V/2A	28x28x8	Ja
SKYMAXX PRO 35 BEC	35A\45A	5-12NC\2-4Lipo	35	5V/3A	28x38x8	Ja
SKYMAXX PRO 45 SBEC	45A\65A	5-18NC\2-6Lipo	58	5.0V,5.5V,6.0V verstelbaar /5A	30x56x11	Ja
SKYMAXX PRO 65 SBEC	65A\85A	5-18NC\2-6Lipo	58	5.0V,5.5V,6.0V verstelbaar /5A	30x56x11	Ja
SKYMAXX PRO 85 OPTO	85A\100A	5-18NC\2-6Lipo	60	OPTO, Geen BEC	34x46x12	Ja
SKYMAXX PRO 85 SBEC	85A\100A	5-18NC\2-6Lipo	63	5.0V,5.5V,6.0V verstelbaar /5A	34x46x13	Ja
SKYMAXX PRO 115 OPTO	115A\130A	5-18NC\2-6Lipo	60	OPTO, Geen BEC	34x46x13	Ja
SKYMAXX PRO 115 SBEC	115A\130A	5-18NC\2-6Lipo	63	5.0V,5.5V,6.0V verstelbaar /5A	34x46x13	Ja
SKYMAXX PRO 125 SBEC	125A\150A	5-18NC\2-6Lipo	150	5.0V,5.5V,6.0V verstelbaar /5A	55x72x17	Ja
SKYMAXX PRO 155 SBEC	155A\200A	5-18NC\2-6Lipo	150	5.0V,5.5V,6.0V verstelbaar /5A	55x72x17	Ja
SKYMAXX PRO 90 HV	90A\100A	18-38NC\6-12 Lipo	135	OPTO, Geen BEC	55x72x17	Ja
SKYMAXX PRO 120 HV	120A\150A	18-38NC\6-12 Lipo	145	OPTO, Geen BEC	55x72x17	Ja

SKYMAXX Regelaar Series Specificaties:

- Er wordt gebruik gemaakt van de nieuwe generatie MOSFET's met verbeterde warmteafvoer wat mede zorgt voor een betrouwbare werking.
- Ook geschikt voor hoogtoerige motoren, en compatible met nagenoeg alle gangbare motoren welke in de RC worden gebruikt.
- De sub-menu instellingen kunnen eenvoudig met een programmeer box (LED-kaart) worden aangepast.
- BEC uitgangen kunnen naar keuze worden ingesteld op resp. 5.0V/5.5V/6.0V en leveren continue 5A als voeding voor de servos waardoor deze krachtig kunnen blijven werken.
- De geavanceerde Governor Mode van de B-Serie houden het motortoerental gelijk ook bij wisselende belastingen.
- Meer mogelijkheden om de motortiming aan te passen waardoor de motoren soepeler lopen en zorgen voor het geleidelijk aanlopen vanaf stilstand.
- Voorzien van een beveiliging ter voorkoming van het per ongeluk gaan draaien van de motor, indien de gasstand niet op 0 staat.
- Beveiliging tegen thermische overbelasting. Indien de temperatuur van de regelaar 110°C of hoger wordt dan zal de output worden teruggenomen om de regelaar de mogelijkheid te geven om af te koelen.
- Indien het radiosignaal wordt verloren zal de regelaar de output stoppen.
- Zeer soepele en nauwkeurige gas lineariteit.
- Nieuwe geavanceerde programmeersoftware.

De SKYMAXX-serie stelt u in staat om alle functies naar eigen behoefte te programmeren, waardoor deze regelaars zeer efficiënt en gebruiksvriendelijk zijn:

1. De gebruiker programmeerbare Type rem (wij raden u aan remmen voor maar vouwen props toepassingen)
2. De gebruiker programmeerbare Battery Type (NiCd / NiMH, LiPo, LiFe)
3. De gebruiker programmeerbare Cut Off Voltage Drempel
4. De gebruiker programmeerbare Restore Factory Setup Defaults
5. De gebruiker programmeerbare Motor Timing (ESC efficiency en gladheid te verbeteren)
6. De gebruiker programmeerbare SBEC Volt uitgang
7. De gebruiker programmeerbare Gouverneur-modus (voor helikopter toepassingen)
8. De gebruiker programmeerbare Motor Rotatie (vooruit / achteruit)
9. De gebruiker programmeerbare Start Up Sterkte (voor delicate versnellingsbak en helikopter toepassingen)
10. De gebruiker programmeerbare Low Voltage Cut Off Type (verlaagt het stroomverbruik of afsluiten van de stroom)

INSTELLINGEN:

1. SOORT REMFUNCTIE: Rem Uit / Weinig Rem / Gemiddelde Rem / Harde Rem.

* Rem Uit.-Hiermee loopt de schroef vrij wanneer de gashendel in de laagste stand staat.
* Weinig Rem- Hiermee wordt 30% van de ingestelde remwerking gegeven bij gas dicht. (Aanbevolen bij inklapbare propellers
* Gemiddelde Rem- Hiermee wordt 60% van de ingestelde remwerking gegeven bij gas dicht. (Aanbevolen bij inklapbare propellers)
* Harde Rem- Hiermee wordt 100% van de ingestelde remwerking gegeven bij gas dicht. (Aanbevolen bij inklapbare propellers)

2. BATTERIJ TYPE: NiCad / NiMh / LiPo / LiFe

* **NiCad / NiMH:** Stelt de waarde van de Lage Spannings bewaking in voor NiCad / NiMH cellen.
* **LiPo:** Stelt de waarde Lage Spannings bewaking in ter bescherming van LiPo cellen en detecteert automatisch het aantal gebruikte cellen in het accupakket.
* **LiFe:** Stelt de Low Spanningsbewakinging in voor LiFe cellen.

Opmerking: Indien NiCad / NiMH als optie is ingesteld dan wordt de fabrieksinstelling actief wat ingesteld staat op 60%. Dit is de waarde van de beginspanning bij het aansluiten van de akku waarbij de beveiliging actief wordt. Indien gewenst kan de cutoff drempel vervolgens worden gewijzigd via de Lage Spanning beveiling optie. De regelaar meet bij het aansluiten de spanning van de akku en neemt dit telkens als uitgangswaarde van de beveiliging.

3. LAGE SPANNINGS BEWAKING:

2,8V/50% • 3,0V/60% • 3,2V/65% • Geen bescherming

1. Voor Li-xx-packs aantal cellen worden automatisch herkend en vereist geen actie buiten het instellen van het juiste type accu. Er zijn 4 instelwaardes mogelijk waarbij de beveiliging actief wordt. 2,8V/ 3,0V/ 3,2V/geen beveiliging. Voorbeeld: De afslagwaardes van een 11,1V 3S Li-Po pack zou zijn 8,4V/(Laag)/ 9,0V (Middel)/ 9,6V (Hoog).

2. Voor Ni-xx/Life packs zijn de initiele afschakel spanningen -laag / midden / hoog respectievelijk 50% / 60% / 65% van de gebruikte akkupacks.
   Bijvoorbeeld: Een volledig opgeladen 6 cell NiMH accu's voltage bedraagt 1.44V x 6 = 8.64V, wanneer "LAAG" is ingesteld, zal de afschakel spanning: 8.64V x 50% = 4.3V bedragen en bij "HOOG " wordt de cut-off spanning 8.64VX 65% = 5.61V.

4. RESETTEN VAN DE FABRIEKSINSTELLINGEN:
Restore – Zet alle instelingen weer terug naar fabriekswaardes.

Type rem:	Rem UIT
Type Accu:	LiPo met automatische celdetectie
Lage Spannings bewaking:	3.0V/60%
Motor Timing:	Auto
SBEC voltage:	5.0V
Governor Mode:	RPM UIT
Motor Draairichting:	Vooruit
Start Up Sterkte:	30%
Soort Spanningsbewaking:	energieverbruik beperken

5. MOTOR TIMING : Auto, 2°, 8°, 15°, 22°, 30°
* Auto – Regelaar bepaalt zelf de optimale motortimimg
* 2 °, 8 ° - geschikt voor de meeste in-runner motoren.
* 15 °, 22 °-instelling voor motoren met 6 of meer polen.
* 30 ° - Instelling voor meerploige motoren.

In de meeste gevallen zal de automatische timing goed werken voor alle motoren. Maar voor een hoog rendement raden wij voor 2 polige motoren (algemene in-runner) een lage timing voor en en hoge timing voor 6 polige motoren en hoger (algemene out-runners). Voor een hogere snelheid, kan hoge timing worden ingesteld. Sommige motoren vereisen echter andere timing. Raadpleeg voor de juiste instelling de voorschriften van de fabrikant van de motor.
Let op: test de motor eerst op de grond voor u wijzigingen aanbrengt aan de motor timing!

6. SBEC VOLTAGE OUTPUT : 5.0V/5.5V/6.0V
Opmerking: Deze optie is alleen beschikbaar bij de SKYMAXX SBEC 5A.
Er kunnen drie verschillende SBEC uitgangsspanning worden geselecteerd.
* Nivo 1: 5.0V
* Nivo 2: 5.5V
* Nivo 3: 6.0V

7. GOVER MODE (Heli Governor-modus)
*** RPM OFF**
*** Soft Start: :** Voor de 1e Soft Start is er een vertraging van 8 seconden van 0 tot max RPM.
Voor de 2e Soft Start betekend dit een vertraging van 18 seconden van 0 tot max RPM.
Opmerking: Indien het gas na de start binnen 3 seconden wordt dicht gezet dan zal een normale start volgen.Wordt het gas na 3 seconden dicht gezet dan zal er een soft start volgen zoals ingesteld.

- Governor Mode 1:De vertraging van vanaf de start tot het maximale toerental bedraagt 23 seconden. Indien de gashendel op 80% van de maximale gasstand of lager dan 80% van de gasstand wordt genomen zou het toerental normaal gezien verminderen. Dit verlies aan toeren wordt gedetecteerd en zal automatisch worden gecompenseerd zodat het toerental constant blijft.(Opmerking: Deze optie geldt enkel voor Lage KV motoren)
- Governor Mode 2 : De vertraging van vanaf de start tot het maximale toerental bedraagt 23 seconden. Indien de gashendel op 80% van de maximale gasstand of lager dan 80% van de gasstand wordt genomen zou het toerental normaal gezien verminderen. Dit verlies aan toeren wordt gedetecteerd en zal automatisch worden gecompenseerd zodat het toerental constant blijft.(Opmerking: Deze optie geldt enkel voor Hoge KV motoren)

Opmerking 1: Indien het gas na de start binnen 3 seconden wordt dicht gezet dan zal een normale start volgen.Wordt het gas na 3 seconden dicht gezet dan zal er een soft start volgen zoals ingesteld.
Opmerking 2: Zodra de Governor Mode aktief is zal de REM van de regelaar en het ingestelde TYPE Lage Spanningsbewaking automatisch worden gereset naar REM UIT en VERMOGEN VERMINDEREN, ongeacht wat vooraf was ingesteld.

8. DRAAIRICHTING MOTOR : Vooruit/ Omgekeerd

In de meeste gevallen zal de draairichting worden aangepast door het verwissel van 2 motor kabels. Indien deze echter gesoldeerd zijn aan de regelaar kan via deze instelling de draairichting omgekeerd worden.

9. AANLOOP VERMOGEN

* Laag (10% -15% -20%) Stelt het aanloopvermogen in voor motoren welke weinig aanloop (start) stroom nodig hebben.
* Middel (25% -30% -35%) Stelt het aanloopvermogen in voor motoren welke een gemiddelde aanloop (start) stroom nodig hebben.
* Hoog (40% -45% -50%) Stelt het aanloopvermogen in voor motoren welke veel aanloop (start) stroom nodig hebben.

10. TYPE LAAGSPANNINGSBEVEILIGING: Verminderd Vermogen / Geen Vermogen

* **Vermogen Verminderen - De regelaar regelt het terug zodra de ingestelde Lage Spannings-beveiling is bereikt. (Aanbevolen)**
* **Geen Vermogen - De regelaar stopt het motorvermogen indien de ingestelde LageSpan-ningsbeveiliging is bereikt.**

DE PROCEDURE / INSTRUKTIE VAN HET PROGRAMEREN MET BEHULP VAN DE ZENDER

1. HET AKTIVEREN VAN DE PROGRAMEERSTAND
2. KEUZE VAN DE TE PROGRAMMEREN INSTELLING
3. INSTELLEN VAN DE GEWENSTE WAARDE
4. AFKOPPELEN VAN DE AKKU

1. HET AKTIVEREN VAN DE PROGRAMEERSTAND

1. Zet de zender aan en zet de gashendel op de maximale stand (VOL GAS)
2. Sluit de akku aan.
3. Wacht ongeveer 2 seconden totdat u twee korte piepjes (•• ••) hoort wat bevestigt dat de regelaar nu in de programmeermodus staat.

2. KEUZE VAN DE TE PROGRAMMEREN INSTELLING

2. KEUZE VAN DE TE PROGRAMMEREN INSTELLING

De programmeermodus doorloopt een cyclus waarbij elk programmeerbaar onderdeel wordt aange-geven dmv 4 gelijke geluidjes. Er zijn 10 verschillende tonen die achtereenvolgens worden weergege-ven. Wanneer het gewenste item wordt weergegeven beweeg dan de gashendel naar minimum (GAS DICHT) De motor zal een geluid geven wat aangeeft dat het gewenste onderdeel kan worden ingesteld.

3. INSTELLEN VAN DE GEWENSTE WAARDE

De motor zal achtereenvolgens piepjes in een bepaalde frequentie laten horen. Zet de gashendel maximaal (VOL GAS) indien de gewenste waarde is bereikt. De motor zal dmv een toon aangeven dat de waarde is ingesteld.

4. AFKOPPELEN VAN DE AKKU.

Ontkoppel de accu indien u klaar bent met instellen. Indien u verder wenst te gaan, wacht dan op de volgende cyclus verder gaat en stel de gewenste waarde in.

Opmerking: U kunt ook de LED-programmeerbox gebruiken om de gewenste waardes in te stellen. De programmeerbox is optioneel en voor de werkwijze dient u de bijgeleverde instructies te volgen.

DE TONEN VAN DE PROGRAMMEERCYCLUS ZIJN ACHTEREENVOLGENS:

1	Beep-	TYPE REM (1 korte toon)
2	Beep-Beep-	TYPE ACCU (2 korte tonen)
3	Beep-Beep-Beep-	LAGE SPANNINGSBEWAKING (3 korte tonen)
4	Beep-Beep-Beep-Beep-	RESETTEN FABRIEKSWAARDES (4 korte tonen)
5	Beep-----	MOTOR TIMING (1 lange toon)
6	Beep-----Beep-	SBEC SPANNING (1 lange toon 1 short tone)
7	Beep-----Beep- Beep-	GOVERNOR MODE(1 lange toon 2 korte tonen)
8	Beep-----Beep- Beep- Beep-	MOTOR DRAAIRICHTING (1 lange toon 3 korte tonen)
9	Beep-----Beep- Beep- Beep- Beep-	AANLOOP WAARDE (1 lange toon 4korte tonen)
10	Beep----- Beep-----	LAGE SPANNINGSBEWAKING TYPE (2 korte tonen)

OPMERKING. 1 lange toon (BEEP - - - - -) komt overeen met 5 korte tonen (BEEP -)

Tones / Program	Bip-	Bip-Bip-	Bip- Bip- Bip-	Bip-Bip- Bip-Bip-	Bip-----	Bip-----Bip-	Bip-----Bip-Bip-	Bip-----Bip-Bip-Bip-	Bip-----Bip-Bip-Bip-Bip-
Rem Type	Rem OFF	Lage rem	Medium rem	hoge rem					
Akku Type	NiCd/NiMH	LiPo	LiFe						
Cutoff (laags-panning)	2.8V/50%	3.0V/60%	3.2V/65%	geen bescherming					
Terug naar fabrieksinstel-lingen	Restore								
Motor Timing	Auto	2°	8°	15°	22°	30°			
SBEC Output	5.0V	5.5V	6.0V						
Governor Mode	RPM OFF	eerste soft start	tweede soft start	Governor Mode 1	Governor Mode 2				
Draairichting motor draai-richting motor	vooruit	Achteruit							
Aanloop ver-mogen	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Type laagspan-ningsbeveiliging	Vermogen Verminderen	Geen Ver-mogen							

Bijvoorbeeld: Het instellen van de motor timing ---- 15 °

1). Zet uw zender an en zet de gashendel op maximaal (VOL GAS). Sluit de accu aan en wacht ongeveer 2 seconden totdat u twee keer een serie tonen hoort.(•• •• •• ••) Dit bevestigt dat de regelaar nu de programmeermodus staat.

2). Zet na het horen van «Beep -----», de gashendel dicht. (GAS UIT)

3).Zet na het horen van «Beep-Beep-Beep-Beep-», de gashendel maximaal (VOL GAS) De motor zal dit aangeven met geluidssignaal wat betekend dat de nieuwe instelling is opgeslagen.

4). Ontkoppel de accu.

HET GEBRUIK VAN DE NIEUWE REGELAAR

Het verkeerd aansluiten van de polariteit of een kortsluiting zal de regelaar beschadigingen. Kontroleer daarom alle verbindingen en aansluitingen zeer nauwkeurig VOORDAT de accu wordt aangesloten.

INGEBOUWDE BEVEILIGINGSFUNCTIES VAN DE REGELAAR

1. **Hoge temperatuursbeveiliging.:** Wanneer de temperatuur van de regelaar de 110 ° C overschrijdt, zal de regelaar het vermogen terug nemen om de regelaar de gelegenheid te geven af te koelen.
2. **Verlies van het Radio signaal:** Indien er geen radiosignaal wordt gedetecteerd zal de regelaar de voeding naar de motor stoppen.

HET EERSTE MAAL IN GEBRUIK NEMEN VAN DE REGELAAR EN CALIBREREN VAN HET GAS

De SKYMAXX regelaar is voorzien van een Automatische Gas Calibratie wat zorgt voor de rustige en geleidelijke respons op het gas over het gehele bereik van de gashendel. De calibratie wordt een keer uitgevoerd en de regelaar "leert en onthoudt" de uitgangssignalen van de zender en zal niet wijzigen zolang er geen wijzigingen in de zender worden doorgevoerd.

1. Zet de zender AAN en geef vol gas.
2. Sluit de akku aan op de ontvanger, motor en regelaar. Wacht ongeveer 2 seconden waarna de motor 2 maal zal piepen. Vervolgens de gashendel geheel terugnemen, waarna de motor zal piepen.Dit betekend dat de regelaar de range van de gashendel heeft bepaald.De calibratie is voltooid en de regelaar is klaar voor gebruik. *Het gas is nu gecalibreerd en de regelaar is gereed voor gebruik*

NORMALE OPSTART PROCEDURE VAN DE REGELAAR

1. Zet uw zender AAN en zet de gashendel geheel dicht.
2. Sluit de accu aan.
3. Wanneer de regelaar voor het eerst wordt opgestart, zal de regelaar 2 maal een pieptoon laten horen. Dit geeft aan dat de regelaar paraat staat.

* De eerste reeks tonen geeft het aantal cellen weer van het LiPo pakket wat is aangesloten op de regelaar.

(Drie pieptonen (***) duidt op een 3 cell LiPo Pack terwijl 4 pieptonen (****) aan geeft dat er een 4 cellen LiPo pack is aangesloten).

* De tweede set van tonen staat voor REM status (een pieptoon (*) voor de REM "AAN" en twee pieptonen (**) voor REM "UIT"). *Het regelaar is nu klaar voor gebruik.*

ALGEMENE VEILIGHEIDS MAATREGELEN

Zorg dat er geen schroef of tandwiel is aangeloten voordat alle instellingen en functies volledig met de zendinstallatrie is getest en u er zeker van bent dat alles correct functioneert.

- Gebruik nooit defecte accu's of accu's die ernstige beschadigingen vertonen.
- Gebruik nooit accu's waarvan bekend is dat oververhit raken tijdens gebruik.
- Gebruik nooit kortsluiting batterij of klemmen van de motor.
- Gebruik altijd de juiste isolatiemateriaal/krimpkousvoor het isoleren van kabels.

• Gebruik altijd de juiste stekkers die ook geschikt zijn voor hoge stromen.
• Sluit geen accu's aan met meer cellen dan de regelaar voorschrijft en sluit niet meer servo's aan dan waarvoor de regelaar bedoeld is.

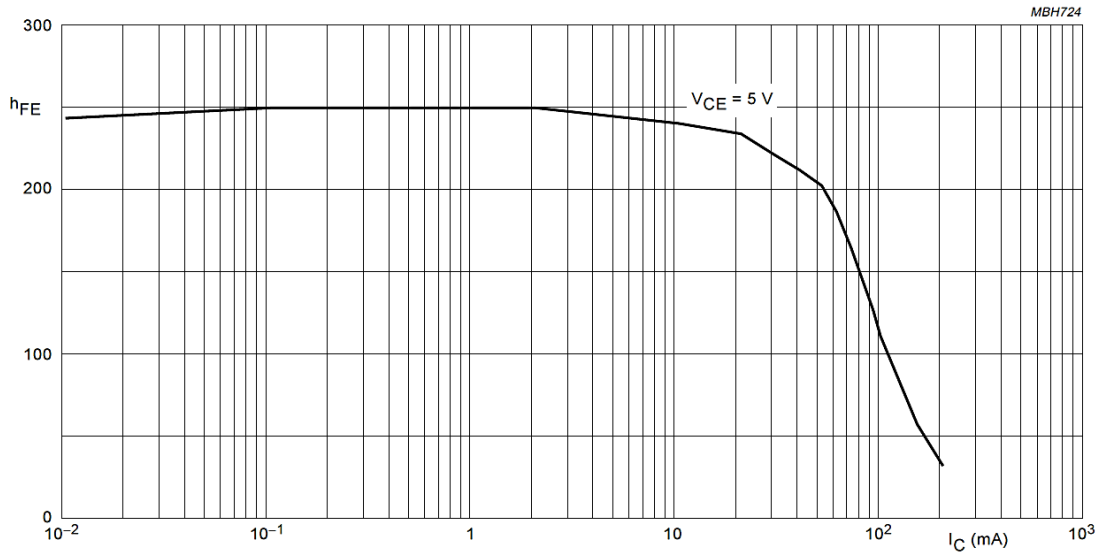
Verwisseling van de accupolen zal de regelaar beschadigen en valt niet onder de garantie.

- Plaats de regelaar op een geschikte plaats met voldoende ventilatie.De regelaar is voorzien van een ingebouwde beveiliging tegen oververhitting zodra de 110C wordt bereikt. De regelaar zal de voeding naar de motor stoppen.
- Gebruik de juiste voorgeschreven accu's en let op de juiste polariteit.
- Zet de zender aan en zorg dat de gashendelnaar beneden (GAS UIT) staat voor het aansluiten van de accu.
- Zet nooit de regelaar UIT met de accu nog aangesloten.
- Suit de accu pas aan voor de vlucht en laat de accu niet aangesloten na de vlucht.
- Ga met de nodige voorzichtigheid om met uw toestel indien de accu is aangesloten en ga nooit "in the line of fire" staan en houdt u weg bij de propellor/of draaiende delen.
- Zorg ervoor dat er geen vocht of water in contact kan komen met de regelaar.
- Houdt u aan de veiligheidsvoorschriften van voorgeschreven regels van uw vliegterrein of club.

TROUBLE SHOOTING

Probleem	Mogelijke oorzaak	Oplossing
Motor werkt niet, en er geen hoorbaar signaal terwijl de servo's normaal functioneren nadat de regelaar is aangezet	De GAS CALIBTRATIE is nog niet doorgevoerd.	GAS CALIBRATIE uitvoeren
Motor draait niet en geen toon hoorbaar. Servos werken ook niet nadat de akku is aangesloten	-GEEN/SLECHT contact tussen akku en regelaar	-Plaats nieuwe stekkers/maak goede verbinding.
	-Geen spanning	-Laad of vervang de akku
	-Slechte soldering	-Soldeer op de juiste wijze
	-Signaal kabel van regelaar zit verkeerd om in de ontvanger	-Controleer en draai de stekker om
	-Fout in de regelaar	-Vervang de regelaar
Motor heeft verkeerde draairichting.	Kabels van de motor verkeerd aangeloten op de regelaar	Draai 2 van de 3 aansluitkabels om tussen regelaar en motor. Of zet via de programeer functie de MOTOR REVERSE mode om
De motor loopt op een vreemde manier aan / regelaar wordt te heet.	-Mogelijke stoorsignaal in de omgeving	-De kans bestaat dat er een stoorsignaal in de omgeving op treedt. Herstart de regelaar en controleer op de grond en op meerdere plekken of er een storing op treedt.Test dit bij blijvende problemen ook op een andere vliegplek.
	-Slechte ventilatie/warmte afvoer	-Plaats de regelaar op een plek waar er deze beter ventileert.
	-De servo's lopen te zwaar en overbelasten de regelaar	-Gebruik servo's die de maximale BEC stromen niet overschrijden.
	Te zware motor en/of propellor gemonteerd.	-Plaats een kleinere propellor en.of plaats motor met het maximaal toegestane vermogen.

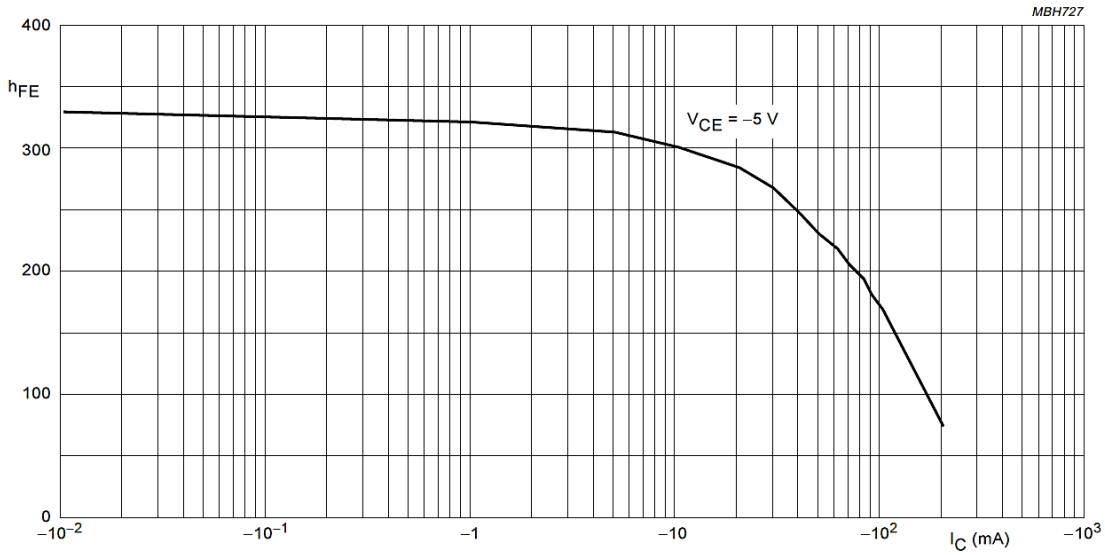
29.7 Bijlage 7: Transistor BC547B



BC546B; BC547B.

Fig.3 DC current gain; typical values.

29.8 Bijlage 8: Transistor BC557B



BC556B; BC557B.

Fig.3 DC current gain; typical values.