

Eindrapportage Adaptief Tilhulpsysteem

*Eindverslag van de ontwikkeling van het elektrische tilhulp- en
balanceersysteem voor Festo B.V. bestaande uit Festo onderdelen.*

Jasper Daleman
11042346

Eindrapportage Adaptief Tilhulpsysteem

*Eindverslag van de gehele ontwikkeling van het elektrische tilhulp- en
balanceersysteem voor Festo B.V. bestaande uit Festo onderdelen.*

FESTO

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Jasper Daleman
11042346
Festo B.V.
5 juni 2015
Delft

Voorwoord

Mijn naam is Jasper Daleman en gedurende de periode van 9 februari 2015 tot 5 juni 2015 heb ik stage gelopen bij Festo B.V. te Delft. Ik ben een vierdejaars student Mechatronica aan de Haagse Hogeschool en heb deze stage uitgevoerd in het kader van mijn afstudeertraject. Hiervoor is een stage van 17 weken verplicht voordat de afstudeerzitting plaatsvindt. In dit rapport zijn mijn bevindingen te lezen die ik gedurende de stage heb opgedaan.

Dit rapport is geschreven voor de afstudeerbegeleiders van de opleiding Mechatronica van de Haagse Hogeschool en voor aankomende afstudeerders. Daarnaast is het rapport geschreven als naslagwerk voor Festo waarin de kennis is gedocumenteerd die ik met deze opdracht heb opgedaan.

Ik wil graag mijn begeleiders dhr. van der Ree en dhr. Tukker bedanken voor de aandachtige begeleiding gedurende de opdracht. Daarnaast wil ik Festo B.V. bedanken voor de aangeboden mogelijkheid tot het uitvoeren van deze stage. Tot slot wil ik mevr. Le Mair en dhr. Kouwe bedanken voor de goede begeleiding gedurende het afstudeertraject.

Jasper Daleman
Delft, 5 juni 2015

Contents

Voorwoord	5
Figurenlijst	7
Samenvatting	8
Summary	9
Verklarende woordenlijst	10
Symbolenlijst	11
1 Inleiding	12
2 Opdrachtschrijving	13
2.1 Probleembeschrijving	13
2.2 Doelstelling	14
2.3 Scope en afbakening	14
2.4 Deliverables	14
3 Aanpak	15
3.1 Fasering	15
3.2 Werkpakketten	15
3.3 Teamsamenstelling	15
4 Basiskennis	16
4.1 Lineaire as	16
4.1.1 Tandriemas	16
4.1.2 Spindelas	16
4.1.3 Lineaire motor	16
4.2 Elektromotor	16
4.2.1 Servomotor	16
4.2.2 Stappenmotor	17
4.3 Motorcontroller	18
5 Concept	19
5.1 Situatiebeschrijving	19
5.2 Pakket van eisen	20
5.3 Onderdelenkeuze concept	22
5.3.1 Lineaire as	22
5.3.2 Elektromotor	23
5.3.3 Motorcontroller	24
5.3.4 PLC	24
5.4 Systeemgrenzen	24
5.4.1 Maximaal toelaatbare massa	24
5.4.2 Maximaal haalbare snelheid	25
5.4.3 Minimale motorkoppel	25
5.5 Testopstelling	26
6 Regelsysteem	27
6.1 Regelkring motorcontroller	27
6.2 Regelsysteem	27
6.2.1 Massabepaling	28
6.2.2 Verwachte motorstroom berekenen	29
6.2.3 Snelheid uitsturen	31
7 Ontwerp	32
7.1 Tandriemas	32
7.2 Motor	34
7.3 Motorcontroller en PLC	35
7.4 Model	35
8 Conclusies en aanbevelingen	36
Bronvermelding	37
BIJLAGE A1: Aansluitschema	38
BIJLAGE A2: PLC-programmatuur	39
BIJLAGE B: Voorstel Afstudeeropdracht	42
BIJLAGE C: Plan van Aanpak	43
BIJLAGE D: Testrapport snelheidsmeting	56
BIJLAGE E: Testrapport statische wrijving	63
BIJLAGE F: Testrapport dynamische wrijving	76
BIJLAGE G: Nauwkeurigheid massabepaling	86
BIJLAGE H: Testrapport intuïtiviteit	94

Figurenlijst

Figuur 2-1: Verplaatsing van een doos.....	13
Figuur 2-2: Tilhulpsysteem klant.....	13
Figuur 2-3: Focus verticale as.....	14
Figuur 3-1: Werkpakketten	15
Figuur 4-1: Tandriemas	16
Figuur 4-2: Spindelass	16
Figuur 4-3: Lineaire motor.....	16
Figuur 4-5: Servomotor exploded view	17
Figuur 4-6: Stappenmotor exploded view	17
Figuur 4-4: Gesloten circuit servomotor.....	17
Figuur 4-7: Cascaderegeling motorcontroller.....	18
Figuur 5-1: Tilhulpsysteem klant.....	19
Figuur 5-2: Basissysteem één as.....	19
Figuur 5-3: Krachtenspel gebruiker.....	20
Figuur 5-4: Stroom- tijddiagram gebruiker/normaal.....	20
Figuur 5-5: EGC-tandriemas	22
Figuur 5-6: Servomotor EMMS-AS.....	23
Figuur 5-7: CMMP-AS	24
Figuur 5-8: Krachten motor	24
Figuur 5-9: Momentenschema motor.....	25
Figuur 5-10: Testopstelling	26
Figuur 6-1: Regelsysteem basis	27
Figuur 6-2: Regelsysteem geheel	27
Figuur 6-3: Regeling massabepaling	28
Figuur 6-4: Stroom- tijddiagram normaal/gemeten	29
Figuur 6-5: Regelsysteem verwachte motorstroom.....	29
Figuur 6-6: Snelheid- tijddiagram opwaartse beweging.....	30
Figuur 6-7: Stroom- tijddiagram opwaartse beweging + verwachting	30
Figuur 6-8: Snelheid uitsturen	31
Figuur 7-1: Krachtenschema tandriemas	32
Figuur 7-2: Momentenschema motor.....	34

Tabellenlijst

Tabel 3-1: Teamsamenstelling	15
Tabel 5-1: Algemene eisen.....	21
Tabel 5-2: Balanceren en aandrijven as	21
Tabel 5-3: Veiligheidseisen	21
Tabel 5-4: Intuïtieve eisen.....	22
Tabel 5-5: Keuzetabel Lineaire as	22
Tabel 5-6: Eigenschappen tandriemas.....	23
Tabel 5-7: Keuzetabel elektromotor.....	23
Tabel 5-8: Eigenschappen servomotor.....	23
Tabel 5-9: Eigenschappen servomotor met vertraging.....	23
Tabel 5-10: Eigenschappen motorcontroller	24
Tabel 7-1: ELGA-80-2000-TB-KF	32
Tabel 7-2: EGC-120-2000-TB-KF-GK	33
Tabel 7-3: EGC-HD-160-2000-TB-KF-GK	33
Tabel 7-4: Keuzetabel tandriemas	33
Tabel 7-5: EMMS-AS-100-L-HS-RSB.....	34
Tabel 7-6: EMMS-AS-140-S-HS-RSB	34
Tabel 7-7: EMMS-AS-140-L-HS-RSB.....	34
Tabel 7-8: Keuzetabel servomotor	35
Tabel 7-9: Eigenschappen motorcontroller	35

Samenvatting

In dit document is de ontwikkeling van een adaptief en intuïtief tilhulpsysteem beschreven. Het is ontwikkeld voor Festo B.V. te Delft om de mogelijkheden van de eigen apparatuur in beeld te brengen. Festo is een leverancier van pneumatische, elektrische en hybride technologieën voor de automatisering van productieprocessen. Het onderzoek richt zich op de ontwikkeling van een volledig elektrisch tilhulpsysteem dat massa's tot 50 kg kan verplaatsen. De gebruiker moet hiervoor 20 % van de versnellende kracht uitoefenen, de overige 80 % wordt ondersteund door de motor.

De Electric Drives (elektrische aandrijvingen) productgroep van Festo bestaat onder andere uit de onderdelen:

- Lineaire- of roterende as
- Servo- of stappenmotor
- Motorcontroller.

Het tilhulpsysteem is ontwikkeld voor een lineaire tandriemas, een servomotor en een bijbehorende motorcontroller. Om de motorcontroller cyclisch (constant) te kunnen aansturen en uitlezen, is een PLC gebruikt. In de PLC is een regelsysteem verwerkt dat op basis van een motorstroombetaling en de beweging kan analyseren wat de gebruiker aan kracht uitoefent. Op basis hiervan wordt een beweging gerealiseerd die natuurlijk aanvoelt voor de gebruiker.

Het regelsysteem bepaalt eerst de massa die aan de slede of op het plateau is bevestigd. Dit is afhankelijk van de laatst bewogen richting. Op basis van de massa aan de slede wordt bepaald welke massa de gebruiker moet versnellen. Dit is zoals gezegd een vijfde van de massa aan de slede. Met een schakelaar wordt er aan het systeem aangegeven dat er bewogen mag worden. De PLC start dan met het berekenen van een verwachte motorstroom op basis van de beweging. De verwachte motorstroom wordt vergeleken met de gemeten motorstroom en op basis daarvan wordt de kracht die de gebruiker uitoefent, bepaald. Met de formule $a = F/m_{\text{gebruiker}}$ wordt de versnelling berekend die gerealiseerd moet worden. Om de versnelling te realiseren moet de snelheid in een bepaalde tijd worden opgehoogd. De functies zijn afkomstig uit de testrapporten uit de Bijlagen D tot en met -G.

Op basis van dit rapport kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is om met Festo onderdelen een adaptieve tilhulp te realiseren dat werkt op basis van motorstroombetalingen. De testresultaten laten zien dat het regelsysteem zou kunnen werken, maar volgens Bijlage H: Testrapport Intuïtiviteit werkt het regelsysteem nog niet optimaal. Het systeem is nog erg instabiel. Het is aan te bevelen nader onderzoek te doen naar de aard van de wrijvingen in het systeem en het berekenen van de kracht die de gebruiker uitoefent. Aangenomen is dat de bepaalde wrijvingen zijn veranderd na het betrekken van de PLC en dat met het in beeld brengen van de metingen via de PLC veel winst behaald kan worden op de stabiliteit. Alle metingen moeten in het vervolg worden uitgevoerd met dezelfde regelkring van de motorcontroller.

Summary

This document describes the development of an adaptive and intuitive lift system. The lift system is developed for Festo B.V. in Delft to examine new possibilities of their products. Festo is a supplier of pneumatic, electric and hybrid solutions for the automation industry. This research project focuses on the development of a full electric adaptive lift system. It should be capable to lift and move masses up to 50 kg and let the user accelerate 20 % of the mass.

The Festo Electric Drives product range consists at least out of the following products:

- Linear- or rotary drives
- Servo- or stepper motors
- Motor controllers

The adaptive lift system is developed for a toothed belt drive, a servo motor and a motor controller. To control the motor controller at all time, a PLC is used. The PLC consists of a control system based on measuring the motor current and actual velocity. It can detect the force of the user from the difference between the expected motor current and the actual motor current. Based on the force of the user, a movement is realized.

At first, the control systems detects the mass attached to the axle. This is dependent of the last direction. From this mass, the mass the user must accelerate is determined. With a button the input is given that the axle is free to move. The PLC starts calculating the expected motor current based on the actual movement of the system. Based on the comparison between the expect- and the actual motor current, the force of the user is calculated. With the formula $a = F/m_{\text{gebruiker}}$ the asked acceleration is calculated. To realize an acceleration, the actual velocity has to increase in a time step. The functions used for the control system are written in the attachments D to G.

Based on this document the conclusion can be made that it is possible to make an adaptive lift system based on Festo components that works on measuring the motor current. The test results show that the control system should work. Based on attachment H, the system does not work perfectly. It is instable and sometimes a lot of force is needed to change the direction. A recommendation based on this document is to analyze the cause of internal resistances and their influences on the system. Based on this recommendation, the adaptive lift system can be made a lot more stable. The calculation of the expected motor current can be made more precise when the causes of the resistance are clear. All new tests need to be executed with a PLC and a motor controller, all in the same mode.

Verklarende woordenlijst

Adaptief	Het aanpassen naar een bepaalde omstandigheid. In deze context: aanpassen naar de wens van de gebruiker.
CoDeSys	Het programma (en programmeertaal) waarmee de PLC van Festo kan worden geprogrammeerd.
Electric Drives	Vertaald: Elektrische Aandrijvingen. Hiermee wordt elektrisch een lineaire- of roterende beweging gerealiseerd.
Feed constante	De verplaatsing in mm/omw over een lineaire as van Festo.
Input	Het inkomende/ingegeven signaal van een regelaar of proces.
Intuïtie	Het aanvoelen van bepaalde eigenschappen zonder erover na te denken. In deze context; Het systeem verplaatsen zonder erover na te denken wat er voor kracht nodig is om de totale massa te verplaatsen.
Massa	Het gewicht dat een bepaald object heeft, een massa.
Moment	Een maat voor het rotatie effect van een kracht. $\text{Moment} = \text{kracht} * \text{arm}$.
Motorcontroller	Het product waarmee de motorstroom van de elektromotor wordt ingeregeld. Met de motorcontroller kunnen bepaalde parameters worden ingesteld en uitgelezen.
Motorstroom	De stroom die de motor nodig heeft om zijn kracht te kunnen leveren.
Output	Het uitgaande signaal van een regelaar of proces.
PLC	Een Programmable Logic Controller. Deze controller kan worden geprogrammeerd om bepaalde activiteiten cyclisch en in een bepaalde volgorde uit te voeren.
Poelie	Een wiel- of snaarschijf die wordt gebruikt om onderdelen aan te drijven. In dit geval wordt de tandriem aangedreven door een poelie
Snelheid	De verplaatsing van een object in een bepaalde tijdseenheid, bijvoorbeeld 1 meter per seconde.
Spindel	Schroefdraad bedoeld voor de aandrijving van voorwerpen. Dit schroefdraad wijkt af van het soort schroefdraad dat wordt gebruikt voor bevestigingen.
Tandriem	Een riem met tanden die door een poelie wordt aangedreven.
Tilhulpsysteem	Systeem dat is ontworpen om de tillende beweging te ondersteunen, niet volledig over te nemen.
Versnelling	De verandering van de snelheid in een bepaalde tijdseenheid, bijvoorbeeld 2 meter per seconde die per seconde verandert. Korter: 2 m/s^2 .
Wrijving	Een weerstandskracht die ontstaat als twee oppervlakken tegen elkaar aanschuiven. Deze kracht werkt altijd tegen de bewegingsrichting in.
Zwaartekracht	De zwaartekracht is de aantrekkende kracht op aarde die ervoor zorgt dat alles hier op aarde naar de grond getrokken wordt. De zwaartekracht kan worden berekend met behulp van een gravitatieconstante g .

Symbolenlijst

a	Versnelling	m/s^2
C_f	Feed constante	mm/omw
C_m	Motorconstante	Nm/A
F_a	Versnellingskracht	N
F_m	Motorkracht	N
F_w	Wrijvingskracht	N
F_z	Zwaartekracht	N
g	Gravitatieconstante	m/s^2
I	Motorstroom	A
I_{gemeten}	Gemeten motorstroom	A
I_{verwacht}	Verwachte motorstroom	A
J	Traagheidsmoment	kgcm^2
m	Massa	kg
$m_{\text{gebruiker}}$	Massa die de gebruiker moet aanvoelen	kg
m_{gemeten}	Massa gemeten door het systeem	kg
m_{verwacht}	Massa verwacht te meten	kg
m_{slede}	Massa bevestigd aan de slede	kg
n	Toerental	omw/min
r_{poelie}	Straal van de poelie van de as	m
s	Afstand tot het draaipunt (Moment)	m
T	Koppel	Nm
T_w	Koppel veroorzaakt door de wrijving	Nm
T_m	Koppel geleverd door de motor	Nm
v	Snelheid	m/s

1 Inleiding

Dit rapport is opgesteld om Festo inzicht te geven in de mogelijkheden om met eigen apparatuur een adaptief en intuïtief tilhulpsysteem te realiseren. Een tilhulpsysteem is voor de markt van belang om bepaalde zware werkzaamheden te kunnen verlichten. Voor Festo is de ontwikkeling van dit tilhulpsysteem een onderzoek naar nieuwe mogelijkheden van de eigen apparatuur. De uitkomsten van dit onderzoek kunnen worden gebruikt bij andere oplossingen van Festo.

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van een adaptief en intuïtief tilhulpsysteem op basis van Festo apparatuur. Het tilhulpsysteem is ontwikkeld om objecten met variabele massa's tussen de 5 en 50 kg te kunnen verplaatsen, waarbij de gebruiker zorgt voor de kracht die nodig is voor de versnelling. Deze kracht wordt door het systeem met een factor 5 ondersteunt, wat inhoudt dat de gebruiker nog maar $1/5^e$ van de massa hoeft te versnellen. De gebruiker voelt hierbij nooit de zwaartekracht. In dit rapport zijn de uitkomsten uit de verschillende testrapporten uit de bijlagen toegepast om het uiteindelijke ontwerp mee te realiseren.

In hoofdstuk 2 is de opdrachtoomschrijving beschreven, waarin de probleembeschrijving en doelstelling te vinden zijn. In hoofdstuk 3 is een aanpak van de opdracht opgesteld. Om de rest van het rapport te kunnen begrijpen, is er in hoofdstuk 4 een stuk basiskennis over de productgroep Electric Drives van Festo bijgevoegd. Vervolgens is het concept beschreven waarmee de functionaliteit is getest, beschreven. De functionaliteit is geautomatiseerd volgens een bepaald regelsysteem dat is beschreven in hoofdstuk 6. Het concept is in hoofdstuk 7 opgeschaald naar een ontwerp dat tot 50 kg kan verplaatsen en tot slot zijn er conclusies en aanbevelingen opgesteld. Alle testrapporten zijn te vinden in de bijlagen van dit rapport.

2 Opdrachtomschrijving

In dit hoofdstuk is het probleem bij Festo beschreven waaruit de opdracht is ontstaan. De doelstelling van de opdracht beschrijft wat er met de opdracht moet worden bereikt en de scope en afbakening welke werkzaamheden er wel en niet zijn uitgevoerd. De producten die deze werkzaamheden hebben opgeleverd, zijn apart beschreven in dit hoofdstuk.

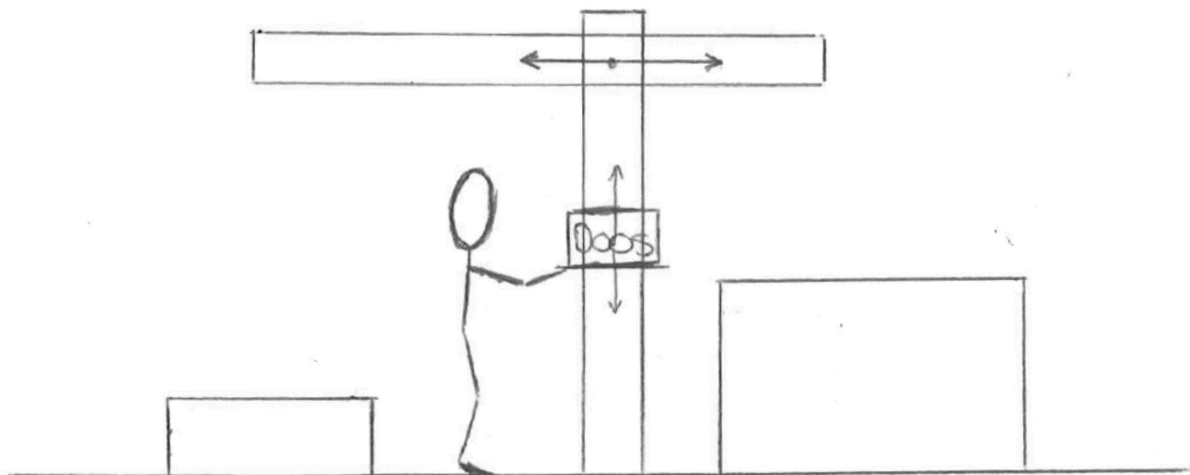
2.1 Probleembeschrijving

De industrie- en dienstensector richten zich steeds meer op de ergonomie van werkplekken. Voor zwaar lichamelijke beroepen waarbij veel zware objecten moeten worden verplaatst, zijn tilhulp- en balanceersystemen een opkomend aandachtspunt. Denk hierbij aan een magazijnmedewerker van een productiebedrijf, waar gedurende de dag zware pakketten met grote massavariaties worden ontvangen en verstuurd. Deze dozen worden vaak op verschillende tafels verzameld en moeten meestal worden overgeplaatst op karren of andersom (zie Figuur 2-1). Een tilhulpsysteem kan het magazijnwerk verlichten door de tillende beweging te ondersteunen en de gebruiker het object te laten verplaatsen.



Figuur 2-1: Verplaatsing van een doos

Het beoogde systeem is reeds bij een klant van Festo ontwikkeld met onderdelen van een andere leverancier (zie Figuur 2-2). Dit systeem lijkt op een soort portaal, maar is nog niet ontwikkeld op basis van Festo onderdelen. Bij Festo wil men graag weten wat de mogelijkheden zijn om op basis van de huidige elektrische aandrijvingen uit het eigen assortiment een adaptief tilhulpsysteem te maken. De productgroep is beschreven in hoofdstuk 4.



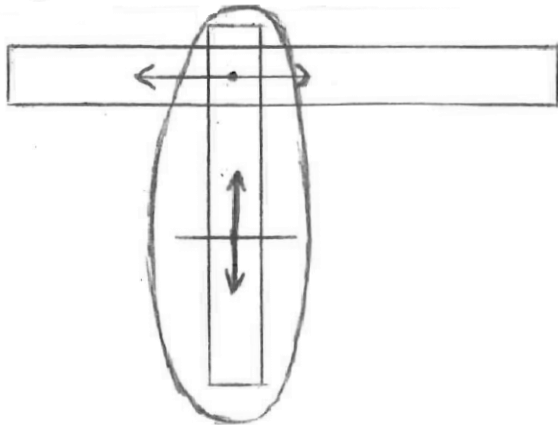
Figuur 2-2: Tilhulpsysteem klant

De dozen mogen een maximale massa van 23 kg hebben als deze herhaaldelijk door menselijke inspanning worden verplaatst¹. De maximale massa die een werknemer zelf mag verplaatsen, is 50 kg. Een tilhulp kan een uitkomst zijn voor bedrijven waar de pakketten veelal tussen de 5 kg en 50 kg zijn en er meerdere leveringen per dag zijn, omdat de werknemers worden ontlast bij het verplaatsen van de vele pakketten.

¹ Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (z.d.). *Tillen en Dragen*. Geraadpleegd op 16 februari 2015, van <http://www.arboportaal.nl/onderwerpen/tillen-en-dragen>

2.2 Doelstelling

De doelstelling van de opdracht is het onderzoeken van de mogelijkheid om met Festo apparatuur een intuïtief tilhulpsysteem voor de verticale verplaatsing over één as te realiseren (zie Figuur 2-3: Focus verticale as). Het systeem moet massa's tussen de 5 kg en 50 kg balanceren en de versnelling doen aanvoelen alsof de massa een factor 5 kleiner is. De documentatie met resultaten moet op 5 juni 2015 zijn opgeleverd.



Figuur 2-3: Focus verticale as

Randvoorwaarden

Door Festo zijn de volgende randvoorwaarden gesteld:

- De functionaliteit moet eerst worden bewezen met een testmodel dat beschikbaar is gesteld door Festo.
- Het ontwerp moet gebruik maken een regelsysteem dat werkt op basis van een motorstroombetaling.

2.3 Scope en afbakening

Gedurende de opdracht worden de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Het opdoen van basiskennis van de Festo producten
- Onderzoek doen naar de werking en inzet van tilhulpsystemen
- Het uitwerken van een eerste concept
- Het verrichten van verschillende metingen om het gedrag van dergelijke systemen in kaart te brengen
- Het verwerken van de testresultaten in een nieuw concept voor het uiteindelijke model
- Het programmeren van de automatisering
- Het bouwen en testen van het model
- Het documenteren van de bevindingen.

Werkzaamheden die niet worden uitgevoerd en niet binnen de opdracht vallen zijn:

- Het ontwerpen van een intuïtief plateau waar gewichten op kunnen worden geplaatst
- Een onderzoek naar de pneumatische mogelijkheden met dit systeem
- De implementatie van onderdelen van andere bedrijven
- Het systeem ontwerpen voor meerdere graden van vrijheid.

2.4 Deliverables

De opdracht levert voor Festo de komende producten op:

- Plan van aanpak
- Testrapporten met resultaten van de tests
- Een schema voor het kalibreren van een dergelijk Festo systeem
- Het eindrapport
- Het testmodel.

3 Aanpak

De opdracht wordt uitgevoerd volgens een vooraf bepaalde aanpak. De aanpak bestaat uit een fasering waarmee de grote lijn van de opdracht is uitgezet. De fasering is opgedeeld in werkpakketten die elk een deelproduct opleveren voor het eindproduct. Tot slot is het team opgesteld waarmee de opdracht uitgevoerd. Het gehele plan van aanpak is bijgevoegd in Bijlage C.

3.1 Fasering

De opdracht is opgedeeld in de volgende fasen:

1. Opstarten

De opstartfase bevat het schrijven van een plan van aanpak en het inlezen in de opdracht.

2. Definieren

In de definitiefase is de opdracht verder gedefinieerd en is er een pakket van eisen opgesteld. Er is onderzoek gedaan naar het systeem als basis voor het ontwerp.

3. Ontwerpen

In de ontwerpfase is het gehele ontwerp van het tilhulpsysteem opgeleverd. Er zijn al tests uitgevoerd om de rekenmethoden te bepalen.

4. Realiseren (optioneel)

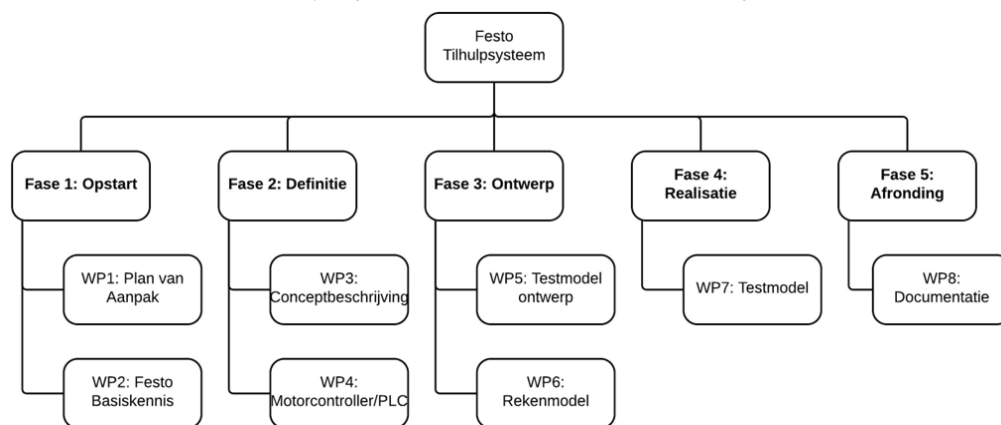
In deze optionele fase is het ontwerp gerealiseerd tot een werkend testmodel.

5. Afsluiting

De opdracht is afgesloten en alle documentatie is opgeleverd.

3.2 Werkpakketten

De bovengenoemde fasen zijn opgedeeld in de onderstaande werkpakketten:



Figuur 3-1: Werkpakketten

De werkpakketten zijn uitgewerkt in de onderstaande hoofdstukken en/of bijlagen:

1. Het *plan van aanpak* is bijgevoegd in Bijlage C
2. De *Festo basiskennis* is beschreven in hoofdstuk 4
3. De *conceptbeschrijving* is te vinden in hoofdstuk 5 en -7.
4. *Motorcontroller/PLC* heeft invloed gehad op de uitwerking van het rekenmodel in het PLC programma van Bijlage A3.
5. Het *ontwerp van het testmodel* is weergegeven in paragraaf 5.5 en 7.5.
6. Het *rekenmodel* is beschreven in hoofdstuk 6.
7. Het *testmodel* is weergegeven in paragraaf 5.5.

3.3 Teamsamenstelling

Het team waarmee de opdracht wordt uitgevoerd is beschreven in de onderstaande tabel:

Tabel 3-1: Teamsamenstelling

Naam	Functie	Mailadres	Locatie
Jasper Daleman	Afstudeerder	STO@festo.nl	Festo Delft
Arnoud Tukker	Bedrijfsbegeleider	TKR@festo.nl	Festo Delft
Anita le Mair	Afstudeerbegeleider	a.lemair@hhs.nl	Haagse Hogeschool Delft
Ernst Kouwe	Afstudeerbegeleider 2	e.m.kouwe@hhs.nl	Haagse Hogeschool Delft

Daarnaast zijn de afdeling Customer Solutions en Tim Kieft van groot belang bij de uitvoering van de opdracht.

4 Basiskennis

Dit hoofdstuk geeft een korte introductie naar de Festo Electric Drives² productgroep. Op basis van deze productgroep is het tilhulpsysteem ontwikkeld. Dit hoofdstuk is van belang voor begrip van het verdere rapport.

Electric Drives van Festo bestaan minstens uit de volgende onderdelen:

- Lineaire of roterende as
 - o *Het onderzoek heeft zich gericht op een lineaire as.*
- Elektromotor
- Motorcontroller.

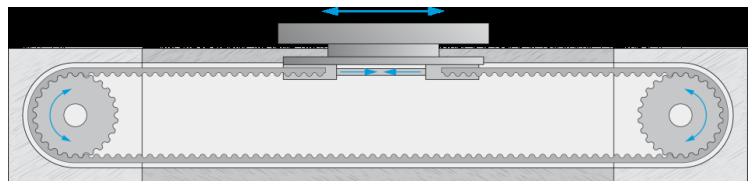
4.1 Lineaire as

Een lineaire as zet de draaiende beweging van de motor om in een rechtlijnige beweging. Deze zijn onder te verdelen in verschillende soorten:

- Tandriemassen
- Spindelassen
- Lineaire motoren.

4.1.1 Tandriemas

De slede wordt verplaatst met behulp van een elektromotor die gemonteerd is op het tandwiel (poelie). Met een tandriemas zijn snelheden tot 10 m/s en versnellingen tot 50 m/s² haalbaar. Daarnaast hebben deze assen een herhalingsprecisie tot 0,05 mm. Een voorbeeld is in Figuur 4-1 weergegeven.



Figuur 4-1: Tandriemas

4.1.2 Spindelass

De slede van een spindelass wordt aangedreven door de spindel te laten draaien terwijl de moer in een vaste positie op de slede bevestigd is. Hierdoor verplaatst de moer zich over de spindel en de slede over de as (zie Figuur 4-2). Spindels kunnen erg grote krachten overbrengen, halen een snelheid van ongeveer 2 m/s, kunnen een versnelling aan van 20 m/s² en hebben een herhalingsprecisie tot 0,003 mm.



Figuur 4-2: Spindelass

4.1.3 Lineaire motor

Een lineaire motor drijft de slede niet aan met een elektromotor, maar met interne elektromagneten (zie Figuur 4-3). Dit systeem is erg snel, maar kan geen grote krachten overbrengen.



Figuur 4-3: Lineaire motor

4.2 Elektromotor

Een elektromotor kan worden geleverd in twee verschillende varianten:

- Een servomotor
- Een stappenmotor.

Een elektromotor kan nog worden uitgebreid met een eventuele vertragingkast, waarmee de eigenschappen van het koppel en het toerental van de motor kunnen worden beïnvloed. Dit is nader onderzocht in paragraaf 5.3.2.

4.2.1 Servomotor

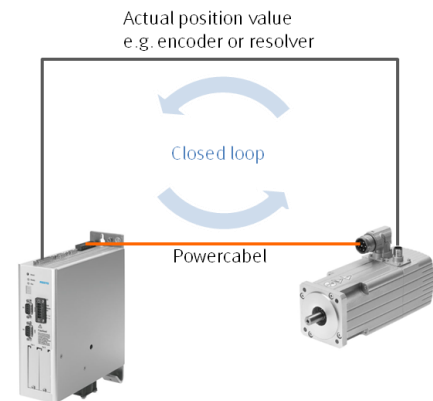
Een servomotor heeft geen vastgesteld principe als elektromotor. De voorwaarde voor een servomotor om zo genoemd te mogen worden is dat het voorzien is van een positieterugkoppeling. Een servomotor wordt dus altijd aangestuurd vanuit een gesloten circuit, zie Figuur 4-4. De positieterugkoppeling wordt gerealiseerd door een zogenaamde encoder.

² Festo Didactic. (z.d.). *BPC Electric Drives*. Handbook Electric Drives: Festo

Een servomotor wordt ingezet in situaties waar een hoog dynamisch bereik, koppel en precisie zijn vereist. Dit wordt gerealiseerd door de motorstroom constant in te regelen met behulp van een motorcontroller (zie paragraaf 4.3).

Encoder:

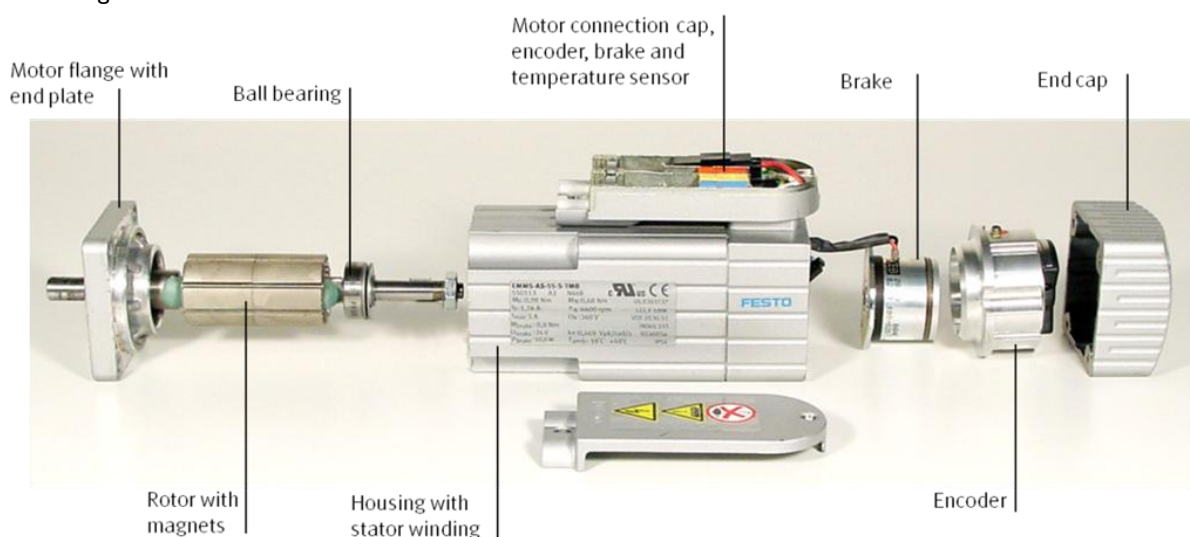
De encoder voorziet de motorcontroller van de terugkoppeling van positie en snelheid van de motoras door het geven van pulsen op bepaalde momenten. Per omwenteling van de motoras geeft de encoder een bepaald aantal pulsen af. Het aantal pulsen staat gelijk aan de verplaatsing. Het aantal pulsen in de tijd staat gelijk aan de snelheid van de motoras.



Figuur 4-4: Gesloten circuit servomotor

Rem:

De rem van een servomotor is optioneel bij Festo. De rem zorgt ervoor dat er zonder spanning geen beweging in het systeem komt. De rem moet ontkracht worden als de motor in gebruik is.

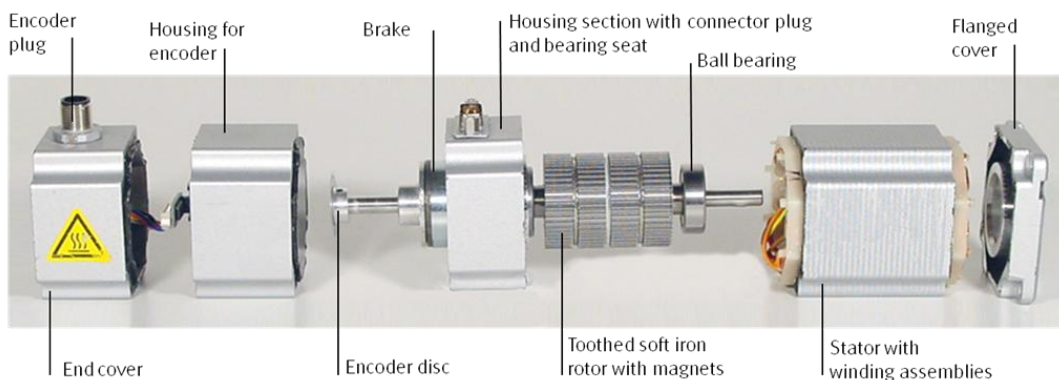


Figuur 4-5: Servomotor exploded view

In de bovenstaande afbeelding is de servomotor van Festo geopend weergegeven. Hierbij is de rotor het deel dat ronddraait in de motor, de stator is het stilstaande deel. De stator bevat de elektromagneten die ervoor zorgen dat de magneten van de rotor in beweging worden gebracht.

4.2.2 Stappenmotor

De stappenmotor is geschikt voor het nauwkeurig positioneren van de lineaire as. Met een stappenmotor kunnen kleine rotatiestapjes worden gerealiseerd, ook zonder terugkoppeling van positie. Dit houdt in dat de stappenmotor ook in een open circuit kan functioneren, zodat de oplossing goedkoper is. De voordelen van de stappenmotor zijn de lage kosten en hoog koppel bij stilstand.

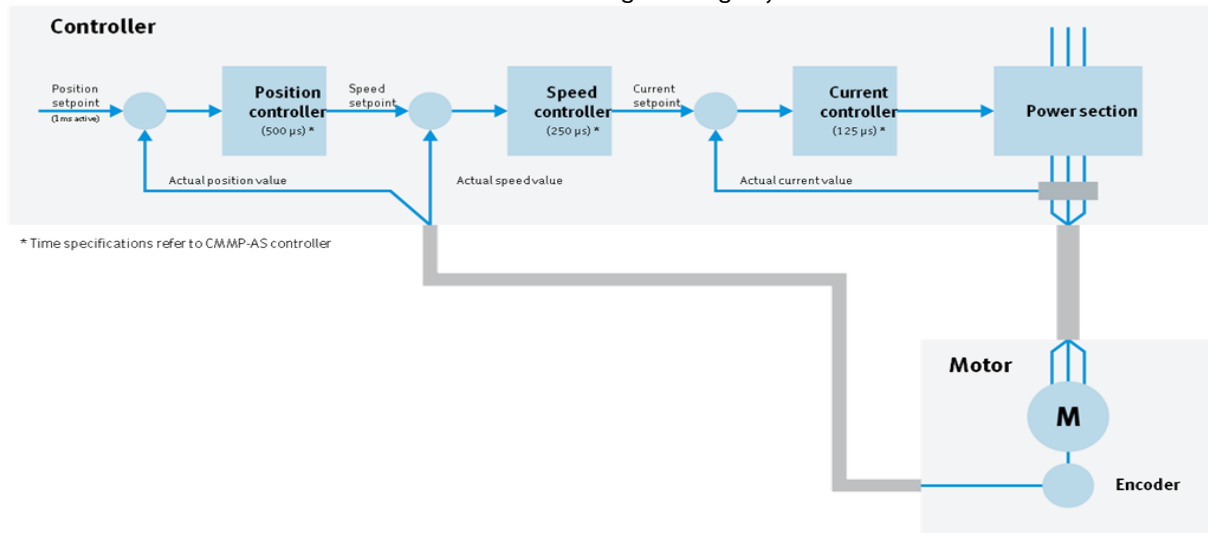


Figuur 4-6: Stappenmotor exploded view

In Figuur 4-6 is de stappenmotor uitgekleeft weergegeven. De rotor bestaat hierbij uit permanente magneten met daaromheen ijzeren tanden die het magnetisch veld beïnvloeden. Door deze kleine tanden kunnen er kleinere stappen worden gerealiseerd dan met een servomotor.

4.3 Motorcontroller

De motorcontroller is benodigd voor het inregelen van de motorstroom. Hoe hoger de stroom, hoe meer kracht de motor levert. De motorcontroller bezit het volgende regelsysteem:



Figuur 4-7: Cascaderegeling motorcontroller

Deze regeling wordt ook wel een cascaderегeling genoemd. Bij deze regelaar is de uitgang van de ene regelaar een setpoint voor de volgende regelaar. De cascaderегeling bestaat uit de volgende regelaars:

- Positieregelaar
 - o Regelt dat de as op een bepaalde ingegeven positie en balanceert door de *snelheid* en de *kracht* in te regelen.
- Snelheidsregelaar
 - o Regelt dat de as een bepaalde ingegeven snelheid hanteert door de *kracht* te regelen, ongeacht de *positie*.
- Stroomregelaar
 - o Regelt dat de motor een bepaalde kracht uitoefent op de as, ongeacht de *snelheid* en de *positie*.

Deze regelaars kunnen elk apart worden aangestuurd.

FCT:

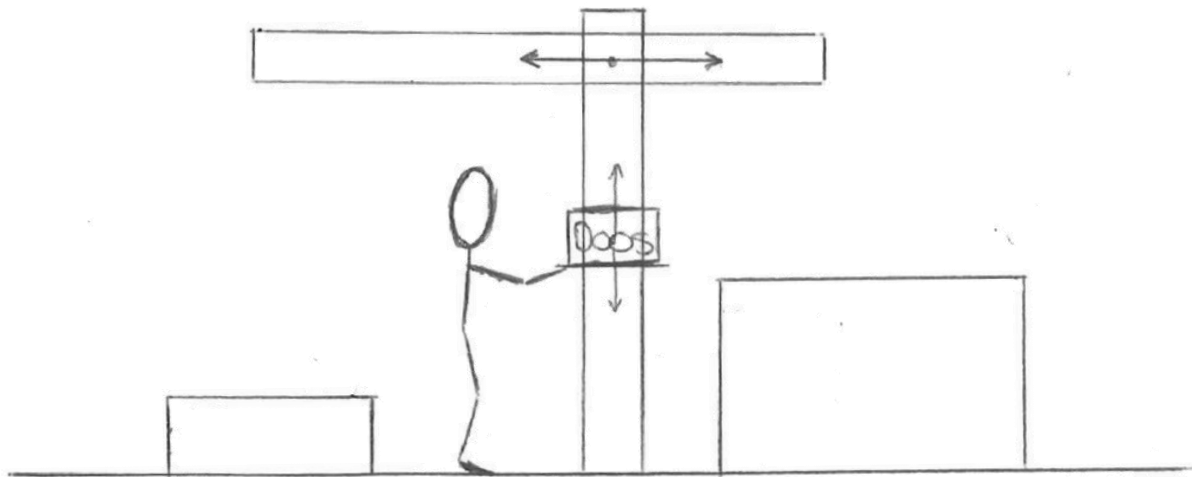
De motorcontroller wordt ingesteld met de Festo Configuration Tool (FCT), een software tool van Festo. Het is met deze software mogelijk om bepaalde posities in te geven en de as er naartoe te bewegen. De parameters van de regelaars kunnen vervolgens afzonderlijk worden uitgelezen (positie, snelheid en stroom). Deze gegevens kunnen vervolgens worden geëxporteerd naar Excel om ze te verwerken.

5 Concept

Op basis van het voorgaande onderzoek is er een concept opgesteld dat voldoet aan de gestelde randvoorwaarden en de doelstelling kan behalen. Het concept is ontstaan uit een vooraf beschreven situatie waaruit specifieke eisen en wensen zijn voortgekomen. Om het pakket van eisen verder te specificeren, zijn een aantal tests uitgevoerd waarnaar wordt verwezen. Tot slot zijn de systeemgrenzen van het huidige concept berekend.

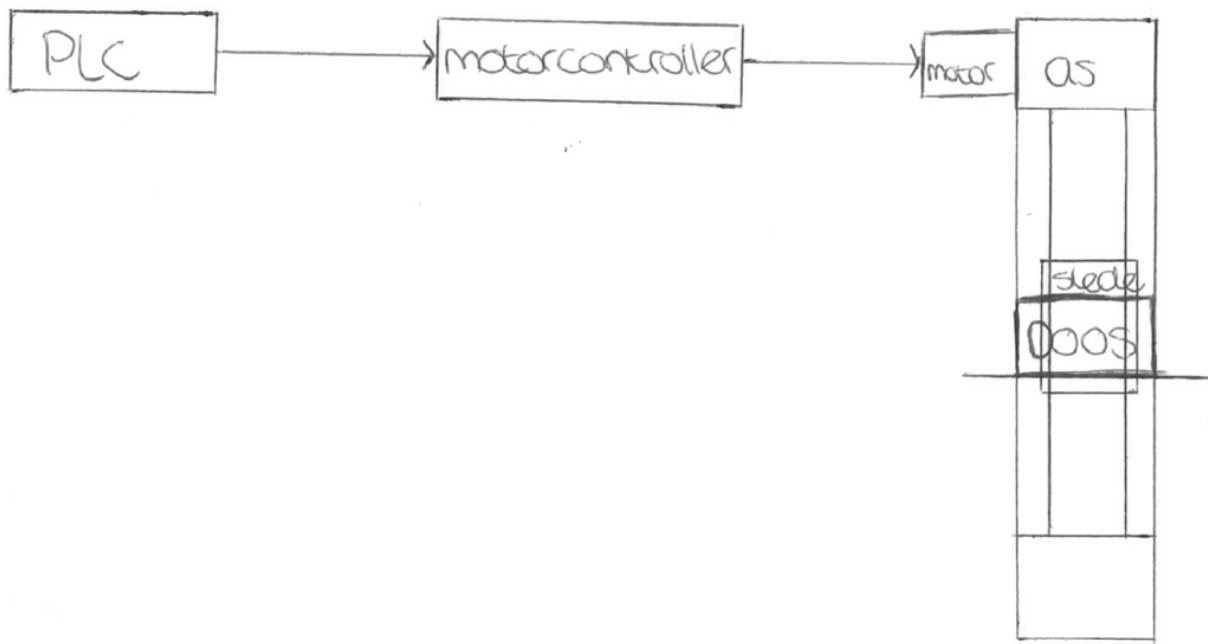
5.1 Situatiebeschrijving

Het tilhulpsysteem is bedoeld voor de verplaatsing van objecten met grote massavariatie. Afgaand op het ontwerp van een klant (zie Figuur 5-1) kan een ontwerp van een portaal goed worden toegepast. Deze oplossing kan ook worden uitgewerkt op basis van de Electric Drives van Festo.



Figuur 5-1: Tilhulpsysteem klant

De productgroep Electric Drives maakt het mogelijk om op basis van de lineaire assen, elektromotoren en motorcontrollers een dergelijke portaaloplossing te realiseren. In de onderstaande afbeelding is weergegeven welke onderdelen er minstens nodig zijn bij de uitwerking van dit concept voor één as.

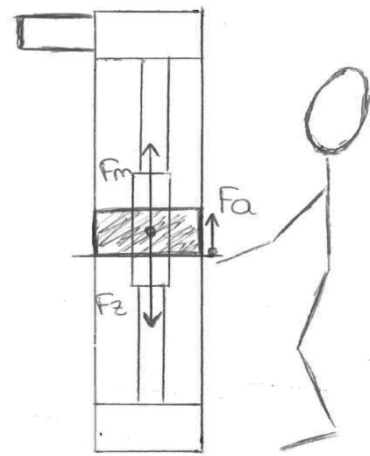


Figuur 5-2: Basissysteem één as

De opdracht focust zich op de verwerking van meetresultaten met behulp van de motorcontroller en PLC, in het bijzonder de motorstroommetingen. Het idee van een regelsysteem dat werkt op basis van motorstroommetingen is op de volgende pagina verder behandeld.

Krachtschema

In Figuur 5-3 is de gebruiker betrokken bij de beweging van de slede van de as. Hierin is te zien dat de massa een bepaalde zwaartekracht (F_z) heeft die moet worden opgevangen door de kracht van de motor (F_m). Daarnaast voorziet de motor voor 80 % van de versnellende kracht van de slede. De overige versnellende kracht (F_a) wordt uitgeoefend door de gebruiker. Dit betekent dat de motor een bepaalde motorstroom nodig heeft om de kracht uit te oefenen die nodig is voor de versnelling en dat de gebruiker daarnaast nog een kracht aan het uitoefenen is om aan te geven wat hij wil.

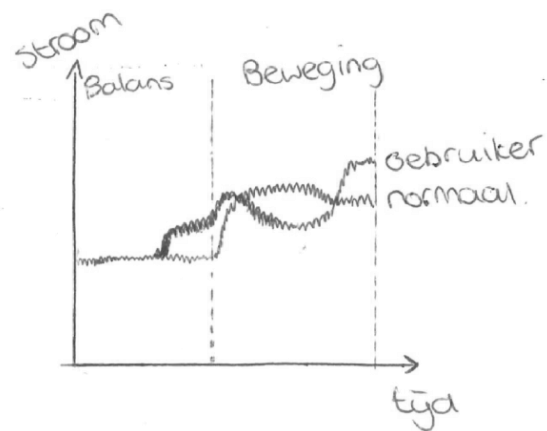


Figuur 5-3: Krachtenspel gebruiker

Een indicatie van de gevolgen die merkbaar zijn in de motorstroom is weergegeven in Figuur 5-4. In dit figuur is een stroomprofiel in de tijd getekend die nodig is voor een bepaalde beweging. Daardoorheen is een stroomprofiel in de tijd getekend die meetbaar is als de gebruiker kracht uitoefent op het systeem.

Concept

Het onderzoek richt zich op het gedrag van het systeem met- en zonder invloed van de gebruiker en het bepalen van de verschillen hiertussen. Op basis hiervan wordt een ontwerp gemaakt voor een regelsysteem dat met het huidige testmodel wordt bewezen. Vervolgens wordt er een ontwerp gemaakt dat hetzelfde reageert met massa's tot 50 kg.



Figuur 5-4: Stroom- tijddiagram gebruiker/normaal

5.2 Pakket van eisen

Het tilhulpsysteem is ontworpen om het werk dat de gebruiker uitvoert, te verlichten. Daarvoor zijn bepaalde eisen gesteld. De eisen zijn voorzien van een bepaalde prioriteit met behulp van de MoSCoW regel. Een dikgedrukte letter achter de eis geeft aan welke prioriteit een eis heeft:

- Must (**M**)
 - o De uitwerking moet deze eis bevatten voor de goedkeuring.
- Should (**S**)
 - o De uitwerking zou deze eis moeten bevatten, maar kan goedgekeurd worden zonder deze eis mits er een goed alternatief is.
- Could (**C**)
 - o Uitwerking kan deze eis bevatten.
- Would (**W**)
 - o Het is wenselijk dat de uitwerking deze eis bevat, maar het is niet nodig voor de goedkeuring en/of de functionaliteit.

In Tabel 5-1 op de volgende pagina zijn alle algemene eisen beschreven. Een aantal van deze eisen zijn in de daarop volgende tabellen verder uitgewerkt.

Tabel 5-1: Algemene eisen

Index	Naam	Omschrijving	MoSCoW
R1.0	Balanceren en aandrijven as	Het systeem moet minstens in staat zijn een massa die bevestigd is aan de slede te balanceren en aan te drijven. Deze eis is verder uitgewerkt in Tabel 5-2.	M
R2.0	Veiligheid	Het systeem moet veilig zijn voor de gebruiker om te bedienen. Het moet bijvoorbeeld beveiligd zijn tegen te hoge snelheden en versnellingen. Deze eis is verder uitgewerkt in Tabel 5-3	M
R3.0	Grootte	Het systeem moet over een lengte twee meter massa's kunnen verplaatsen.	C
R4.0	Intuïtief	Het systeem moet intuïtief zijn in gebruik. Dit moet worden bevestigd door de mogelijke eindgebruikers. Zo moet besturing van het apparaat zo natuurgetrouw mogelijk. Deze eis is verder uitgewerkt in Tabel 5-4.	M
R5.0	Festo Onderdelen	Het systeem moet bestaan uit Festo onderdelen uit de Electric drives productgroep en/of producten waar Festo als bedrijf mee werkt.	M
R6.0	Massa's	Het systeem moet massa's van 5 tot 50 kg kunnen verplaatsen.	S

De eisen voor het balanceren en aandrijven van de tandriemas zijn in de onderstaande tabel beschreven.

Tabel 5-2: Balanceren en aandrijven as

Index	Naam	Omschrijving	MoSCoW
R1.1	Balans	Er moet balans in het systeem zijn als er geen beweging wordt gevraagd. De snelheid moet dan gelijk zijn aan 0 m/s.	M
R1.2	Massabepaling	De geplaatste massa moet zo nauwkeurig mogelijk worden bepaald. Zo kan ook nauwkeurig worden vastgesteld welke massa de gebruiker moet aanvoelen om te versnellen.	M
R1.3	Aandrijving	Tijdens de beweging moet de motor 80% van de kracht uitoefenen voor de versnelling. De gebruiker levert 20% van de versnellende kracht.	M
R1.4	Verkleiningsfactor = 5	De massa die de gebruiker voor het gevoel moet versnellen moet een factor 5 kleiner aanvoelen dan de daadwerkelijke massa.	M

De veiligheidseisen zijn in de onderstaande tabel beschreven.

Tabel 5-3: Veiligheidseisen

Index	Naam	Omschrijving	MoSCoW
R2.1	Snelheid	Het systeem mag een maximale snelheid behalen van 2 m/s (zie Bijlage D: Snelheidstest)	S
R2.2	Versnelling	De maximale versnellingen zijn zowel positief als negatief 10 m/s ² (zie Bijlage D: Snelheidstest).	S
R2.3	Ontgrendeling	Het systeem moet voorzien zijn van een ontgrendeling voor het in beweging brengen. Hiermee moet worden voorkomen dat de as uit zichzelf start met een beweging.	M
R2.4	Motorrem	De motor moet zijn voorzien van een rem, zodat de as zonder spanning ook niet in beweging kan worden gebracht. Als de spanning wegvalt kan de rem ervoor zorgen dat de slede op positie blijft.	M
R2.5	Softwarebeveiligingen	Het systeem moet in de software worden voorzien van veiligheidsmaatregelen tegen onverwachte schokken, bewegingen en maximale waarden.	C

De eisen aan de intuïtieve van het systeem zijn in de onderstaande tabel beschreven.

Tabel 5-4: Intuïtieve eisen

Index	Naam	Omschrijving	MoSCoW
R4.1	Meetsnelheid	De massa moet binnen één seconde zijn bepaald, zodat na een verandering het systeem binnen één seconde gebruikt kan worden. (aanname)	M
R4.2	Beweging	Het systeem moet een zo natuurgetrouw mogelijke beweging kunnen nabootsen op basis van de kracht die wordt uitgeoefend door de gebruiker.	S

5.3 Onderdelenkeuze concept

Op basis van het pakket van eisen is een onderdelenpakket samengesteld voor het eerste testmodel. Hiervoor is eerst het principe van het onderdeel vastgesteld, waarna een korte beschrijving volgt van de onderdelen die Festo beschikbaar heeft gesteld voor het eerste testmodel. Het onderdelenpakket is als volgt samengesteld:

- Soort lineaire as bepalen op basis van krachten en snelheden
- Soort elektromotor bepalen op basis van benodigde kracht en snelheid
- Motorcontroller op basis van de gekozen elektromotor.

De PLC is benodigd om het regelsysteem in te kunnen programmeren. Dit kan niet op basis van alleen een motorcontroller.

5.3.1 Lineaire as

Als eerste moet er een keuze worden gemaakt met welk mechanisch principe de verplaatsing wordt gerealiseerd. De basis van ieder principe is beschreven in hoofdstuk 4. De keuze is afhankelijk van de volgende eisen:

- Snelheid maximaal 2 m/s
- Versnelling maximaal 10 m/s²
- Massa maximaal 50 kg
- Ongeveer 2 m afstand.

Hierbij hebben de snelheid, de versnelling en de af te leggen afstand de hoogste prioriteit. De eisen en de mogelijke oplossingen zijn verwerkt in de onderstaande keuzetabel:

Tabel 5-5: Keuzetabel Lineaire as

Eis	Weging	Tandriem	Spindel	Lineaire motor
Snelheid	3	3	1	3
Versnelling	3	3	2	4
Kracht	2	3	4	1
Afstand	3	4	2	1
Uitkomst		36	23	26

In de bovenstaande tabel is er een schaalverdeling van 1 tot 4 gebruikt:

- 1 is een slechte score voor de eis
- 4 is een zeer goede score voor de eis.

Daarnaast is er een weegfactor gegeven aan de eisen. Hoe hoger de weegfactor, hoe belangrijker de eis. De uitkomst geeft een indicatie van de beste oplossing op basis van de eisen. In dit geval voldoet een tandriem het beste aan de opgestelde eisen, aangezien deze oplossing de hoogste score heeft.

Voor de eerste versie van het testmodel is er een EGC-70-1000-TB-KF-GK (zie Figuur 5-5) beschikbaar gesteld. Met deze as kan er worden getest met kleinere massa's, wat veiliger is voor een testfase. Nadat is bewezen dat de functionaliteit haalbaar is, is het concept voor een tilhulpsysteem voor 50 kg opgesteld in hoofdstuk 7. De beschikbare as heeft de volgende eigenschappen³:



Figuur 5-5: EGC-tandriemas

³ Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF

Tabel 5-6: Eigenschappen tandriemas

Eigenschap	Waarde
Maximale tandriemkracht	100 N
Diameter poelie	24,83 mm
Massa slede	0,37 kg
Maximale My	51 Nm
Wrijving	Zie Bijlage E: Wrijving Statisch
Feed constant	78 mm/omw

5.3.2 Elektromotor

De elektromotor is gekozen op basis van de lineaire as. De keuze is afhankelijk van de toepassing:

- Een *stappenmotor* wordt toegepast bij precieze positioneringstaken
- Een *servomotor* wordt toegepast bij dynamische systemen die van meerdere andere factoren afhankelijk zijn.

De keuze van de elektromotor is gebaseerd op de volgende eisen:

- De snelheid van 2 m/s moet in combinatie met de huidige as haalbaar zijn
- De kracht die geleverd moet worden moet minimaal gelijk zijn aan de maximale tandriemkracht.

De keuze is gemaakt op basis van de onderstaande keuzetabel:

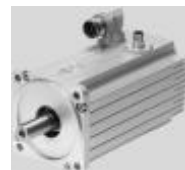
Tabel 5-7: Keuzetabel elektromotor

Eis	Weging	Servomotor	Stappenmotor
Snelheid	4	3	1
Kracht	3	3	3
Uitkomst		21	13

De servomotor heeft de hoogste score. Voor het eerste testmodel is er een EMMS-AS-70-M-RS motor beschikbaar gesteld. Deze motor beschikt over de volgende eigenschappen ⁴:

Tabel 5-8: Eigenschappen servomotor

Eigenschap	Waarde
Nominaal stroom	2,6 A
Piek stroom	10 A
Nominaal koppel	2,29 Nm
Piek koppel	7,75 Nm
Stilstand koppel	2,56 Nm
Nominaal toerental	4100 omw/min
Maximaal toerental	4880 omw/min



Figuur 5-6:
Servomotor EMMS-AS

Daarnaast is er een vertragskast van het type EMGA-60-P-G5-70 beschikbaar gesteld om mee te testen, zodat de karakteristieken van de motor met- en zonder vertragskast in beeld gebracht kunnen worden. Op basis van deze tests is besloten of het uiteindelijke ontwerp een vertragskast bevat of niet. Deze test is beschreven in Bijlage E: Testrapport Wrijving Statisch en Bijlage F: Testrapport Wrijving Dynamisch. De eigenschappen van de motor met vertragskast zijn:

Tabel 5-9: Eigenschappen servomotor met vertraging

Eigenschap	Waarde
Vertragskast ratio	5
Nominaal stroom	2,6 A
Piek stroom	10 A
Nominaal koppel	11,45 Nm
Piek koppel	38,75 Nm
Stilstand koppel	12,8 Nm
Nominaal toerental	820 omw/min
Maximaal toerental	976 omw/min

⁴ Festo B.V. (2015). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF

5.3.3 Motorcontroller

Op basis van de nominale- en maximale motorstroom van de gekozen servomotor kan een bijbehorende motorcontroller worden uitgekozen. Er zijn twee verschillende motorcontrollers leverbaar:

- CMMS-AS-....
 - o Te benaderen met een PC via een seriële poort
- CMMP-AS-....
 - o Te benaderen met een PC via een ethernet poort.



Figuur 5-7: CMMP-AS

Een seriële poort wordt bijna niet meer toegepast op de huidige generatie laptops en kan niet worden aangesloten op de aanwezige laptop van de student. Daarom wordt er altijd gekozen voor een CMMP-AS motorcontroller. De motorcontroller voor de huidige servomotor is de CMMP-AS-C5-3A-M3 en heeft de volgende eigenschappen:

Tabel 5-10: Eigenschappen motorcontroller⁵

Eigenschap	Waarde
Input spanning	230V AC
Output spanning	320 tot 380 V DC
Nominale stroom	5 A
Piek stroom	10 A voor 5 s 20 A voor 0,5 s

5.3.4 PLC

Het regelsysteem moet cyclisch worden aangeroepen zodat het zonder tussenkomst van een PC kan worden uitgevoerd. In de huidige toepassing waarin één as wordt aangestuurd, voldoet een CPX-CEC-C1 module van Festo. Deze controller kan via de CAN-bus communiceren met de motorcontroller. Over de CAN-bus kan informatie worden uitgewisseld over de huidige motorstroom en snelheid van de motor en de nieuwe setpoints. Als er meerdere assen en motorcontrollers worden toegevoegd aan het systeem moet er nogmaals worden gekeken naar de benodigde PLC.

5.4 Systeemgrenzen

Op basis van de gegeven onderdelen zijn de systeemgrenzen van het eerste testmodel bepaald, waarbij de volgende eigenschappen zijn berekend:

- Maximaal toelaatbare massa bij de maximaal toelaatbare versnelling
- Maximaal haalbare snelheid
- Minimaal te leveren koppel door de motor bij maximale massa en maximale versnelling.

5.4.1 Maximaal toelaatbare massa

In het pakket van eisen is beschreven dat de maximale versnelling die in beide richtingen behaald moet kunnen worden gelijk is aan 10 m/s^2 . In Tabel 5-6 is te zien dat de maximaal toelaatbare kracht op de tandriem gelijk is aan 100 N. De krachten die op de tandriem werken bij een versnelling omhoog zijn weergegeven in de figuur hiernaast. Hierin zijn:

- F_z de zwaartekracht
- F_m de kracht die de motor uitoefent om de slede te balanceren en versnellen.

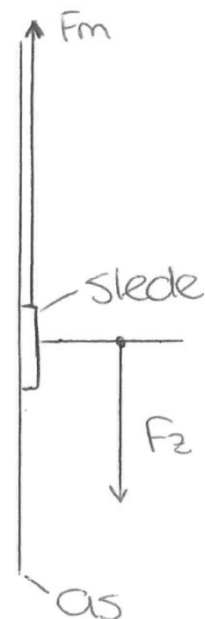
$$F_z = m \cdot g$$

$$F_m = -F_z + F_a$$

$$F_a = m \cdot a$$

In de laatste formule is F_a de kracht die nodig is voor de versnelling a . In de huidige situatie gelden de volgende waarden:

- $a = 10 \text{ m/s}^2$
- $g = -10 \text{ m/s}^2$
- $F_{m_maximaal} = 100 \text{ N}$ (Maximale kracht die de motor mag uitoefenen).



Figuur 5-8: Krachten motor

⁵ Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS for Servo Motors*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/CMMP-AS-M3_EN.PDF

Invullen in de formules geeft:

$$100 = -(m \cdot -10) + m \cdot 10$$

$$100 = 2 \cdot m \cdot 10$$

$$100 = 20 \cdot m$$

$$m = 5 \text{ kg}$$

De maximaal toelaatbare massa bij een versnelling van 10 m/s^2 omhoog is gelijk aan 5 kg. De maximale massa die beschikbaar is gesteld voor de tests is 7,5 kg. De maximale versnelling omhoog die daarmee behaald mag worden is:

$$F_z = 7,5 \cdot 10 = 75 \text{ N}$$

$$F_a = 25 \text{ N}$$

$$a_{\text{maximaal}} = \frac{25}{7,5} = 3,33 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

5.4.2 Maximaal haalbare snelheid

Voor het bepalen van de maximaal haalbare snelheid is het maximum toerental n gebruikt uit Tabel 5-8. Daarnaast is de feed constant C_f uit Tabel 5-6 toegepast. Dit invullen in de formules geeft:

$$n_{\text{maximaal}} = 4880 \frac{\text{omw}}{\text{min}}$$

$$C_f = 0,078 \frac{\text{m}}{\text{omw}}$$

$$v = n_{\text{maximaal}} \cdot C_f = 4880 \cdot 0,078 = 380,64 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$v = 6,34 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

De snelheid is begrensd op 2 m/s . Dit is dus geen probleem zonder vertragskast. Met vertragskast is het maximale toerental 976 omw/min . De maximale snelheid wordt daarmee $1,27 \text{ m/s}$. Deze kan de maximale snelheid dus niet halen met het testmodel.

5.4.3 Minimale motorkoppel

Het krachtschema van Figuur 5-8 kan worden uitgebreid met een roterende poelie waar de motoras aan is gemonteerd. Dit schema is weergegeven in Figuur 5-9.

De kracht F_m wordt veroorzaakt door het koppel T_m dat de motor levert op de poelie en het moment M_m tot gevolg heeft. De formule voor een moment is:

$$T = F \cdot s$$

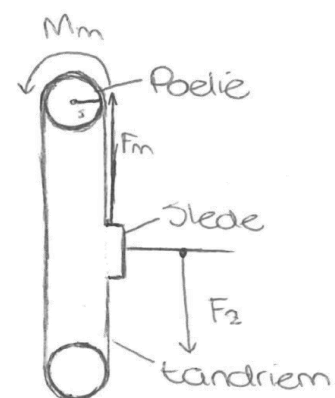
Hierin is s de afstand tot het draaipunt. Het draaipunt is het midden van de poelie, wat gelijk is aan de halve diameter (zie Tabel 5-6). Dit houdt in dat:

$$s = \frac{0,02483}{2} = 0,012415 \text{ m}$$

$$F_m = 100 \text{ N}$$

$$T_m = 100 \cdot 0,012415 = 1,24 \text{ Nm}$$

Dit is ruim onder het nominale koppel van de motor zonder vertragskast (zie Tabel 5-8). De vertragskast is in deze testopstelling dus overbodig. Om voor het uiteindelijke concept een goede motorkeuze te kunnen maken, zijn de eigenschappen van een vertragskast met behulp van de test "Statische wrijving" (Bijlage E) en "Dynamische wrijving" (Bijlage F) in beeld gebracht.



Figuur 5-9: Momentenschema motor

5.5 Testopstelling

Alle eerder genoemde onderdelen zijn aan elkaar gekoppeld. Dit resulteert in de volgende testopstelling:

De testopstelling heeft de volgende extra toegevoegde onderdelen:

1. Een noodstop voor het vrijgavesignaal van de motorcontroller.
2. Een klemmenstrook voor de verdeling van de 24V DC voeding. Het aansluitschema is bijgevoegd in Bijlage A1.
3. Een drukknop om het systeem te laten weten dat er bewogen mag worden.
4. Een speciale gewichthouder van Festo en een stootdemper van Festo.

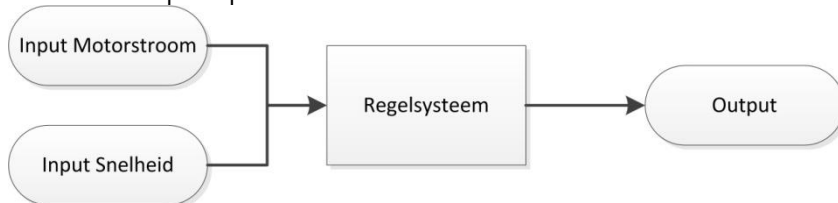
In de rode cirkel zijn de PLC en de motorcontroller te zien. Het volgende hoofdstuk gaat verder in op het ontworpen regelsysteem dat gerealiseerd moet worden met deze onderdelen. Het PLC programma is bijgevoegd in Bijlage A2.



Figuur 5-10: Testopstelling

6 Regelsysteem

Het regelsysteem is afhankelijk van de wijze van aansturing vanuit de motorcontroller. Na het bepalen van een aanstuurprincipe is er een ontwerp voor het regelsysteem gemaakt. Dit ontwerp is gebaseerd op het onderstaande principe:



Figuur 6-1: Regelsysteem basis

De inkomende signalen van het regelsysteem zijn de motorstroom en de snelheid. Op basis van de motorstroom kan de kracht worden bepaald die de gebruiker uitoefent. Op basis van de snelheid kan de wrijving worden bepaald. De versnelling wordt bepaald door de snelheidsverandering over een bepaald tijdsinterval te nemen. Met behulp van deze inkomende signalen moet het regelsysteem de uitgang uitsturen. De wijze van aansturing van het uitgaande signaal is zoals gezegd afhankelijk van de gekozen regelkring op de motorcontroller.

6.1 Regelkring motorcontroller

De motorcontroller kan op drie manieren worden aangestuurd (zie paragraaf 4.3):

- Positieregeling
- Snelheidsregeling
- Stroomregeling.

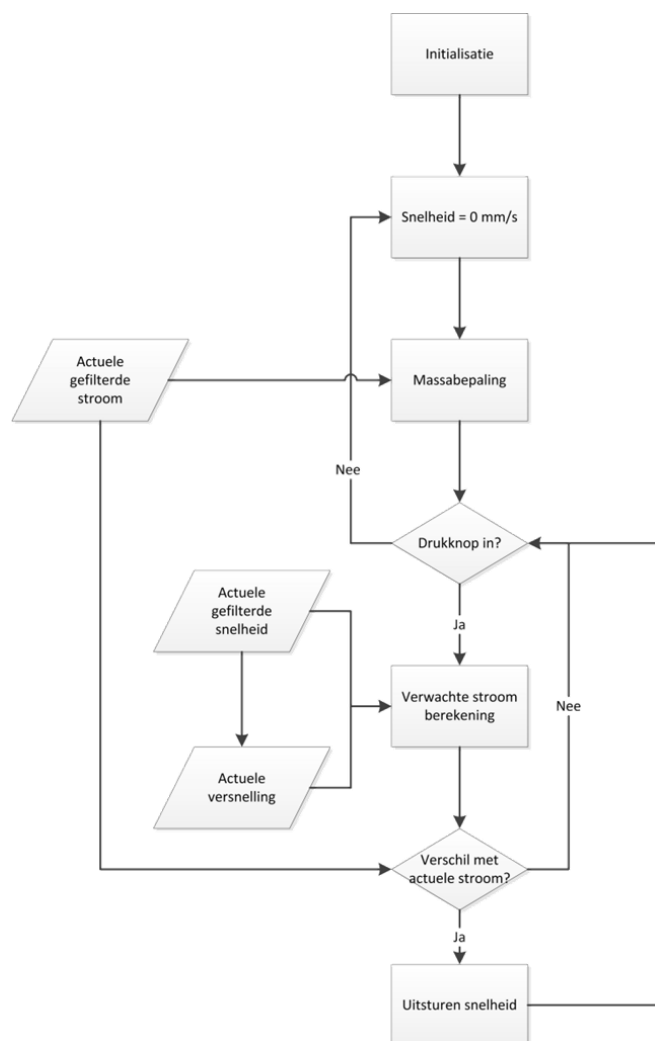
Uit het pakket van eisen kan worden opgemaakt dat het tilhulpsysteem positieonafhankelijk is. Hier zijn geen eisen aan gesteld, enkel dat de positie wordt vastgehouden als de gebruiker wenst niet te bewegen. Om een verplaatsing te realiseren moet het systeem wel een bepaalde snelheid kunnen uitsturen. De kracht moet worden gemeten, maar niet geregeld (zie paragraaf 5.1). Daarom is er gekozen voor de snelheidsregeling.

Daarnaast kan er met de snelheidsregeling gemakkelijk een aantal grenzen worden ingesteld voor de maximale snelheid en versnelling die de motorcontroller uitstuurt, onafhankelijk van de PLC. Dit is gunstig voor de veiligheid van het systeem.

6.2 Regelsysteem

Het ontworpen regelsysteem is weergegeven in Figuur 6-2. Het regelsysteem loopt van boven naar beneden. De blokken aan de linkerkant zijn de inputs van het systeem (stroom, snelheid en versnelling). Het onderste blok is de output, een snelheidssetpoint. Het systeem is op te delen in de volgende stappen:

1. Massabepaling
 - a. Wordt constant uitgevoerd als de drukknop niet is ingedrukt.
2. Verwachte motorstroom berekenen
 - a. Nodig voor het bepalen van de kracht van de gebruiker.
3. Uitsturen snelheidssetpoint
 - a. Het realiseren van de uiteindelijke beweging.



Figuur 6-2: Regelsysteem geheel

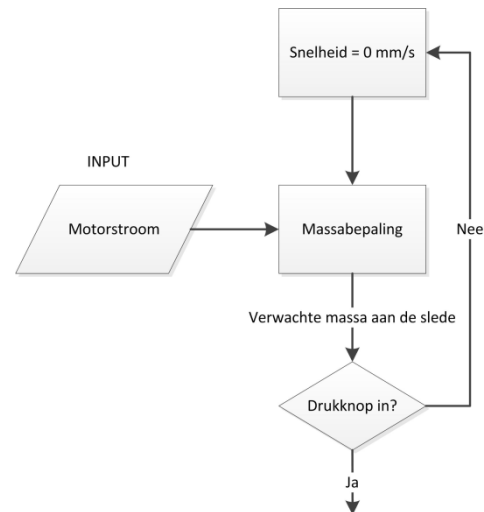
De volgende waarden zijn constant:

- Motorconstante $C_m = 0,864 \text{ Nm/A}$
- Gravitatieconstante $g = -9,81 \text{ m/s}^2$
- Straal van de poelie $r_{poelie} = 0,012415 \text{ m}$
- Wrijving Statisch omhoog $T_wOmhoog = 0,028 \text{ Nm}$
- Wrijving Statisch omlaag $T_wOmlaag = 0,095 \text{ Nm}$
- Massa van houder en slede $m_{houder} = 1,32 \text{ kg}$.

6.2.1 Massabepaling

In Figuur 6-3 is het regelsysteem uitvergroott voor het gedeelte waarin de massabepaling plaatsvindt. Na de initialisatie van het systeem vinden de volgende stappen plaats:

1. De snelheid wordt op 0 mm/s ingesteld zodat de slede van de tandriemas niet in beweging kan komen.
2. De massa die aan de slede is bevestigd, wordt op basis van de gemeten motorstroom bepaald. Deze bepaling is afhankelijk van de laatst bewogen richting van de slede. De vergelijkingen die worden toegepast zijn verderop in deze paragraaf behandeld.
3. De output van de massabepaling is een verwachte massa (m_{slede}) die aan de slede is bevestigd. Daarnaast is de $m_{gebruiker}$ berekend die de gebruiker moet versnellen. Deze handelingen worden herhaald zolang de drukknop niet is ingedrukt.



Figuur 6-3: Regeling massabepaling

De massa is evenredig met de (zwaarte)kracht die op het object werkt. De kracht die nodig is om de slede te balanceren kan worden afgeleid uit de motorstroom met de volgende functie:

$$F_{zGemeten} = -F_m = -\frac{I_{gemeten} \cdot C_m}{r_{poelie}}$$

De gemeten massa $m_{gemeten}$ kan vervolgens worden bepaald met de volgende functie:

$$m_{gemeten} = \frac{F_{zGemeten}}{g}$$

Zoals eerder aangegeven is $m_{gemeten}$ onder invloed van een statische wrijving bepaald (zie Bijlage E: Statische wrijving). De verwachte gemeten massa $m_{verwacht}$ kan met behulp van de opgestelde ijklijn worden bepaald (zie Bijlage G: Massabepaling). In de onderstaande functie is rekening gehouden met de offset in het meetsignaal die veroorzaakt wordt door de statische wrijving zodat de afwijking ten opzichte van $m_{gemeten}$ klein is:

$$m_{verwacht} = 0,994 \cdot m_{gemeten} + 0,039$$

De volgende stap in de berekening is het bepalen van de massa die bevestigd is aan de slede m_{slede} en de massa die de gebruiker moet versnellen ($m_{gebruiker}$). De massa die op de slede is bevestigd, kan worden berekend door de wrijving en de standaardmassa van de slede met de gewichthouder m_{houder} van $m_{verwacht}$ af te halen. Zie hiervoor de onderstaande formules:

$$m_{totaal} = (0,994 \cdot m_{gemeten} + 0,039) - \frac{T_wOmhoog}{r_{poelie} \cdot g}$$

$$m_{slede} = (0,994 \cdot m_{gemeten} + 0,039) - \frac{T_wOmhoog}{r_{poelie} \cdot g} - m_{houder}$$

De bovenstaande formule moet worden gebruikt na een beweging omhoog. Zie voor onderbouwing Bijlage G: Nauwkeurigheid massabepaling.

De onderstaande formules moeten worden gebruikt na een beweging omlaag. Zie voor onderbouwing Bijlage G: Nauwkeurigheid massabepaling.

$$m_{\text{totaal}} = (0,994 \cdot m_{\text{gemeten}} + 0,039) - \frac{T_w \text{Omlaag}}{r_{\text{poelie}} \cdot g}$$

$$m_{\text{slede}} = (0,994 \cdot m_{\text{gemeten}} + 0,039) - \frac{T_w \text{Omlaag}}{r_{\text{poelie}} \cdot g} - m_{\text{houder}}$$

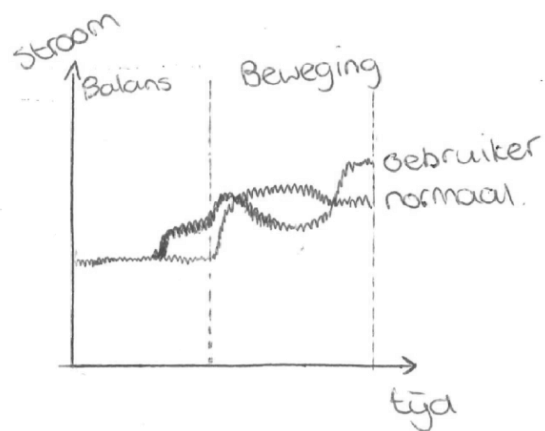
De massa die gebruiker moet versnellen $m_{\text{gebruiker}}$ is gelijk aan:

$$m_{\text{gebruiker}} = \frac{m_{\text{slede}}}{5}$$

Met de bovenstaande formules is het mogelijk om de massa voor 95,4% binnen 108 gr nauwkeurig te bepalen.

6.2.2 Verwachte motorstroom berekenen

Het systeem kan op zichzelf een op- en neergaande beweging realiseren. Voor het versnellen en het verplaatsen met een constante snelheid van de slede heeft de motor een bepaalde motorstroom nodig. Daarnaast oefent de gebruiker kracht uit op het systeem, wat ervoor zorgt dat de gemeten motorstroom afwijkt ten opzichte van de normaal benodigde motorstroom. Om de kracht van de gebruiker te bepalen, moet het verschil worden bepaald tussen de gemeten motorstroom en de motorstroom die nodig is voor de onbelaste beweging (de beweging zonder invloed van de gebruiker). Dit is weergegeven in Figuur 6-4.



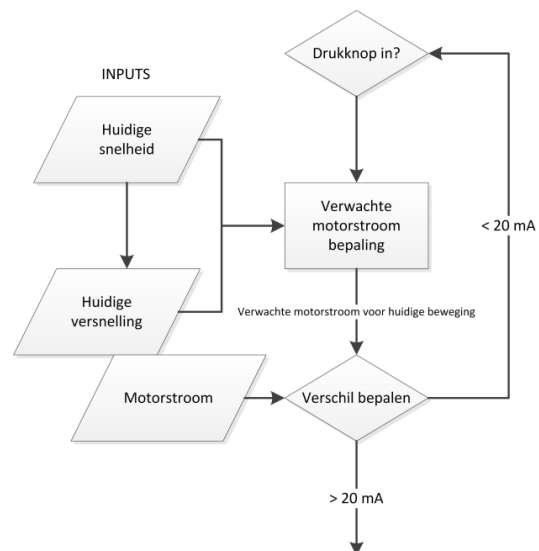
Figuur 6-4: Stroom- tijddiagram normaal/gemeten

In Figuur 6-5 is het regelsysteem weergegeven dat is ontworpen voor het berekenen van de verwachte motorstroom op basis van de huidige beweging. De inputs voor de berekening zijn:

- De huidige snelheid
- De huidige versnelling
 - o Wordt berekend door de verandering van de snelheid te delen door een bepaald tijdsinterval.
- De gemeten motorstroom
- m_{totaal} , afkomstig van de massabepaling.

Vervolgens worden de volgende stappen ondernomen:

1. Nadat de drukknop is ingedrukt, wordt de verwachte motorstroom berekend.
2. Het verschil tussen de verwachte motorstroom en de gemeten motorstroom wordt bepaald. Het verschil moet groter zijn dan 20 mA om verder te gaan. Deze waarde is bepaald op basis van de variatie in de motorstroom. Tijdens het testen is gebleken dat de motorstroom tijdens een verplaatsing binnen 20 mA varieert binnen een aantal tijdstappen. Deze grens is in het regelsysteem meegenomen om te voorkomen dat de slede direct begint te bewegen door een verschil dat veroorzaakt wordt door de systeemruis.



Figuur 6-5: Regelsysteem verwachte motorstroom

De motorstroom is afhankelijk van de volgende factoren:

- Dynamische wrijving
- De kracht F_{verwacht} die nodig is om m_{totaal} met versnelling a te versnellen.

Wrijving

Eerst wordt de wrijving bepaald op basis van de gemeten snelheid (zie Bijlage F voor toelichting)

$$I_w = 0,1434 \cdot v_{\text{gemeten}} + 0,161$$

De wrijving is evenredig met de snelheid: Als de snelheid positief is, is de functie van de wrijving ook positief. Als de snelheid negatief is, is de functie van de wrijving in zijn geheel negatief. Dit is uit de tests gebleken.

Kracht

De motorstroom kan worden gerelateerd aan de kracht die de motor moet leveren om de massa een versnelling mee te geven. Deze kracht kan worden berekend met:

$$F_{\text{verwacht}} = -(m_{\text{totaal}} \cdot g) + m_{\text{totaal}} \cdot a$$

F_{verwacht} kan met behulp van de onderstaande formule worden omgerekend naar een stroom $I_{F\text{verwacht}}$:

$$I_{F\text{verwacht}} = \frac{F_{\text{verwacht}} \cdot r_{\text{poelie}}}{C_m}$$

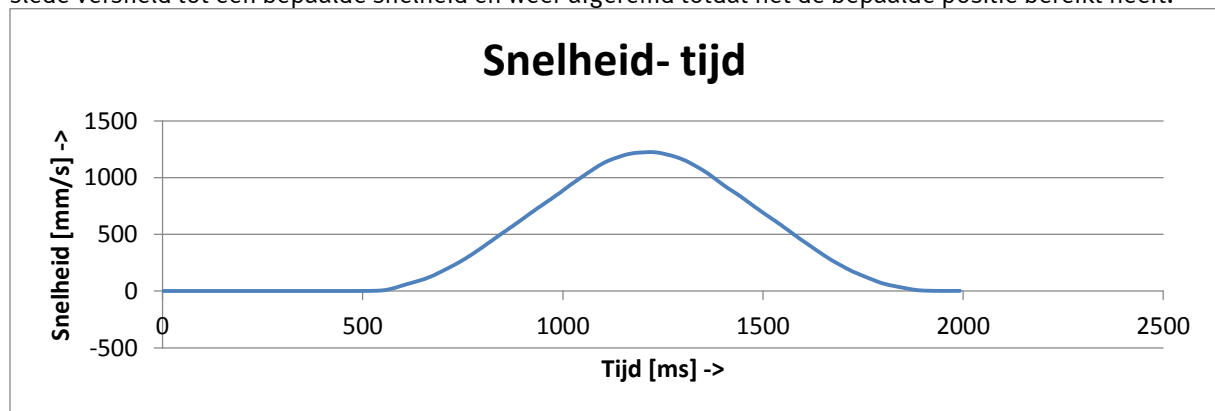
I_{verwacht}

De verwachte stroom I_{verwacht} kan worden bepaald met de functie:

$$I_{\text{verwacht}} = I_{F\text{verwacht}} + I_w$$

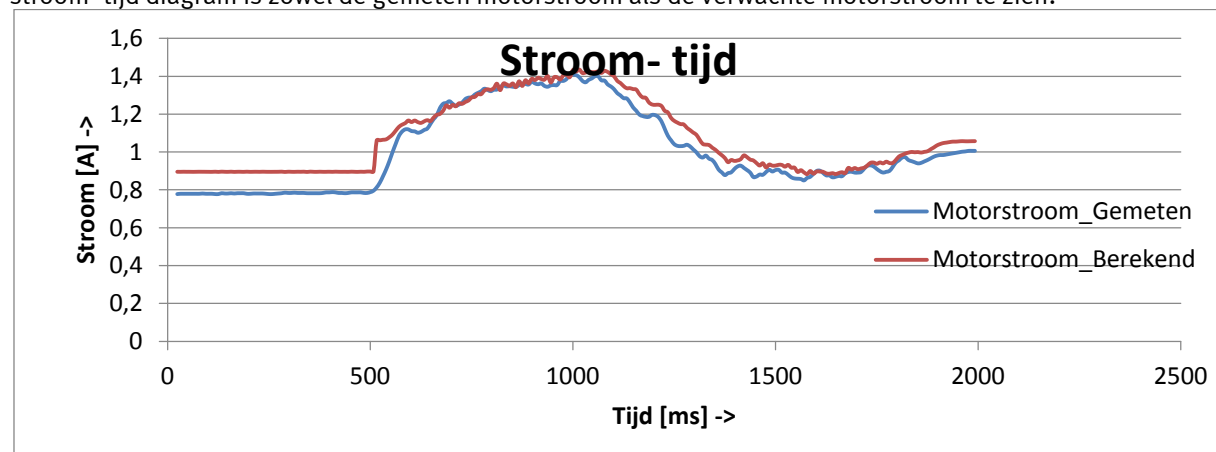
Voorbeeld

Het onderstaande snelheids- tijd diagram hoort bij een opwaartse beweging van de slede. Hierbij wordt de slede versneld tot een bepaalde snelheid en weer afgeremd totdat het de bepaalde positie bereikt heeft.



Figuur 6-6: Snelheid- tijddiagram opwaartse beweging

Om deze snelheid en versnelling te realiseren, is er een bepaalde motorstroom nodig. In het onderstaande stroom- tijd diagram is zowel de gemeten motorstroom als de verwachte motorstroom te zien:



Figuur 6-7: Stroom- tijddiagram opwaartse beweging + verwachting

Uit het stroom- tijd diagram kan worden opgemaakt dat de verwachte stroom nauwkeurig bepaald kan worden. De afwijking ten opzichte van de gemeten stroom is klein. Hier is geen exacte waarde voor bepaald omdat de gemeten stroom continu wordt beïnvloed door de gebruiker. Hierdoor heeft het gemeten signaal nooit dezelfde omstandigheden.

6.2.3 Snelheid uitsturen

In Figuur 6-8 is de laatste stap uit het regelsysteem weergegeven. Hiermee wordt de uiteindelijke beweging gerealiseerd. De verandering van de snelheid wordt bepaald door:

- Het tijdsinterval van aansturing dt
- De kracht van de gebruiker $F_{gebruiker}$.
- De massa die de gebruiker moet versnellen $m_{gebruiker}$.

Zoals eerder aangegeven moet het verschil tussen $I_{gemeten}$ en $I_{verwacht}$ veroorzaakt zijn door de gebruiker. De kracht die de gebruiker uitoefent is dan gelijk aan:

$$F_{gebruiker} = \frac{I_{verschil} \cdot C_m}{r_{poelie}}$$

Met deze kracht kan de versnelling a worden berekend die het systeem moet realiseren om de gebruiker het gevoel te geven dat hij zijn deel van de totale massa aan het versnellen is:

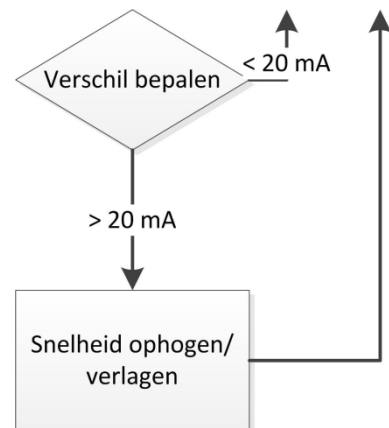
$$a_{gebruiker} = \frac{F_{gebruiker}}{m_{gebruiker}}$$

De versnelling moet worden gerealiseerd door het uitsturen van een snelheidsverandering in een bepaald tijdsinterval. Dit tijdsinterval is in eerste instantie gezet op 100 ms. Op basis van literatuuronderzoek is bepaald dat het menselijk lichaam ongeveer 120 ms nodig heeft om spieractiviteiten te registreren en daarop weer te reageren⁶. Een snelheidsverandering over 100 ms zou in theorie dus vloeiend moeten aanvoelen. De uitgaande snelheid wordt dan als volgt berekend:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$dv = a \cdot 0,100$$

$$v_{output} = v_{gemeten} + dv$$



Figuur 6-8: Snelheid uitsturen

⁶ Hendrik Spiering. (2012, 29 december). Reactietijd. *NRC Handelsblad*, p6-7
<http://psychologiemblogspot.nl/2013/02/reactietijd-nrc-29-december-2012.html>

7 Ontwerp

In dit hoofdstuk is het ontwerp opgesteld dat voldoet aan de eisen over de maximale massa en versnelling.

Dit ontwerp is opgesteld voor:

- Een maximale massa van 10 kg
- Een maximale versnelling in beide richtingen van 9 m/s^2
- Een verplaatsing over 2 m
- Een motor zonder vertragingskast.

Bij de berekeningen zijn de volgende constante waarden gebruikt:

- $g = -10 \text{ m/s}^2$
 - o *De berekening is een indicatie. De afgeronde waarde rekent makkelijker en de keuze van de tandriemas hangt niet af van deze significantie.*
- $C_m = 0,864 \text{ Nm/A}$
- $m = 50 \text{ kg}$
- $a = 9 \text{ m/s}^2$

7.1 Tandriemas

De tandriemas moet in staat zijn een massa van 50 kg met 9 m/s^2 omhoog en omlaag te versnellen. De versnelling omhoog betekent dat de zwaartekracht F_z en de versnellingskracht F_a door de motor omhoog moeten worden uitgeoefend, zie Figuur 7-1. In dit krachtschema geldt:

$$F_z = 50 \cdot -10 = -500 \text{ N}$$

$$F_a = 50 \cdot 9 = 450 \text{ N}$$

$$F_m = -F_z + F_a = 500 + 450 = 950 \text{ N}$$

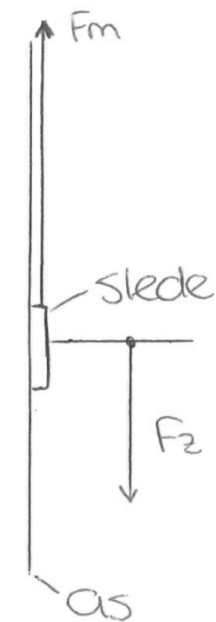
De massa die de gebruiker moet versnellen komt overeen met 10 kg. Dit houdt in dat de gebruiker een kracht moet uitoefenen van:

$$F_{\text{gebruiker}} = 10 \cdot 9 = 90 \text{ N}$$

Deze kracht hoeft de motor niet leveren. Dit resulteert in een F_m van:

$$F_m = 950 - 90 = 860 \text{ N}$$

Daarnaast moet de slede in staat zijn een moment op te vangen dat wordt veroorzaakt door de massa. Deze berekening is niet meegenomen in de keuze van de tandriemas, omdat het moment afhankelijk is van het aangrijppunt van de zwaartekracht en de grootte van het plateau waar de voorwerpen mee verplaatst gaan worden. Dit gedeelte valt buiten de opdracht. Met het moment op de slede moet dus rekening gehouden worden tijdens het ontwerp van het plateau.



Figuur 7-1:
Krachtschema
tandriemas

Tandriemkeuze:

De tandriemen die aan de eerder genoemde eisen aan kracht en moment kunnen voldoen zijn:

Tabel 7-1: ELGA-80-2000-TB-KF⁷

Eigenschap	Waarde
Maximale kracht F_x	800 N
Massa	14,96 kg
Massa slede	1,53 kg
Maximale moment M_v	228 Nm
Feed constante	125 mm/omw
Poeliediameter	39,79 mm
Traagheidsmoment	$9,82 + 0,93/m + 3,96/\text{kg kgcm}^2$

⁷ Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes ELGA*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/ELGA-TB_EN.PDF

Tabel 7-2: EGC-120-2000-TB-KF-GK

Eigenschap	Waarde
Maximale kracht F_x	800 N
Gewicht	40,5 kg
Gewicht slede	2,1 kg
Maximale moment M_v	380 Nm
Feed constante	125 mm/omw
Poeliediameter	39,79 mm
Traagheidsmoment	$12.41 + 0.93/m + 3.96/kg \text{ kgcm}^2$

Tabel 7-3: EGC-HD-160-2000-TB-KF-GK⁸

Eigenschap:	Waarde
Maximale kracht F_x	1000 N
Gewicht	30,9 kg
Gewicht slede	2,5 kg
Maximale moment M_v	500 Nm
Feed constante	125 mm/omw
Poeliediameter	39,79 mm
Traagheidsmoment	$14,49 + 1,267/kg + 3,96/kg \text{ kgcm}^2$

De assen uit Tabel 7-1 en Tabel 7-2 kunnen op het eerste gezicht niet voldoen aan de maximale kracht van 860 N (beide een maximale F_x van 800 N). Aangenomen is dat deze kracht zelden voorkomt, omdat dit de meest extreme situatie is van het systeem en men bij normaal gebruik nooit bij deze kracht in de buurt komt. Bij normaal gebruik voldoen deze assen ruim aan de gestelde eisen.

De bovenstaande assen zijn gekozen op basis van de volgende eisen:

- De maximaal toelaatbare kracht. De as moet de maximale krachten goed kunnen overbrengen.
- De massa van de as bij 2 m lengte. Deze eis is meegenomen met het oog op uitbreiding van het systeem naar meerdere assen. Hoe lager het gewicht van dit systeem, hoe minder complicaties er optreden bij uitbreiding.
- Een lage massa van de slede heeft een positieve invloed op de afwijking van het meetsignaal.
- De momenten die de massa veroorzaakt op de slede moeten goed verwerkt kunnen worden.
- Met het oog op eventuele uitbreidingen is de prijs van de tandriemas meegenomen in de keuzetabel.

Tabel 7-4: Keuzetabel tandriemas

Eis	Weging	ELGA	EGC	EGC-HD
Kracht	3	2	2	3
Massa as	2	3	2	2
Massa slede	3	3	3	2
Momenten	2	2	3	4
Prijs	2	4	4	1
Totaal:		33	33	29

Op basis van de keuzetabel is er gekozen voor een EGC-120-2000-TB-KF-GK tandriemas. Aangenomen is dat de maximale kracht niet behaald wordt in het normale gebruik. Er is voor deze as gekozen omdat er meerdere maten van motoren op gemonteerd kunnen worden. Dit geeft meer keuze vrijheid bij de keuze van de motor.

⁸ Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-HD-TB*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-HD-TB_EN.PDF

7.2 Motor

Op basis van de tandriemas is een motor gekozen die de maximale belasting moet kunnen verwerken. Om een kracht van 860 N om te zetten, moet er een bepaald koppel geleverd worden door de motor (zie Figuur 7-2). Het benodigde motorkoppel is als volgt berekend:

$$T = F \cdot s = 860 \cdot 0,019895 = 17,1 \text{ Nm}$$

In stilstand moet de motor een koppel kunnen leveren van:

$$T = F_z \cdot s = 500 \cdot 0,019895 = 9,9 \text{ Nm}$$

Om met een feed constante van 125 mm/omw (= 0,125 m/omw) een snelheid van 2 m/s maximaal te halen, is een toerental benodigd van:

$$n = \frac{2}{0,125} = 16 \frac{\text{omw}}{\text{s}} = 16 \cdot 60 = 960 \frac{\text{omw}}{\text{minuut}}$$

De motoren die dit zonder vertragskast aan kunnen zijn:

Tabel 7-5: EMMS-AS-100-L-HS-RSB

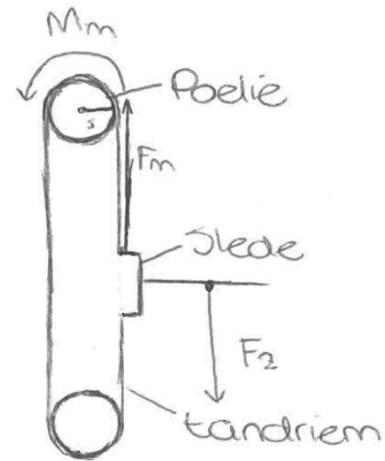
Eigenschap	Waarde
Nominale stroom	3,8 A
Piek stroom	24,8 A
Nominaal koppel	7,51 Nm
Maximaal koppel	39,8 Nm
Stilstaand koppel	10,94 Nm
Rem koppel	9 Nm
Nominaal toerental	3000 omw/min
Maximum toerental	3360 omw/min
Massa	9,39 kg
Traagheidsmoment	7,21 kgcm ²

Tabel 7-6: EMMS-AS-140-S-HS-RSB

Eigenschap	Waarde
Nominale stroom	4,4 A
Piek stroom	15 A
Nominaal koppel	9,55 Nm
Maximaal koppel	25,6 Nm
Stilstaand koppel	11,2 Nm
Rem koppel	18 Nm
Nominaal toerental	2600 omw/min
Maximum toerental	3060 omw/min
Massa:	10,4 kg
Traagheidsmoment	9,271 kgcm ²

Tabel 7-7: EMMS-AS-140-L-HS-RSB

Eigenschap	Waarde
Nominale stroom	7,8 A
Piek stroom	20 A
Nominaal koppel	21,12 Nm
Maximaal koppel	48,8 Nm
Stilstaand koppel	25,6 Nm
Rem koppel	18 Nm
Nominaal toerental	2000 omw/min
Maximum toerental	2460 omw/min
Massa:	17 kg
Traagheidsmoment	20,108 kgcm ²



Figuur 7-2: Momentenschema motor

De keuze voor de motor is gemaakt op basis van de volgende eisen:

- De massa van de motor mag niet te groot zijn, met het oog op uitbreiding van het systeem.
- Het piekkoppel en het stilstand koppel moeten voldoen aan de berekende koppels.
- Het maximale toerental moet voldoen aan het berekende maximale toerental.
- Met het oog op eventuele uitbreiding van het systeem is het raadzaam om niet het duurste ontwerp te maken.
- Het traagheidsmoment moet in de goede verhouding zijn ten opzichte van de as.

De eisen zijn verwerkt in de onderstaande keuzetabel:

Tabel 7-8: Keuzetabel servomotor

Eis	Weging	EMMS-AS-100-L	EMMS-AS-140-S	EMMS-AS-140-L
Massa motor	3	4	3	1
Koppel	4	3	3	4
Toerental	2	4	3	2
Prijs	1	3	2	2
Traagheidsmoment	4	1	3	4
Totaal		39	41	41

Op basis van de bovenstaande keuzetabel is er gekozen voor een EMMS-AS-140-S-HS-RSB. Deze heeft dezelfde score als de EMMS-AS-140-L-HS-RSB, maar scoort gelijkmatiger. De L variant is erg zwaar, vandaar dat er gekozen is voor een S variant. De EMMS-AS-100-L is niet in staat de beoogde massa in te regelen, afgaand op het traagheidsmoment ratio. Dit ratio mag hooguit 1 : 25 zijn (Traagheid motor : Traagheid as).⁹ De motor kan gemonteerd worden op de EGC-120 tandriemas, niet op een ELGA-80. Dit bevestigt de keuze voor een EGC-120 tandriemas.

7.3 Motorcontroller en PLC

De motorcontroller die deze motor kan aansturen is een CMMP-AS-C5-11A-P3-M3. De eigenschappen zijn weergegeven in de onderstaande tabel:

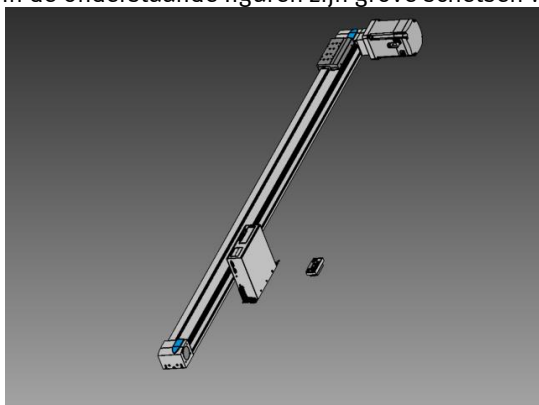
Tabel 7-9: Eigenschappen motorcontroller

Eigenschap:	Waarde:
Nominaal stroom	5 A
Maximale stroom	10 A voor 3 s 20 A voor 0,5 s
Input voltage	400 V, 3 fasen AC

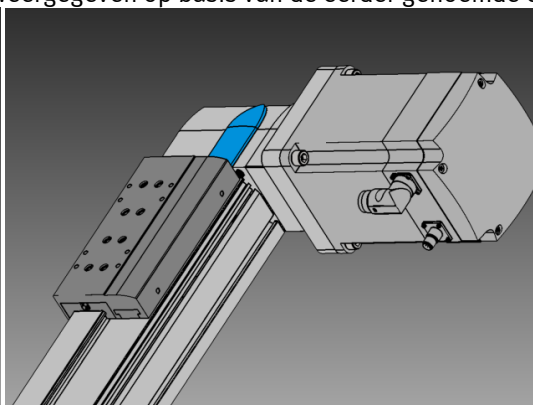
De PLC die gebruikt wordt is een CPX-CEC-C1. Hiermee is hetzelfde mogelijk als bij het testmodel.

7.4 Model

In de onderstaande figuren zijn grove schetsen weergegeven op basis van de eerder genoemde onderdelen:



Figuur 7-3: Model afbeelding 1



Figuur 7-4: Model motor aan de as

Dit ontwerp is nog afhankelijk van de toepassing en de plaats van de besturingskast. Deze factoren zijn niet meegenomen in dit ontwerp, omdat dit meegenomen moet worden in het vervolg van de opdracht.

⁹ Festo Didactic. (z.d.). *BPC Electric Drives*. Handbook Electric Drives: Festo

8 Conclusies en aanbevelingen

Het is gelukt om een tilhulpsysteem te ontwikkelen dat op basis van een gemeten motorstroom adaptief reageert op de kracht van de gebruiker. Het tilhulpsysteem is nog niet geheel stabiel, maar zorgt er wel voor dat de massa's lichter aanvoelen gedurende de verplaatsing. Het systeem is wel stabiel gedurende de balancerings.

Door de aansturing in de snelheidsregeling van de motorcontroller kunnen bepaalde veiligheidsmaatregelen met betrekking tot de maximale snelheid en -versnelling gemakkelijker worden ingesteld. Het regelsysteem is ontworpen voor deze wijze van aansturing en kan dus voldoen aan de eisen aan de maximale snelheid en -versnelling.

De functionaliteit is getest met een testopstelling die niet kan voldoen aan de eisen voor de maximaal toelaatbare massa van 50 kg. In hoofdstuk 7 is bewezen dat het mogelijk is om op basis van Festo apparatuur een systeem te configureren dat aan de krachten die ontstaan bij het gebruik van 50 kg, kan voldoen. De verwachting is dat deze opschaling weinig gevolgen heeft voor het ontworpen regelsysteem, omdat deze onafhankelijk is van de massa's die het systeem moet aankunnen.

De testen uit de bijlagen zijn uitgevoerd in verschillende aanstuurmodi. Aangenomen is dat er tussen de verschillende regelkringen in de motorcontroller weinig verschil merkbaar is en dat de PLC de meetwaarden op dezelfde manier omzet als in Excel is bepaald. Deze aanname is onjuist gebleken; de PLC geeft andere meetwaarden van de motorstroom terug dan in Excel is voorspeld. De verwachting is dat deze verschillen zijn veroorzaakt doordat de wrijving en de massabepaling (Bijlage E,F en G) zijn vastgesteld in verschillende modi van de motorcontroller.

Aanbevelingen

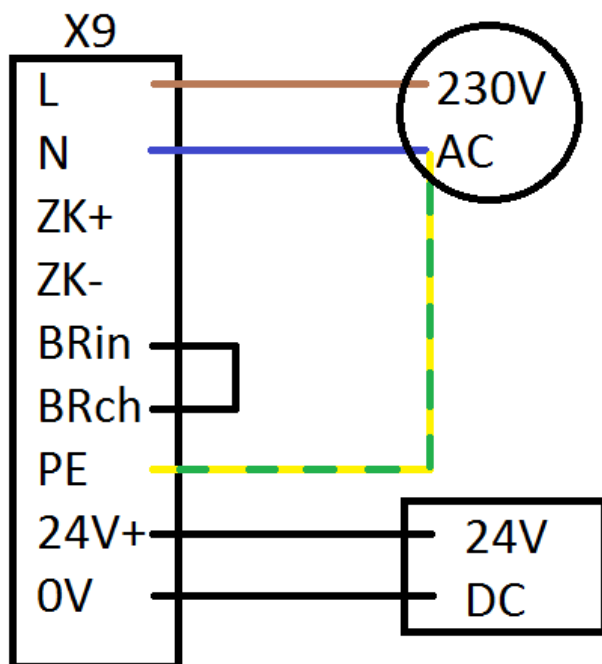
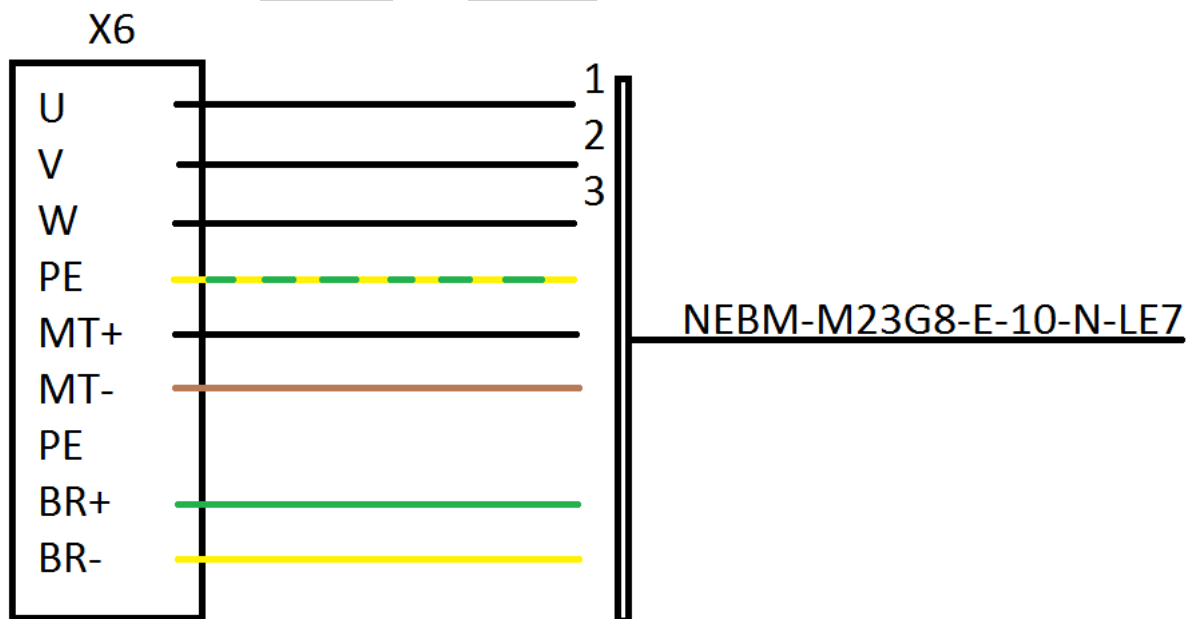
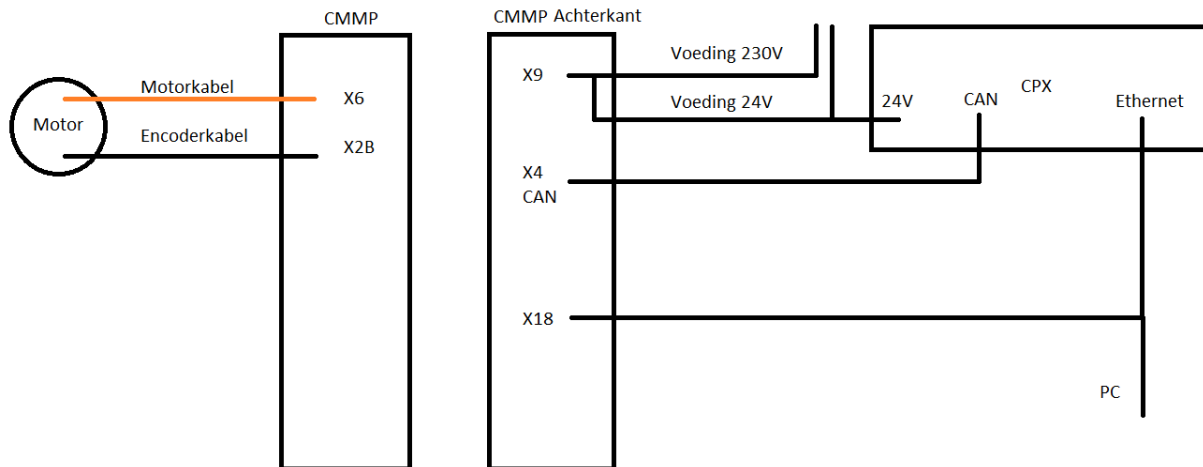
In het testrapport "Intuïtiviteit" uit Bijlage H is getest wat de invloed is van het veranderen van cyclustijden van de PLC. De conclusie die uit deze test kan worden getrokken is dat de cyclustijden van de individuele programma's invloed hebben op het gedrag van het systeem. Het is aan te bevelen de cyclustijden constant mee te nemen in de veranderingen, en de exacte invloed hiervan in beeld te brengen. Hierdoor kan het systeem nauwkeuriger worden afgesteld. Het systeem is opgeleverd met een cyclustijd van 50 ms voor de berekening van de versnelling en het uitsturen van de snelheid. Dit kan nog verder geoptimaliseerd worden.

Om het tilhulpsysteem met het huidige regelsysteem beter werkend te krijgen, zijn er nog een aantal stappen die genomen kunnen worden. Ten eerste is het aan te raden om de functies voor het berekenen van de benodigde motorstroom opnieuw te kalibreren, maar dan met gebruik van de PLC en de motorcontroller in de snelheidsregeling. De verwachting is dat het kalibreren met het gehele systeem nauwkeurigere functies oplevert. De functies die volgens het testrapport Intuïtiviteit nogmaals gekalibreerd moeten worden, zijn:

- De massabepaling
- De kracht die de gebruiker uitoefent
 - o Bevat het bepalen van een nieuwe wrijvingscoëfficiënt
- De bewegingsdynamica van de slede
 - o Moet verder afgesteld worden met behulp van de cyclustijden van de PLC-programma's.

Bronvermelding

1. van der Ree, B. (2015). *Voorstel afstudeeropdracht Jasper CS_REE*. Delft: Festo
2. Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (z.d.). *Tillen en Dragen*. Geraadpleegd op 16 februari 2015, van <http://www.arboportaal.nl/onderwerpen/tillen-en-dragen>
3. Festo Didactic. (z.d.). *BPC Electric Drives*. Handbook Electric Drives: Festo
4. Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015. http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF
5. Festo B.V. (2014). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015. http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF
6. Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS for Servo Motors*. Geraadpleegd op 27 mei 2015. http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/CMMP-AS-M3_EN.PDF
7. Hendrik Spiering. (2012, 29 december). Reactietijd. *NRC Handelsblad*, p6-7 <http://psychologiemblogspot.nl/2013/02/reactietijd-nrc-29-december-2012.html>
8. Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes ELGA*. Geraadpleegd op 27 mei 2015. http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/ELGA-TB_EN.PDF
9. Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-HD-TB*. Geraadpleegd op 27 mei 2015. http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-HD-TB_EN.PDF

BIJLAGE A1: Aansluitschema

BIJLAGE A2: PLC-programmatuur

(*INITIALISATIE*)

(*-----*)

CASE intStep OF

(*Negatieve stapnummers voor INITIALISATIE*)

-50: (*CANverbinding check en aandrijfvoltage check*)

IF pcanopennode[0].nStatus = 5 AND CMMP.SupplyVoltagePresent THEN

CMMP.Halt:= TRUE;

CMMP.Stop:= TRUE; (*Zonder deze is er geen aandrijving mogelijk*)

intStep:= -40;

END_IF

-40: (*Controller Enable*)

IF CMMP.HaltActive THEN (*Check of het signaal van HALT TRUE is en binnenkomt*)

CMMP.EnableDrive:= TRUE;

intStep:= -30;

END_IF

-30: (*Na Enable een Homing uitvoeren*)

IF CMMP.DriveEnabled THEN

CMMP.StartHoming := TRUE;

intStep:= -20;

END_IF

-20: (*Nadat er beweging heeft plaatsgevonden van de Homing, Homing FALSE maken*)

IF CMMP.AckStart AND CMMP.DrivesMoving THEN

CMMP.StartHoming := FALSE;

intStep:= -10;

END_IF

-10: (*Controle of Homing goed is gegaan*)

IF CMMP.DrivesReferenced THEN

intStep:= 0;

END_IF

(*idle*)

(*-----*)

0: (* Stabilisatie *)

DRUKKNOP_LED := TRUE;

v_set := 0;

CMMP.SetValueRotSpeed := v_set;

CMMP.SetValueRotRamp := 50;

CMMP.StartTask := TRUE;

intStep := 10;

10: (* Stopzetten taak *)

IF CMMP.AckStart AND CMMP.DrivesMoving THEN

CMMP.StartTask := FALSE;

intStep := 20;

END_IF

20: (* Massabepaling *)

m_gemeten := l_filtered *MC/r_poelie/g/1000;

IF OMHOOG THEN

m_totaal := (0.994*m_gemeten+0.039) + 0.1/r_poelie/g;

m := m_totaal - m_houder;

ELSE

m_totaal := (0.994*m_gemeten+0.039) + 0.07/r_poelie/g;

m := m_totaal - m_houder;

END_IF

m_gebruiker := m/Verkleiningsfactor;

```

intStep := 30;

30:
IF DRUKKNOP THEN
    intStep := 40;
ELSE
    intStep := 0;
END_IF

40: (* Verwachte stroom bepalen*)
IF v_filtered > 5 THEN
    Weerstand := 0.1434 * v_filtered + 0.161;
    I_verwacht := m_totaal * g * r_poelie / MC * 1000 + Weerstand + m_totaal * a * r_poelie / MC;
    intStep := 50;
ELSIF v_filtered < -5 THEN
    Weerstand := -(0.1434 * v_filtered + 0.161);
    I_verwacht := m_totaal * g * r_poelie / MC * 1000 + Weerstand + m_totaal * a * r_poelie / MC;
    intStep := 50;
ELSE
    I_verwacht := m_gemeten * g * r_poelie / MC * 1000 + m_gemeten * a * r_poelie / MC;
    intStep := 50;
END_IF

50: (* Vset berekenen. Interval van 100 ms*)
I_verschil := I_verwacht - I_filtered;
IF I_verschil > 20 OR I_verschil < -20 THEN
    F_gebruiker := I_verschil * MC / r_poelie / 1000;
    a_gevraagd := REAL_TO_INT(F_gebruiker / m_gebruiker); (* a = F/m *)
    IF a_gevraagd > 5 THEN
        a_gevraagd := 5;
    ELSIF a_gevraagd < -5 THEN
        a_gevraagd := -5;
    END_IF
    v_setpoint := REAL_TO_INT(a_gevraagd / 0.05); (* gedeeld door de tijd en in mm/s*)
    v_set := v_set + v_setpoint; (* Setpoint ophogen *)
    IF v_set > 800 THEN
        v_set := 800;
    ELSIF v_set < -800 THEN
        v_set := -800;
    END_IF
    CMMP.SetValueRotSpeed := v_set;
    CMMP.StartTask := TRUE;
    intStep := 60;
ELSE
    F_gebruiker := 0;
    a_gevraagd := 0;
    intStep := 30;
END_IF

60:
IF CMMP.AckStart AND CMMP.DrivesMoving THEN
    CMMP.StartTask := FALSE;
    intStep := 30;
END_IF

END_CASE

IF v_filtered >= 5 THEN
    OMHOOG := TRUE;
ELSIF v_filtered <= -5 THEN
    OMHOOG := FALSE;
END_IF

```



```
(* Versnelling*)
IF INDEX < 1024 THEN
    Velocity[INDEX] := v_filtered;
    IF INDEX > 1 THEN
        a := (Velocity[INDEX] - Velocity[(INDEX-1)]) / 0.05;
    END_IF
    INDEX := INDEX + 1;
    IF INDEX > 1023 THEN
        INDEX := 0;
    END_IF
END_IF
```

```
(* Stroom *)
I := DWORD_TO_INT(ConvertBytesToDword(%IB24, %IB25, %IB26, %IB27));
I_filter(X := I, T := t#50ms);
I_filtered := I_filter.Y;
```

```
(* Snelheid*)
v := CMMP.ActualRotSpeed;
v_filter(X := DINT_TO_INT(v), T := t#50ms);
v_filtered := v_filter.Y;
```

BIJLAGE B: Voorstel Afstudeeropdracht

Concept afstudeer-opdracht voor de heer Jasper Daleman

Delft, 13 januari 2015

“Servoelektrische tilhulp aandrijving “

Inleiding:

Festo ontwikkelt, produceert en levert motion & control componenten en modules voor de industriële automatisering. Het toepassingsgebied van deze componenten en modules is breed en varieert van bewegings- en besturingsoplossingen voor wafersteppers (ASML) tot melkrobots.

De oplossingen die Festo biedt worden in een groot aantal verschillende toepassingsgebieden ingezet. Dit levert verschillende eisen aan de materialen en dynamiek van de bewegingen.

Doelstellingen van de opdracht:

Ergonomie van werkplekken wordt een steeds belangrijker thema in de industrie en dienstensector. Het gebruik van tilhulpen en balanceersystemen is hierin een belangrijk thema. Bij applicaties met een constante massa zijn hiervoor eenvoudige systemen in gebruik met contragewichten en/of pneumatische balanceersystemen. Festo heeft behoefte aan het ontwikkelen van een intuïtief tilhulpsysteem op basis van servo-elektrische aandrijving voor als de massavariatie groot is of als er geen perslucht beschikbaar is.

De vraag binnen Festo leeft om een opstelling te ontwerpen waarmee de mogelijkheden van zo'n intuïtief tilhulpsysteem op basis van de Festo servocontrollers te onderzoeken zijn.

Belangrijk bij de uitvoering van de opdracht is niet alleen het ontwerpen/realiseren van een opstelling maar zeker ook een onderzoek naar de dynamische grenzen van een soortgelijk systeem.

Opdrachten:

1. Doorgrondt de werking van een verticaal servo-elektrisch systeem met zijn componenten.
 - a. Lineaire (tandriem-)as
 - b. Servomotor (met vertraging)
 - c. motorcontroller;
2. Analyseer het systeem met behulp van (interne en externe) signaalmetingen.
 - a. Signaal/ruis verhouding
 - b. Filtering
 - c. Signaalverlies in systeemcomponenten
3. Ontwerp een opstelling en rekenmodel waarmee het inzicht in de grenzen van een dergelijke aandrijving vergroot wordt;
4. Documenteer de ontwikkelde oplossing op goede wijze;
5. Maak een werkend testmodel.

BIJLAGE C: Plan van Aanpak

Plan van Aanpak

Het Plan van Aanpak voor de opdracht bij Festo Nederland over het ontwikkelen van een adaptief tilhulpsysteem.

FESTO

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Jasper Daleman
11042346
Festo B.V.
13 februari 2015
Delft

Inleiding

In dit document is het plan van aanpak van de afstudeeropdracht bij Festo beschreven. Dit document is opgesteld om inzicht te geven in de stappen die genomen gaan worden om tot het eindresultaat te komen. Omdat een dergelijk systeem nog nooit is gerealiseerd bij Festo, is het van belang om de opdracht goed gestructureerd aan te pakken en te documenteren. Het eindresultaat is een adaptief tilhulpsysteem, wat inhoudt dat het systeem gewichten als gewichtloos laat ervaren.

De opdracht wordt uitgevoerd bij Festo Nederland. Festo is marktleider op het gebied van componenten voor de industriële automatisering. De opdracht wordt uitgevoerd op de afdeling Customer Solutions. Het tilhulpsysteem moet worden gerealiseerd op basis van elektrische aandrijvingen van Festo. De opdracht is gefaseerd in een aantal fasen om het overzicht te kunnen houden in de ontwikkelingen. In de inrichting is weergegeven met wie er vooral wordt gecommuniceerd over de opdracht. De planning omvat de gehele ontwikkeling en oplevering tot 05-06-2015.

In het plan van aanpak is het belangrijkste om de opdracht in overeenstemming met de opdrachtgever op te schrijven. De goedgekeurde opdracht is gegeven in de opdrachtschrijving in hoofdstuk 3. De gestructureerde aanpak van de opdracht is beschreven in hoofdstuk 4. De opdracht is opgedeeld in verschillende fasen en deelresultaten. De uitvoering van de opdracht ligt in handen van de afstudeerder, maar hiervoor zijn ook verschillende andere personen binnen Festo benodigd. Deze zijn weergegeven in de inrichting. Tot slot is er een korte planning toegevoegd waarin de mijlpalen zijn weergegeven.

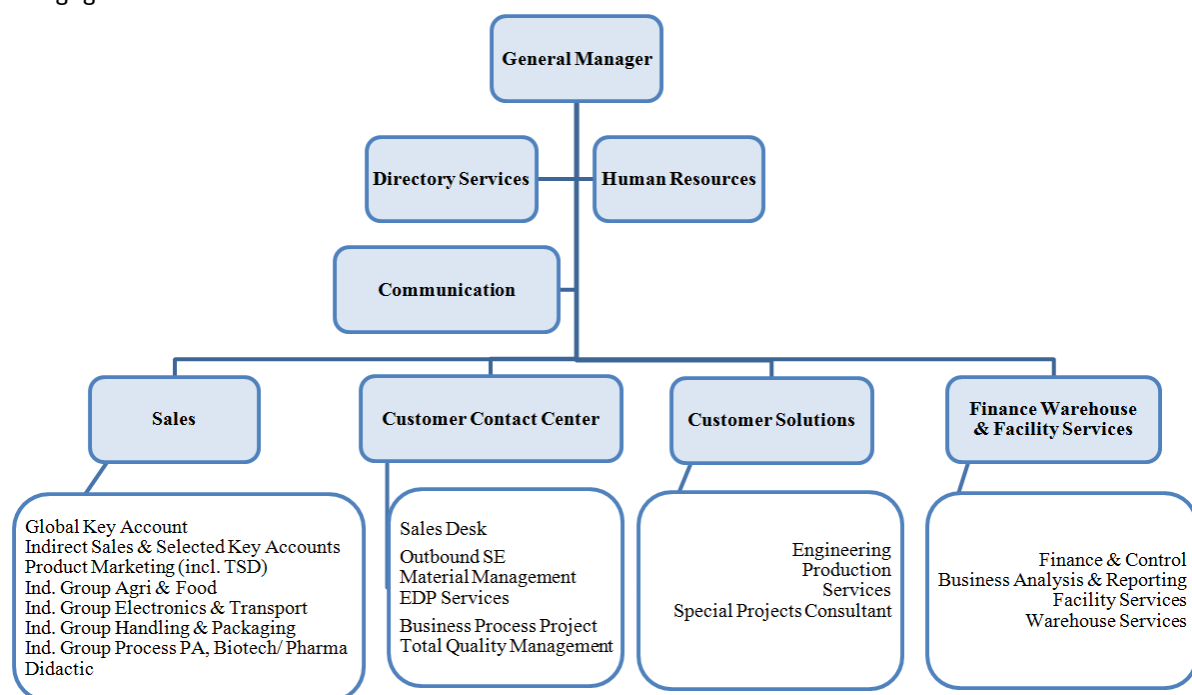
Opdrachtomschrijving ^[1]

In dit hoofdstuk is de opdracht uitgewerkt. Hiervoor is de achtergrond van de opdracht beschreven vanuit de behoefte van het bedrijf. Vervolgens is een probleembeschrijving gegeven waaruit de doelstelling van de afstudeeropdracht is geformuleerd. Deze is afgebakend door het opstellen van een scope. Om de doelstelling te behalen, zijn bepaalde producten (deliverables) gedefinieerd. Voordat er aan de opdracht kan worden gestart, moet er aan bepaalde randvoorwaarden worden voldaan. Tot slot zijn de risico's beschreven die deze opdracht met zich meebrengt.

Achtergrond

Festo is een internationale organisatie die zich inzet voor de industriële automatisering. Festo levert pneumatische, elektrische en hybride technologieën om de automatisering van productieprocessen te verbeteren. Het bedrijf is in 1925 opgericht in Esslingen, Duitsland. Inmiddels bestaat Festo uit 59 zelfstandige vestigingen met ruim 14600 medewerkers. De Nederlandse vestiging is in 1967 opgericht en is inmiddels een zelfstandige onderneming met ongeveer 135 medewerkers.

De medewerkers zijn werkzaam op verschillende afdelingen. In figuur 1 is het organogram van het bedrijf weergegeven:



Figuur 0-1: Organogram Festo Nederland ^[2]

De afstudeeropdracht vindt plaats op de afdeling Customer Solutions. Deze afdeling is verdeeld in vier subgroepen:

- **Engineering**
 - o De klantspecifieke vragen worden hier omgezet tot nieuwe oplossingen.
- **Production**
 - o De oplossingen van Engineering worden hier gerealiseerd. Ook worden hier defecte producten gerepareerd.
- **Services**
 - o Draagt de naam Field Services. Er wordt apparatuur en onderhoud bij de klant gepleegd, zowel op contract als op aanvraag.
- **Special Projects Consultant**
 - o Complexe klantenprojecten worden hier geïnitieerd, beheerd en gerealiseerd.

Op de afdeling Engineering wordt het innoverende karakter van Festo in Delft van inhoud voorzien. Festo blijft graag op de hoogte van nieuwe technologische ontwikkelingen om daar vervolgens zelf wat mee te kunnen doen. Zo is onlangs een machine uit Nederland opgedoken dat zeer werkverlichtend is bij een beroep waar veel getild moet worden, een tilhulp. Vanuit de afdeling engineering is de behoefte ontstaan om een dergelijke tilhulp te realiseren.

Probleembeschrijving

De industrie- en dienstensector richten zich steeds meer op de ergonomie van werkplekken. Voor zwaar lichamelijke beroepen waarbij veel zware objecten verplaatst moeten worden, zijn tilhulp- en balanceersystemen een opkomend aandachtspunt. Volgens de ARBO is het maximale gewicht dat herhaaldelijk mag worden verplaatst tijdens de beroepsuitoefening 23 kilogram, afhankelijk van het beroep. Het maximum gewicht dat door werknemers getild mag worden is 50 kilogram. Een tilhulp is dus een zeer aantrekkelijke machine in deze gewichtsklasse. De tilhulp is werkverlichtend en biedt dezelfde vrijheden als zonder hulp.

Ook zijn tilhulpsystemen veelal voorzien van pneumatische balanceersystemen, wat ervoor zorgt dat er perslucht op de locatie aanwezig moet zijn om het systeem te laten werken. Het probleem is dat dit niet overal aanwezig is. Een dergelijke oplossing op basis van servo-elektrische motoren is nog niet ontwikkeld bij Festo.

Doelstelling

De doelstelling van de opdracht is het ontwikkelen van een volledig servo-elektrisch, intuïtief tilhulp- en balanceersysteem in de verticale richting op basis van Festo apparatuur. Het systeem moet gewichten tussen de vijf en vijftig kilo doen aanvoelen als gewichten die een factor vijf kleiner zijn. De documentatie met resultaten moet gereed zijn op 05-06-2015.

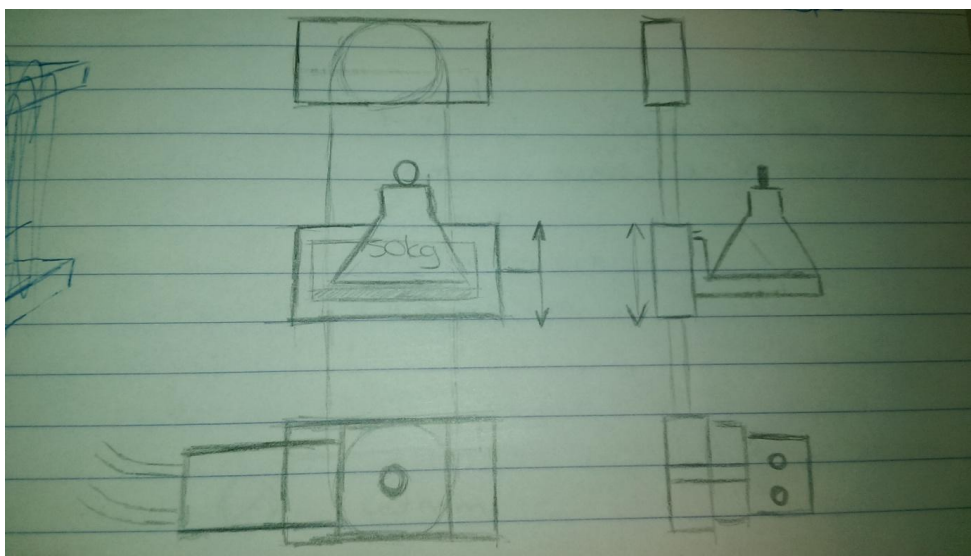
Scope en afbakening

Gedurende de opdracht worden de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Onderzoek naar de werking en het gebruik van tilhulpsystemen. De focus ligt op het belang en de veiligheid van de gebruiker.
- Onderzoek naar de werking van Festo apparatuur (PLC, motorcontroller, motor en lineaire as).
- Onderzoek naar de dynamische grenzen van het systeem. Welke parameters zijn er aanwezig binnen het systeem en wat is de impact als er een verandert? Is het gekozen concept de beste oplossing?
- Samenstellen van benodigde systeemeigenschappen en het ontwerpen van het testmodel.
 - o Het systeem wordt ontworpen voor een verticale verplaatsing over één as (*zie figuur 2*).
Onderin de tekening is een servo-motor getekend die de tandriemas aandrijft. Op de slede van de tandriemas is het gewicht geplaatst op een gewichtenhouder.
- Ontwerpen van een PLC-regelsysteem dat balanceert en aandrijft.
- Het bouwen en testen van het testmodel.
- Het documenteren van de onderzoeken, ontwerpen en testresultaten.

De volgende werkzaamheden vallen buiten de opdracht:

- Het ontwerpen van het systeem voor meerdere graden van vrijheid.
- Het onderzoeken naar de pneumatische mogelijkheden van dit systeem.
- Aandrijfcomponenten van andere partijen worden gebruikt.
- Het ontwerpen van een bepaald soort gewichtenplateau.



Figuur 0-2: Concepttekening

Deliverables

Gedurende deze opdracht worden de volgende deliverables opgeleverd:

- Plan van aanpak
- Testrapport over de dynamische grenzen van het systeem en de aanbevelingen om deze grenzen te kunnen verleggen.
- Een testmodel
 - o Op basis van een vooraf ontworpen mechanisch model
 - o En een regeltechnisch model voor de PLC en motorcontroller.
 - o Er wordt getest met variabele massa's.
- Het eindrapport.

Randvoorwaarden en aannames

Voordat er aan de afstudeeropdracht kan worden gewerkt, moet er door Festo worden voldaan aan de volgende randvoorwaarden:

- De student heeft een account met toegang tot informatie over de betreffende opdracht.
- De student heeft een werkplek binnen Festo.
- Het bedrijf stelt materiaal beschikbaar voor de testen.

Verder is aangenomen dat:

- Medewerking wordt verleend aan de student.
- De student niet wordt uitgesloten van informatie betreffende de opdracht.

Risico's

De risico's aangaande de opdracht zijn:

1. De onderdelen van de testopstelling niet aanwezig zijn bij Festo en moeten besteld.
2. Het testmodel gaat stuk waardoor er geen metingen meer kunnen worden verricht.
3. Door langdurig onderzoek is er tijdschort voor het opleveren van een werkend testmodel.

De gevolgen en vervolgacties van deze risico's zijn:

1. Het bouwen van het testmodel is vertraagd, waardoor het testen van het ontwerp en het rekenmodel wordt vertraagd en de kans klein is dat er een goed werkend testmodel wordt opgeleverd. Er kunnen misschien simulaties van het rekenmodel worden opgeleverd als bewijs dat het werkt.
2. Als er nieuwe onderdelen besteld moeten worden geldt hier hetzelfde als bij risico 1. Bij het repareren van onderdelen loopt de opdracht ook vertraging op, maar is het wellicht nog in te halen.
3. Als dit risico uitkomt kan er geen werkend testmodel worden opgeleverd. Er kunnen misschien simulaties worden gemaakt voor de specifieke situatie.

Aanpak

In dit hoofdstuk is de aanpak van de afstudeeropdracht beschreven. De opdracht is opgedeeld in een aantal fasen. De fasen bestaan uit een aantal werkpakketten die moeten worden afgerond alvorens kan worden doorgedaan met de volgende fase.

Fasering

De opdracht is opgedeeld in de volgende fasen:

1. Opstarten

De opstartfase bevat het schrijven van een plan van aanpak en het inlezen in de opdracht.

2. Definieren

In de definitiefase wordt de opdracht verder gedefinieerd en voorzien van een pakket van eisen. Er wordt onderzoek uitgevoerd op het systeem en op basis hiervan kan het ontwerp worden gecreëerd.

3. Ontwerpen

In de ontwerpfase wordt het gehele ontwerp van het tilhulpsysteem opgeleverd. Er worden alvast tests uitgevoerd om de beste principes te bewijzen.

4. Realiseren (optioneel)

In deze optionele fase wordt het ontwerp gerealiseerd tot een werkend testmodel.

5. Afsluiting

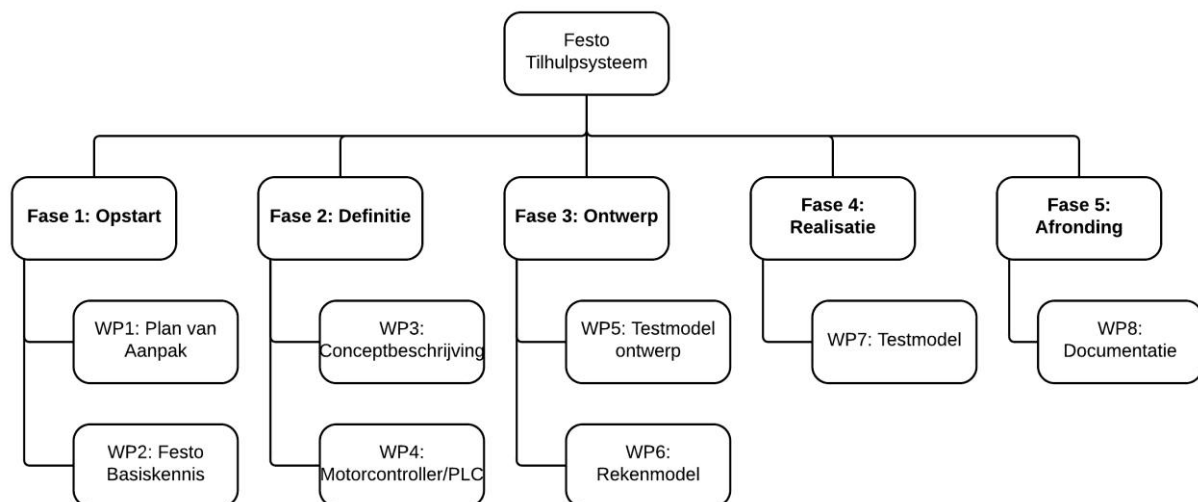
De opdracht wordt afgesloten en alle documentatie wordt opgeleverd.

Werkpakketten

De werkpakketten worden in de definitiefase opgesteld na het afronden van de eerste verdiepende onderzoeken. Een werkpakket bestaat uit:

- Eigenaar
- Omschrijving
- Uit te voeren activiteiten
- Beschikbare tijd
- Input
- Output.

De afstudeeropdracht bestaat uit de volgende werkpakketten:



Figuur 0-3: Werkpakketten

In bijlage A zijn de werkpakketten beschreven. De werkpakketten zijn in hoofdstuk 6 in een planning verwerkt.

Beheersing

Een project wordt normaal gesproken beheerst op de volgende punten:

- Tijd
- Geld
- Kwaliteit
- Scope.

Tijd en Geld:

De opdracht wordt beheerst op tijd. Er worden geen nieuwe spullen aangeschaft die geld kunnen kosten, en kosten van werknemers worden als niet relevant ervaren. De beheersing op tijd wordt gerealiseerd door het constant bijwerken van de planning. Bij complexe vraagstukken worden specialisten zo spoedig mogelijk geraadpleegd.

Kwaliteit:

De kwaliteit wordt beheerst door opgeleverd werk te laten nakijken door betrokkenen bij de opdracht en de opmerkingen te verwerken. Hierdoor kunnen producten alleen maar worden verbeterd zodat de vereiste kwaliteit van de specialisten kan worden gegarandeerd.

Scope:

De scope wordt beheerst door iedere scopewijziging uit te zetten in de planning en de gevolgen te checken. Hierdoor kunnen kansen die te veel tijd kosten worden afgewezen, zodat de uiteindelijke oplevering binnen de originele scope kan worden gerealiseerd.

Inrichting

In dit hoofdstuk is de inrichting beschreven voor de uitvoering van de opdracht. Als eerste zijn de belanghebbenden geïnventariseerd die van belang zijn bij de uitvoering van de opdracht, of belang hebben bij de opdracht. Vervolgens is hieruit een selectie gemaakt met personen die het meeste moeten worden geïnformeerd over de voortgang van de opdracht.

Inventarisatie

De belanghebbenden bij deze opdracht zijn:

- **Jan Koudijzer**
 - o Manager van de afdeling Customer Solutions. De opdracht wordt op deze afdeling uitgevoerd.
- **Bob van der Ree**
 - o Teamleider Engineering op de afdeling Customer Solutions. Opdrachtgever van de afstudeeropdracht en bedrijfsbegeleider.
- **Arnoud Tukker**
 - o Bedrijfsbegeleider en inhoudelijk deskundige van de opdracht. Heeft al een begin gemaakt aan de opdracht, maar werkt de opdracht in samenwerking verder uit.
- **Emiel van Setten**
 - o Stagiair met een soortgelijke opdracht. Waardevol om bevindingen uit te wisselen om zo tot nieuwe inzichten te komen.
- **Tim Kieft**
 - o Begeleider van Emiel, specialist van de elektrische aandrijvingen van Festo en beheerder van de testmaterialen.
- **Anita le Mair**
 - o Afstudeerbegeleider vanuit de Haagse Hogeschool.
- **Ernst Kouwe**
 - o Tweede afstudeerbegeleider vanuit de Haagse Hogeschool.

Teamsamenstelling

Gedurende de opdracht worden de volgende belanghebbenden actief betrokken bij de opdracht:

Naam:	Functie:	Mailadres:	Locatie:
Jasper Daleman	Afstudeerder	STO@festo.nl	Festo Delft
Bob van der Ree	Opdrachtgever	REE@festo.nl	Festo Delft
Arnoud Tukker	Bedrijfsbegeleider	TKR@festo.nl	Festo Delft
Anita le Mair	Afstudeerbegeleider	a.lemair@hhs.nl	Haagse Hogeschool Delft

Planning

Er is een planning opgesteld om de opdracht op een gestructureerde manier aan te pakken. De in hoofdstuk 4 beschreven fasering is hierin verwerkt en voorzien van einddata.

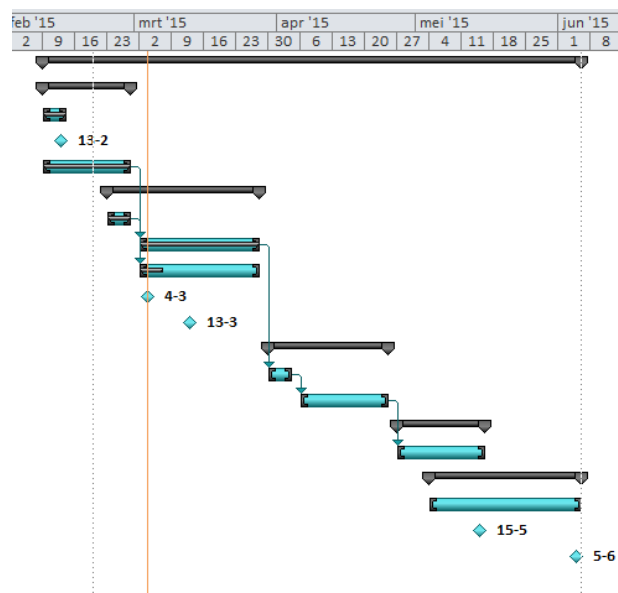
Er zijn bepaalde deadlines van de Haagse Hogeschool die gehaald moeten worden:

- Eind week 1 wordt het Plan van Aanpak opgeleverd (13-02-2015)
- Eind week 5 is de conceptversie van de inhoudsopgave van het eindverslag opgeleverd (13-3-2015)
- Begin week 14 wordt het concepteindverslag opgeleverd (11-05-2015)
- Op 05-06-2015 wordt het eindverslag ingeleverd.

Zoals te zien is in de onderstaande tabel, zijn beide planningen op elkaar afgestemd zodat deze gemakkelijker te halen is.

Tabel 10: Planning tilhulp

Taaknaam	Duur	Begindatum	Einddatum	Voorafgaande taken
Festo Tilhulpsysteem	85 dagen	maa 9-2-15	vri 5-6-15	
1. Opstarten	15 dagen	maa 9-2-15	vri 27-2-15	
WP1: Plan van Aanpak	5 dagen	maa 9-2-15	vri 13-2-15	
Inleveren PvA v1	0 dagen	vri 13-2-15	vri 13-2-15	
WP2: Festo Basiskennis	15 dagen	maa 9-2-15	vri 27-2-15	
2. Definitie	25 dagen	maa 23-2-15	vri 27-3-15	
WP1: Plan van Aanpak	5 dagen	maa 23-2-15	vri 27-2-15	
WP3: Gebruikersanalyse	20 dagen	maa 2-3-15	vri 27-3-15	7
WP4: Motorcontroller/PLC	20 dagen	maa 2-3-15	vri 27-3-15	5
Bezoek begeleiding	0 dagen	woe 4-3-15	woe 4-3-15	
Inleiding+Inhoud verslag	0 dagen	vri 13-3-15	vri 13-3-15	
3. Ontwerp	20 dagen	maa 30-3-15	vri 24-4-15	
WP5: Testmodel ontwerp	5 dagen	maa 30-3-15	vri 3-4-15	8
WP6: Rekenmodel	15 dagen	maa 6-4-15	vri 24-4-15	13
4. Realisatie/Test	15 dagen	maa 27-4-15	vri 15-5-15	
WP7: Testmodel testen	15 dagen	maa 27-4-15	vri 15-5-15	14
5. Afronding	25 dagen	maa 4-5-15	vri 5-6-15	
WP8: Documentatie	25 dagen	maa 4-5-15	vri 5-6-15	
Concepteindverslag	0 dagen	vri 15-5-15	vri 15-5-15	
Eindverslag	0 dagen	vri 5-6-15	vri 5-6-15	



In de afbeelding hiernaast is een grafische weergave te zien van de planning van de afstudeeropdracht. De planning is gemaakt op basis van de in hoofdstuk 4 aangegeven afhankelijkheden.

Figuur 0-4: Gantt Chart

Bijlage A: Werkpakketten

In deze bijlage zijn alle werkpakketten beschreven:

Werkpakket 1:	Plan van Aanpak
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Het plan van aanpak is opgesteld om houvast te geven bij de uitvoering van de opdracht. Hierin is onder andere een planning weergegeven die de structuur van het project tegen de tijd uitzet.
Activiteiten:	Bespreken van opdrachtomschrijving, opdoen van basiskennis van Festo
Tijd:	2 weken
Input:	Opdrachtomschrijving, Basiskennis Festo
Output:	Plan van aanpak

Werkpakket 2:	Basiskennis Festo
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Voor het opstellen van een goed plan van aanpak en een duidelijk beeld van de activiteiten voor de opdracht, is het van belang voldoende kennis te hebben van de systemen die Festo levert.
Activiteiten:	Documentatie lezen E-Drives, Plan van aanpak aanpassen, Testdisplay
Tijd:	2 weken
Input:	Plan van Aanpak, documentatie Festo
Output:	Verslag van benodigde kennis voor deze opdracht.

Werkpakket 3:	Conceptbeschrijving
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Om een goed pakket van eisen op te stellen, is het van belang het gebruik van het product door de eindgebruikers in beeld te brengen. Hieruit kunnen de benodigde krachten en snelheden opgesteld worden, zodat er een componentkeuze voor het concept gemaakt kan worden
Activiteiten:	Testen van bepaalde parameters op display, onderzoek doen naar het gebruik van tilhulpen.
Tijd:	2 weken
Input:	Plan van aanpak, Basiskennis Festo apparatuur
Output:	Pakket van Eisen, Conceptbeschrijving met componenten.

Werkpakket 4:	Motorcontroller/PLC
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Onderzoek doen naar de mogelijkheden van de motorcontroller en kijken voor welke toepassingen een PLC vereist is. Ook het doorgronden van de werking van beide apparaten.
Activiteiten:	Doornemen documentatie motorcontroller en PLC, documenteren opgedane kennis. Concept aanpassen naar de onderzoeksresultaten
Tijd:	2 weken
Input:	Pakket van Eisen, Festo documentatie
Output:	Onderzoeksrapport

Werkpakket 5:	Testmodel ontwerp
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Ontwerp maken op basis van de eerder uitgevoerde onderzoeken, zodat de bouw van het testmodel spoedig kan verlopen.
Activiteiten:	Onderdelen verwerken in een 3D-CAD model
Tijd:	1 week
Input:	Conceptbeschrijving, Motorcontroller/PLC rapport
Output:	Bouwtekeningen en Elektrische schema's testmodel

Werkpakket 6:	Rekenmodel
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Het rekenmodel ontwikkelen voor tilhulpsysteem. Het rekenmodel is de basis voor de programmering van het systeem, dat ook onder dit werkpakket wordt vormgegeven.
Activiteiten:	Mogelijkheden testen op testopstellingen, programmering vormgeven.
Tijd:	3 weken
Input:	Testmodel ontwerp, onderzoeksrapport Motorcontroller/PLC
Output:	Rekenmodel voor programmering testmodel

Werkpakket 7:	Testmodel
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Het bouwen van het testmodel en alle opgeleverde concepten aan tests onderwerpen, zodat uiteindelijk een werkend testmodel kan worden opgeleverd.
Activiteiten:	Testmodel bouwen, testen en documenteren
Tijd:	3 weken
Input:	Bouwtekeningen, elektrische schema's en rekenmodel
Output:	Testmodel met documentatie en testrapporten van de oplossingen

Werkpakket 8:	Documentatie
Eigenaar:	Jasper Daleman
Omschrijving:	Alle opgedane kennis en opgeleverde documentatie samenvoegen in één grote bundel. Deze bundel moet worden opgeleverd bij de Haagse Hogeschool en Festo.
Activiteiten:	Alle documentatie doornemen en samenvoegen
Tijd:	5 weken
Input:	Alle documentatie
Output:	Afstudeerscriptie

BIJLAGE D: Testrapport snelheidsmeting

Testrapport Snelheidsmeting

Testrapport over de test waarmee is bepaald voor welke maximale snelheid het tilhulpsysteem ontworpen wordt.

FESTO

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Jasper Daleman
11042346
Festo B.V.
20 februari 2015
Delft

Inleiding

Een voorwerp wordt verplaatst door het te versnellen tot een bepaalde snelheid en vervolgens weer te vertragen. Deze snelheid gedurende de normale verplaatsing van bijvoorbeeld een doos is nog een relatief begrip, er is nog geen waarde aan verbonden. In dit testrapport is beschreven voor welke snelheden het tilhulpsysteem ontworpen wordt om een natuurlijke beweging te kunnen nabootsen.

Doel

Het doel van de snelheidstest is het in beeld van de snelheid die het systeem moet kunnen halen bij een maximale belasting. Welke snelheid en versnelling wordt er behaald gedurende normaal gebruik en welke snelheid wordt er behaald met een maximale inspanning van de gebruiker?

Testopstelling

Voor deze test zijn de volgende onderdelen gebruikt:

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| - Een EMMS-ST-87-S-SE | Stappenmotor |
| - Een CMMS-ST-C8-7 | Motorcontroller |
| - Een ELGR-TB-55-650-0H | Tandriemas |
| - PSU2410 | Voeding met losse stekker |
| - NEBM-S1G15-E-5-LE-6 | Motorkabel |
| - NEBM-M12G8-E-15-S1G9 | Encoderkabel. |

De testopstelling is weergegeven in Figuur 0-1: Testopstelling en Figuur 0-2: Testopstelling Motorcontroller. Het aansluitschema is bijgevoegd in Bijlage A.

Testmethode

Voor deze test is een aantal onafhankelijke werknemers van Festo gevraagd om de slede van de as op en neer te bewegen in twee situaties:

- Een keer zo snel mogelijk omhoog en omlaag
- Een keer normaal omhoog en omlaag.

De motor levert geen kracht gedurende de beweging. Deze is alleen gemonteerd om de beweging van de slede in beeld te brengen. De kracht die de testpersonen moeten leveren om de slede in beweging te krijgen is:

$$T_w = 0,4 \text{ Nm}^{10}$$

$$d_{poelie} = 0,02865 \text{ m}$$

$$F_w = \frac{T_w}{r_{poellie}} = \frac{0,4 \cdot 2}{0,02865} = 28 \text{ N}$$

Dit staat gelijk aan een te verplaatsen massa van:

$$g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ (bij benadering)}$$

$$F = m \cdot g$$

$$m = \frac{F}{g} = \frac{28}{10} = 2,8 \text{ kg}$$

Daarnaast wordt met behulp van de softwaretool FCT van Festo de snelheid uitgelezen. Voor elke meting wordt een snelheids- tijdgrafiek gemaakt, waaruit de maximale snelheid en de gemiddelde versnelling kunnen worden bepaald. De versnelling wordt berekend met:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$



Figuur 0-1: Testopstelling



Figuur 0-2: Testopstelling Motorcontroller

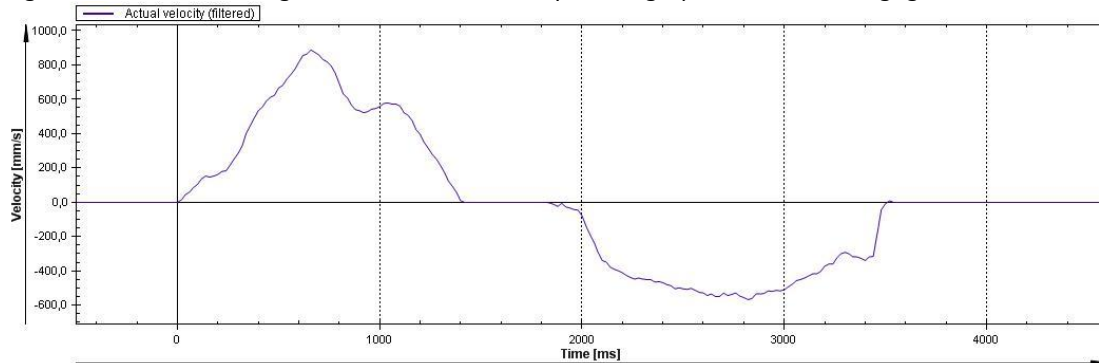
¹⁰ Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes ELGR*. Geraadpleegd op 27 mei 2015. http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/ELGR_EN.PDF

Resultaten

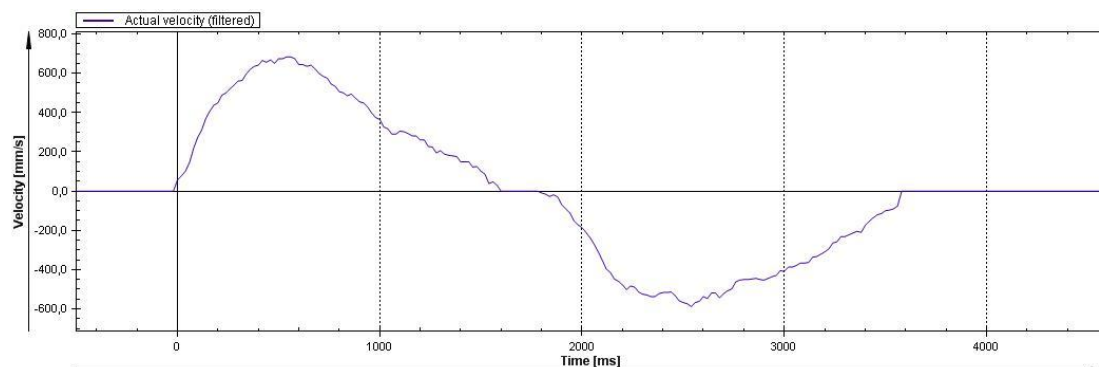
De test bestaat uit twee verschillende metingen. Als eerst zijn de resultaten weergegeven voor de normale verplaatsing van de slede. Vervolgens zijn de resultaten weergegeven van de maximale inspanningen van de testpersonen.

Metingen normale snelheid

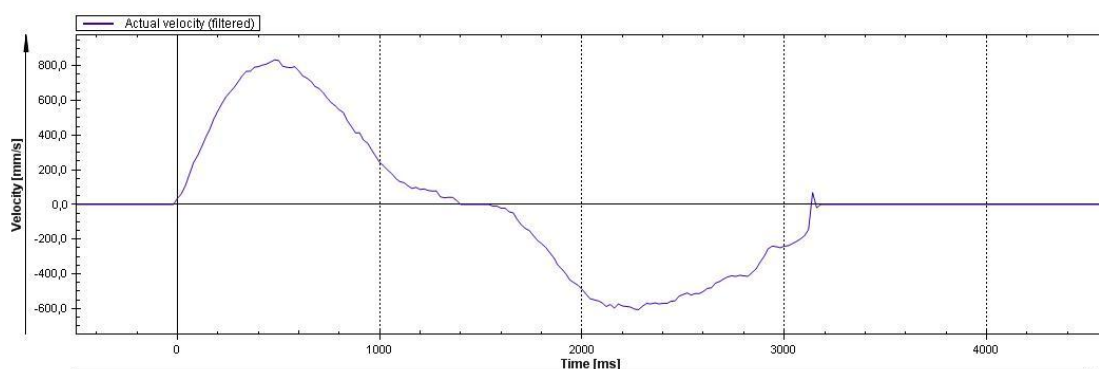
De grafieken van de metingen met een normale verplaatsing zijn hieronder weergegeven:



Figuur 0-3: Meting 1 normale snelheid



Figuur 0-4: Meting 2 normale snelheid



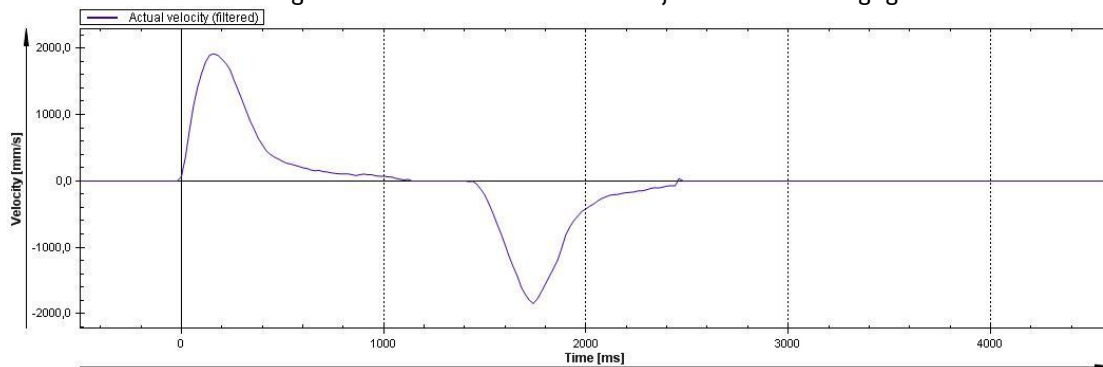
Figuur 0-5: Meting 3 normale snelheid

Uit de bovenstaande grafieken kan worden opgemaakt dat de maximale snelheid bij een normale verplaatsing zich gemiddeld tussen de 0,6 m/s en 0,8 m/s bevindt. Deze snelheid wordt behaald na ongeveer een halve seconde. Dit houdt in dat de gemiddelde versnelling gelijk is aan:

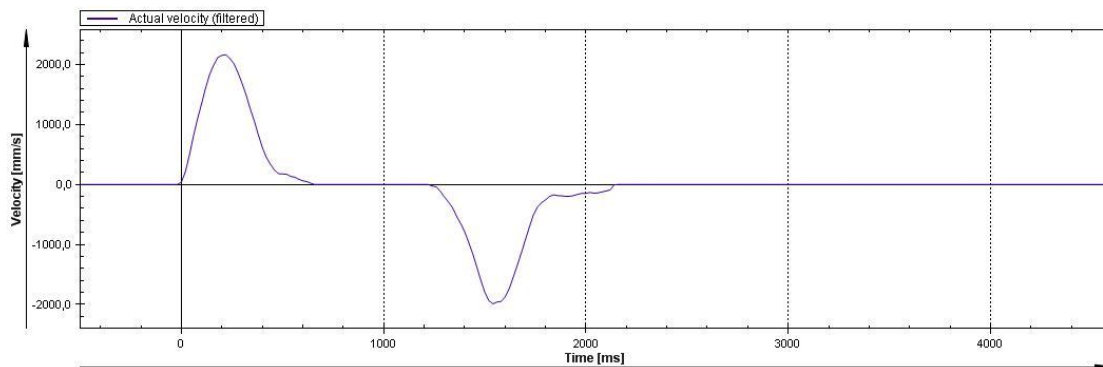
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0,7}{0,5} = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Metingen maximale snelheid

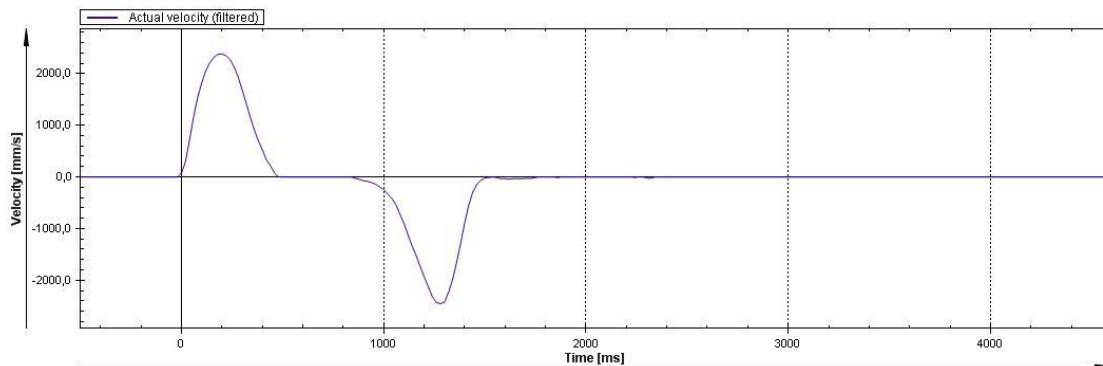
De resultaten van de metingen voor de maximale snelheid zijn hieronder weergegeven



Figuur 0-6: Meting 1 maximale snelheid



Figuur 0-7: Meting 2 maximale snelheid



Figuur 0-8: Meting 3 maximale snelheid

Uit de bovenstaande grafieken kan worden opgemerkt dat de gemiddelde maximale snelheid die is behaald gelijk is aan 2 m/s. Deze snelheid wordt behaald met de volgende gemiddelde versnelling:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2}{0,2} = 10 \text{ m/s}^2$$

Deze versnelling wordt bij benadering zowel met een beweging omhoog als omlaag gehaald.

Conclusie

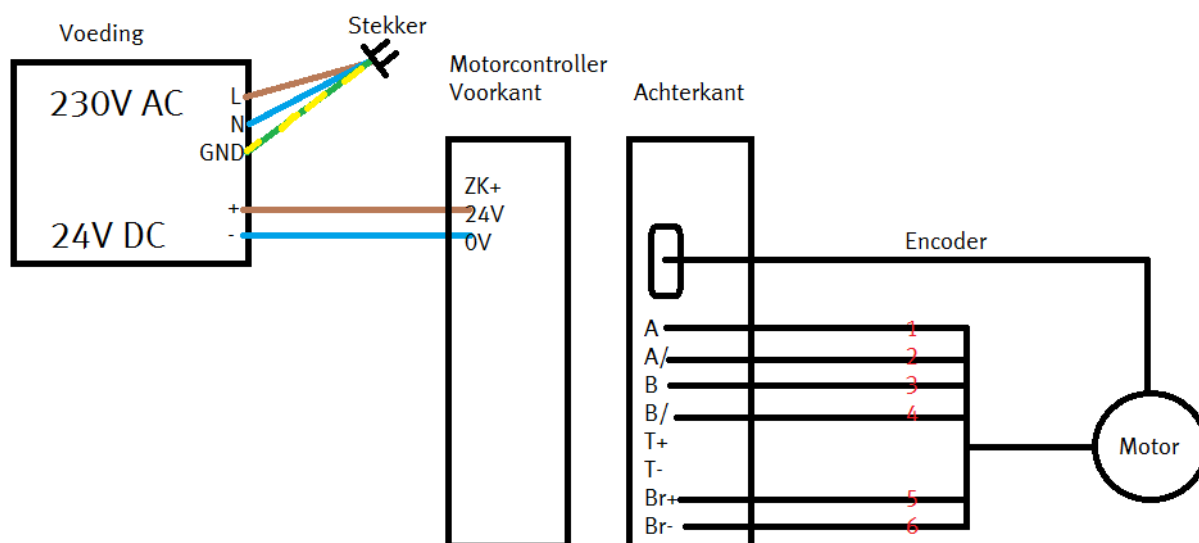
Bij deze test is gemeten met een tandriemas die een weerstand heeft van 28 N. Dit komt overeen met een massa van ongeveer 3 kg. In de opdrachtoomschrijving is beschreven dat de benodigde kracht om een object te verplaatsen een factor 5 kleiner moet aanvoelen. Als de massa dus aanvoelt als 3 kg aan de as, betekent dit dat er 15 kg is bevestigd op de slede. Dit is een veel voorkomende massa in de context van het tilhulpsysteem en daarom zijn de resultaten van deze test bruikbaar.

Uit de testresultaten is gebleken dat de maximale snelheid die behaald kan worden ongeveer gelijk is aan 2 m/s. Een normale snelheid is bij benadering tussen de 0,6 en 0,8 m/s. Dit betekent dat de begrenzing van het systeem op 2 m/s een ruime marge geeft op het normale gebruik en dus niet als hinderlijk kan worden ervaren bij normaal gebruik.

De maximaal behaalde versnelling van 10 m/s^2 is bij benadering gelijk aan de zwaartekracht. De versnelling bij normaal gebruik is ongeveer $1,4 \text{ m/s}^2$, wat betekent dat de maximale versnelling ook een ruime marge heeft op het normale gebruik.

Bronvermelding

1. Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes ELGR*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/ELGR_EN.PDF

BIJLAGE A: Aansluitschema

BIJLAGE E: Testrapport statische wrijving

Testrapport statische wrijving

Bepalen van de statische wrijving in het systeem met de beschikbare onderdelen in verschillende configuraties.

FESTO

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Jasper Daleman
11042346
Festo B.V.
27 maart 2015
Delft

Inleiding

Als men een voorwerp over een bepaald oppervlak in beweging wil brengen, ondervindt deze altijd een bepaalde statische wrijving. De kracht die op het voorwerp moet worden uitgeoefend, moet in ieder geval groter zijn dan deze wrijvingskracht om het in beweging te brengen. De kracht die hiervoor nodig is, is in beeld gebracht met deze test.

Doel

Het doel van deze test is om de statische wrijvingen in beeld te brengen die in het systeem aanwezig zijn. Met welke waarden moet er rekening gehouden worden bij het regelsysteem en welke invloed heeft de vertragsingskast op het systeem?

Testopstelling

Voor deze test zijn de volgende testopstellingen gebruikt:

1: Motor los

- Motorcontroller *CMMP-AS-C5-3A-M3*
- Servomotor *EMMS-AS-70-M-LS-RM*
- Testkastje *CDSM-S1-P*

2: Motor met vertraging

- Motorcontroller
- Servomotor
- Vertragsingskast (i = 5) *EMGA-60-P-G5-SAS-70*
- Testkastje

3: Tandriemas horizontaal met motor

- Motorcontroller
- Servomotor
- Tandriemas *EGC-70-1000-TB-KF-GK*
- Testkastje

4: Tandriemas horizontaal met motor en vertragsingskas

- Motorcontroller
- Servomotor
- Vertragsingskast
- Tandriemas
- Testkastje

Daarnaast is er voor elke testopstelling een laptop nodig met de softwaretool FCT. Hiermee kunnen verschillende parameters van het systeem worden ingesteld en uitgelezen. Het aansluitschema is bijgevoegd in Bijlage A.

Testmethode

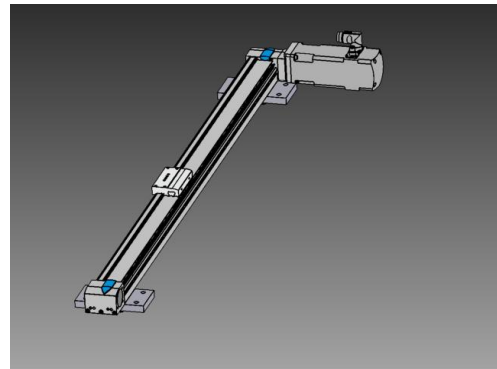
Het testkastje kan de motorcontroller voorzien van een analoge input om een aantal parameters mee aan te sturen. Voor deze test wordt er gebruik gemaakt van de stroomregeling van de motorcontroller. Hiermee kan de stroom analoog worden ingevoerd. De stroom is evenredig met de kracht, dus de stroom die nodig is op het moment van het in beweging komen van de as is gelijk aan de statische wrijving. De stroom kan worden als volgt worden omgerekend naar een kracht:

$$T_m = C_m \cdot I$$

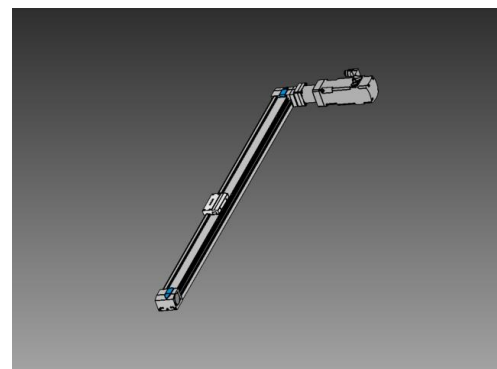
$$F_m = F_w = \frac{T_m}{r_{poelie}}$$

De motorconstante C_m is gelijk aan 0,864 Nm/A¹¹

De straal van de poelie r_{poelie} is gelijk aan 0.012415 m¹²



Figuur 0-1: Testopstelling 3



Figuur 0-2: Testopstelling 4

¹¹ Festo B.V. (2014). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF

¹² Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

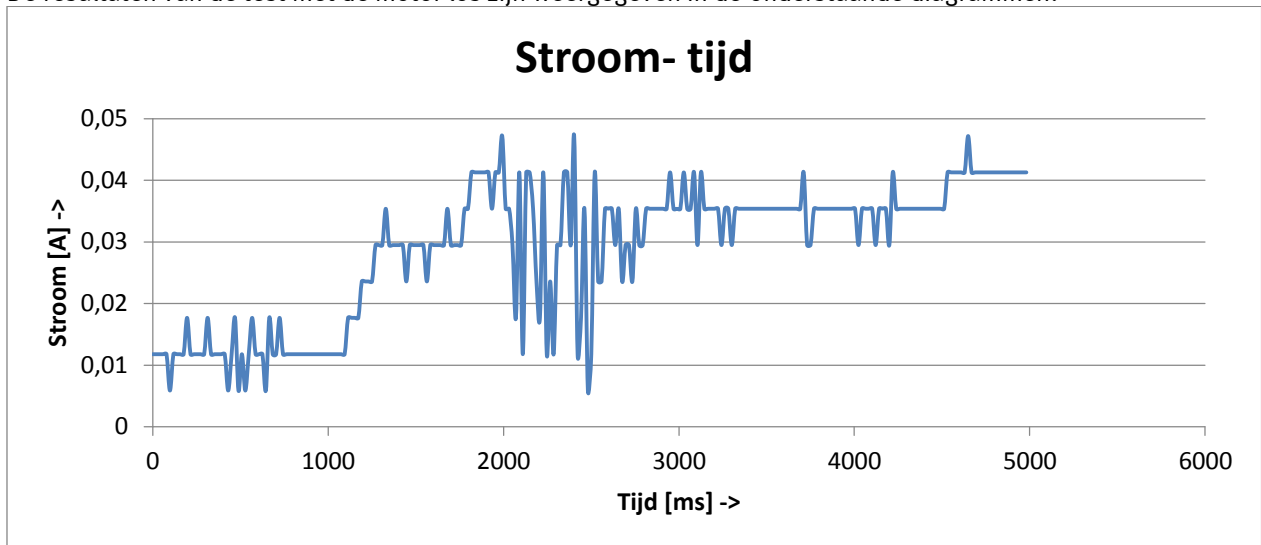
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF

Resultaten

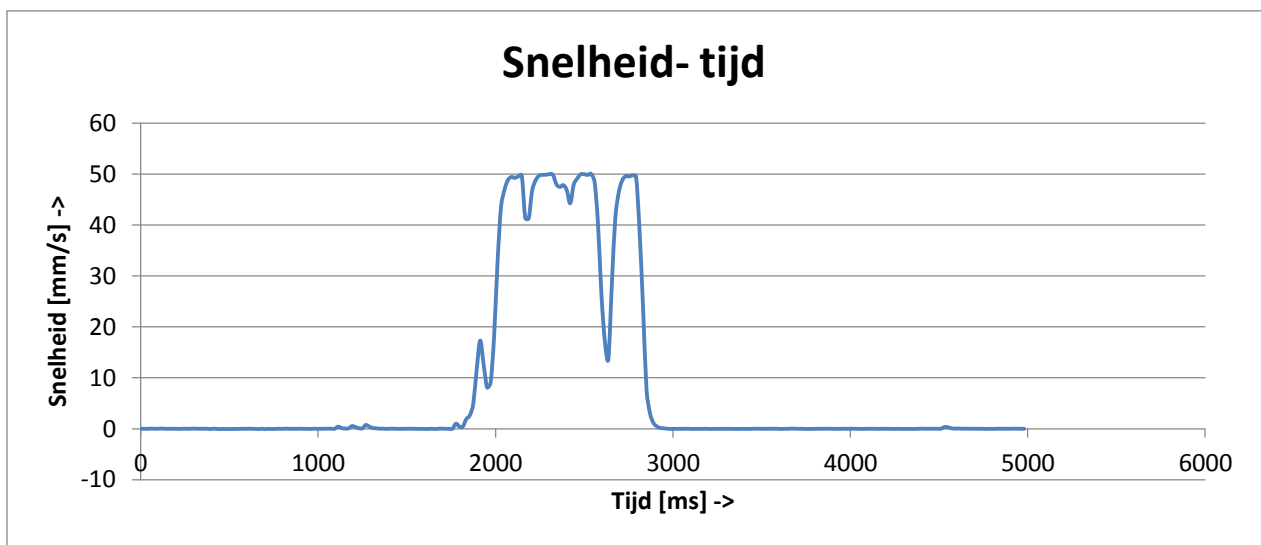
De testen zijn uitgevoerd op volgorde van de gegeven testopstellingen in paragraaf 1.2. De resultaten zijn weergegeven in een stroom- tijd diagram en een snelheid- tijd diagram.

Motor los

De resultaten van de test met de motor los zijn weergegeven in de onderstaande diagrammen:



Figuur 0-3: Stroom- tijd diagram motor los



Figuur 0-4: Snelheid- tijd diagram motor los

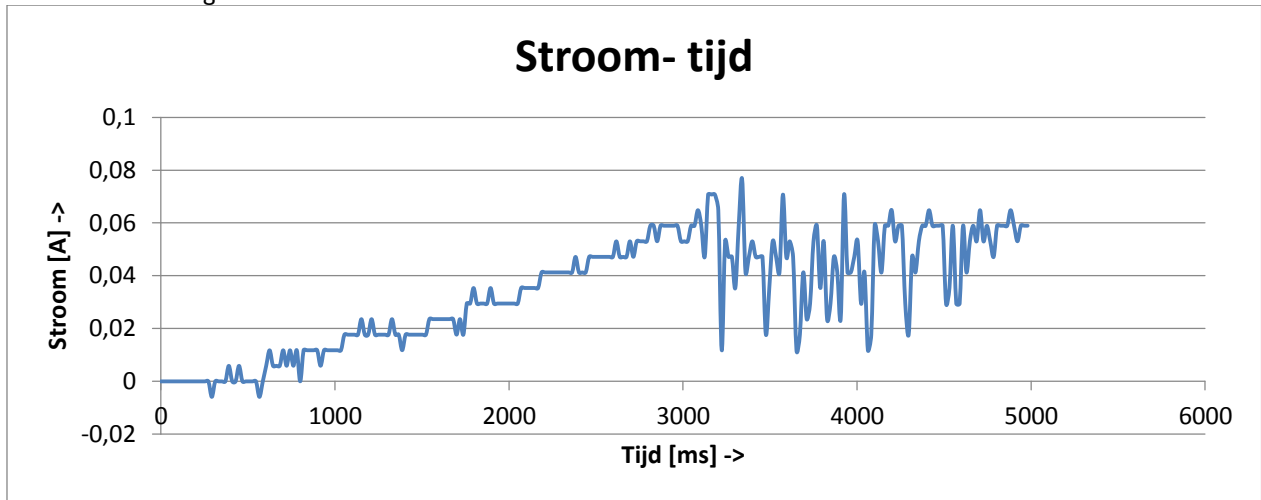
In de bovenstaande diagrammen is te zien dat de motoras na ongeveer 2 s begint met draaien. Hierbij is een piekstroom gemeten van gemiddeld 0,040 A. De statische weerstandskracht is dan:

$$T_m = 0,864 \cdot 0,040 = 0,035 \text{ Nm}$$

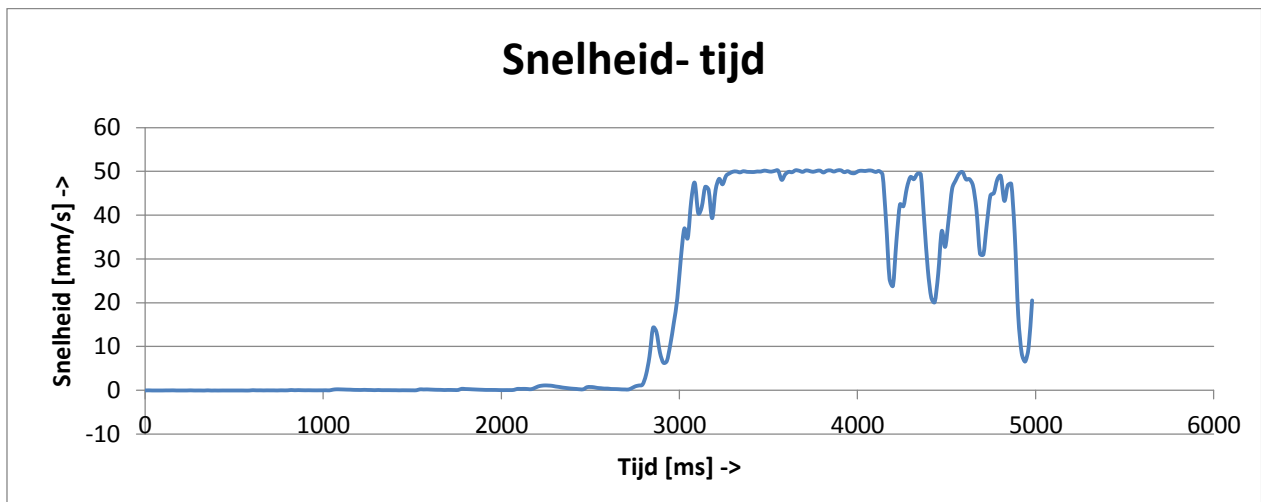
$$F_w = \frac{0,035}{0,012415} = 2,783 \text{ N}$$

Motor met vertragsingskast

De resultaten van de test voor de statische wrijving met een vertragsingskast zijn weergegeven in de onderstaande diagrammen:



Figuur 0-5: Stroom- tijd diagram motor met vertragsingskast



Figuur 0-6: Snelheid-tijd diagram

In het snelheid- tijd diagram is te zien dat de as begint te draaien rond de 3 s. De motorstroom die hiervoor nodig is, is ongeveer gelijk aan 0,070 A. Dit komt overeen met:

$$T_m = 0,864 \cdot 0,070 = 0,060 \text{ Nm}$$

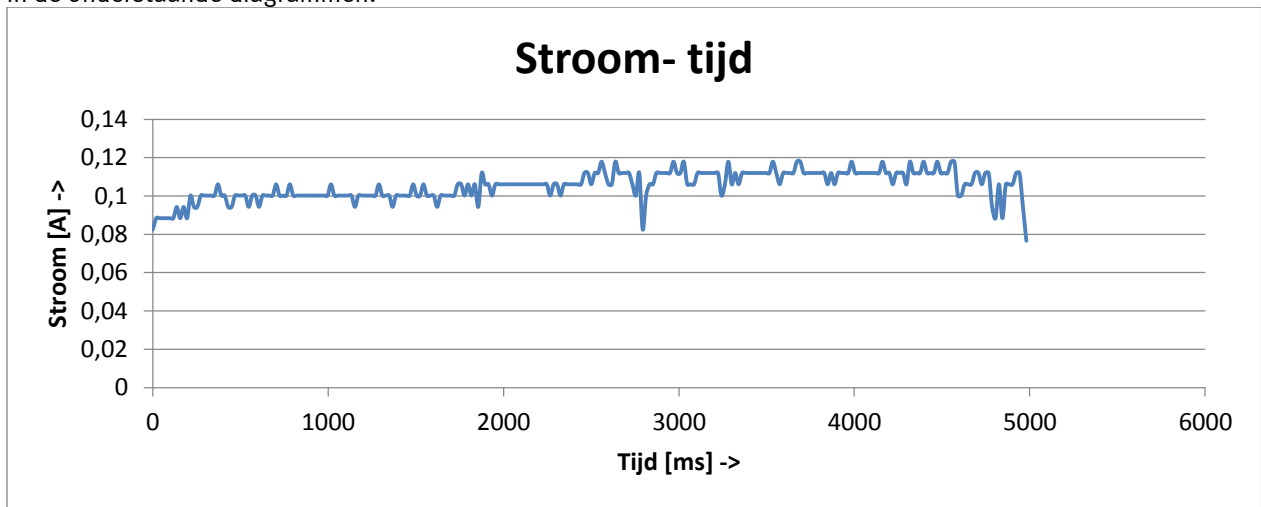
$$F_w = \frac{0,060}{0,012415} = 4,872 \text{ N}$$

Dit is de statische wrijving van het hele systeem. De statische wrijving die enkel door de vertragsingskast wordt veroorzaakt is gelijk aan:

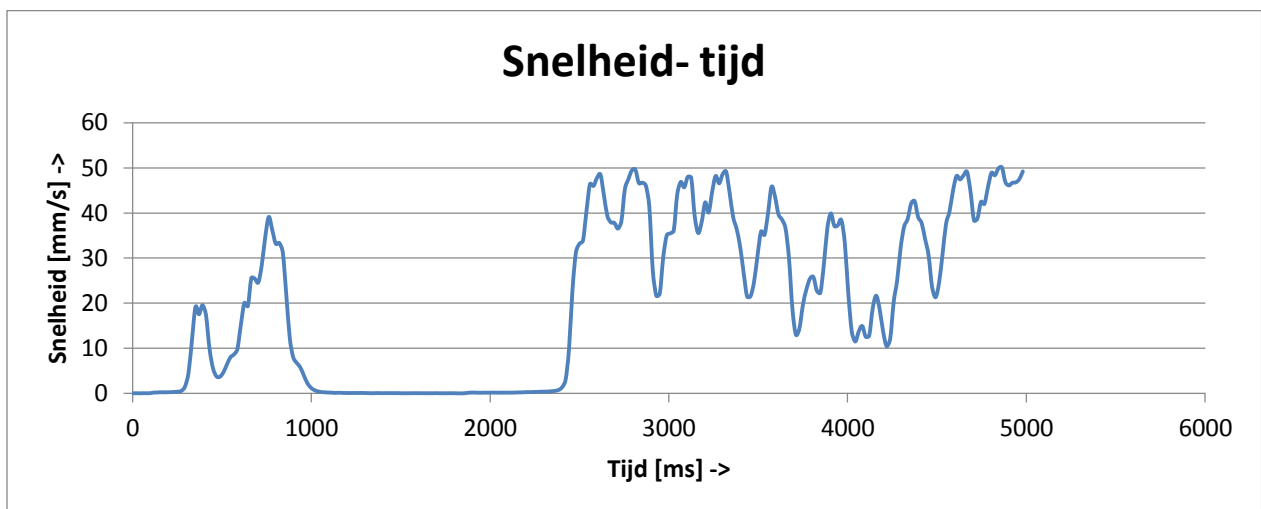
$$F_w \text{Vertragsingskast} = 4,872 - 2,783 = 2,089 \text{ N}$$

Motor direct op de tandriemas

De resultaten van de test voor de statische wrijving met de motor direct op de tandriemas zijn weergegeven in de onderstaande diagrammen:



Figuur 0-7: Stroom- tijd diagram motor op de tandriemas



Figuur 0-8: Snelheid- tijd diagram motor op de tandriemas

In het snelheid- tijd diagram is te zien dat de slede van de tandriemas na ongeveer 2,5 s in beweging komt met een variabele snelheid. Het variëren wordt veroorzaakt door de wrijving in het systeem. Deze treedt op als er een motorstroom wordt uitgestuurd van ongeveer 0,110 A. Dit komt overeen met:

$$T_m = 0,864 \cdot 0,110 = 0,095 \text{ Nm}$$

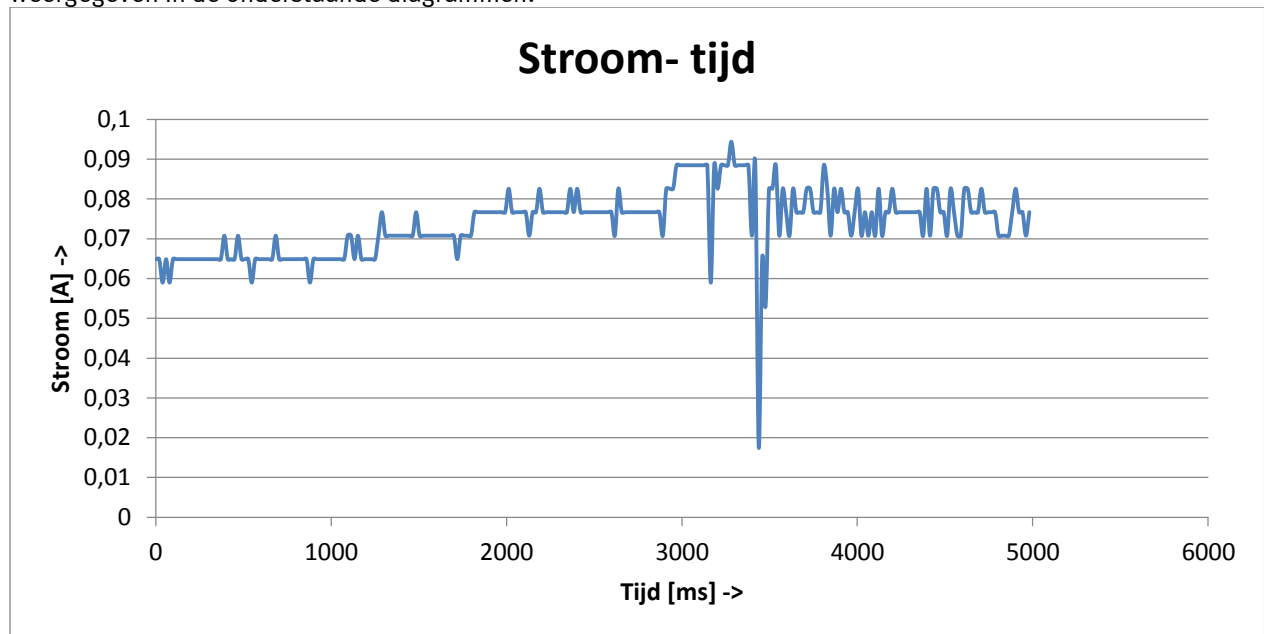
$$F_w = \frac{0,095}{0,012415} = 7,655 \text{ N}$$

De wrijving die wordt veroorzaakt door de tandriemas alleen is gelijk aan:

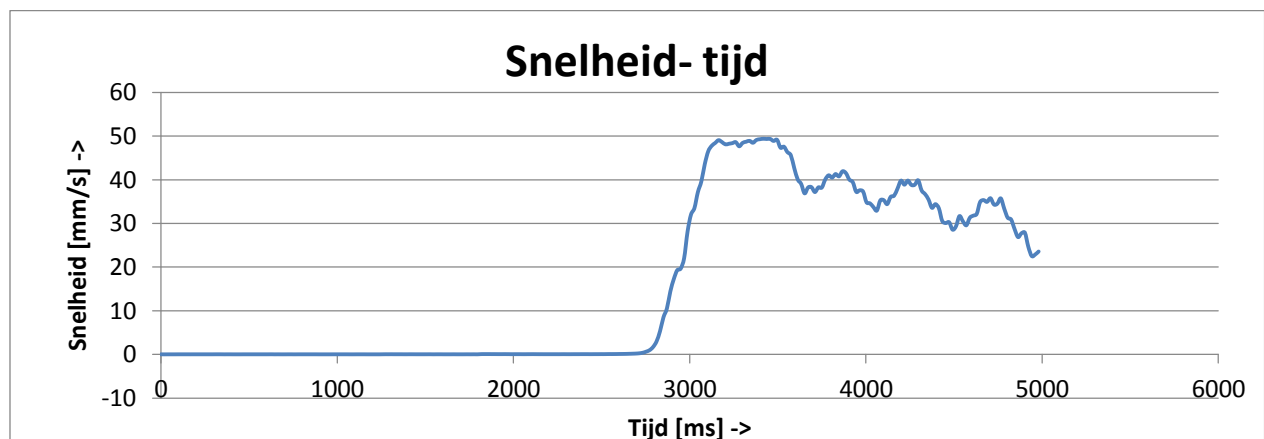
$$F_{wTandriemas} = 7,655 - 2,783 = 4,872 \text{ N}$$

Motor met vertragsingskast op de tandriemas

De resultaten van de test van de statische wrijving met de motor met vertragsingskast op de tandriemas zijn weergegeven in de onderstaande diagrammen:



Figuur 0-9: Stroom- tijd diagram motor met vertragsingskast op de tandriemas



Figuur 0-10: Snelheid- tijd diagram motor met vertragsingskast op de tandriemas

In het snelheid- tijd diagram is te zien dat de slede van de tandriemas na bijna 3 s begint te bewegen. De piekstroom die hiervoor nodig is, is ongeveer gelijk aan 0,085 A. De totale wrijvingskracht die hierbij hoort is:

$$T_m = 0,864 \cdot 0,085 = 0,073 \text{ Nm}$$

$$F_w = \frac{0,073}{0,012415} = 5,915 \text{ N}$$

De motor heeft 4,872 N nodig om de vertragsingskast in beweging te brengen. Om de as in beweging te brengen heeft de motor dus een extra kracht geleverd van:

$$F_m = 5,915 - 4,872 = 1,043 \text{ N}$$

Aan de uitgaande as van de vertragsingskast betekent dit dat er een kracht is geleverd van:

$$F_{was} = 1,043 \cdot 5 = 5,215 \text{ N}$$

Conclusie

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat de statische wrijving toeneemt naarmate er meer onderdelen worden toegevoegd aan het systeem. Voor het in beweging brengen van de vertragskast is extra kracht nodig ten opzichte van de motor los. Dit wordt veroorzaakt door extra wrijving in het systeem. Aangenomen is dat het systeem hinder ondervindt tijdens de stabilisatie, wat waarschijnlijk wordt veroorzaakt door de statische wrijving in het systeem. Hoe lager de statische wrijving, hoe kleiner de afwijkingen in het vervolg kunnen zijn. In de uitwerking van het regelsysteem moet er rekening worden gehouden met een statische wrijving van:

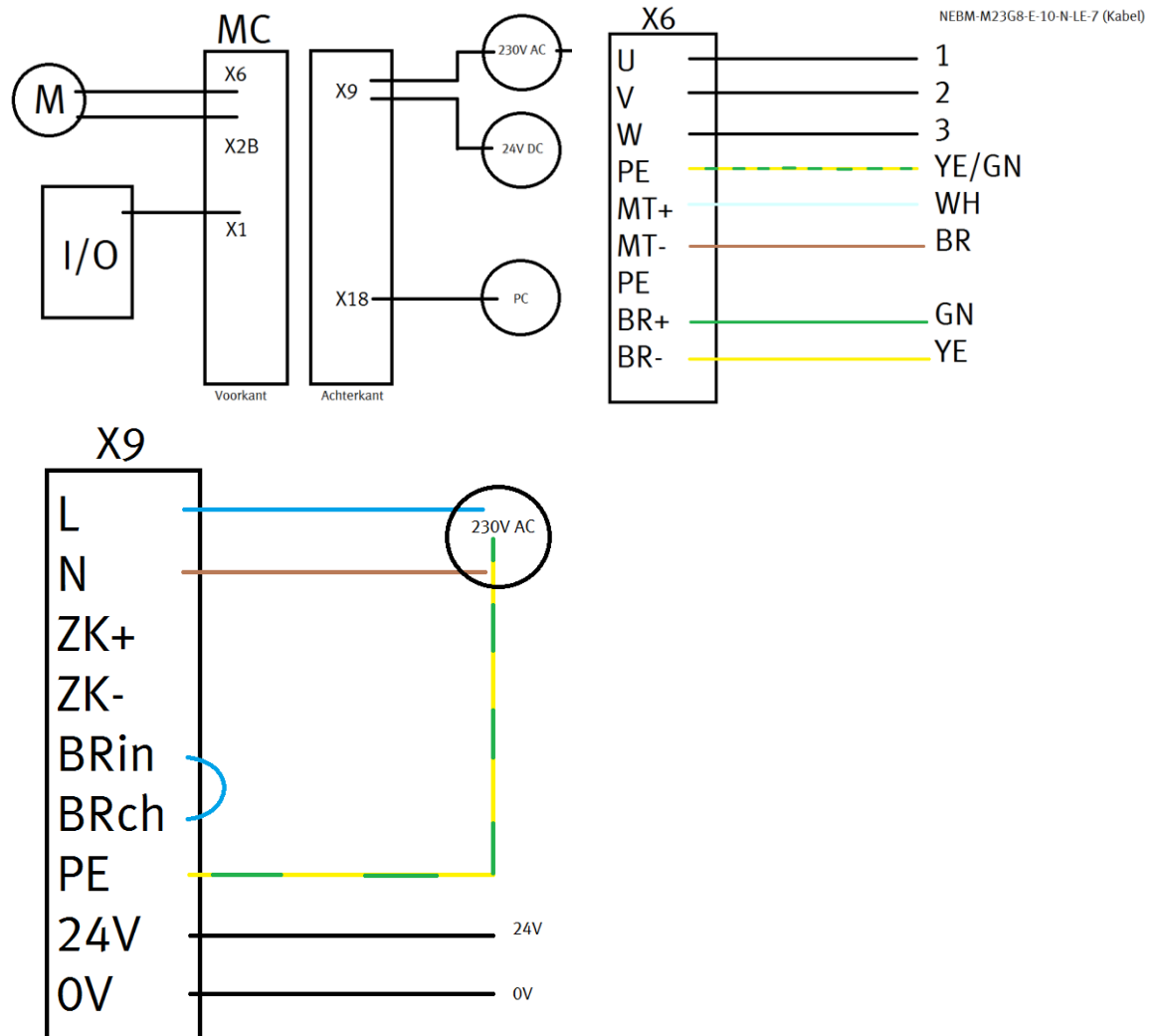
- 7,655 N voor de motor direct op de tandriemas
- 5,915 N voor de motor met vertragskast op de tandriemas.
 - o Deze waarde is kleiner omdat de motor minder kracht hoeft te leveren in verband met de vertragskast. Relatief gezien zijn de waarden ongeveer gelijk.

Aanbevelingen

De gemeten wrijving met een vertragskast en de tandriemas is ongeveer 0,4 N groter dan de gemeten wrijving met alleen de motor en de tandriemas. Het is aan te bevelen in het vervolg verder onderzoek te doen naar de herkomst van de statische weerstand. Voor de huidige opdracht is het aan te bevelen de weerstand in beeld te brengen die optreedt bij een beweging.

Bronvermelding

1. Festo B.V. (2014). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF
2. Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF
3. Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS, for servo motors*. Geraadpleegd op 28 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/products_CMMP_AS

BIJLAGE A: Aansluitschema

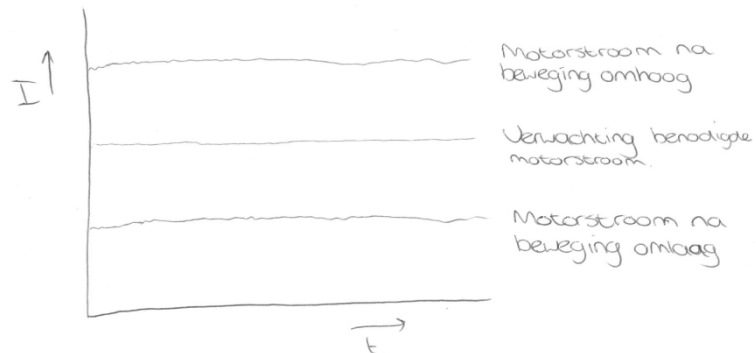
Hierin staat MC voor MotorController. Overige aansluitingen zijn te vinden in de documentatie van Festo ¹³

¹³ Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS, for servo motors*. Geraadpleegd op 28 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/products_CMMP_AS

BIJLAGE B: Statische wrijving verticaal

Inleiding

De meting is ter controle opnieuw uitgevoerd in de verticale richting. De verwachting is dat het systeem last heeft van de statische wrijving bij de positionering van de tandriemas en dat de gemeten motorstroom na een beweging naar boven groter is dan na een beweging naar beneden. Aangenomen is dat de werkelijke massa zich in het midden van de gemeten motorstromen bevindt (zie Figuur 0-11: Verwachte motorstroom)



Figuur 0-11: Verwachte motorstroom

Doel

Het doel van deze test is de validatie van de eerdere testresultaten. Regelt de motorcontroller de positie precies op de statische wrijving zoals eerder gemeten, of verschilt de gemeten motorstroom van de verwachte motorstroom met wrijving?

Testopstelling

De derde testopstelling van de afgelopen test is gebruikt, maar dan verticaal gemonteerd.

Testmethode

Bij deze test is er gebruik gemaakt van de positieregeling van de motorcontroller. Er is gekeken naar de benodigde stroom om de slede te balanceren na een beweging omhoog en na een beweging omlaag.

Daarnaast is er nogmaals gecontroleerd welke motorstroom er nodig is om de slede in beweging te krijgen. Dit is uitgevoerd met behulp van de stroomregeling van de motorcontroller.

Resultaten

De resultaten zijn weergegeven in de onderstaande tabellen:

Tabel 0-1: Resultaten na een beweging omhoog

I [A]	T_w [Nm]
0,085	0,073
0,084	0,073
0,083	0,072
0,083	0,071

Tabel 0-2: Resultaten na een beweging omlaag

I [A]	T_w [Nm]
0,016	0,014
0,020	0,017
0,020	0,017
0,020	0,017

Tabel 0-3: Verschil tussen meetwaarden

Verschil [Nm]
0,060
0,056
0,055
0,054

Het gemiddelde verschil is gelijk aan 0,056 Nm. Dit betekent dat de motorcontroller de positie regelt met een offset van 0,028 Nm afhankelijk van de laatst bewogen richting. De resultaten met de stroomregeling zijn weergegeven in de onderstaande tabellen:

Tabel 0-4: Resultaten na een beweging omhoog

I [A]	T _w [Nm]
0,159	0,138
0,153	0,132
0,153	0,132
0,156	0,135

Tabel 0-5: Resultaten na een beweging omlaag

I [A]	T _w [Nm]
-0,065	-0,056
-0,062	-0,053
-0,065	-0,056
-0,065	-0,056

Tabel 0-6: Verschillen tussen meetwaarden

Verschil [Nm]
0,194
0,186
0,188
0,191

Het gemiddelde verschil is 0,190 Nm. Dit betekent dat er ten opzichte van het gemiddelde een extra koppel van 0,095 Nm geleverd moet worden om de slede in beweging te krijgen. Deze uitkomst is gelijk aan de uitkomst uit de eerdere test.

Conclusie

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat de positieregeling regelt met een offset van 0,028 Nm ten opzichte van het gemiddelde. Om de slede in beweging te krijgen moet er rekening gehouden worden met een extra koppel van 0,095 Nm ten opzichte van het gemiddelde. Dit geldt in beide richtingen. Deze waarde komt overeen met de wrijving die is bepaald in horizontale toestand. Waar deze verschillen vandaan komen is niet bekend.

Het is aan te bevelen om nader onderzoek te doen naar de aard van de statische wrijving en te bepalen waar de offset vandaan komt. Deze offset moet wel worden meegenomen in verdere berekeningen gedurende deze opdracht.

BIJLAGE F: Testrapport dynamische wrijving

Testrapport dynamische wrijving

Rapport over de uitgevoerde tests om de dynamische wrijving in beeld te brengen van het systeem met- en zonder vertragingkast.

FESTO

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Jasper Daleman
11042346
Festo B.V.
7 mei 2015
Delft

Inleiding

Een voorwerp dat op een oppervlak ligt, ondervindt een bepaalde statische wrijving. De benodigde kracht om het voorwerp te verplaatsen over het oppervlak moet groter zijn dan de statische wrijving. Het voorwerp krijgt dan een versnelling. Om vervolgens een constante snelheid aan te houden, moet de uitgeoefende kracht gelijk zijn aan de wrijvingskracht. De wrijvingskracht in beweging is meestal lager en wordt in dit geval dynamische wrijving genoemd. Deze wrijving moet ook in beeld worden gebracht om het regelsysteem optimaal in te kunnen stellen.

Doel

Het doel van deze test is het in beeld brengen van de aanwezige wrijving in het systeem tijdens de beweging, de dynamische wrijving. Uit de testresultaten moet een functie opgesteld kunnen worden waarmee voor elke snelheid een bepaalde wrijvingskracht berekend kan worden.

Daarnaast wordt er nogmaals gekeken naar de invloed van een vertragskast op het systeem en de motorstroom. Zijn de meetresultaten positief, zodat in het uiteindelijke concept een vertragskast toegepast kan worden?

Testopstelling

Voor deze test zijn de volgende testopstellingen toegepast:

1: Motor zonder vertragskast op de tandriemas (horizontaal)

- Motorcontroller *CMMP-AS-C5-3A-M3*
- Servomotor *EMMS-AS-70-M-LS-RM*
- Tandriemas *EGC-70-1000-TB-KF-GK*
- Testkastje *CDSM-S1-P*

2: Motor met vertragskast op de tandriemas (horizontaal)

- Motorcontroller
- Servomotor
- Vertragskast *EMGA-60-P-G5-SAS-70*
- Tandriemas
- Testkastje

Bij elke opstelling is een laptop met de softwaretool FCT vereist. Hiermee kunnen bepaalde parameters worden ingesteld en uitgelezen. Het aansluitschema is bijgevoegd in Bijlage A: Aansluitschema.

Testmethode

Met behulp van het testkastje wordt er op bepaalde snelheden gestuurd. De motorstroom die nodig is voor deze constante snelheid wordt in beeld gebracht. Dit kan als volgt worden omgerekend naar de kracht:

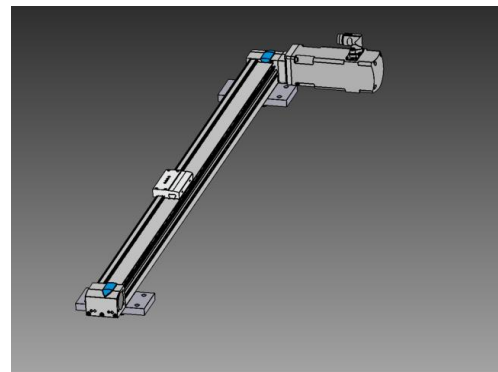
$$T_m = C_m \cdot I_w$$

$$F_m = F_w = \frac{T_m}{r_{poelie}}$$

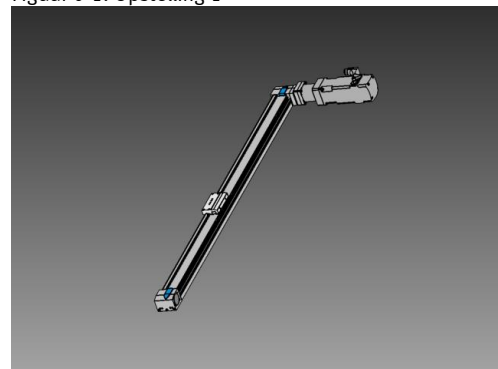
Hierin is:

$$C_m = 0,864 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}^{14}$$

$$r_{poelie} = \frac{d_{poelie}}{2} = 0,012415 \text{ m}^{15}$$



Figuur 0-1: Opstelling 1



Figuur 0-2: Opstelling 2

¹⁴ Festo B.V. (2014). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF

¹⁵ Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

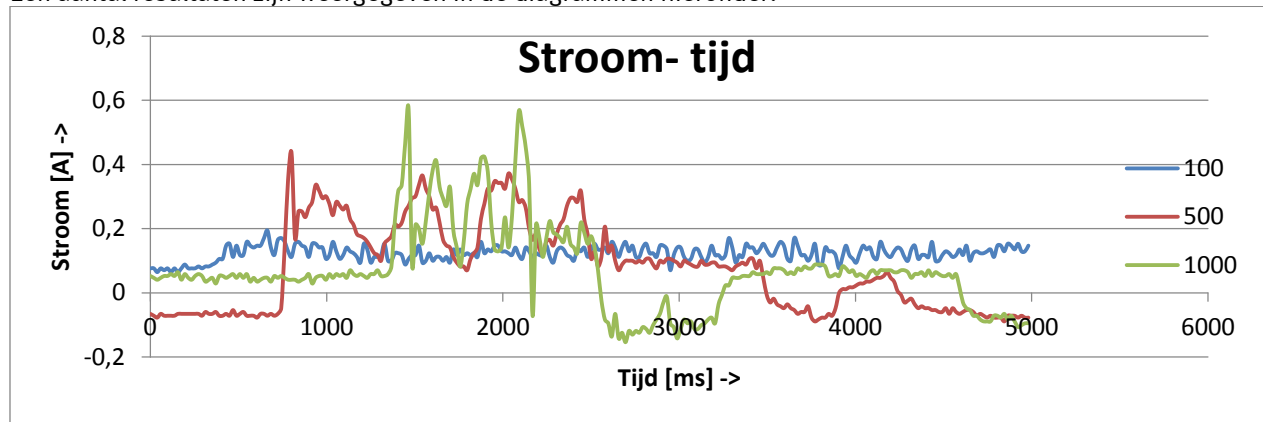
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF

Resultaten

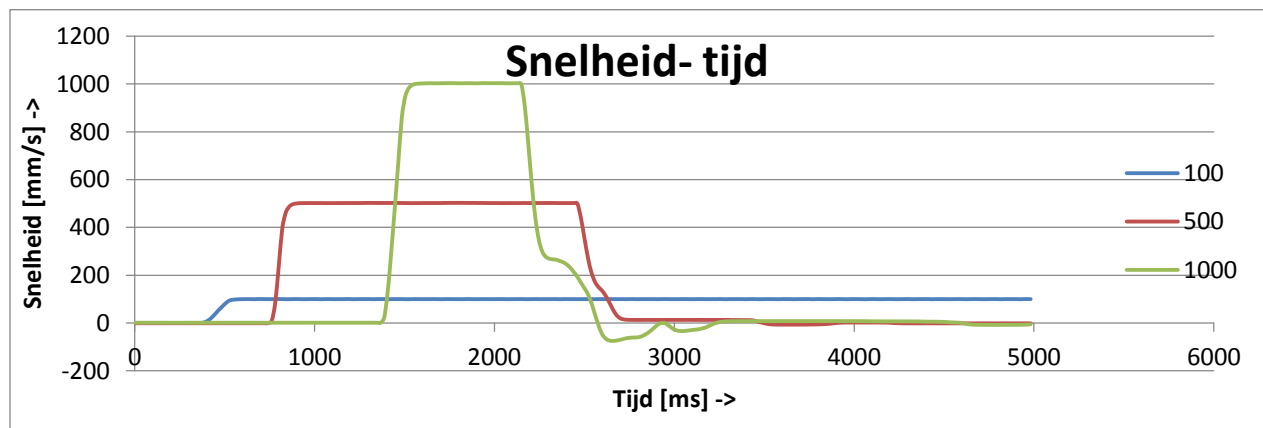
In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de eerste opstelling en de tweede opstelling op volgorde weergegeven.

Motor zonder vertragsingskast op de tandriemas

Een aantal resultaten zijn weergegeven in de diagrammen hieronder:



Figuur 0-3: Stroom- tijd diagram motor zonder vertraging



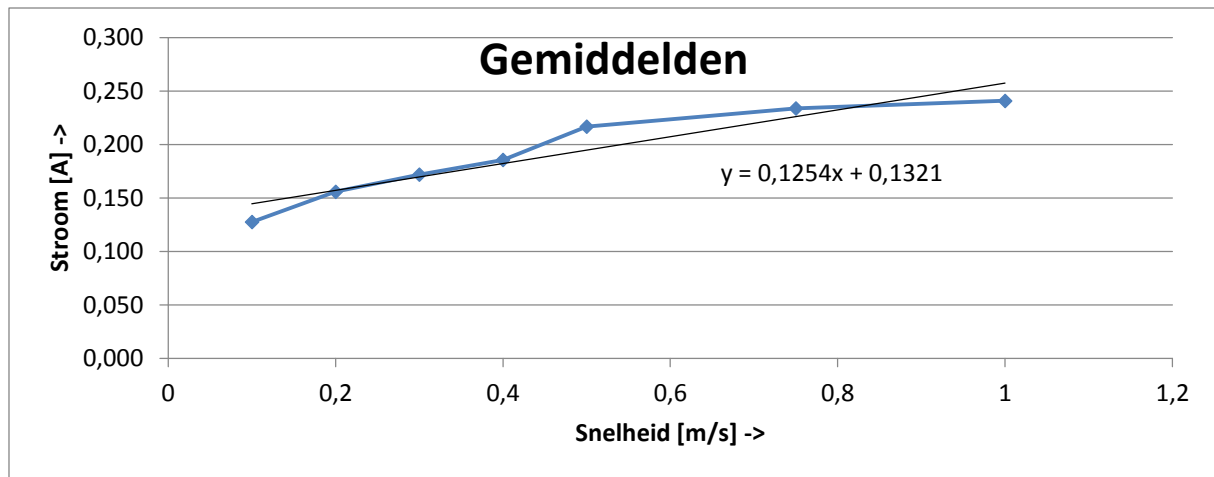
Figuur 0-4: Snelheid- tijd diagram zonder vertraging

In het snelheid- tijd diagram is te zien vanaf welk moment de slede van de tandriemas begint te bewegen, namelijk als de snelheid toeneemt. De gemiddelde stroomwaarde is bepaald vanaf het moment dat de ingestelde snelheid is bereikt tot het moment dat er weer afgeremd wordt. Dit heeft geresulteerd in de volgende gemiddelde stroomwaarden:

Tabel 0-1: Gemiddelde stroomwaarden afhankelijk van de snelheid

Snelheid [m/s]	Gemiddelde motorstroom [A]
0,10	0,128
0,20	0,156
0,30	0,172
0,40	0,186
0,50	0,217
0,75	0,234
1,00	0,241

Deze waarden kunnen in een nieuw diagram worden verwerkt, zoals weergegeven in Figuur 2-3: Gemiddelde stroom- snelheid diagram.



Figuur 0-5: Gemiddelde stroom- snelheid diagram

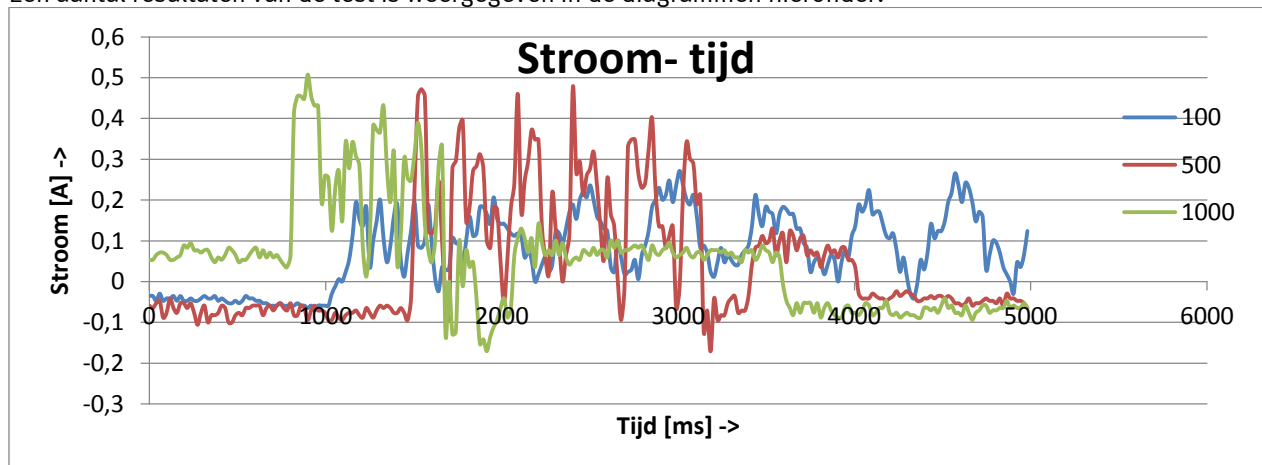
Dit betekent dat de dynamische wrijving die hoort bij een bepaalde snelheid bepaald kan worden met de formule:

$$I_w = 0,1254 \cdot v + 0,1321$$

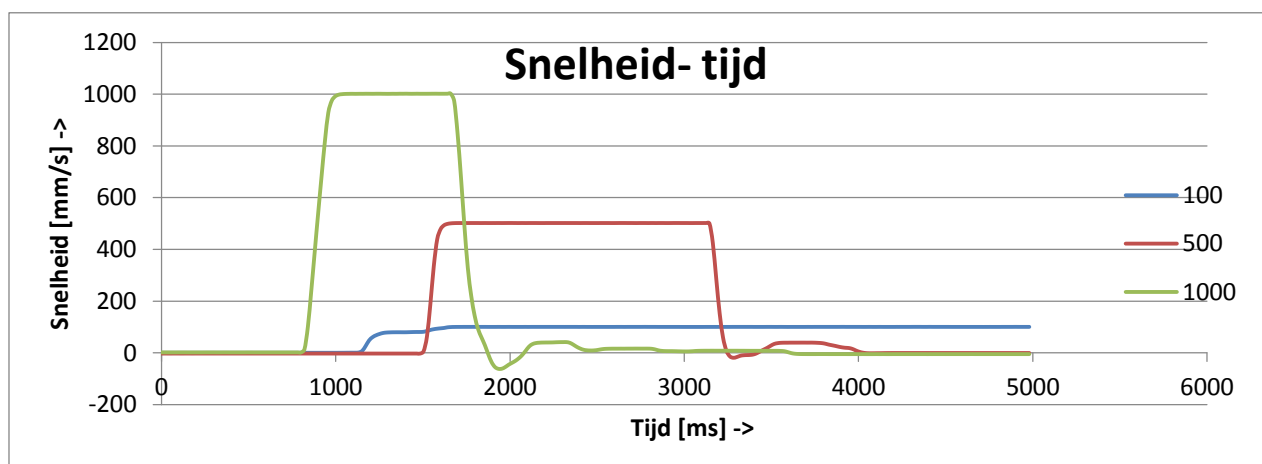
$$F_w = \frac{I_w \cdot C_m}{r_{poetie}}$$

Motor met vertragsingskast op de tandriemas

Een aantal resultaten van de test is weergegeven in de diagrammen hieronder:



Figuur 0-6: Stroom- tijd diagram motor met vertragsingskast



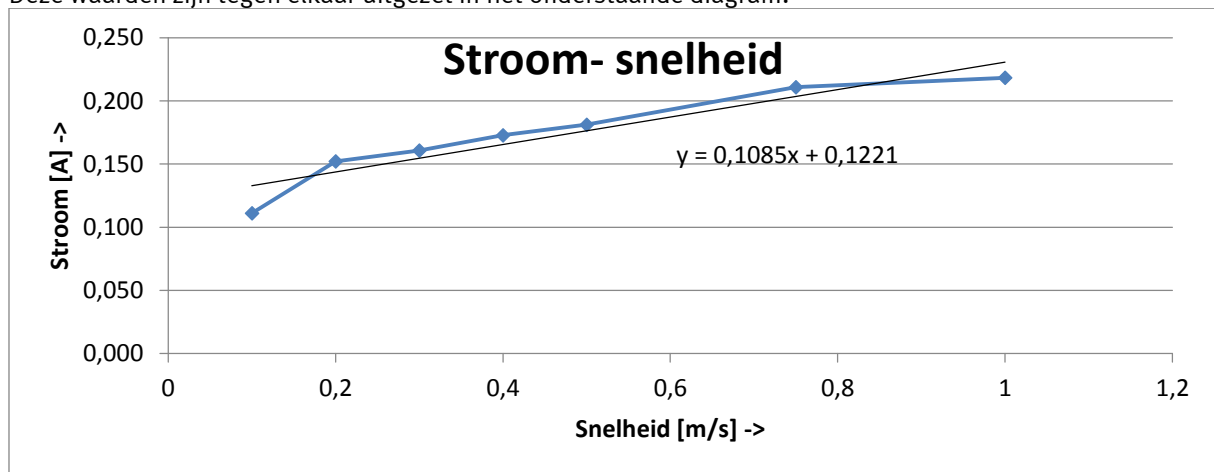
Figuur 0-7: Snelheid- tijd diagram motor met vertragsingskast

Uit het stroom- tijd diagram kan worden opgemaakt dat de motorstroom instabieler is ten opzichte van het gebruik zonder vertragsingskast. Ook van deze metingen is de gemiddelde stroom bepaald in de tijd dat de constante snelheid is aangehouden. Dit heeft geresulteerd in de volgende uitkomsten:

Tabel 0-2: Gemiddelde stroomwaarden afhankelijk van de snelheid

Snelheid [m/s]	Gemiddelde motorstroom [A]
0,10	0,111
0,20	0,152
0,30	0,161
0,40	0,173
0,50	0,181
0,75	0,211
1,00	0,218

Deze waarden zijn tegen elkaar uitgezet in het onderstaande diagram:



Figuur 0-8: Gemiddelde stroom- snelheid diagram motor met vertragsingskast

Dit betekent dat de benodigde motorstroom met vertragsingskast afhankelijk van de snelheid berekend kan worden met de formule:

$$I_w = 0,1085 \cdot v + 0,1221$$

$$F_w = \frac{I_w \cdot C_m}{r_{poelie}}$$

Conclusie

Uit de meetresultaten is gebleken dat de motorstroom bij benadering lineair toeneemt naar mate de snelheid toeneemt. Hierbij is er nauwelijks verschil merkbaar tussen de motorstroom met vertragsingskast en zonder. De motorstroom is met een vertragsingskast wel een stuk instabieler. De motorstroom zonder vertragsingskast is gemakkelijker vast te stellen in het uiteindelijke systeem. Daarom is ervoor gekozen om geen vertragsingskast toe te passen in de uiteindelijke uitwerking.

Met behulp van de onderstaande functie kan de motorstroom worden bepaald die nodig is bij een bepaalde snelheid:

$$I_w = 0,1254 \cdot v + 0,1321$$

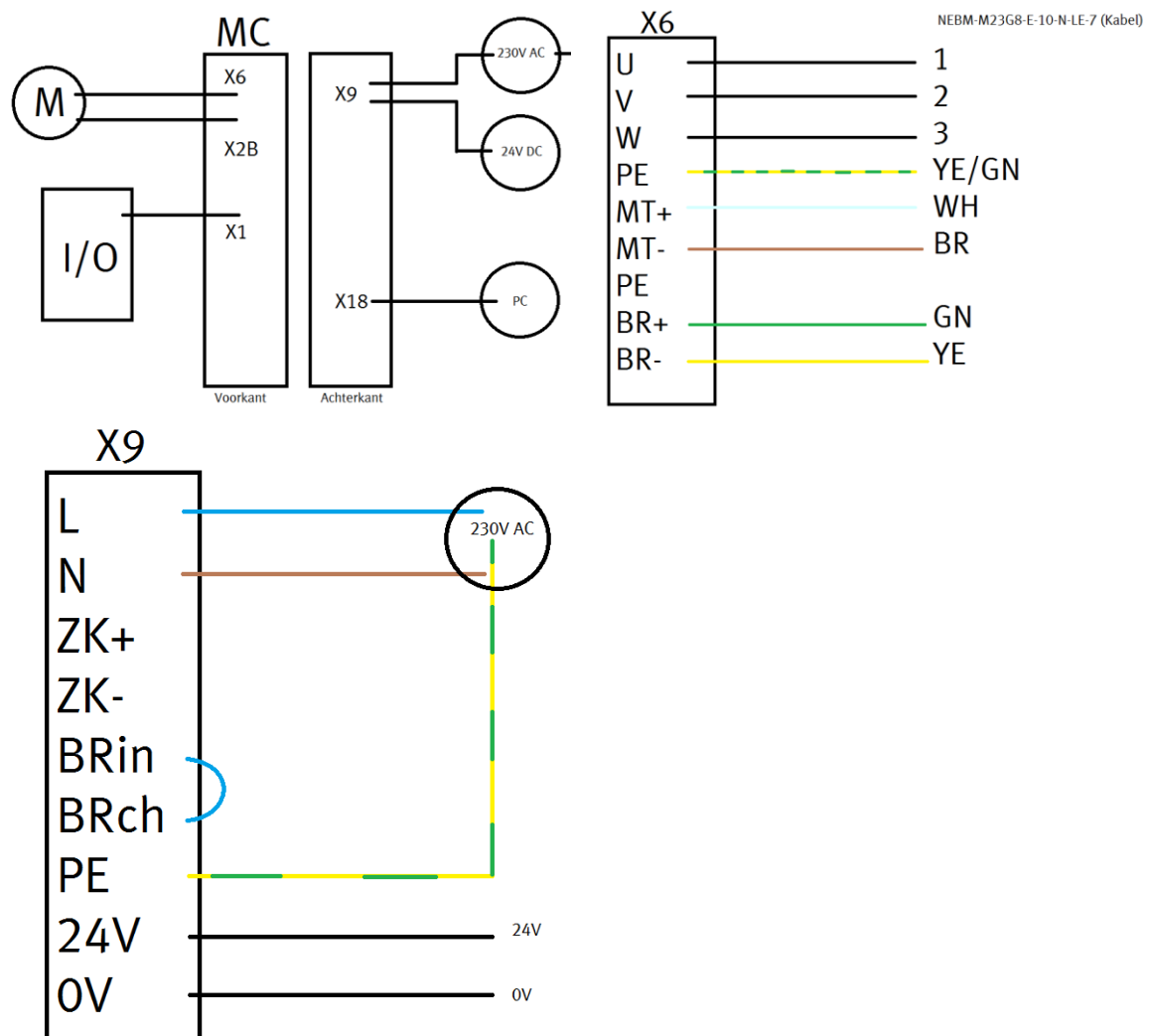
De test is nogmaals uitgevoerd in een verticale toestand (zie Bijlage B: Dynamische wrijving verticaal). Hieruit kan worden geconcludeerd dat de bepaalde functie verschilt ten opzichte van de horizontaal bepaalde functie:

$$I_w = 0,1434 \cdot v + 0,161$$

Deze functie is negatief als de richting ook negatief (naar beneden) is. Aangenomen is dat deze functie(s) het meest juist zijn, aangezien deze zijn bepaald in de uiteindelijke montagestand.

Bronvermelding

1. Festo B.V. (2014). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF
2. Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF
3. Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS, for servo motors*. Geraadpleegd op 28 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/products_CMMP_AS

BIJLAGE A: Aansluitschema

Hierin staat MC voor MotorController. Overige aansluitingen zijn te vinden in de documentatie van Festo.¹⁶

¹⁶ Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS, for servo motors*. Geraadpleegd op 28 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/products_CMMP_AS

BIJLAGE B: Dynamische wrijving verticaal

Inleiding

Dezelfde test is uitgevoerd in de verticale richting. De dynamische wrijving is bepaald op basis van een opgaande beweging en een neergaande beweging.

Doel

Het doel van deze test is het bepalen van de dynamische wrijving als de tandriemas verticaal gemonteerd is. Zit er verschil in de bepaalde waarde ten opzichte van de meting in horizontale toestand?

Testopstelling

De testopstelling is gelijk aan de eerste testopstelling, maar dan verticaal gemonteerd.

Testmethode

De testmethode is gelijk aan de eerdere testmethode. In deze bijlage is enkel gerekend met de gemiddelde stroomwaarden die op eenzelfde wijze zijn bepaald als in de vorige test.

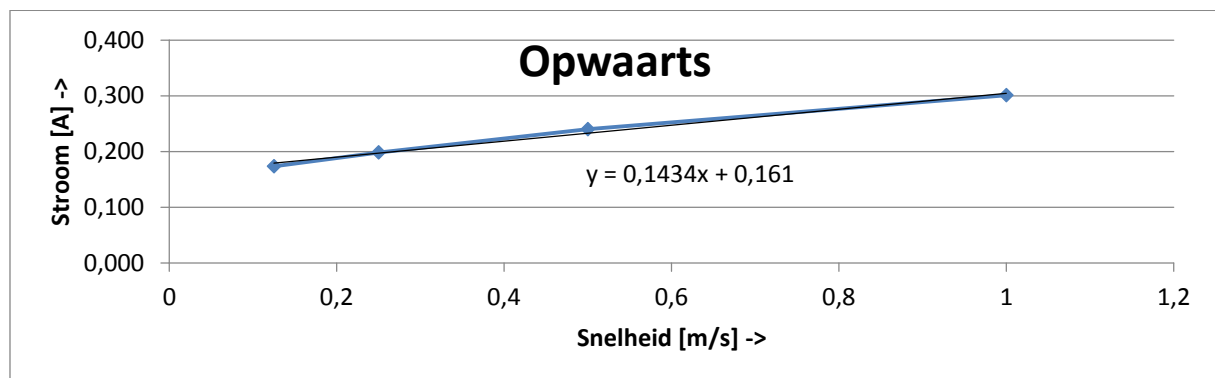
Resultaten

De gemiddelde waarden voor de stroom bij bepaalde snelheden zijn weergegeven in de onderstaande tabel:

Tabel 0-3: Opwaartse beweging

Snelheid [m/s]	Motorstroom [A]
0,125	0,173
0,250	0,198
0,500	0,240
1,000	0,301

Deze waarden zijn uitgezet in het volgende diagram:



Figuur 0-9: Stroom- snelheid diagram wrijving opwaartse beweging

In het diagram is te zien dat de functie voor het bepalen van de motorstroom bij een bepaalde snelheid gelijk is aan:

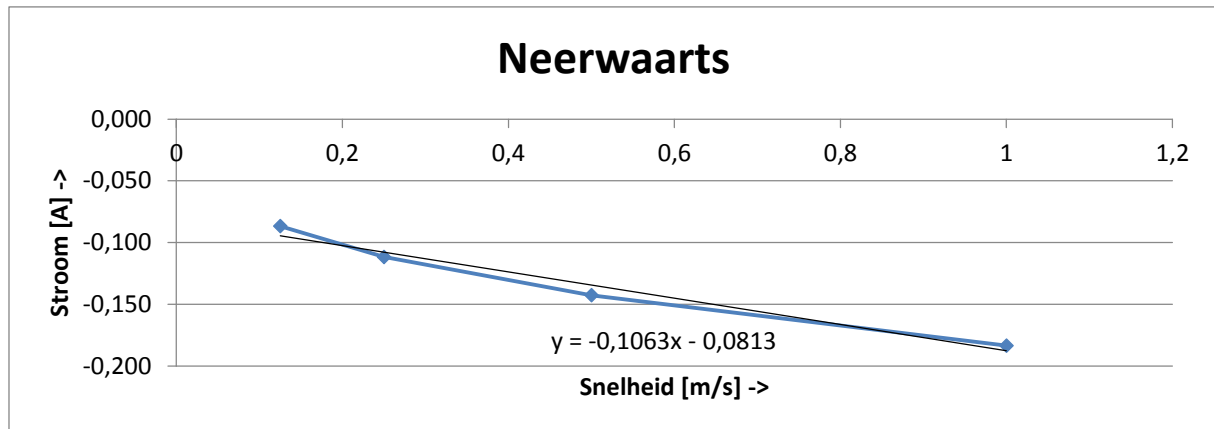
$$I_w = 0,1434 \cdot v + 0,161$$

In de onderstaande tabel zijn de gemiddelde motorstromen gegeven bij een neerwaartse beweging:

Tabel 0-4: Neerwaartse beweging

Snelheid [m/s]	Motorstroom [A]
0,125	-0,087
0,250	-0,112
0,500	-0,143
1,000	-0,183

Deze waarden zijn verwerkt in het onderstaande diagram:



Figuur 0-10: Stroom- snelheid diagram wrijving neerwaartse beweging

In dit figuur is te zien dat de motor een negatieve stroom nodig heeft voor een neerwaartse beweging. Deze is te bepalen met de functie:

$$I = -0,1063 \cdot v - 0,0813$$

Conclusie

De wrijving in verticale toestand verschilt per richting. Dit wordt veroorzaakt door de massa van de slede en de statische weerstand van de as. De weerstand is namelijk groter dan de massa van de slede. Dit zorgt ervoor dat de slede bij een neerwaartse beweging aangedreven moet worden door de motor. Dit zorgt ervoor dat de motor een negatieve motorstroom moet leveren.

Bij normaal gebruik van het tilhulpsysteem is er altijd een massa aanwezig op het systeem die met behulp van de zwaartekracht de slede naar beneden kan bewegen. De motor moet dan altijd een positieve kracht leveren om de slede te remmen en hoeft dus niet naar beneden aan te drijven voor een neerwaartse beweging. Aangenomen is dat de functie voor een opwaartse beweging geldt:

$$I_w = 0,1434 \cdot v + 0,161$$

En voor een beweging naar beneden geschreven kan worden als:

$$I_w = -(0,1434 \cdot v + 0,161)$$

Met deze stelling wordt beweerd dat de wrijving in beide richtingen gelijk is, maar in een opwaartse richting tegenwerkt (de motor moet dus meer kracht leveren) en in de neerwaartse richting meewerkt om de slede te remmen (de motor hoeft dus minder kracht te leveren).

BIJLAGE G: Nauwkeurigheid massabepaling

Nauwkeurigheid massabepaling

*Rapport over het bepalen van de externe massa op basis van de gemeten
motorstroom.*

FESTO

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Jasper Daleman
11042346
Festo B.V.
16 mei 2015
Delft

Inleiding

De basis van het tilhulpsysteem is het bepalen van de massa van het object dat de gebruiker wil verplaatsen. Deze massa moet namelijk tijdens de verplaatsing voor 80% ondersteund worden. Om deze 80% te bepalen, moet het systeem de massa zo nauwkeurig mogelijk bepalen.

Doel

Het doel van deze test is het vaststellen van een functie waarmee zo nauwkeurig mogelijk de massa bepaald kan worden die bevestigd is aan de slede. Met welke nauwkeurigheid kan de massa worden bepaald? Hoe betrouwbaar is het systeem?

Testopstelling

Voor deze test is de volgende testopstelling gebruikt:

- Motorcontroller *CMMP-AS-C5-3A-M3*
- Servomotor *EMMS-AS-70-M-LS-RM*
- Tandriemas *EGC-70-1000-TB-KF-GK*
- Testkastje *CDSM-S1*

De testopstelling is weergegeven in Figuur 0-1: Testopstelling. Daarnaast is er gebruik gemaakt van een laptop met de FCT softwaretool. Hiermee kunnen bepaalde parameters van het systeem worden ingesteld en uitgelezen. Het aansluitschema is weergegeven in Bijlage A.

Testmethode

Op de houder die momenteel op de slede van de tandriemas gemonteerd is, kunnen enkel geijkte gewichtschijven gemonteerd worden. De massa hiervan is bekend en hiermee kan dus worden gecontroleerd of de gemeten/berekende massa overeenkomt met wat er werkelijk aanhangt. Daarnaast is de massa van de slede en de massa van de gewichthouder bekend:

- Massa slede = 0,37kg
- Massa gewichthouder = 0,95kg
- Massa totaal zonder gewichtschijf = 1,32kg.



Figuur 0-1: Testopstelling

Dit houdt in dat de werkelijk gemeten massa waarschijnlijk 1,32 kg hoger is dan wat er aan de houder hangt.

De motorcontroller wordt aangestuurd in de "Positioning Mode". In deze mode kan de as naar verschillende posities op de as worden gestuurd met een bepaalde snelheid en versnelling. Vervolgens blijft de slede op de ingegeven positie balanceren. De kracht die hiervoor nodig is, kan gemeten worden met behulp van de motorstroom. Op basis van de kracht kan de gemeten massa bepaald worden. De massa is bepaald na een beweging omhoog en na een beweging omlaag. De verwachting is dat de statische wrijving een verschil veroorzaakt tussen beide metingen.

De gemeten massa is als volgt berekend:

$$T_{\text{gemeten}} = I_{\text{gemeten}} \cdot C_m$$

$$F_{\text{gemeten}} = \frac{T_{\text{gemeten}}}{r_{\text{poelie}}}$$

$$m_{\text{gemeten}} = \frac{F_{\text{gemeten}}}{g}$$

Hierin is:

$$C_m = 0,864 \text{ Nm/A}^{17} \quad g = -9,81 \text{ m/s}^2$$

$$r_{\text{poelie}} = d_{\text{poelie}}/2 = 0,012415 \text{ m}^{18}$$

¹⁷ Festo B.V. (2014). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF

¹⁸ Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.

http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF

Resultaten

De meetresultaten zijn te vinden in Bijlage B. Hierin is ook een foutanalyse uitgevoerd over de meetresultaten. In dit hoofdstuk zijn alleen de gemiddeld gemeten waarden gebruikt per meting. Deze zijn weergegeven in de volgende tabellen:

Tabel 0-1: Meetresultaten na een beweging omhoog

m_{totaal} [kg]	I_{gemeten} [A]	m_{gemeten} [kg]
1,32	0,209	1,48
3,82	0,577	4,09
6,32	0,924	6,56
8,82	1,269	9,00

Tabel 0-2: Meetresultaten na een beweging omlaag

m_{totaal} [kg]	I_{gemeten} [A]	m_{gemeten} [kg]
1,32	0,144	1,02
3,82	0,422	2,99
6,32	0,781	5,54
8,82	1,130	8,01

In het testrapport “Statische Wrijving” is de statische wrijving in beeld gebracht die aanwezig is in het systeem. Hier zijn twee verschillende waarden uitgekomen voor de statische wrijving:

- 0,095 Nm
 - o Koppel dat nodig is om de slede van de tandriemas in beweging te brengen.
- 0,028 Nm
 - o Extra koppel dat nodig is om de slede te balanceren na een beweging omhoog.

De verwachting is dat deze wrijving invloed heeft op het regelsysteem van de motorcontroller, waarbij de wrijving zorgt voor een lagere gemeten massa na een beweging omlaag en een hogere gemeten massa na een beweging omhoog ten opzichte van de totale massa. De functie voor het bepalen van de massa inclusief de wrijving is:

$$m_{\text{totaal}} = m_{\text{gemeten}} \pm \frac{T_w}{r_{\text{poelie}} \cdot g}$$

Uit de meetresultaten kan ook worden opgemaakt dat het verschil tussen de gemeten massa na een beweging omhoog minder verschilt van de totale massa dan na een beweging omlaag. Daarom zijn de volgende functies van toepassing geweest op

$$m_{\text{totaal}} = m_{\text{gemeten}} + \frac{0,028}{0,012415 \cdot 9,81}$$

De bovenstaande functie is van toepassing na een beweging omhoog.

$$m_{\text{totaal}} = m_{\text{gemeten}} - \frac{0,095}{0,012415 \cdot 9,81}$$

De bovenstaande functie is van toepassing na een beweging omlaag.

Tabel 0-3: Massa verwacht na beweging omhoog

m_{totaal} [kg]	m_{verwacht} [kg]	m_{gemeten} [kg]
1,32	1,55	1,48
3,82	4,05	4,09
6,32	6,55	6,56
8,82	9,05	9,00

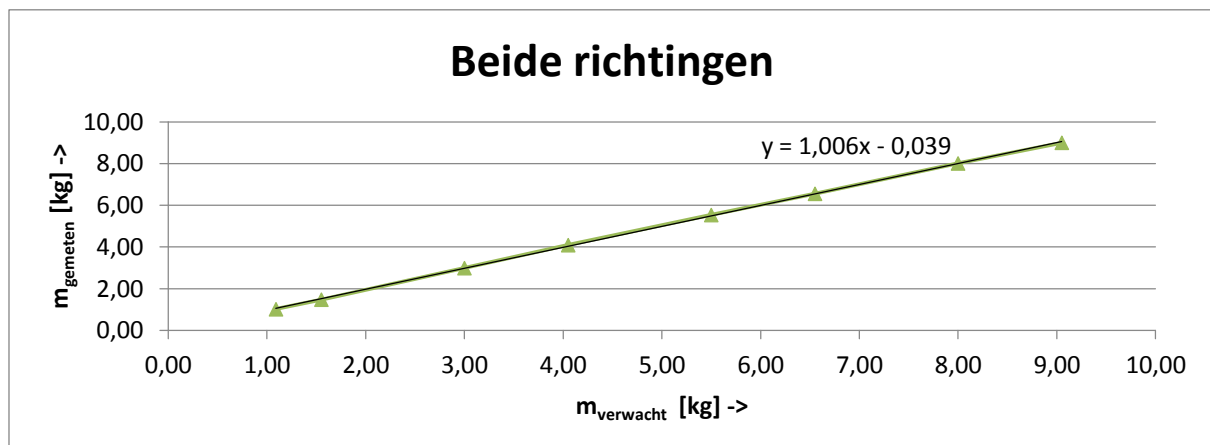
Tabel 0-4: Massa verwacht na een beweging omlaag

m_{totaal} [kg]	m_{verwacht} [kg]	m_{gemeten} [kg]
1,32	1,80	1,02
3,82	3,00	2,99
6,32	5,50	5,54
8,82	8,00	8,01

In de bovenstaande tabellen is te zien dat de m_{verwacht} die gemeten moet worden weinig verschilt als de wrijving meegerekend wordt. Alleen zonder gewichtschijf na een beweging omlaag is er een grote afwijking tussen de m_{verwacht} en m_{gemeten} .

De m_{verwacht} zonder gewichtschijf (1,32 kg) na een beweging omlaag kan worden bepaald met de wrijving van 0,028 Nm., omdat de slede nauwelijks in beweging komt zonder gewichtschijf. De m_{verwacht} wordt hiermee 1,09 kg. Dit wijkt minder af dan de huidige m_{verwacht} van 1,80 kg.

De m_{verwacht} is uitgezet tegen de m_{gemeten} in het onderstaande diagram:



Figuur 0-2: Massadiagram

De ijklijn die uit het bovenstaande diagram kan worden opgesteld is:

$$m_{\text{gemeten}} = 1,006 \cdot m_{\text{verwacht}} - 0,039$$

Deze ijklijn wordt in de bijlage gebruikt bij het bepalen van de standaardfout van de meetwaarden.

Conclusie

Op basis van de uitgevoerde test kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is om de massa te bepalen met behulp van de motorstroom en de statische wrijving. In Bijlage B: Meetresultaten is uitgewerkt dat de massa bepaald kan worden met een nauwkeurigheid van 0,108 kg.

Aanbevelingen

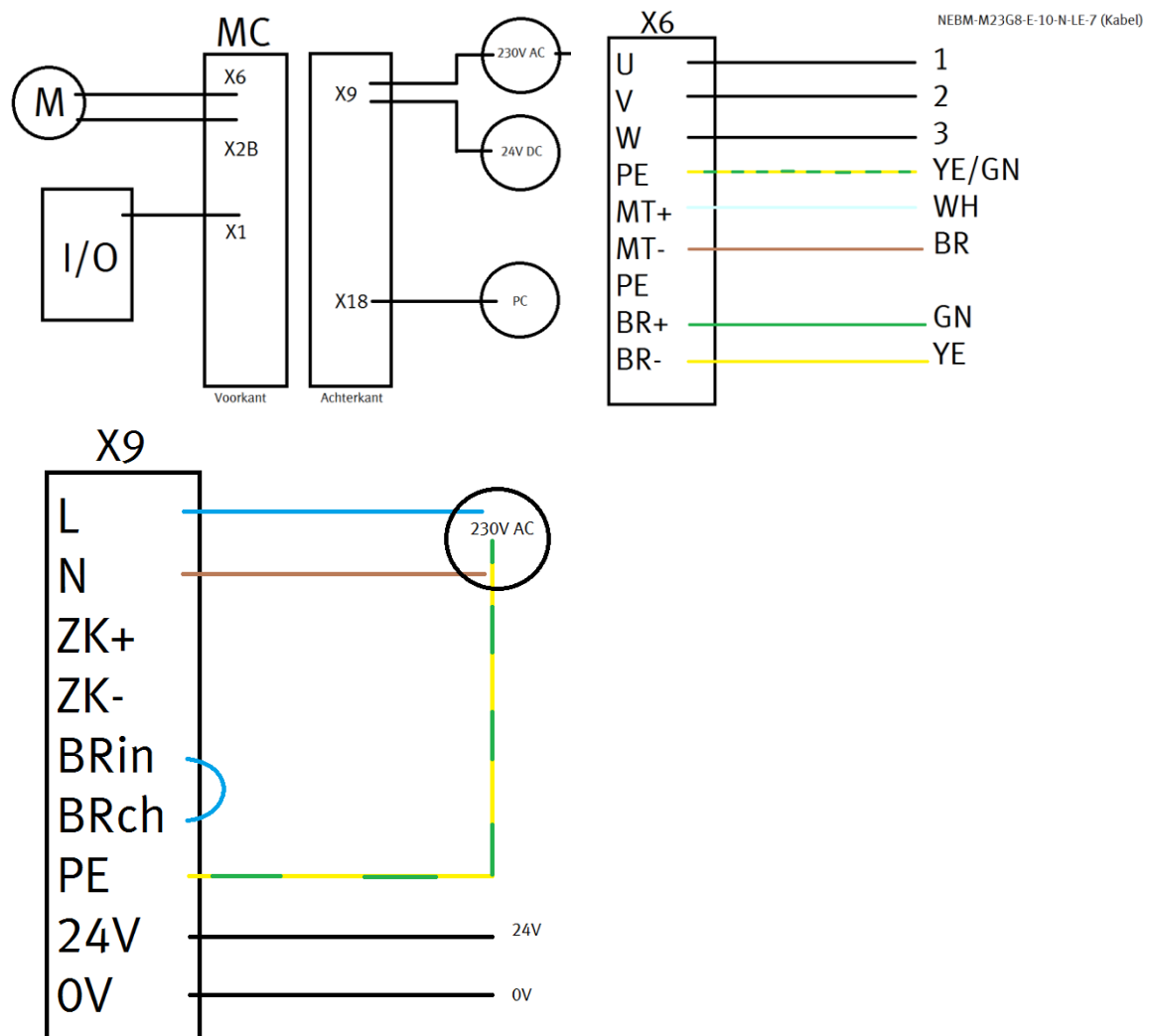
Het is aan te bevelen om nader onderzoek te doen naar de aard van de statische wrijving in het systeem, maar niet binnen deze opdracht. De functie die in Figuur 0-2: Massadiagram is opgesteld moet nog worden omgeschreven, zodat de gemeten waarde wordt vertaald naar een verwachte gemeten massa:

$$m_{\text{gemeten}} = 1,006 \cdot m_{\text{verwacht}} - 0,039$$

$$m_{\text{verwacht}} = 0,994 \cdot m_{\text{gemeten}} + 0,039$$

Bronvermelding

1. Festo B.V. (2014). *Servo motors EMMS-AS*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EMMS-AS_EN.PDF
2. Festo B.V. (2015). *Toothed belt axes EGC-TB-KF*. Geraadpleegd op 27 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/data/doc_engb/PDF/EN/EGC-TB_EN.PDF
3. Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS, for servo motors*. Geraadpleegd op 28 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/products_CMMP_AS
4. *Standaardfout*. (z.d.). Geraadpleegd op 28 mei 2015.
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Standaardafwijking>

BIJLAGE A: Aansluitschema

Hierin staat MC voor MotorController. Overige aansluitingen zijn te vinden in de documentatie van Festo.¹⁹

¹⁹ Festo B.V. (2015). *Motorcontrollers CMMP-AS, for servo motors*. Geraadpleegd op 28 mei 2015.
http://www.festo.com/cat/nl_nl/products_CMMP_AS

BIJLAGE B: Meetresultaten en foutanalyse

In de tabel hieronder zijn alle meetresultaten weergegeven:

I_{gemeten} [A]	m_{gemeten} [kg]	m_{verwacht} [kg]	m_{ijklijn} [kg]	Vershil [kg]
0,144	1,02	1,09	1,05	0,04
0,144	1,02	1,09	1,05	0,04
0,143	1,01	1,09	1,05	0,04
0,207	1,47	1,55	1,50	0,05
0,209	1,48	1,55	1,51	0,04
0,210	1,49	1,55	1,52	0,03
0,425	3,01	3,00	3,04	-0,04
0,411	2,92	3,00	2,94	0,06
0,430	3,05	3,00	3,07	-0,07
0,577	4,09	4,05	4,11	-0,06
0,572	4,06	4,05	4,07	-0,02
0,582	4,13	4,05	4,14	-0,09
0,786	5,58	5,50	5,58	-0,08
0,787	5,58	5,50	5,59	-0,09
0,769	5,46	5,50	5,46	0,04
0,924	6,56	6,55	6,56	-0,01
0,929	6,59	6,55	6,59	-0,04
0,920	6,53	6,55	6,53	0,02
1,123	7,96	8,00	7,96	0,04
1,133	8,04	8,00	8,03	-0,03
1,133	8,04	8,00	8,03	-0,03
1,275	9,05	9,05	9,03	0,02
1,263	8,96	9,05	8,95	0,10
1,269	9,01	9,05	8,99	0,06

Hierbij is het verschil bepaald tussen m_{verwacht} en m_{ijklijn} . De nauwkeurigheid waarmee de m_{verwacht} bepaald kan worden is gelijk aan twee maal de standaardfout²⁰. Dit dekt 95,4% van de meetwaarden. De standaardfout in deze meetwaarden is 0,054 kg. Dit is berekend met de functie “stdev.s(verschillen)” in Excel. Twee maal de standaardfout geeft een nauwkeurigheid van 0,108 kg.

²⁰ Standaardfout. (z.d.). Geraadpleegd op 28 mei 2015. <http://nl.wikipedia.org/wiki/Standaardafwijking>

BIJLAGE H: Testrapport intuïtiviteit

Testrapport Intuïtiviteit

Testrapport over de ervaring van het systeem tot nu toe en een onderzoek naar hoe het nog beter kan.

FESTO

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Jasper Daleman
11042346
Festo B.V.
3 juni 2015
Delft

Inleiding

Dit rapport is opgesteld om de ervaringen met het regelsysteem vast te leggen nadat deze is onderworpen aan een test. De ervaringen van gebruikers zijn vastgelegd, evenals alle berekende parameters van het systeem. Op basis van het gedrag van het systeem is er in de bijlage een klein onderzoek uitgevoerd waarin is gekeken voor een optimalisatie van het systeem.

Doel

Het doel van deze test is het in beeld brengen van de verbeterpunten van het huidige regelsysteem. Wat is de algemene ervaring van het gebruik van het systeem? Waar liggen de verbeterpunten op basis van een aanvullend onderzoek?

Testopstelling

Voor de test is de opstelling uit de afbeelding hiernaast gebruikt: Deze bestaat uit de volgende onderdelen:

- Servomotor *EMMS-AS-70-M-LS-RM*
- Tandriemas *EGC-70-1000-TB-KF-GK*
- Motorcontroller *CMMP-AS-C5-3A-M3*
- PLC *CPX-CEC-C1*

Om de parameters van het systeem uit te lezen, is een laptop met CoDeSys software gebruikt. Het aansluitschema is in Bijlage A1 toegevoegd.

Testmethode

De test is simpel: druk op de knop en probeer de as naar een gewenste positie te bewegen. Stel daarbij de volgende vragen:

- Hoe voelt dit?
- Wat voel ik?
- Kan ik dit terugzien in de grafieken?

Deze antwoorden kunnen vervolgens deels worden teruggevonden in de uitgelezen parameters:

- De motorstroom
- De verwachte motorstroom
- De snelheid
- De berekende snelheid
- De versnelling
- De kracht die de gebruiker uitoefent
- De wrijving die het systeem moet ondervinden.



Figuur 0-1: Testopstelling

Resultaten

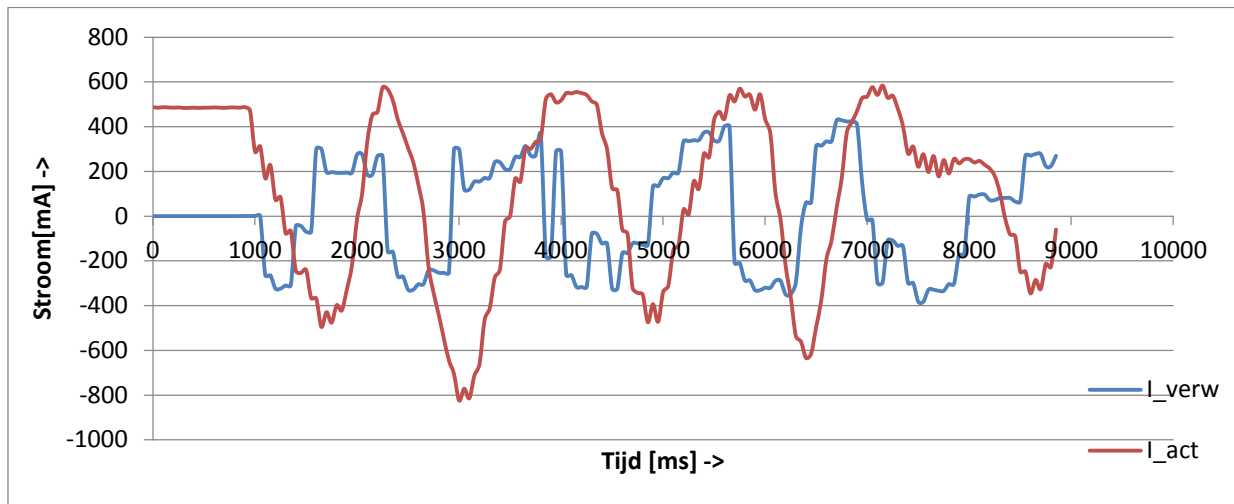
Eerst zijn de gebruikerservaringen beschreven. Vervolgens is er in dit hoofdstuk gekeken of deze ervaringen overeen kunnen komen met de uitgelezen parameters van het systeem.

Gebruikerservaringen

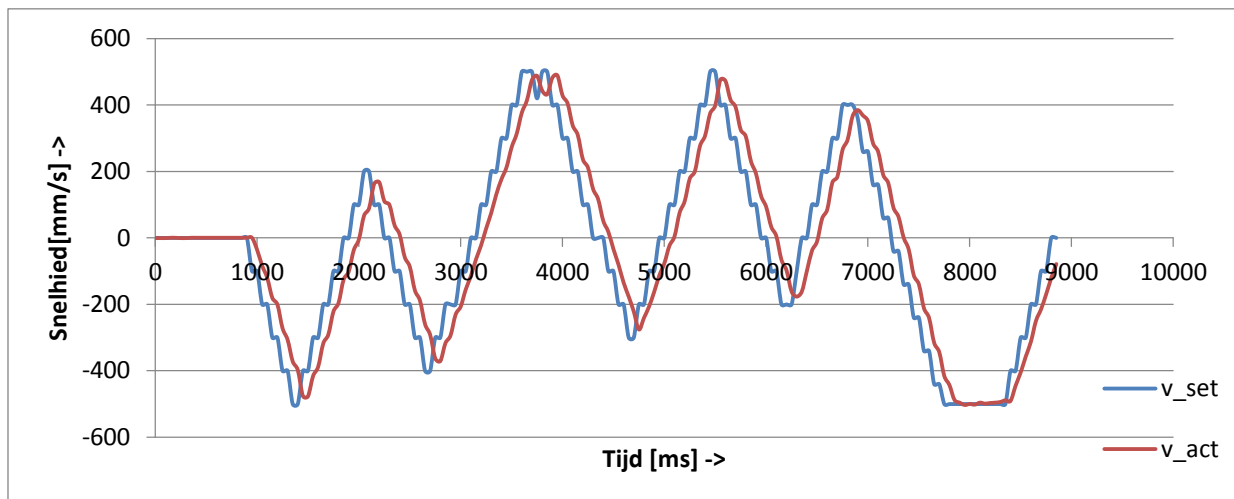
1. Het systeem reageert zenuwachtig op de geleverde kracht. Er is soms veel kracht nodig om van richting te veranderen.
2. De versnelling is altijd maximaal totdat de maximum snelheid is behaald. Er is geen rustige snelheidsopbouw mogelijk.
3. Het systeem is nauwelijks in stilstand te krijgen met de knop ingedrukt. Dit is alleen te bereiken met de knop uit.

Grafieken

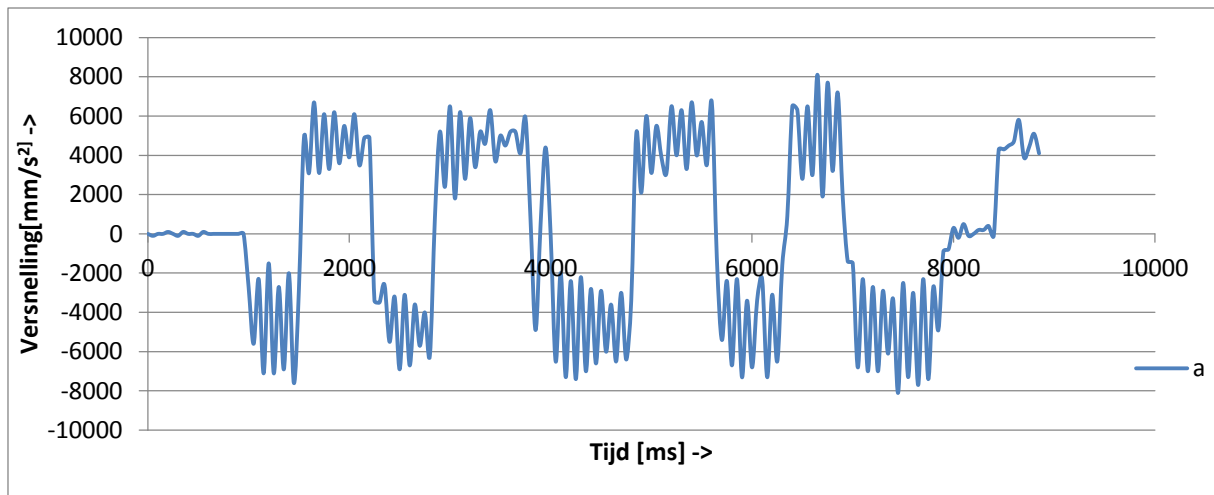
De parameters zijn elk in een eigen grafiek uitgelezen. In deze paragraaf is één voorbeeld van een serie grafieken gegeven, de rest is bijgevoegd in Bijlage A2.



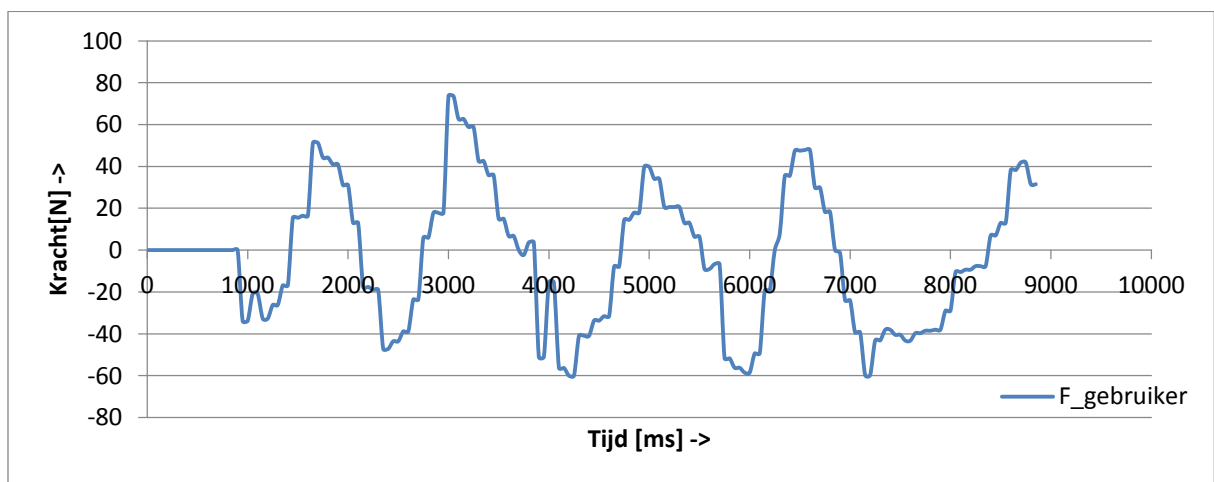
Figuur 0-2: Stroom- tijddiagram



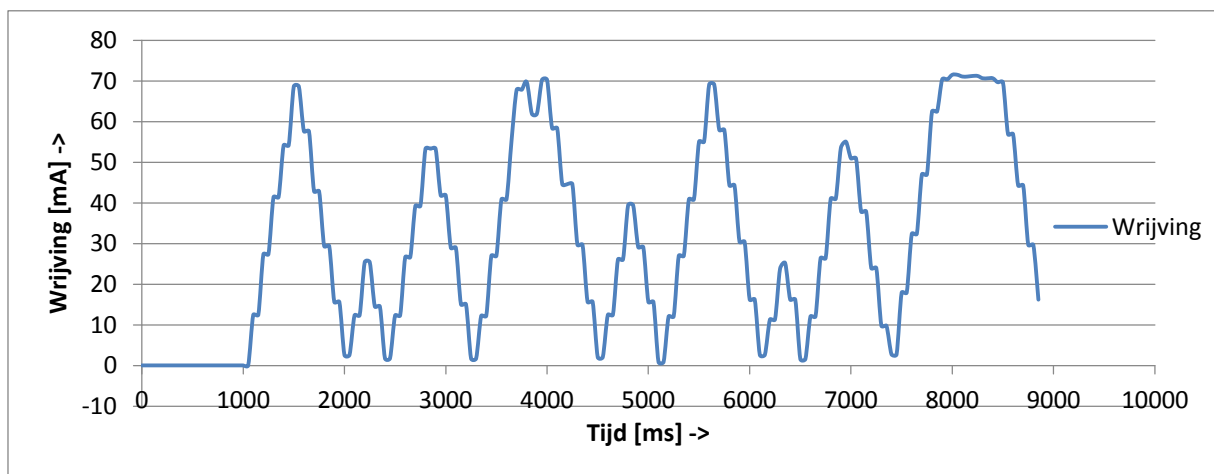
Figuur 0-3: Snelheids- tijddiagram



Figuur 0-4: Versnelling- tijddiagram



Figuur 0-5: Kracht- tijddiagram



Figuur 0-6: Wrijving- tijddiagram

In de bovenstaande grafieken zijn alle berekende waarden tegen de gemeten waarden uitgezet. Hieruit kan worden opgemaakt dat de versnelling constant maximaal is, positief of negatief. Dit is afhankelijk van de uitgeoefende kracht van de gebruiker. De berekende wrijving blijkt altijd een positief effect te hebben.

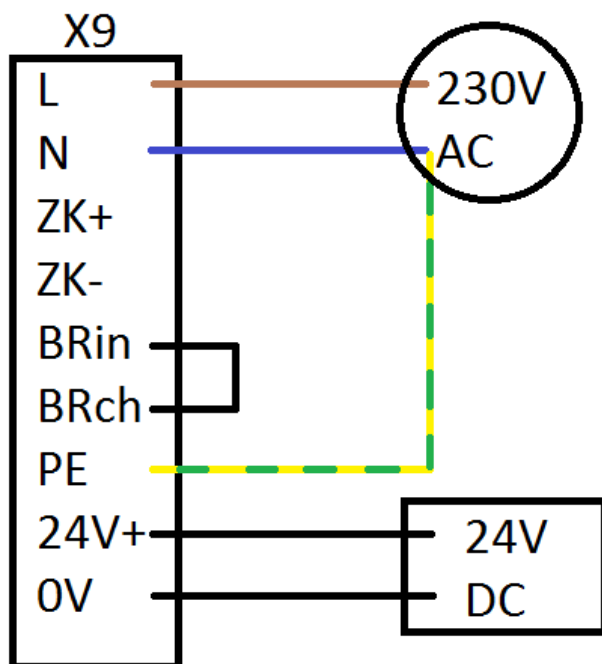
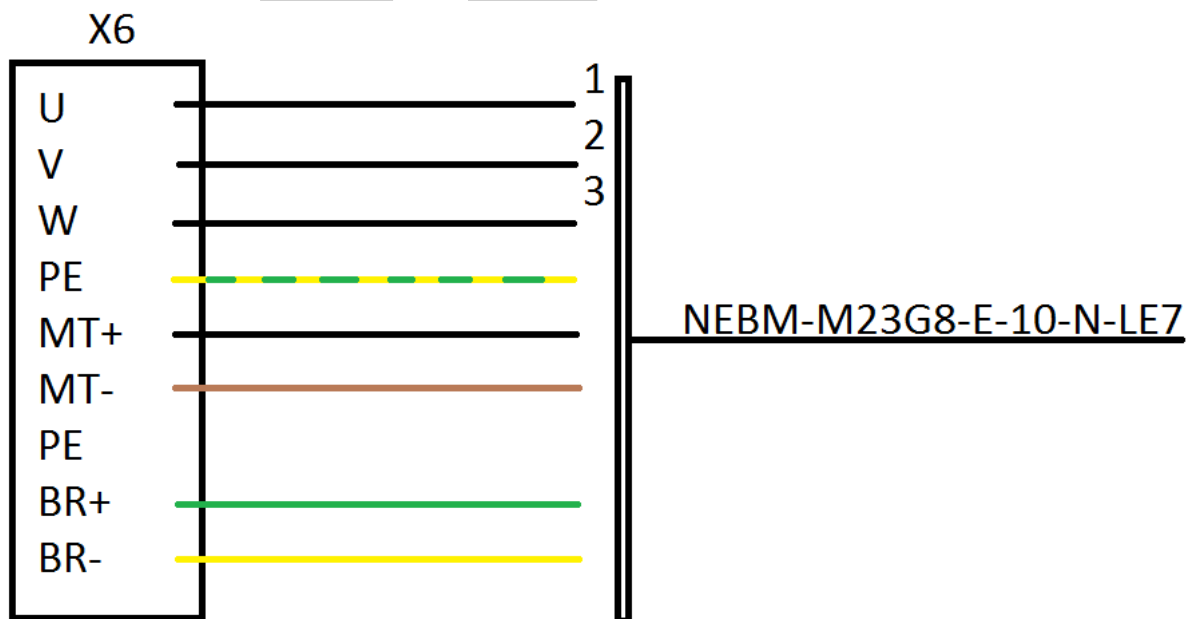
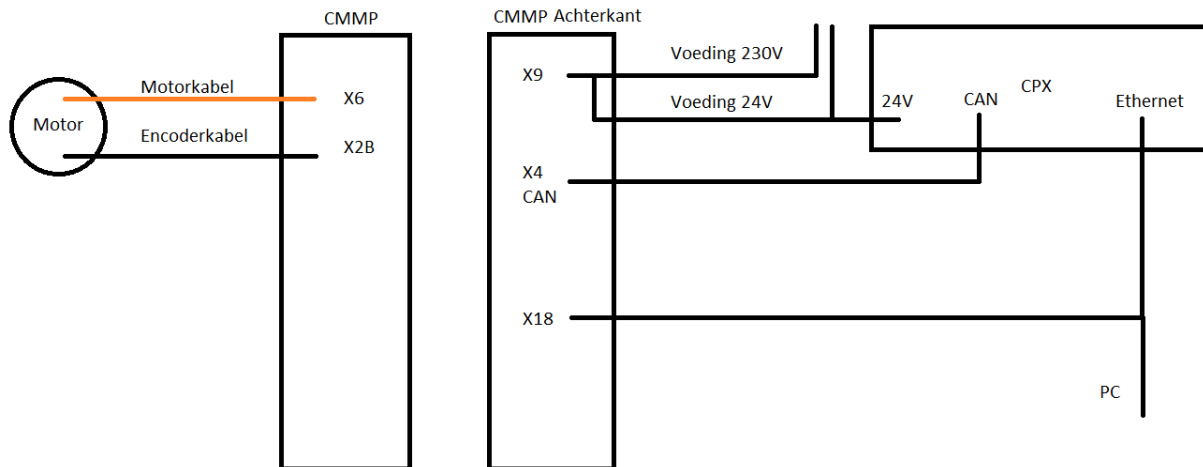
Conclusie

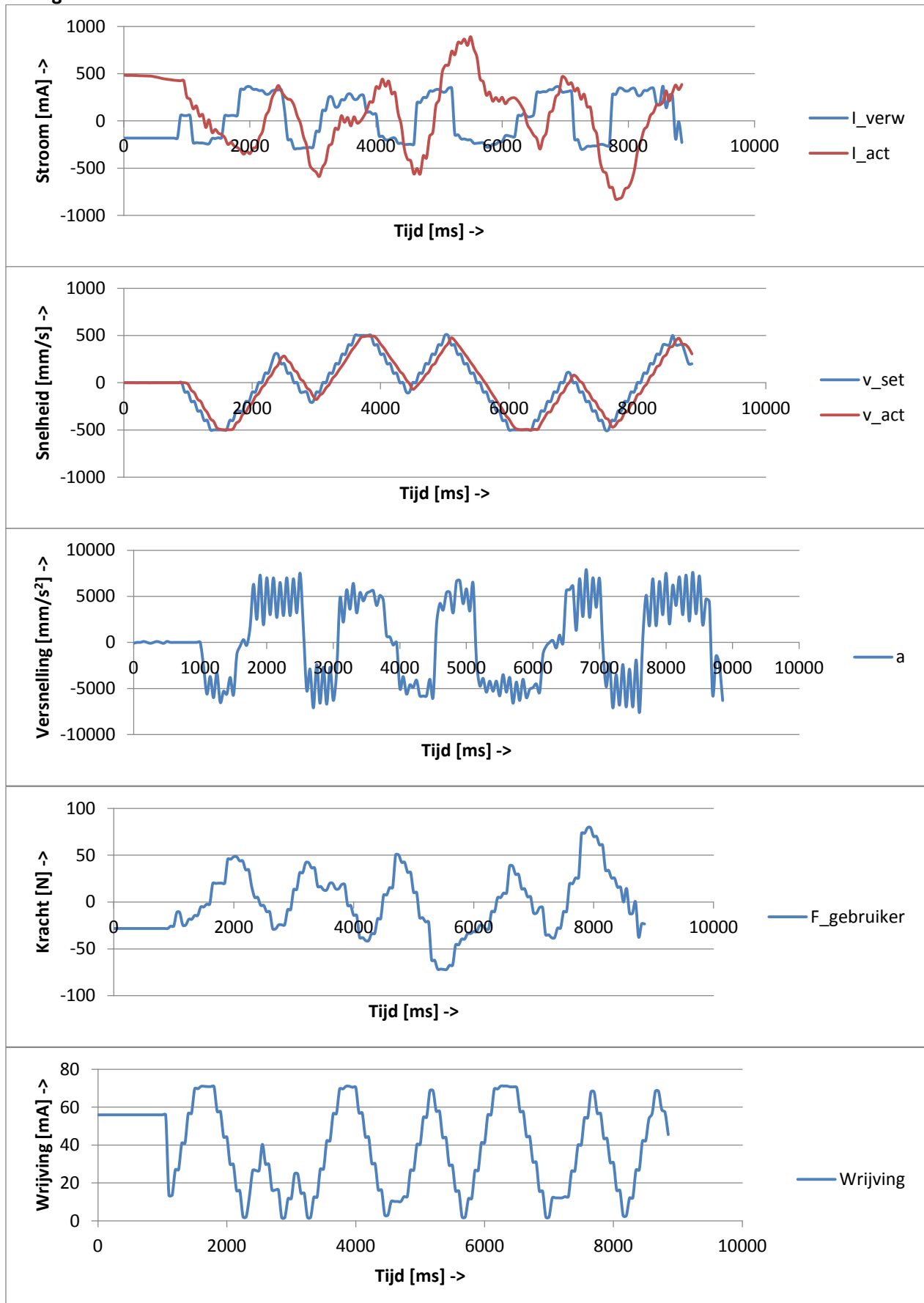
Uit de metingen kan worden opgemaakt dat de gemeten motorstroom en de verwachte motorstroom erg verschillen. Dit komt waarschijnlijk door fouten in de berekening van deze verwachte stroom. In Bijlage B is een onderzoek gedaan naar de mogelijke oorzaak van deze fouten.

De berekende versnelling blijkt wel te kloppen. De maximaal ingestelde versnelling in de motorcontroller is 5 m/s^2 en de berekende versnelling is gemiddeld 5000 mm/s^2 , ofwel 5 m/s^2 . De berekende versnelling varieert nog sterk, dus hier moet nader onderzoek naar gedaan worden.

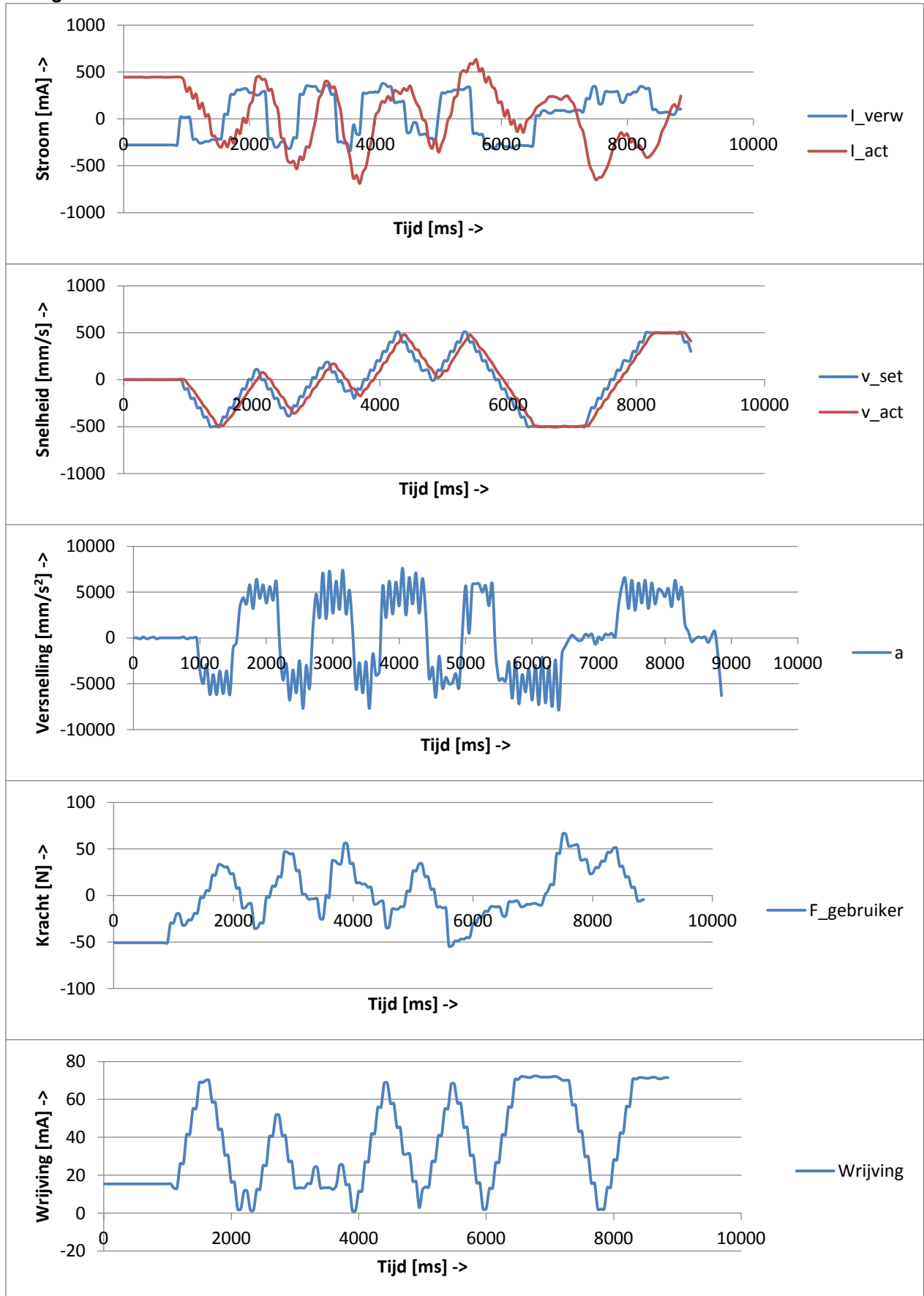
De berekende wrijving is altijd positief, terwijl op basis van het testrapport Dynamische wrijving is bepaald dat de wrijving negatief is als de snelheid negatief is. Hier moet nader onderzoek naar gedaan worden om te kijken wat de oorzaak van deze fout is.

De berekende kracht van de gebruiker wijkt waarschijnlijk af van de uitgeoefende kracht, omdat de verwachte stroom niet klopt.

BIJLAGE A1: Aansluitschema:

BIJLAGE A2: Overige meetresultaten:**Meting 1:**

Meting 2:



BIJLAGE B: Aanvullend onderzoek

Op basis van de eerder verkregen resultaten is er een aanvullend onderzoek uitgevoerd. Het doel van dit onderzoek is het bepalen van de oorzaak van de meet- en berekenfouten. Aangenomen is dat er één berekening fout is, waardoor de overige berekeningen automatisch foute uitkomsten geven.

Testopstelling

De testopstelling is gelijk aan de eerder toegepaste testopstelling.

Meetmethode

Het regelsysteem is opgedeeld in kleinere stukjes. Zo kunnen de berekeningen los van elkaar worden getest en op juistheid worden gecontroleerd. Dit is gedaan in de onderstaande volgorde:

1. Massabepaling in stilstand
2. Bepaling van de kracht van de gebruiker
 - a. Daarnaast wordt de gevraagde versnelling berekend
 - b. Deze versnelling wordt vervolgens gerealiseerd door het ophogen van de uitgaande snelheid.
3. Het in beweging brengen van de tandriemas.

Resultaten

De resultaten zijn op volgorde van de bovengenoemde tests behandeld.

Massabepaling

De massabepaling is opnieuw uitgevoerd. Dit is als volgt uitgevoerd:

- Kleine afstand in beweging, vervolgens een berekening uit de gemeten motorstroom. De gemonteerde massa is 2,5 kg. Dit moet overeenkomen met 3,82 kg in totaal.
- De resultaten zijn in de onderstaande tabellen weergegeven:

In de tabellen zijn de volgende berekeningen gebruikt:

$$m_{\text{gemeten}} = I_{\text{gemiddeld}} \cdot C_m$$

$$m_{\text{totaal}} = (0,994 \cdot m_{\text{gemeten}} + 0,039) - \frac{T_w \text{Omhoog}}{r_{\text{poelie}} \cdot g}$$

$$m_{\text{totaal}} = (0,994 \cdot m_{\text{gemeten}} + 0,039) - \frac{T_w \text{Omlaag}}{r_{\text{poelie}} \cdot g}$$

De onderstaande waarden zijn constant:

$$T_w \text{Omhoog} = 0,028 \text{ Nm}$$

$$T_w \text{Omlaag} = -0,1 \text{ Nm}$$

$$C_m = 0,864 \text{ Nm/A}$$

$$R_{\text{poelie}} = 12,415 \text{ mm}$$

$$g = -9,81 \text{ m/s}^2$$

Tabel 0-1: Massabepaling na neergaande beweging

Meting	$I_{\text{gemiddeld}}$ [A]	m_{gemeten} [kg]	m_{totaal} [kg]
1	471	3,35	2,79
2	415	2,94	2,39
3	421	2,98	2,42

Tabel 0-2: Massabepaling na opgaande beweging

Meting	$I_{\text{gemiddeld}}$ [A]	m_{gemeten} [kg]	m_{totaal} [kg]
1	451	3,21	1,67
2	476	3,38	1,85
3	459	3,26	1,73

Conclusie

Uit de tabellen kan worden geconcludeerd dat de berekende totale massa niet overeenkomt met de totale massa die de motor tilt. Dit komt waarschijnlijk door de manier waarop de snelheidsregeling op de statische wrijving reageert. Het is aan te bevelen nader onderzoek te doen naar de te gebruiken wrijfingswaarden.

Het verschil tussen de gemeten massa en de berekende totale massa kan een oorzaak zijn van het standaard verschil in de motorstroom die wordt gemeten. Door dit standaardverschil beweegt de as na een kleine kracht al standaard naar beneden. Het is aan te bevelen aanvullend onderzoek te doen naar de nauwkeurigheid van de massabepaling, om zo het standaardverschil tussen de gemeten- en berekende massa zo klein mogelijk te maken.

Kracht van de gebruiker

De kracht die de gebruiker uitoefent is berekend uit het verschil tussen een verwachte motorstroom en de gemeten motorstroom. Hier kan een kracht mee berekend worden met de onderstaande formule:

$$F_{gebruiker} = \frac{I_{verschil} \cdot C_m}{r_{poelie}}$$

Op basis van de massa die de gebruiker moet aanvoelen kan vervolgens de versnelling berekend worden met de onderstaande formule:

$$a = \frac{F_{gebruiker}}{m_{gebruiker}}$$

Deze versnelling is vervolgens omgezet in een ophoging voor de snelheid:

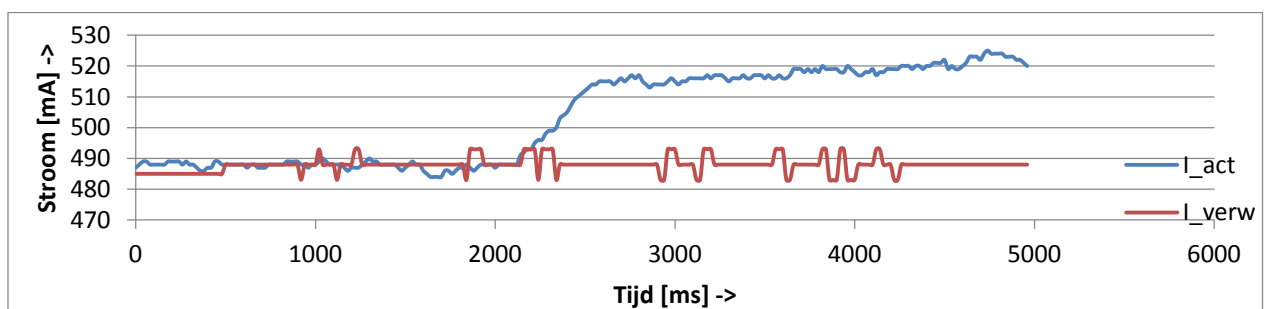
$$dv = \frac{a}{dt}$$

Het doel van deze test is een validatie dat de kracht die de gebruiker uitoefent goed wordt omgerekend naar een versnelling door het systeem.

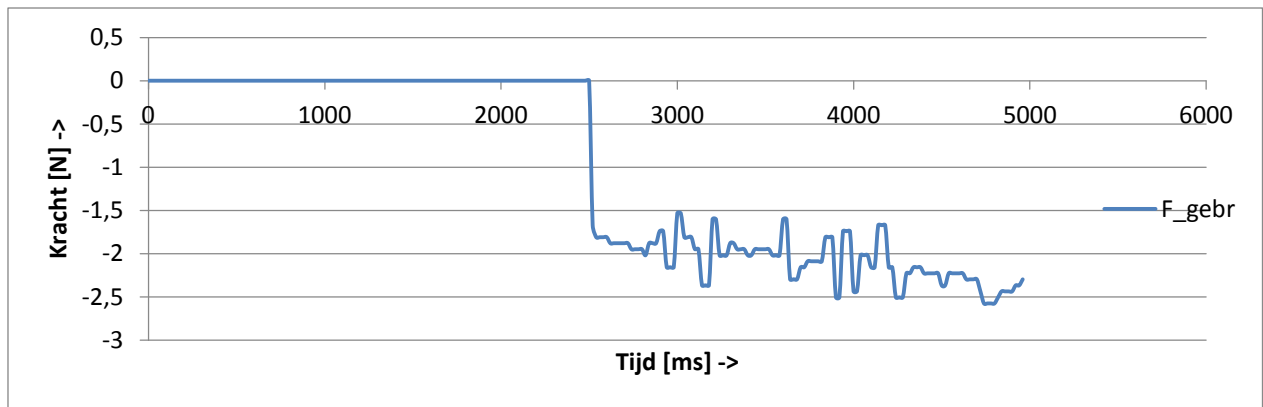
In de bovenstaande vergelijkingen zijn de volgende waarden constant:

$$\begin{aligned} dt &= 50 \text{ ms} \\ C_m &= 0,864 \text{ Nm/A} \\ r_{poelie} &= 12,415 \text{ mm.} \end{aligned}$$

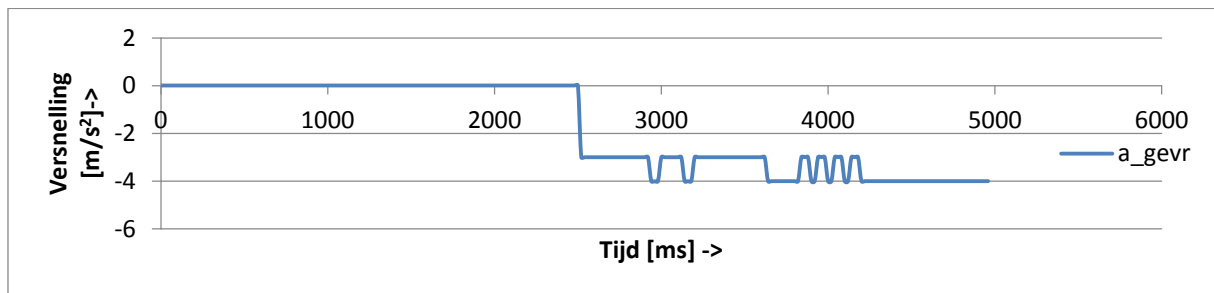
Deze berekeningen hebben in het systeem geleid tot de volgende resultaten:



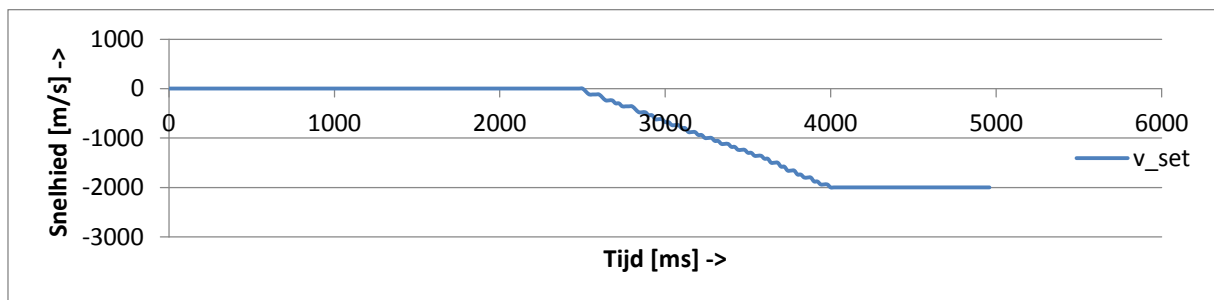
Figuur 0-7: Stroom- tijddiagram



Figuur 0-8: Kracht- tijddiagram



Figuur 0-9: Versnelling- tijddiagram



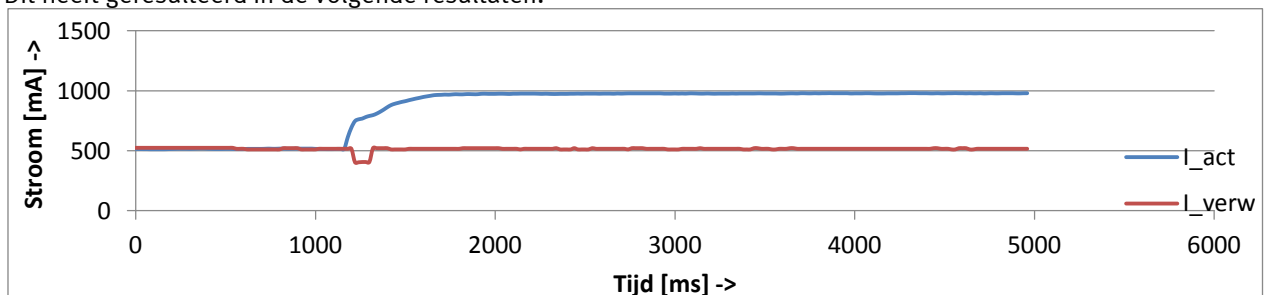
Figuur 0-10: Snelheid- tijddiagram

Er is in stilstand kracht uitgeoefend op de as. Op basis van deze kracht is de versnelling bepaald en is de snelheid opgehoogd. Zoals te zien in de bovenstaande diagrammen volgen deze acties elkaar netjes op tot een bewegingsprofiel uit het onderste diagram.

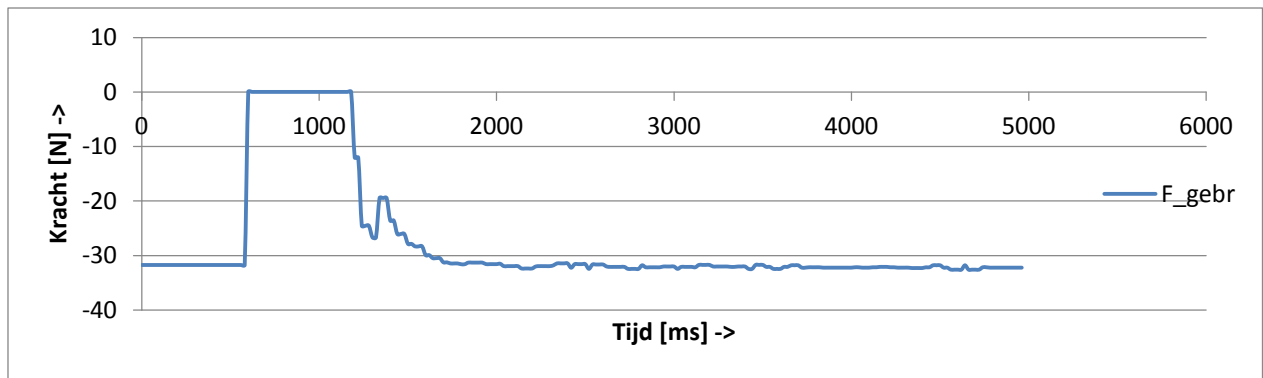
Om te controleren of de kracht van de gebruiker juist is berekend, is er een extra schijf van 5 kg aan de slede gehangen. Deze moet dus omgerekend voor een kracht zorgen van:

$$F = m \cdot g = 5 \cdot 9,81 = 49,1 \text{ N}$$

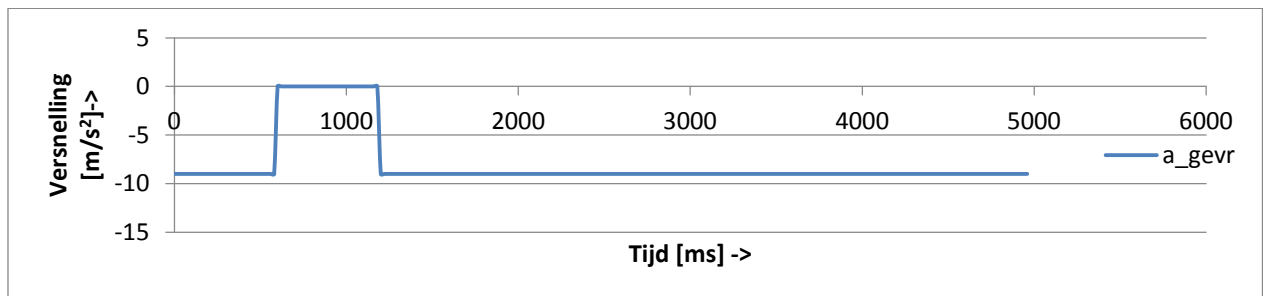
Dit heeft geresulteerd in de volgende resultaten:



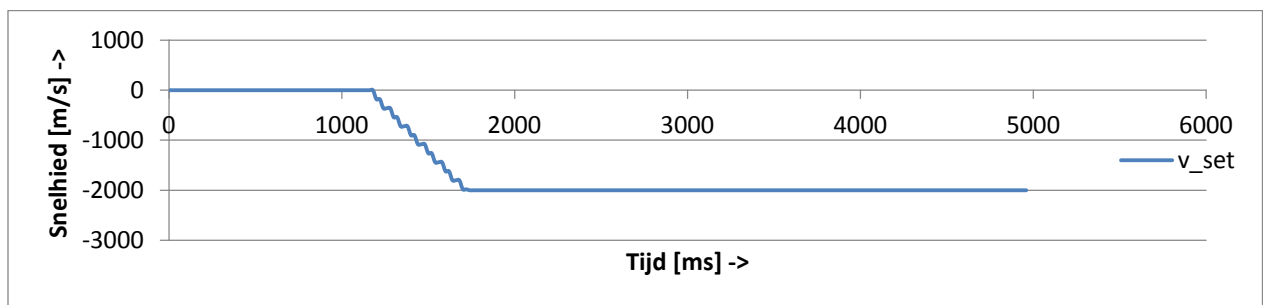
Figuur 0-11: Stroom- tijddiagram



Figuur 0-12: Kracht- tijddiagram



Figuur 0-13: Versnelling- tijddiagram



Figuur 0-14: Snelheid- tijddiagram

In figuur 0-6 is te zien dat de 5 kg zorgt voor een extra kracht van ongeveer 32 N. Dit verschilt dus ongeveer 17 N met de kracht die het zou moeten leveren.

Conclusie

Er zit een sterke afwijking in de berekende kracht, waardoor ook de berekende versnelling een afwijking heeft ten opzichte van wat het zou moeten worden. De afwijking in de berekende versnelling is ook deels te danken aan de massabepaling, omdat deze afwijkt van de eerder vastgestelde waarden.

Op basis van de berekende waarden met het huidige systeem kan er wel worden geconcludeerd dat de snelheid netjes wordt opgehoogd voor de berekende versnelling. Deze versnelling wordt gerealiseerd door de snelheid uit te sturen met bepaalde, even grote tijdstappen.

Het is aan te bevelen nader onderzoek te doen naar de oorzaak van de afwijking in de gemeten kracht. Door deze fout berekend het systeem een verkeerde versnelling. Door deze fout kan het systeem soms nerveus aanvoelen voor de gebruiker, omdat het object harder versnelt dan verwacht.

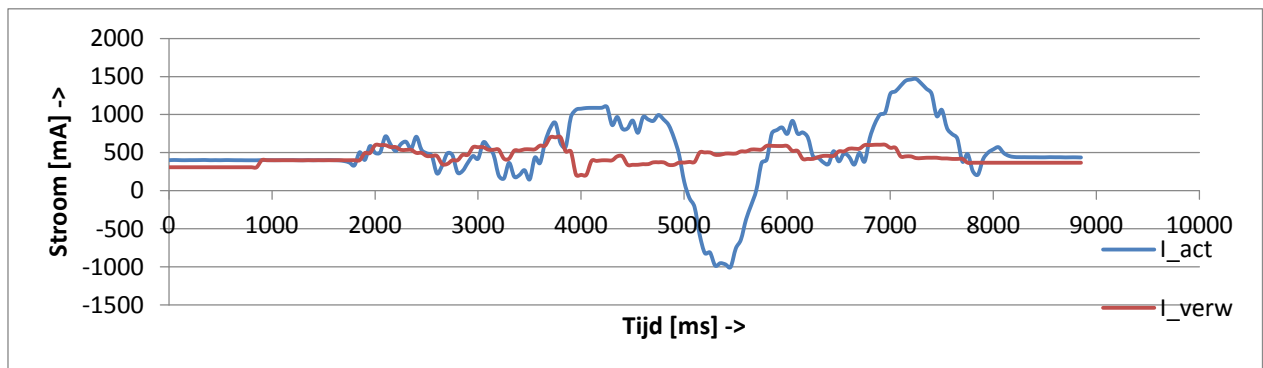
Realisatie van de beweging

De berekende versnelling moet nog worden gerealiseerd. In deze test is de beweging van het tilhulpsysteem in beeld gebracht dat is aangestuurd door een handkracht. In hoeverre wordt deze handkracht omgezet naar een versnelling? Hoe komt de ervaring overeen met de weergegeven resultaten?

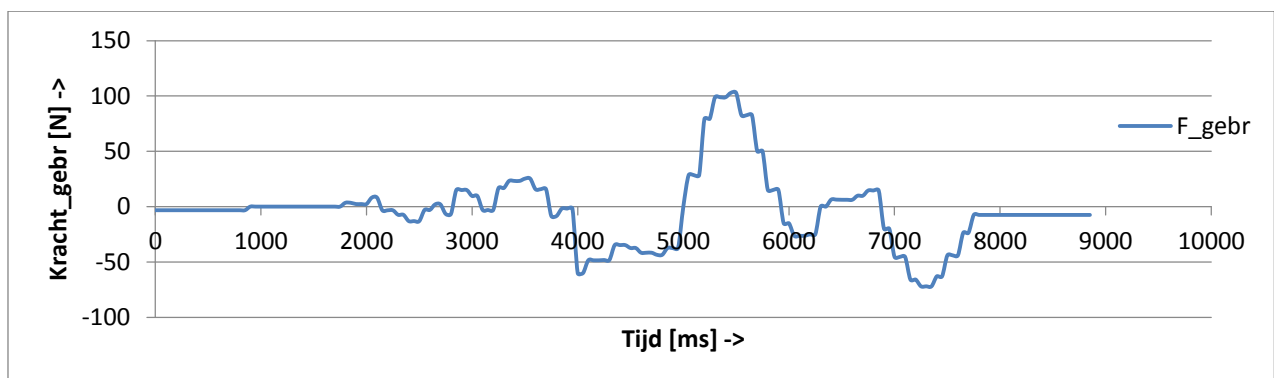
In deze test zijn de volgende grenzen gesteld:

- De PLC mag een maximale versnelling van 5 m/s^2 uitsturen
- De maximale snelheid is 800 mm/s
- De cyclustijd van de PLC is 25 ms .
 - o Deze wijkt af van de cyclustijd van de eerste test in beweging en daarnaast wordt er geen gebruik meer gemaakt van timers. Daarnaast is de cyclustijd van de versnellingsberekening aangepast naar 50 ms .

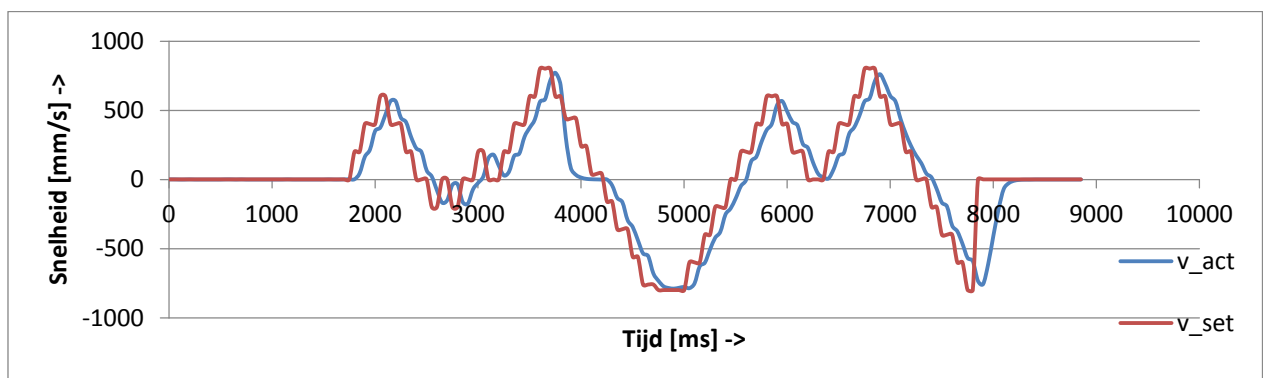
Met deze grenzen zijn de volgende resultaten geboekt:



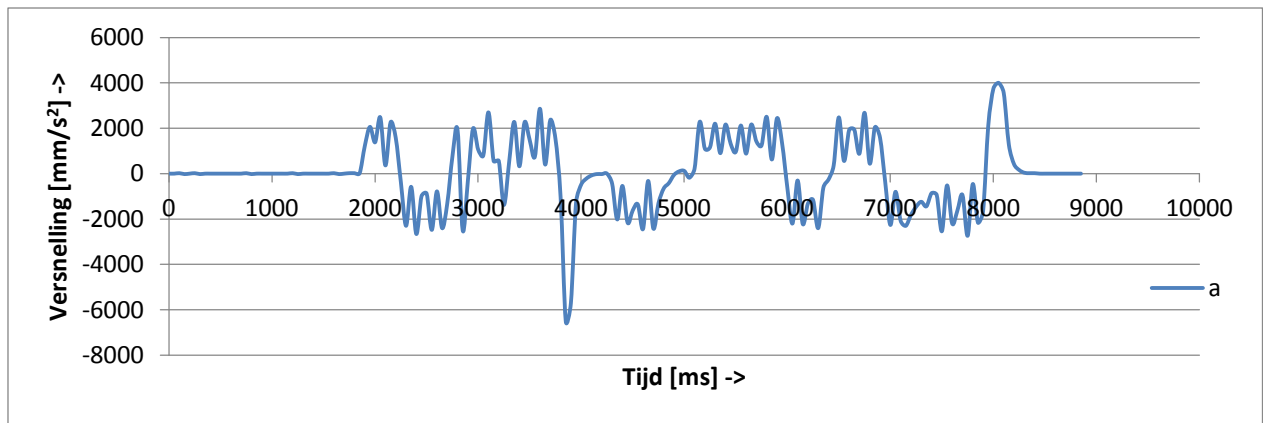
Figuur 0-15: Stroom- tijddiagram



Figuur 0-16: Kracht- tijddiagram



Figuur 0-17: Snelheid- tijddiagram



Figuur 0-18: Versnelling- tijddiagram

Conclusie

Op basis van de eerder weergegeven resultaten kan worden opgemerkt dat de nieuwe berekenmethode effect heeft op de berekening van de verwachte motorstroom en dat het systeem beter reageert op de verschillen tussen de verwachte- en gemeten motorstroom. De berekening van de versnelling klopt in combinatie met de gemeten waarden, maar komt niet overeen met de maximale versnelling als ingesteld. Op basis van de berekende handkracht moet het systeem de maximale versnelling van 5 m/s^2 uitsturen, maar die is niet behaald.

Het is aan te bevelen nader onderzoek te doen naar de oorzaak van het afwijken van de behaalde versnelling ten opzichte van de berekende handkracht. Het zenuwachtige gedrag van het systeem kan ontstaan zijn uit een niet nader te verklaren fout in de berekening van de gevraagde versnelling.