

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Pneumatische aandrijvingen: energie- en kostenanalyse en het ontwerpen van rendabele elektrische alternatieven

PROMOTOR :

ing. John BIJNENS

PROMOTOR :

ing. Tom GEURTS

COPROMOTOR :

ing. Frank VALKENBORGH

Arne Smeets

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Pneumatische aandrijvingen: energie- en kostenanalyse en het ontwerpen van rendabele elektrische alternatieven

PROMOTOR :

ing. John BIJNENS

PROMOTOR :

ing. Tom GEURTS

COPROMOTOR :

ing. Frank VALKENBORGH

Arne Smeets

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica



Woord vooraf

Voor u ligt de scriptie “Pneumatische aandrijvingen: energie- en kostenanalyse en het ontwerpen van rendabele elektrische alternatieven” waar ik me het academiejaar 2021-2022 over ontfermd heb. Deze scriptie is geschreven in het kader van mijn masteropleiding Industriële Ingenieurswetenschappen Elektromechanica georganiseerd door de KULeuven en de UHasselt te Diepenbeek.

De mechanisch probleemoplossende aard van dit onderwerp trok initieel mijn interesse. Ook het aspect van innoveren van efficiëntere en dus ecologische aandrijvingsmethodes maakte de keuze voor dit project makkelijk. Tijdens een bezoek aan IPTE kreeg ik uitleg over de machines en hun mechanismes en prikkelde het onderwerp mij direct.

De eerste stap van deze masterproef was mij verdiepen in pneumatische en elektrische aandrijvingen. Na het onderzoek naar de kost van pneumatische en elektrische aandrijvingen viel meteen op dat er geen duidelijk betere aandrijvingsmethode was. De keuze om de pneumatische aandrijving te behouden of toch over te schakelen op een elektrische variant was zeer complex. Een tweede stap was deze keuzen automatiseren. Hiervoor moest eerst alle data verzameld worden van de machines van IPTE in Excel om de kosten van de pneumatische sturing te bepalen. Ten derde heb ik de uitgebreide functionaliteit van Excel leren kennen en heb ik alle berekeningen geautomatiseerd. Een vierde fase was de ontwerpfase. Tijdens de ontwerpfase week ik regelmatig terug af naar Excel om de geautomatiseerde berekeningen gebruiksvriendelijker en nauwkeuriger te maken. Dit heeft een groot deel van mijn ontwerptijd ingenomen, maar ik wist dat dit een belangrijke fundering was om een correcte keuze te maken. Na het volgen van een online Webinar van Festo kon ik mijn berekeningen bevestigen.

Allereerst wil ik mijn interne en externe begeleiders, ing. John Bijnens, ing. Tom Geurts en ing. Frank Valkenborgh, bedanken. Hun feedback, bevestiging, kennis, contacten en gastvrijheid zijn een enorme bijdrage geweest doorheen het academiejaar. Ook ben ik hun zeer dankbaar om me te introduceren in het bedrijfsleven, hierdoor ben ik als persoon professioneler en volwassener geworden.

Vervolgens zou ik graag ing. Danny Smeets bedanken voor al zijn technische kennis en inzichten van pneumatiek tot Excel. Ook de kennis en ervaring van Festo energieconsultant Johan de Peyper waren zeer confirmerend en leerzaam.

Verder wil ik nog mijn vriendin, familie en vrienden bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun en ontspanning wanneer het nodig was.

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	1
Abstract	11
Abstract	13
1 Inleiding.....	15
2 Analyse pneumatische aandrijving.....	17
2.1 Inleiding tot pneumatische aandrijving	17
2.2 Werking pneumatische actuator	18
2.2.1 Bewegingsprincipe	18
2.2.2 Aansturing.....	19
2.3 Verlies factoren.....	20
2.3.1 Drukverliezen	21
2.3.2 Lekverliezen	22
2.4 Berekening luchtverbruik.....	23
2.4.1 Lineaire pneumatische actuator	23
2.5 Pneumatische draai-actuator	25
2.5.1 Draaicilinder met tandwieloverbrenging.....	25
2.5.2 Draaivleugelcilinders	28
2.5.3 Invloed werkdruk.....	28
2.5.4 Totale machine	29
2.6 Kostenbepaling luchtverbruik	30
2.6.1 Vermogensbepaling.....	31
2.6.2 Kostenbepaling.....	32
3 Analyse elektrische aandrijving.....	37
3.1 Inleiding tot elektrische aandrijving	37
3.2 Werking elektrische actuator	38
3.2.1 Aansturing.....	38

3.2.2	Bewegingsprofiel	39
3.2.3	Positiebepaling	40
3.3	Verliesfactoren.....	41
3.4	Berekening energieverbruik	42
3.5	Bestaande actuatoren	42
3.5.1	Klemmodule	43
3.5.2	Stopper	43
3.5.3	Grijpers.....	44
3.5.4	Lineaire actuator	45
3.5.5	Lineaire solenoïdes.....	47
3.5.6	Draai actuator	47
3.5.7	Lineaire-draai combinatie.....	48
3.5.8	Draai solenoïde	49
4	Automatisering luchtverbruik berekeningen.....	51
4.1	Vaste gegevens.....	51
4.2	Variabele gegevens	52
4.2.1	Machine specifieke variabelen	52
4.2.2	Bedrijfsspecifieke variabelen	54
4.3	Excel berekeningen.....	54
4.4	Rekenblad: actuator en machinegegevens	54
4.5	Rekenblad: energiefactuur	61
4.6	Resultaten luchtverbruik berekeningen	63
5	Ontwerp mogelijke elektrische oplossing.....	65
5.1	Functioneel categoriseren actuatoren	66
5.2	Ontwerp elektrische alternatieven	68
5.2.1	Semi-Rotary drive	68
5.2.2	Slede cilinder	72
5.2.3	Stopper/locking cilinder	73
5.2.4	Algemene oplossing.....	76
5.3	Prijsvergelijking elektrische alternatieven	78

6	Bepaling rentabiliteit	81
6.1	Totale eigendomskost	81
6.1.1	Pneumatische TCO	81
6.1.2	Elektrische TCO	82
6.2	Rekenblad: TCO	82
6.2.1	Voorbeeld draai-actuator	82
6.2.2	Voorbeeld slede cilinder	86
6.2.3	Voorbeeld stopper cilinder	88
6.3	Maximale investering	90
7	Besluit	91
	Bibliografie	93
	Bijlage lijst	97
	Bijlage	99

Lijst van tabellen

Tabel 1: Minimum efficiëntie η voor IE2 efficiëntieniveau (%) [31, p. 10]	37
Tabel 2: Verklaring van de gebruikte termen in Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5 en Tabel 6	56
Tabel 3: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 1	59
Tabel 4: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 2	59
Tabel 5: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 3	60
Tabel 6: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 4	60
Tabel 7: Vergelijking meting en berekening voor een machinecyclus	63
Tabel 8: Samenvatting luchtverbruik per minuut per machine	64

Lijst van figuren

Figuur 1: Vereenvoudigde doorsnede van een dubbelwerkende pneumatische cilinder.	18
Figuur 2: Vereenvoudigde doorsnede van een enkelwerkende pneumatische cilinder.	19
Figuur 3: Werkingsprincipe van een zuigerstangloze cilinder [10, p. 9]	19
Figuur 4: Werkingsprincipe van een pneumatisch magneetventiel [11]	20
Figuur 5: Compressor rendement in functie van het compressor vermogen [14]	21
Figuur 6: Voorstelling cilinderafmetingen.....	23
Figuur 7: Interne werking van een draaicilinder met tandwieloverbrenging [24, p. 12]	25
Figuur 8: De draaivleugelcilinder [12, p. 12].....	28
Figuur 9: Voorbeeld energierekening	35
Figuur 10: Voorbeeld motorbesturing en onderdelen [36, p. 2]	39
Figuur 11: Invloed van een S-curve besturing [39]	40
Figuur 12: Actieve vermogens in een motor [44].....	42
Figuur 13: Electrische klem module Schunk [46].....	43
Figuur 14: Festo elektrische stopper [47, p. 1].....	44
Figuur 15: SMC elektrische stopper [48]	44
Figuur 16: Festo elektrische parallelle grijper [49, p. 1]	45
Figuur 17: Schunk elektromagnetische grijper [50]	45
Figuur 18: Drieklauw elektrische grijper [51, p. 57]	45
Figuur 19: Festo elektrische lineaire slede actuator [52].....	46
Figuur 20: Festo elektrische lineaire actuator [53]	46
Figuur 21: Linmot tubular elektrische actuator [6]	46
Figuur 22: Voorbeeld solenoïdes van Kendrion [55].....	47
Figuur 23: Draai-actuator van Festo [56]	48
Figuur 24: Lineaire Draai-actuator combinatie met tandwielkast van Linmot [57].....	48
Figuur 25: Voorbeeld bistabiele draaisolenoïde van Kendrion [58].....	49
Figuur 26: Voorbeeld tray en stack met 5 printplaten.....	53
Figuur 27: Flowchart van de Easytray	53
Figuur 28: Algemene bedrijfsafhankelijke parameters	55
Figuur 29: Rekenblad energiefactuur	62
Figuur 30: ATU Bewegingsmechanismes	68
Figuur 31: Draaicilinder DRRD-40-180-FH-Y14-A.....	69
Figuur 32: Voorbeeld slewing gear [63].....	69
Figuur 33: Ontwerp slewing gear	70
Figuur 34: SMC turntable	71
Figuur 35: Slede cilinder DGC-25-260	72

Figuur 36: Assemblage lineaire slede aandrijving	73
Figuur 37: Shotbolt locking of stopper actuator [65].....	74
Figuur 38: Stopper inbouwruimte versus shotbolt inbouwruimte.....	74
Figuur 39: Low-Profile Latching Solenoid Lock [66]	75
Figuur 40: Stopper spie principe	75
Figuur 41: Festo EFSD stopper [47].....	76
Figuur 42: Testopstelling Bowdenkabel aandrijving [67].....	77
Figuur 43: Schema van het Bowdenkabel aandrijfsysteem	77
Figuur 44: Geselecteerde gegevens voor totale eigendomskost berekening (draai-actuator). 83	
Figuur 45: Overgenomen parameters en totale eigendomskosten (draai-actuator)	84
Figuur 46: Totale eigendomskosten (pneumatisch en elektrisch) (draai-actuator).....	84
Figuur 47: Geselecteerde gegevens voor de totale eigendomskosten (slede cilinder).....	86
Figuur 48: Overgenomen parameters en totale eigendomskosten (slede cilinder).....	86
Figuur 49: Totale eigendomskosten (pneumatisch en elektrisch) (slede cilinder)	87
Figuur 50: Geselecteerde gegevens voor de totale eigendomskosten (stopper cilinder).....	88
Figuur 51: Overgenomen parameters en totale eigendomskosten (stopper cilinder)	88
Figuur 52: Totale eigendomskosten (pneumatisch en elektrisch) (stopper cilinder)	89
Figuur 53: Maximale investeringskost berekening (stopper cilinder).....	90

Abstract

IPTE Factory Automation in Genk ontwikkelt machines voor het produceren, testen en monteren van printplaten. Deze machines zijn deels pneumatisch gestuurd, maar er is stijgende vraag naar elektrische gestuurde alternatieven. Elektrische actuatoren zijn duurder maar behalen een hoger rendement. Deze masterpoef onderzocht of het mogelijk en rendabel is om pneumatische aandrijvingen te vervangen door elektrische alternatieven.

Een eerste moeilijkheid was de berekening van het luchtverbruik van elke pneumatische actuator. Dit verbruik is situatieafhankelijk, aangezien elke klant de machine anders gebruikt. Een tweede uitdaging was het luchtverbruik omrekenen naar een energiekost die afhankelijk was van het gebruikte compressorsysteem en de energieprijs van de klant. De derde uitdaging was om mechanisch equivalente elektrische alternatieven te ontwerpen. Ten slotte moesten de jaarlijkse energiekosten en initiële investeringskosten van beide systemen worden afgewogen.

Eerst werd het luchtverbruik van een actuator en de bijhorende persluchtleidingen berekend aan de hand van de interne afmetingen, werkdruk en werkingscyclussen. Ten tweede werden de jaarlijkse kosten bepaald via het vermogen van de actuator, de compressorrendementen en de energieprijzen. Deze berekeningen werden verwerkt in Excel. Ten derde werden elektrische alternatieven ontworpen in Creo. Ten slotte werd bepaald of de elektrische variant al dan niet rendabel was door de totale eigendomskosten met elkaar te vergelijken. Voor IPTE zijn er rendabele elektrische alternatieven.

Abstract

IPTE Factory Automation in Genk develops machines for the production, testing and assembly of printed circuit boards. These machines are partly pneumatically controlled, but there is an increasing demand for electrically driven alternatives. Electric actuators are more expensive but achieve a higher efficiency. This master exercise investigated whether it is possible and cost-effective to replace pneumatic actuators with electric alternatives.

An initial difficulty was calculating the air consumption of each pneumatic actuator. This consumption is situation-dependent, as each customer uses the machine differently. A second challenge was to convert the air consumption to an energy cost that depended on the compressor system used and the customer's energy price. The third challenge was to design mechanically equivalent electrical alternatives. Finally, the annual energy cost and initial investment cost of both systems had to be weighed.

First, the air consumption of an actuator and its associated compressed air lines were calculated based on internal dimensions, working pressure, and operating cycles. Second, annual costs were determined through actuator power, compressor efficiency and energy prices. These calculations were processed in Excel. Third, electrical alternatives were designed in Creo. Finally, it was determined whether or not the electric alternative was profitable by comparing the *total cost of ownership*. For IPTE, there are cost-effective electric alternatives.

1 Inleiding

Door de hoge huidige energieprijzen is het voordelig voor een bedrijf om een energie-efficiënt werking te hebben. 12% van het industriële energieverbruik op aarde wordt gebruikt om perslucht op te wekken[1]. 24% van de totale kosten van een pneumatische installatie zijn onderhouds- en installatiekosten, de resterende 76% zijn energieverbruikskosten [2, p. 2]. Er is dus een grote markt voor energie-efficiëntere alternatieven voor pneumatiek. Daarom vragen steeds meer en meer bedrijven naar elektrische alternatieven op pneumatische aandrijvingen. Inzicht in de totale kosten van een pneumatische en elektrische installatie maakt duidelijk welke variant werkelijk goedkoper is. Hiervoor is een kostenanalyse van het pneumatisch systeem nodig gevolgd door het ontwerp van een elektrisch alternatief met bijhorende kostenanalyse.

IPTE Factory Automation in Genk, waar deze masterproef plaatsvindt, ontwikkelt standaard automatiseringssystemen en machines voor productie, testen, behandeling en eindmontage van printplaten [3]. Deze machines zijn deels pneumatisch gestuurd en ook IPTE krijgt een stijgende vraag naar elektrische alternatieven.

Een aantal bedrijven zoals Festo, SMC, Linmot en Ultra Motion produceren al elektrische actuatoren specifiek ontworpen om pneumatische actuatoren te vervangen [4]–[7]. Festo biedt een online gratis tool (TCO₂ tool) aan waarmee voor een bepaalde situatie een geschikte pneumatische en elektrische actuator worden voorgesteld. In de tool worden de 2 opties vergeleken op basis van CO₂ uitstoot en totale kost [8]. Deze tool is beperkt in het aantal instelbare parameters maar ook tot de actuatoren van Festo zelf. Een andere tool van Festo is de Quicksearchplus. Deze tool berekent het verbruik van een ingestelde installatie en de kost hiervan maar is ook weer beperkt in het aantal instelbare parameters [9].

De bestaande tools en alternatieven tonen dat de vraag naar elektrische alternatieven beantwoord wordt door meerdere bedrijven, maar op de vraag of het ook goedkoper is, wordt geen antwoord gegeven. Dit komt omdat de kostprijs van specifieke parameters afhangt die machine en bedrijfsafhankelijk zijn en dus niet veralgemeend kunnen worden voor elke pneumatische aandrijving. Deze masterproef heeft twee doelen; een eerste doel is het ontwikkelen van een volledig geparmetriseerde pneumatische kostenanalyse en het ontwerpen van potentiële elektrische alternatieven. Het tweede doel is na te gaan of een elektrisch alternatief voor de pneumatische machines en actuatoren van IPTE rendabel is.

Deze masterproef bepaalt de totaalcost van de pneumatische instelling op basis van drie parameter-niveaus. Een eerste niveau is het actuator-niveau met parameters zoals actuatorafmetingen, leidingafmetingen en werkdruk. Een tweede niveau is het machineniveau met parameters zoals cyclustijden en aantal actuatorbewegingen. Een derde niveau is het bedrijfsniveau met parameters zoals installatierendement, luchtprijzen, energieprijzen en werktijden. Het ontwerp van een elektrische actuator is geen een-op-een vervanging van de exacte pneumatische actuator, maar kan ook een andere oplossing zijn voor die dezelfde functie volbrengt. Elektrische actuators zijn gewoonlijk duurder dan pneumatische actuators. Om een rendabel elektrisch alternatief te ontwerpen wordt er gestreefd naar een goedkoop elektrisch ontwerp.

Een goede basis voor deze masterproef begint bij het onderzoeken van de werking, het luchtverbruik en de verliezen van pneumatische actuators. Eens dit gekend is, worden berekeningen opgesteld om het luchtverbruik te berekenen gevolgd door een kostenbepaling van dit luchtverbruik. Daarna wordt er onderzoek gedaan naar de elektrische alternatieven: hoe werkt het, welke verliezen treden er op, hoe worden de energieverbruikskosten bepaald, en welke opties biedt de markt aan? Het automatiseren van alle voorgaande berekeningen gebeurt in Excel. Alle nodige parameters van de machines van IPTE worden verzameld en verwerkt in de bijhorende formules. Eens deze berekening geverifieerd is aan de hand van metingen worden elektrische alternatieven ontworpen die tenslotte afgewogen worden tegen de huidige pneumatische actuators aan de hand van een totale eigendomskostenberekening.

2 Analyse pneumatische aandrijving

2.1 Inleiding tot pneumatische aandrijving

Pneumatiek is een vorm van energietransport waarbij samengeperste gassen, ook wel perslucht genoemd, expanderen en zo mechanische krachten kunnen uitoefenen. Een pneumatisch systeem bestaat uit een compressor, een leidingsnetwerk en pneumatisch aangedreven machines. Bij het produceren van perslucht wordt elektriciteit of een fossiele brandstof omgezet in mechanische arbeid door middel van elektromotoren of verbrandingsmotoren. Met deze mechanische arbeid wordt lucht gecomprimeerd met een compressor tot hogere drukken. Daarna wordt de perslucht door filters en drogers gezuiverd. Deze zuivere perslucht gaat door het leidingsnetwerk om uiteindelijk in een machine omgezet te worden in bewegingen door middel van pneumatische actuatoren. Perslucht is een veelgebruikte energiebron in de industrie.

Een persluchthoeveelheid wordt uitgedrukt in normaalvolumes. Een normaalvolume is het volume dat de perslucht inneemt onder de normaalomstandigheden. Een volume van 1 *Liter* (L) dat gevuld wordt met perslucht tot 7 *bar* (absolute druk) neemt onder normaalomstandigheden 7 normaalliter in. De gebruikte standaardeenheid voor persluchtvolumes in deze paper is “ nL ”. In de pneumatiek wordt gewoonlijk gerekend in relatieve druk. De relatieve druk is het verschil van de absolute druk en de atmosfeerdruk. In deze paper wordt een atmosfeerdruk van 1 bar verondersteld. Een perslucht debiet is een hoeveelheid normaalvolumes per tijdeenheid. De gebruikte standaardeenheid voor persluchtdebieten in deze paper is “ nL/s ”.

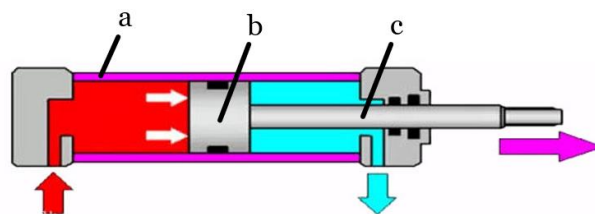
Dit hoofdstuk geeft inzicht in het belang van energiezuinig omgaan met pneumatische systemen. Hierna wordt de werking van een pneumatische machine besproken en hoe het luchtverbruik hiervan berekend wordt. Vertrekkende van het luchtverbruik wordt de jaarlijkse energiekost van het pneumatisch systeem bepaald.

2.2 Werking pneumatische actuator

2.2.1 Bewegingsprincipe

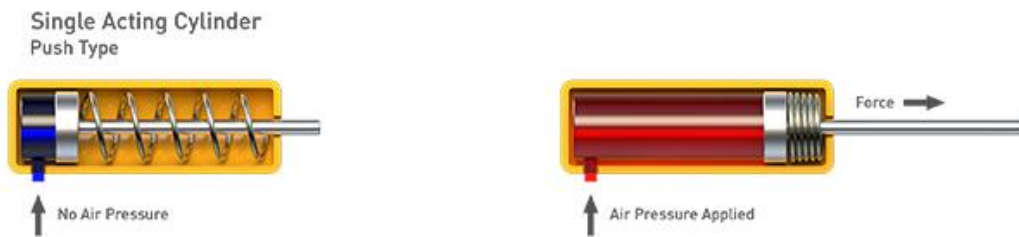
Een lineaire pneumatische actuator, ook wel een pneumatische cilinder genoemd, kan enkel arbeid leveren in een lineaire beweging. De cilinder bestaat voornamelijk uit drie functionele onderdelen namelijk de cilinderkamer of cilinderboring, de zuiger en de zuigerstang. Figuur 1 toont een vereenvoudigde doorsnede van een pneumatische cilinder.

Om arbeid uit te oefenen wordt een kamer gevuld met perslucht waardoor de zuiger en de stang worden verplaatst en dus arbeid kunnen uitoefenen. Zulke vulling wordt in deze paper een kamervulling of cilindervulling genoemd. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een positieve en een negatieve kamervulling. De positieve kamervulling is de kamer waar geen zuigerstang doorheen loopt (de linkse, rode kamer in Figuur 1) en resulteert in een uitgaande slag. De negatieve kamervulling is de kamer waar wel een zuigerstang doorheen loopt (de rechtse, blauwe kamer in Figuur 1) en resulteert in een ingaande slag. Het volume van de negatieve kamer is kleiner dan het volume van de positieve kamer (omdat de zuigerstang een deel van het volume inneemt). In deze paper zullen verschillende eenheden het subscript “+” of “-“ gebruiken. Deze verwijzen naar de positieve en negatieve cilinderslag.



*Figuur 1: Vereenvoudigde doorsnede van een dubbelwerkende pneumatische cilinder.
a) cilinderkamer of cilinderboring. b) zuiger. c) zuigerstang*

De pneumatische cilinder in Figuur 1 is een dubbelwerkende cilinder omdat zowel de positieve als de negatieve cilinderkamers een persluchtconnectie hebben. Een enkelwerkende cilinder is een pneumatische cilinder met slechts één persluchtconnectie. Deze actuator kan maar in één richting bekrachtigd worden. De andere richting wordt bekrachtigd door een veer. De cilinderkamer wordt gevuld met lucht, de zuiger verplaatst en de veer wordt ingedrukt. Wanneer de cilinder niet meer bekrachtigd wordt zal de veer de zuiger terug naar de beginpositie duwen (zie Figuur 2).



Figuur 2: Vereenvoudigde doorsnede van een enkelwerkende pneumatische cilinder.

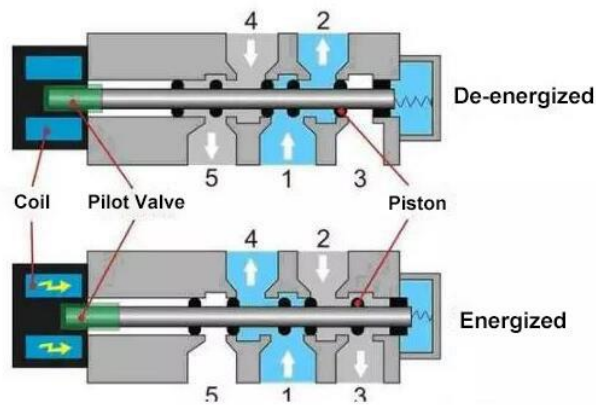
Er bestaan ook zuigerstangloze pneumatische cilinders. In dit geval is er een luchtdichte verbinding met de zuiger en de buitenomgeving doorheen de cilinderwand (zie Figuur 3). De zuiger wordt gekoppeld door de cilinderwand aan een slede. Zo kan de slede arbeid uitoefenen. Hier hebben de negatieve en de positieve kamers een even groot luchtvolume door de afwezigheid van een zuigerstang.



Figuur 3: Werkingsprincipe van een zuigerstangloze cilinder 10, p. 9]

2.2.2 Aansturing

Een pneumatische sturing wordt beheerst door magneetventielen die de luchtdoorlaat blokkeren of openen. Het magneetventiel schakelt wanneer het elektrisch bekrachtigd wordt. De lucht kan nu naar de cilinderkamer stromen en de cilinder bekrachtigen. Verschillende luchtstromen kunnen tegelijk geopend of gesloten worden. Figuur 4 geeft weer hoe de luchtstroom door het ventiel gaat in de onbekrachtigde en de bekrachtigde toestand



Figuur 4: Werkingsprincipe van een pneumatisch magneetventiel [11]

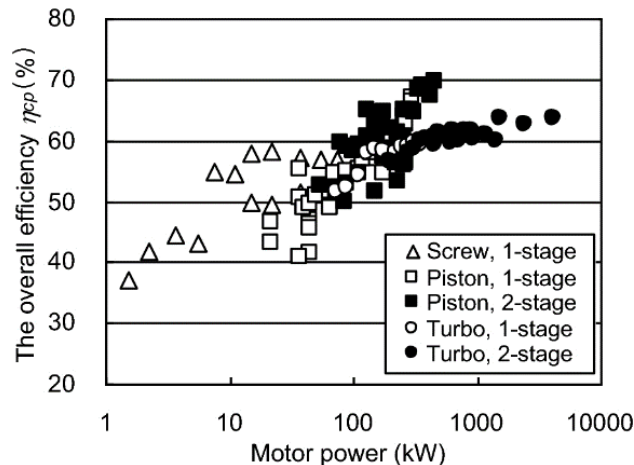
Een pneumatische actuator moet ook gecontroleerd bestuurd worden zodat een vloeiend verloop van de actuator bekomen wordt. Wanneer de cilinder beweegt zonder snelheid of krachtbeperkingen ontstaan er schokken en stoten in het systeem die leiden tot slijtage. Om deze schokken te dempen zal de lucht toevoer en/of afvoer van de cilinder gecontroleerd worden. Om hoge snelheden en versnellingen te beperken wordt een smoorventiel geplaatst in serie met de lucht toevoer en/of afvoer. Dit ventiel zal het luchtdebiet door de leidingen beperken waardoor de slagsnelheid van de cilinder ook beperkt zal worden [12]. Indien het smoorventiel in serie staat met de afvoer zal de zuiger zal als het ware tegengehouden worden door een kussen van lucht dat langzaam verdwijnt.

De kracht die een cilinder uitvoert, wordt bepaald door de luchtdruk in de cilinder. Door de luchtdruk te sturen, zal de kracht ook gecontroleerd kunnen worden. Hoe hoger de druk hoe hoger de krachten. Een drukreducerventiel is hiertoe in staat [13]. Door een combinatie te maken van verschillende soorten pneumatische magneet-, smoor- en drukreducerventielen kan de beweging van een cilinder beheerst worden.

2.3 Verlies factoren

Volgens Atlas Copco, een grote compressor fabrikant, wordt 12% van het totaal industrieel energieverbruik besteed aan het produceren van perslucht [1]. Het is dus niet onbelangrijk om de verliezen die hierbij komen kijken te beschouwen. De efficiëntie van een compressor hangt van veel factoren af. Een aantal van deze factoren zijn: de werkdruk, het type compressor, het vermogen van de compressor, of deze op vollast werkt of niet, de luchtkwaliteit. Indien de perslucht vraag fluctueert zal dit ook een rol spelen in de efficiëntie van de compressor. Buiten de compressor zijn er drukvallen in de leidingen, lekverliezen in de koppelingen, druk- en

luchtverliezen door de luchtbehandeling en verliezen in de actuator [14]. Door de vele parameters is het moeilijk om het rendement van de compressor te bepalen. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Figuur 5 toont de efficiëntie van de verschillende soorten compressoren in functie van het vermogen.



Figuur 5: Compressor rendement in functie van het compressor vermogen per compressortype [14]

Indien alle factoren in rekening worden gebracht, wordt een totaal rendement van 2% tot 20% bekomen [14, p. 9]. Een andere bron meldt 3% tot 5% [15]. Het exact bepalen van het rendement van een systeem is enkel mogelijk indien dit systeem volledig opgemeten en geanalyseerd wordt. Festo, één van de grote spelers in de pneumatiek, biedt zulke analyses aan [16]. Een andere optie is een rendementsmeter installeren.

Met de huidige energieprijzen is het van economisch belang om zo weinig mogelijk luchtverspilling te hebben. Om de luchtkosten te bepalen wordt er gerekend met een prijs per nm^3 die ook afhangt van de prijs per kilowattuur (kWh). Een aantal jaar geleden toen de energieprijzen 0,07€/kWh bedroeg, rekende Festo met een luchtprijs van 0,012 – 0,013€/nm³. Tegenwoordig is de energieprijzen al snel 0,13 – 0,2€/kWh wat resulteert in een luchtprijs van 0,016 – 0,037€/nm³ [17]. Andere bronnen zoals “Thomson linear” en “EA technical services” melden een luchtprijs van respectievelijk 0,028 €/nm³ en 0,025€/nm³ [18], [19]. Dit resulteert in een gemiddelde luchtprijs van 0,027€/nm³

2.3.1 Drukverliezen

Een eerste energieverlies wordt vermeden door de drukvereisten te onderzoeken. Het compressor vermogen stijgt naargelang de uitgangsdruk stijgt [20, p. 3,7]. Wanneer de

pneumatische aandrijvingen correct kunnen functioneren op een lagere druk is het voordelig om de uitgangsdruk van de compressor te verlagen.

Een tweede factor is het correct dimensioneren van de verschillende soorten luchtfilters en drogers. Fabrikanten zijn snel geneigd om kleinere goedkopere filters/drogers te installeren voor hun systeem, maar hierdoor gaat er een grotere drukval ontstaan over de filters/drogers. Om de drukval te compenseren moet de uitgangsdruk van de compressor verhoogd worden wat weer tot onnodige energieverliezen leidt [21]. Een drukvalverlaging van 1 bar over drogers/filters resulteert in een energiebesparing van 6% [17].

Een derde potentiële verliesfactor is het leidingennetwerk. In de leidingen wrijft de lucht met de wanden en botst de lucht in de bochten waardoor drukverliezen ontstaan. Ook plotse overgangen in leidingdiameter veroorzaken drukvallen [22]. Beeld een lange tuinslang met versmallingen en bochten in, op het uiteinde zal de tuinslang een beduidend lagere druk hebben dan aan de kraan. Indien het persluchtleidingennetwerk niet correct gedimensioneerd is zal hier ook een onnodig grote drukval over kunnen ontstaan, wat resulteert in een hoger energieverbruik van de compressor.

Een dubbelwerkende pneumatische cilinder kan in twee richtingen bekrachtigd worden. Vaak wordt voor beide richtingen eenzelfde druk gebruik om de actuator aan te sturen, maar dit is niet altijd nodig. Een voorbeeld is een klemfunctie; om een voorwerp te klemmen is een hoge kracht en dus een hoge druk nodig, maar om het voorwerp los te laten kan een lagere druk gebruikt worden. Zo verbruikt de klemcilinder minder lucht. Een pneumatische actuator bedienen op een onnodig hoge druk kan dus gezien worden als een verlies. Hetzelfde geldt voor een dubbelwerkende cilinder die eigenlijk ook als enkelwerkend kan worden uitgevoerd.

2.3.2 Lekverliezen

Pneumatische lekverliezen zijn iets waar de gemiddelde werknemer geen oog voor heeft, het is dus goed om mensen te sensibiliseren over de gevolgen van pneumatische verliezen. Als er in een bedrijf een water of gaslek was, zou dit direct opgelost worden, maar omdat perslucht geen geur en kleur heeft men vaak geen oog voor zulke verliezen. Gemiddeld gaat tussen 5% en 35% van perslucht verloren door lekkages. 70% van deze lekkages ontstaan door connectoren of leidingen die niet correct aangesloten zijn [17]. Ook andere pneumatische componenten zoals actuatoren, magneetventielen en filters moeten gecontroleerd worden op slijtage om lekkages te voorkomen.

Een lek van 1 mm^2 , vergelijkbaar met de punt van een fijne balpen, met een druk van 6 bar resulteert in een luchtverspilling van 55 nL/min . Dit vertaalt zich in een verlies van 780€ per jaar (met een luchtprijs van $0,027\text{ €/m}^3$). Lekkages zijn dus kleine foutjes die al snel een invloed

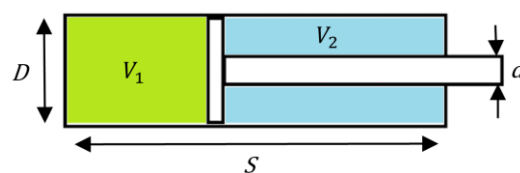
kunnen hebben. Ter referentie verbruikt een gemiddeld blaaspistool 432 nl/min (6 bar) en een pneumatische slagmoersleutel al snel gemiddeld 576 nL/min (6 bar) (gewoonlijk niet continu).

2.4 Berekening luchtverbruik

Een belangrijke factor in het bepalen van de operatiekosten van een pneumatisch ingerichte machine is het luchtverbruik. Een pneumatische machine bevat gewoonlijk uit een of meerdere pneumatische actuatoren. De cilinderkamer van de actuator wordt gevuld met perslucht waardoor de actuator arbeid kan uitoefenen, maar ook lucht verbruikt. Hoeveel deze actuator verbruikt, wordt berekend aan de hand van een aantal factoren: slaglengte, werkdruk, cilinderboringdiameter, zuigerstangdiameter, leidinglengte en leidingdiameter. Een eerste stap is het berekenen van het inwendige cilindervolume. Daarna wordt dit volume omgerekend naar een normaalvolume. Ten slotte wordt het verbruik voor een hele machine gesommeerd.

2.4.1 Lineaire pneumatische actuator

Het luchtverbruik van een lineaire pneumatische cilinder wordt berekend door verschillende gebruikte kamer- en luchtleidingvolumes in een bepaalde machinecyclus te sommeren. Een eerste stap is dus de inwendige volumes van beide cilinderkamers te bepalen. Als voorbeeld wordt het verbruik van een eenvoudige, dubbelwerkende pneumatische zuigerstangcilinder (CDU16 – 25D) (zie Bijlage A) in een realistische situatie berekend [23, p. 15]. Deze cilinder dient als een klemcilinder en voert 10 ingaande en 10 uitgaande bewegingen uit in één machinecyclus van 158 seconden. De twee luchtleidingen, die de cilinder aansluiten, hebben een binnendiameter van 2,5 mm en zijn 1350 mm lang. De positieve en negatieve cilinderslag duren beiden 0,5 seconden. Figuur 6 toont de nodige afmetingen voor de berekening van de cilindervolumes.



Figuur 6: Voorstelling cilinderafmetingen

Berekening	Voorbeeld
$V = \text{kamervolume (L)}$ $D = \text{boringdiameter (mm)}$ $d = \text{diameter zuigerstang (mm)}$ $S = \text{slaglengte (mm)}$	Gegeven : - Model: CDU16 – 25D $D = 16 \text{ mm}$ $d = 6 \text{ mm}$ $S = 25 \text{ mm}$
uitgaande positieve slag: $V_+ = \frac{\frac{D^2}{4} * \pi * S}{10^6}$ (1) ingaaande negatieve slag: $V_- = \frac{\frac{D^2 - d^2}{4} * \pi * S}{10^6}$ (2)	uitgaande positieve slag: $V_+ = \frac{\frac{16^2}{4} * \pi * 25}{10^6} = 0,0050 \text{ L}$ ingaaande negatieve slag: $V_- = \frac{\frac{16^2 - 6^2}{4} * \pi * 25}{10^6} = 0,0043 \text{ L}$

Ook de leidingen, die de cilinder van lucht voorzien worden, gevuld met lucht en zullen dus ook bij het totaal verbruikte luchtvolume gerekend worden. Het leidingvolume wordt voor de 2 cilinderkamers apart berekend aangezien de leidinglengtes anders kunnen zijn.

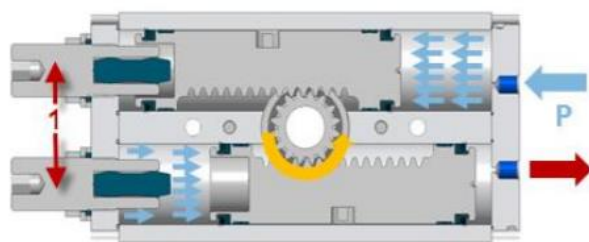
Luchtleidingsystemen kunnen ingewikkeld zijn. Er moet voor elke cilinderbeweging beredeneerd worden welke leidingvolumes verbruikt worden. In dit voorbeeld zijn de twee leidinglengtes gelijk aan elkaar. In deze masterproef worden leidingparameters aangeduid met het subscript 'L'

Berekening	Voorbeeld
$V_L = \text{Leidingvolume}(L)$ $d_L = \text{binnendiameter leiding}(mm)$ $L_L = \text{Leidinglengte}(mm)$	Gegeven: - Leidingtype: SMC – TAU 0425 $d_L = 2,5mm$ $L_L = mm$
<i>Leidingvolume positieve kamer:</i> $V_{L+} = \frac{\frac{d_L^2}{4} * \pi * L_L}{10^6} \quad (3)$ <i>Leidingvolume negatieve kamer:</i> $V_{L-} = \frac{\frac{d_L^2}{4} * \pi * L_L}{10^6} \quad (4)$	<i>Leidingvolume positieve kamer:</i> $V_{L+} = \frac{\frac{6^2}{4} * \pi * 1350}{10^6} = 0,0066 L$ <i>Leidingvolume negatieve kamer:</i> $V_{L-} = \frac{\frac{6^2}{4} * \pi * 1350}{10^6} = 0,0066 L$

2.5 Pneumatische draai-actuator

2.5.1 Draaicilinder met tandwieloverbrenging

Een eerste soort draai-actuator is een draaicilinder met tandwieloverbrenging (zie Figuur 7). Een lineaire pneumatische cilinder wordt via tandheugel en tandwiel gekoppeld aan een as. Via dit mechanisme wordt een lineaire beweging omgezet in een draaibeweging. Er wordt telkens maar één van de 2 cilinderkamers gevuld. Zo kan de actuator in klokwijszin (positieve kamervulling) en tegenklokwijszin (negatieve kamervulling) draaien.



Figuur 7: Interne werking van een draaicilinder met tandwieloverbrenging [24, p. 12]

Aangezien de interne afmetingen van zulke draaicilinders vaak niet gegeven zijn kan het luchtverbruik niet berekend worden zoals een lineaire cilinder. Indien er geen interne afmetingen of volumes gegeven zijn op de datasheet kan men de producent van de draaicilinder contacteren en hier naar vragen. Indien de producent deze niet wilt vrijgeven kan een benaderend luchtvolume berekend worden met andere gegevens die gewoonlijk wel gekend zijn via onderstaande berekeningen

Het draaimoment M (Nm) wordt berekend aan de hand van de kracht F (N) van de zuiger (op een bepaalde druk p (bar)) en de straal r (m) waarop de kracht ingrijpt. De straal r is niet gekend.

$$M = F * r \quad (5)$$

$M = moment$ (Nm)

$F = kracht$ (N)

$r = momentstraal$ (m)

De zuiger oefent een kracht F uit aan de hand van een zuigeroppervlakte A en een werkdruk p .

$$A = \frac{F}{p * 10^5} \quad (6)$$

$A = piston\ oppervlakte$ (m^2)

$p = werkdruk$ (bar)

$10^5 = bar \rightarrow Pa$

Om een rotatiehoek te realiseren grijpt de kracht in over een afstand gelijk aan de omtrek van deze cirkelboog met straal r . De lengte van deze cirkelboog is even lang als de slaglengte van de zuiger.

$$S = \alpha * r \quad (7)$$

$S = slag$ (m)

$\alpha = rotatiehoek$ (rad)

Het volume van één cilinderkamer wordt berekend als volgt:

$$V = S * A$$

(8)

$$V = volume (m^3)$$

Bovenstaande formules (5),(6),(7) en (8) worden gesubstitueerd waardoor de ongekende straal r weg valt en de volgende formule bekomen wordt:

$$V_{+/-} = \frac{M * \alpha * 10^3}{p * 10^5}$$

(9)

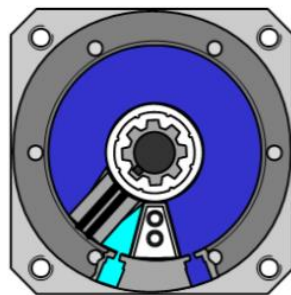
Voor deze masterproef waren de interne afmetingen van de draaicilinder “*Festo – DRRD – 40 – 180 – FH – Y14A*” niet gegeven. Door contact op te nemen met Festo zijn deze interne afmetingen toch bekend en kan de benadering met de werkelijkheid vergeleken worden [25]. De datasheet van deze actuator vermeldt een draaimoment van $24,1Nm$ met een druk van $6bar$ [26].

Benadering	Werkelijkheid
Gegeven: • $M = 24,1Nm$ • $p = 6bar$	Gegeven: • $D = 40 mm$ • $S = 90,7 mm$
Kamervolume draaicilinder (vergelijking (9)): $V_{+/-} = \frac{M * \alpha}{p * 10^5}$ $V_{+/-} = \frac{24,1 * \pi}{6 * 10^5} = 0,000126m^3$ $V_{+/-} = 0,000126m^3 = 0,126L$	Kamervolume draaicilinder (vergelijking (1)(8)): $V_{+/-} = \frac{\frac{D^2}{4} * \pi * S}{10^6}$ $V_{+/-} = \frac{\frac{40^2}{4} * \pi * 90,7}{10^6} = 0,114L$

De benadering geeft een volume van 10% meer dan het werkelijke volume. Hierna kan het normaalvolume berekend worden, gelijkaardig aan de lineaire actuator via formule (10).

2.5.2 Draaivleugelcilinders

Een tweede type draai-actuator is een draaivleugelcilinders (zie Figuur 8) Bij dit type zwaai-aandrijvingen werkt de perslucht in op een draaivleugel die een rotatiebeweging tot stand brengt. De draaihoek is vaak beperkt tot 270° . Via een mechanisch instelbare aanslag kan de draaihoek gelimiteerd worden. Dit soort aandrijving heeft een kleine inbouwmaat, maar het draaimoment is beperkt tot circa 20 Nm [24, p. 12]. Het verbruik van dit soort cilinders kan niet berekend worden zonder alle interne afmetingen te kennen. Het verbruik is gewoonlijk gegeven.



Figuur 8: De draaivleugelcilinder [12, p. 12]

2.5.3 Invloed werkdruk

Aangezien de pneumatische actuator werkt op een verhoogde druk dienen de cilinder- en leidingvolumes omgerekend te worden naar normaalvolumes om de correcte hoeveelheid verbruikte lucht te bekomen.

Er is een verschil tussen het cilinder- en het leidingnormaalvolume; wanneer een cilinderkamer bij de uitgaande slag bijvoorbeeld gevuld wordt met 6 bar perslucht (7 bar absolute druk) wilt dit zeggen dat er 7 normaalvolumes aanwezig zijn in deze cilinderkamer. Wanneer deze lucht er bij de ingaande slag terug volledig uitgedreven wordt, zijn er dus 7 normaalvolumes verbruikt. Dit is in tegenstelling tot een luchtleiding. Een luchtleiding die gevuld wordt met perslucht op 6 bar (7 bar absolute druk) en daarna ontlucht wordt aan de atmosfeer zal nog steeds 1 normaalvolume op 1 bar (atmosfeerdruk) vasthouden. Indien alle 7 normaalvolumes lucht uit de leiding “verbruikt” worden zou de leiding vacuüm zijn en dit is niet het geval. Het voorbeeld gaat nog steeds verder op de lineaire cilinder “(CDU16 – 25D)”

Berekening	Voorbeeld
$V_n = \text{normaalvolume (nL)}$ $p = \text{werkdruk (relatieve druk) (bar)}$ $1 = \text{atmosferische druk (ca. 1 bar)}$	Gegeven: $V_+ = 0,0050 \text{ L}$ $V_- = 0,0043 \text{ L}$ $V_{L+} = 0,0066 \text{ L}$ $V_{L-} = 0,0066 \text{ L}$ $p_+ = 6 \text{ bar}$ $p_- = 6 \text{ bar}$
<i>Cilinderkamer normaalvolumes:</i> $V_n = V_{+/-} * (p_{+/-} + 1) \quad (10)$ <i>Leiding normaalvolumes:</i> $V_{Ln+/-} = V_{L+/-} * p_{+/-} \quad (11)$	<i>Cilinderkamer positief normaalvolumes:</i> $V_{n+} = 0,0050 * (6 + 1) = 0,0352 \text{ nL}$ <i>Cilinderkamer negatief normaalvolumes:</i> $V_{n-} = 0,0043 * (6 + 1) = 0,0302 \text{ nL}$ <i>Leiding positief normaalvolume:</i> $V_{Ln+} = 0,0066 * 6 = 0,0398 \text{ nL}$ <i>Leiding negatief normaalvolume:</i> $V_{Ln-} = 0,0066 * 6 = 0,0398 \text{ nL}$

2.5.4 Totale machine

Om het verbruik van een cilinder tijdens een machinecyclus te bepalen wordt er geteld hoe vaak elke cilinderkamer gevuld wordt binnen die machinecyclus. Alle cilinderkamervolumes worden gesommeerd om het uiteindelijk luchtverbruik van die machinecyclus te bekomen. Een gebruikelijkere eenheid om het luchtverbruik mee weer te geven is normenliter per minuut in plaats van normenliter per cyclus. Om dit om te rekenen dient de machinecyclustijd gekend te zijn.

Berekening	Voorbeeld
$\#V/\text{cyclus} = \text{aantal kamervullingen per cyclus}$ $V_n/\text{cyclus} = \text{Normaalvolumes per cyclus (nL)}$ $V_n/\text{min} = \text{Normaalvolumes per minuut}$ $\text{machinecyclustijd} = \text{de tijd nodig om 1 machinecyclus te voltooien (sec)}$	Gegeven: $V_{n+} = 0,0352 \text{ nL}$ $V_{n-} = 0,0302 \text{ nL}$ $V_{Ln+} = 0,0398 \text{ nL}$ $V_{Ln-} = 0,0398 \text{ nL}$ $\#V_+/\text{cyclus} = 10$ $\#V_-/\text{cyclus} = 10$ $\text{machinecyclustijd} = 158 \text{ sec}$
Totaal luchtverbruik per machinecyclus: $V_n/\text{cyclus} = (V_{n+} + V_{Ln+}) * \#V_+/\text{cyclus} + (V_{n-} + V_{Ln-}) * \#V_-/\text{cyclus} \quad (12)$ $V_n/\text{min} = \frac{V_n/\text{cyclus}}{\text{machinecyclustijd}} * 60 \quad (13)$	Totaal luchtverbruik per machinecyclus: $V_n/\text{cyclus} = (0,0352 + 0,0398) * 10 + (0,0302 + 0,0398) * 10 = 1,4495 \text{ nL}$ $V_n/\text{min} = \frac{1,4495}{158} * 60 = 0,5504 \text{ nL}$

Het theoretisch luchtverbruik per minuut van één enkele lineaire pneumatische actuator is nu bekend. In dit voorbeeld is het luchtverbruik laag,. Dit komt omdat de relatief kleine cilinder maar 10 keer op 158 seconden moest bewegen. De grote luchtverbuikers gaan de cilinders zijn die op hoge frequentie moeten bewegen.

Een pneumatische machine heeft altijd één of meerder pneumatische actuatoren. Om het luchtverbruik van een volledige machine te bepalen moet het verbruik van elke actuator berekend en gesommeerd worden.

2.6 Kostenbepaling luchtverbruik

Het luchtverbruik van een machine is nu gekend, maar hoeveel kost dit nu voor een bedrijf? In dit segment wordt getoond hoe een luchtverbruik omgerekend kan worden naar een actuatorvermogen en vervolgens naar een prijs per jaar aan de hand van een voorbeeld.

2.6.1 Vermogensbepaling

Eerst wordt de arbeid berekend die uitgeoefend wordt door elke positieve en negatieve cilinderslag. Arbeid is een kracht vermenigvuldigd met een verplaatsing of een druk vermenigvuldigd met een volumeverschil [27]. Het voorbeeld dat gehanteerd wordt is hetzelfde als in paragraaf 2.4.1 (CDU16 – 25D)

Berekening	Voorbeeld
<i>W = arbeid uitgeoefend door 1 cilinderslag (J)</i> <i>p = werkdruk (relatieve druk) (bar)</i> <i>V = kamervolume (L)</i> <i>10^5 = bar naar pascal</i> <i>1000 = Liter naar m^3</i>	Gegeven : $V_+ = 0,0050 \text{ L}$ $V_- = 0,0043 \text{ L}$ $V_{L+} = 0,0066 \text{ L}$ $V_{L-} = 0,0066 \text{ L}$ $p_+ = 6 \text{ bar}$ $p_- = 6 \text{ bar}$
<i>Arbeid cilinderslag:</i> $W_{+/-} = P_{+/-} * 10^5 * \left(\frac{V_{+/-}}{1000}\right) \quad (14)$	<i>Uitgaande positieve slag:</i> $W_+ = 6 * 10^5 * \left(\frac{0,0050}{1000}\right) = 3,0 \text{ J}$ $W_{L+} = 6 * 10^5 * \left(\frac{0,0066}{1000}\right) = 4,0 \text{ J}$ <i>ingående negatieve slag:</i> $W_- = 6 * 10^5 * \left(\frac{0,0043}{1000}\right) = 2,6 \text{ J}$ $W_{L-} = 6 * 10^5 * \left(\frac{0,0066}{1000}\right) = 4,0 \text{ J}$

Nu de arbeid per cilinderslag gekend is, wordt het vermogen berekend door de arbeid te delen door de slagtijd. Dit vermogen is nodig om later een geschikte elektrische variant te zoeken.

Berekening	Voorbeeld
<i>W = arbeid uitgeoefend door 1 cilinderslag (J)</i> <i>P = vermogen van een cilinderslag (Watt)</i> <i>slagtijd = de tijd nodig om 1 cilinderslag uit te voeren (sec)</i> <i>10⁵ = bar naar pascal</i> <i>1000 = Liter naar m³</i>	Gegeven : • $W_+ = 3,0 \text{ J}$ • $W_- = 2,6 \text{ J}$ • $W_{L+} = 4,0 \text{ J}$ • $W_{L-} = 4,0 \text{ J}$ • $\text{slagtijd}_+ = 0,5 \text{ sec}$ • $\text{slagtijd}_- = 0,5 \text{ sec}$
<i>Arbeid cilinderslag:</i> $P_{+/-} = \frac{W_{+/-}}{\text{slagtijd}_{+/-}} \quad (15)$	<i>Uitgaande positieve slag:</i> $P_+ = \frac{3,0}{0,5} = 6 \text{ Watt}$ $P_{L+} = \frac{4,0}{0,5} = 8 \text{ Watt}$ <i>Ingaande negatieve slag:</i> $P_- = \frac{2,6}{0,5} = 5,2 \text{ Watt}$ $P_{L-} = \frac{4,0}{0,5} = 8 \text{ Watt}$

2.6.2 Kostenbepaling

De jaarlijkse kostenbepaling kan op twee manieren gebeuren. Enerzijds via de luchtprijs en anderzijds via het actuatorvermogen. Daarnaast wordt er ook nog rekening gehouden met de kosten van een pneumatisch compressorsysteem. Om het voorbeeld door te trekken wordt verondersteld dat de machine continu doorloopt een heel jaar lang.

Op basis van de luchtprijs

Zoals vermeld in paragraaf 2.3 zijn er bedrijven die een volledig pneumatisch systeem kunnen analyseren en zo bepalen hoeveel 1 nm³ lucht gemiddeld zal kosten voor het bedrijf. Indien een bedrijf dit bedrag weet, kan een totaalkost per actuator per jaar berekend worden.

Berekening	Voorbeeld
V_n/min = Normaalvolumes per minuut (nL) #werkuren/jaar = het aantal uren dat de machine operationeel is per jaar (uur) luchtprijs = de prijs per normaalvolume lucht (€/nm³) kost per jaar (luchtprijs) = de kost per jaar om de cilinder operationeel te houden gebaseerd op de luchtprijs (€).	Gegeven: $V_n/min = 0,5504 \text{ nL}$ #werkuren/jaar = 8736 uur - luchtprijs = 0,027 €/nm³
Luchtkosten per jaar: kost per jaar (luchtprijs) $= \left(\frac{V_n/min}{1000} \right) * 60$ * #werkuren/jaar * luchtprijs (16)	Luchtkosten per jaar: kost per jaar (luchtprijs) $= \left(\frac{0,5504}{1000} \right) * 60 * 8736$ * 0,015 = 7,79 €

Op basis van het actuatorvermogen

Een tweede methode vertrekt vanuit het actuatorvermogen. De geleverde arbeid per slag wordt gesommeerd en omgerekend naar een totale arbeid per cyclus. In het voorbeeld bewegen de actuatoren niet constant, maar 10 seconden van de 158 seconden. Verder in deze masterproef wordt gebruik gemaakt van een functie die de kostprijs bepaalt op basis van een netvermogen. Deze functie rekt met een constant vermogenafname. Daarom wordt er een gemiddeld cyclusvermogen berekend. Rekening houdend het systeemrendement kan dit gemiddeld cyclusvermogen omgerekend worden naar een netvermogen. Zoals vermeld in paragraaf 2.3 ligt het rendement van een pneumatische installatie tussen 2 en 20%. Voor dit voorbeeld is een gemiddeld rendement van 11% gekozen.

Berekening	Voorbeeld
W/cyclus = verrichte actuatorarbeid in 1 machinecyclus (J) machinecyclustijd = de tijd nodig om 1 beschouwde machinecyclus te voltooien (sec)	Gegeven: • $W_+ = 3,0 \text{ J}$ • $W_- = 2,6 \text{ J}$ • $W_{L+} = 4,0 \text{ J}$ • $W_{L-} = 4,0 \text{ J}$ • $\#V_+/\text{cyclus} = 10$ • $\#V_-/\text{cyclus} = 10$ • $\text{machinecyclustijd} = 158 \text{ sec}$ • $\eta_{\text{instelling}} = 0,11$
Totale actuatorarbeid per machinecyclus: $W/\text{cyclus} = (W_+ + W_{L+}) * \#V_+/\text{cyclus} + (W_- + W_{L-}) * \#V_-/\text{cyclus}$ (17) Gemiddeld vermogen voor een cyclus: $P_{\text{gem}} = \left(\frac{W/\text{cyclus}}{\text{machinecyclustijd}} \right)$ (18) Netvermogen: $P_{\text{net}} = \frac{P_{\text{gem}}}{\eta_{\text{instelling}}}$ (19)	Totale actuatorarbeid per machinecyclus: $W/\text{cyclus} = (3,0 + 4,0) * 10 + (2,6 + 4,0) * 10 = 136 \text{ J}$ Gemiddeld vermogen voor een cyclus: $P_{\text{gem}} = \left(\frac{136}{158} \right) = 0,9 \text{ Watt}$ Netvermogen: $P_{\text{net}} = \frac{0,9}{0,11} = 7,8 \text{ Watt}$

Een laatste stap is het netvermogen omrekenen tot een jaarlijkse kost. De vereenvoudigde berekening is het netvermogen vermenigvuldigen met de tijd dat de machine operationeel is per jaar om zo een aantal megawattuur te bekomen. Deze hoeveelheid megawattuur wordt vermenigvuldigd met de huidige prijs per megawattuur (energieprijs). Helaas blijkt het niet zo eenvoudig. Er is een verschillende energieprijs voor dag en nacht, de energieprijs varieert continu en er zijn extra bijkomende kosten die variëren per regio en per energieleverancier. Het basisprincipe van de berekening blijft hetzelfde, er zijn enkel meer elementen in de eindrekening.

Een belangrijk verschil zijn de dag en nachturen, ook wel piek en daluren genoemd. Er zijn 15 piekuren per dag (tussen 7u en 22u of tussen 6u en 21u) en er zijn 7 daluren per dag (tussen 22u en 7u of tussen 21u en 6u) [28]. Voor beide piek en daluren is een ander energietarief en deze moeten dus opgedeeld worden.

Onderstaande Figuur 9 toont een voorbeeld van een energierekening met realistische energieprijzen en extra kosten. De eerste kolom beschrijft de categorie van de verschillende kosten. De tweede kolom toont de verbruikte hoeveelheid *MWh*. In de derde kolom staat het

energietarief in €/MWh voor de verschillende categorieën. De vierde kolom is het product van kolom twee en drie. Alle berekende producten van kolom vier worden opgeteld tot een prijs per jaar. In dit geval is dit 182,05€. De waarde die relevant is voor deze masterproef is de “Totale variabele kost (zonder vaste vergoedingen)”. Vaste kosten zoals de “Vaste vergoeding” en de “Bijdrage energiefonds” staan niet in functie van het verbruikte vermogen; een bedrijf betaalt deze ongeacht het energieverbruik. De kost per jaar, nodig om de actuator operationeel te houden, is 9,48€.

	Aantal eenheden (MWh)	Eenheidsprijs (EUR/MWh)	Bedragen
Vaste vergoeding			8,75
Verbruik piekuren	0,0425990	64,61	2,75
Verbruik daluren	0,0255594	41,08	1,05
Bijdrage hernieuwbare energie	0,0681584	20,855	1,42
Bijdrage warmtekrachtkoppeling	0,0681584	3,36	0,23
Totaal energie			14,20
Distributiekosten	0,0681584	9,7298	0,66
Transmissiekosten	0,0681584	13,5757	0,93
Totaal netkosten			1,59
Bijzondere accijns	0,0681584	11,615184	0,79
Totaal federale bijdrage			0,79
Bijdrage Energiefonds (vaste bijdrage)			161,98
Totaal regionale bijdrage			161,98
Totale kost incl. Btw (21%)			20,07
Totale kost incl. Btw (21%) en regionale bijdrage			182,05
Totale variabele kost (zonder vaste vergoedingen)			9,48
	VOORBEELD	INVOER CELLEN	

Figuur 9: Voorbeeld energierekening

De energiekosten zijn op twee manieren berekend, Enerzijds via de luchtprijs en anderzijds via het installatierendement. Een andere belangrijke kost van een pneumatische installatie is het compressorsysteem en het onderhoud ervan. Deze extra kosten kunnen als een percentage van de totaalkost beschouwd worden, verschillende bronnen bieden verschillende percentages. Voor eenvoud wordt een gemiddelde genomen van volgende percentages [1], [2, p. 2], [29], [30, p. 26].

Bron	Percentage installatie- en onderhoudskosten
Atlas Copco:	30%
Silvent:	30%
U.S. Department of energy:	24%
Festo:	21%
Gemiddelde:	26,25%

Vertrekkende van de energiekosten en het percentage installatie- en onderhoudskosten wordt de totaal kost als volgt berekend:

$$kost\ per\ jaar\ inclustief\ installatie = \frac{energiekost\ per\ jaar}{(1 - installatie\ en\ onderhoudskosten\%)}$$

(20)

Voorbeeld

Gegeven:

- $kost\ per\ jaar\ (luchtprijs) = 7,79\text{€}$
- $kost\ per\ jaar\ (\eta_{installatie}) = 9,48\text{€}$
- $installatie - en\ onderhoudskosten\% = 26,5\%$

Kost per jaar inclusief installatie- en onderhoudskosten:

$$kost\ per\ jaar\ incl.\ installatie\ (luchtprijs) = \frac{7,79}{(1 - 26,5)} = 10,65\ \text{€}$$

$$kost\ per\ jaar\ incl.\ installatie\ (\eta_{installatie}) = \frac{9,48}{(1 - 26,5)} = 12,85\ \text{€}$$

Dit is zeer goedkoop om deze actuator een heel jaar functioneel te houden maar weet dat de actuator in het voorbeeld ook maar een gemiddeld vermogen van 7,8 Watt had. Een pneumatische machine heeft vaak ook meerdere pneumatische actuatoren die allemaal bijdragen aan de totaalprijs.

3 Analyse elektrische aandrijving

In dit hoofdstuk wordt besproken welke soorten energieverliezen er in een elektrische actuator aanwezig zijn, hoe deze aangestuurd worden, wat de vereisten zijn voor een elektrische variant en welke mogelijkheden er beschikbaar zijn.

3.1 Inleiding tot elektrische aandrijving

Elektrische actuatoren worden steeds meer en meer toegepast in de industrie en om goede redenen. Elektrische actuatoren worden aangedreven met elektromotoren en zijn zeer efficiënt indien correct gebruikt. In 2019 heeft de Europese Unie besloten dat motoren met een vermogen tussen 0,12 kW en 0,75 kW moeten voldoen aan een IE2 energie efficiëntie klasse. De elektrische actuator wordt bekrachtigd door een *motordriver*. Een *motordriver* levert en controleert de nodige stromen en spanningen zodat de nodige snelheden en koppels bereikt kunnen worden. Sinds 7 juli 2021 dienen alle *motordrivers* met een vermogen tussen 0,12kW en 1000kW ook aan de IE2 energieklasse te voldoen [31]. Deze IE2 energie klasse beschrijft de efficiëntie van een type motor of *motordrivers* met een bepaald vermogen (zie Tabel 1).

Tabel 1: Minimum efficiëntie η voor IE2 efficiëntieniveau (%) [32, p. 10]

Rated output power P_N [kW]	Number of poles			
	2	4	6	8
0,12	53,6	59,1	50,6	39,8
0,18	60,4	64,7	56,6	45,9
0,20	61,9	65,9	58,2	47,4
0,25	64,8	68,5	61,6	50,6
0,37	69,5	72,7	67,6	56,1
0,40	70,4	73,5	68,8	57,2
0,55	74,1	77,1	73,1	61,7
0,75	77,4	79,6	75,9	66,2

De minimum vereiste efficiëntie van een elektrische aandrijving ligt hoger dan de efficiëntie van een pneumatisch systeem (zie paragraaf 2.3). Elektrische aandrijvingen kunnen hoogefficiënt worden uitgevoerd waardoor het interessant is om pneumatische aandrijvingen mogelijks te vervangen door elektrische aandrijvingen.

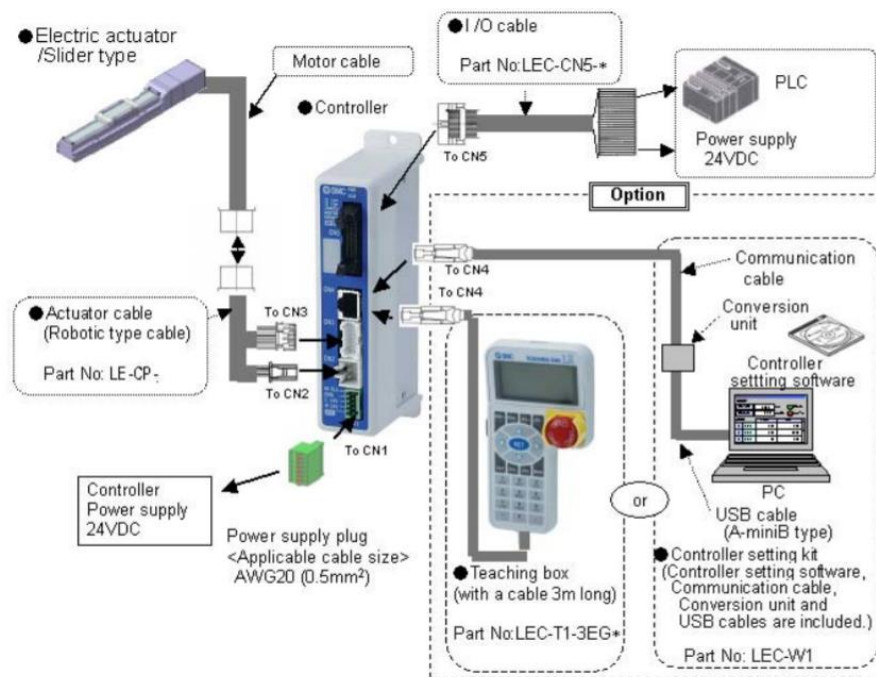
3.2 Werking elektrische actuator

Elektrische aandrijvingen vormen elektrische energie om tot mechanische arbeid waardoor machineonderdelen in beweging gebracht kunnen worden [33]. Een elektrische aandrijving bevat stroomgeleidende spoelen die magnetische velden opwekken, deze magnetische velden werken elkaar tegen en kunnen zo een beweging veroorzaken en dus arbeid leveren. Bespreking verlies factoren

3.2.1 Aansturing

Een elektrische actuator kan nauwkeurig bestuurd worden met een motorbesturing. De motorbesturing bestaat uit meerdere delen: een microprocessor, een *motorcontroller* en een *motordriver*. De microprocessor stuurt laagspanningscommando's naar de *motorcontroller*. De *motorcontroller* verwerkt deze commando's naar PWM (*Pulse Width Modulation*) signalen, die in de *motordriver* versterkt worden om uiteindelijk de motor aan te drijven [34]. Een eerste functie van de motorbesturing is het beheersen van het bewegingsprofiel van de actuator zodat een vloeiende beweging uitgevoerd wordt. Een tweede functie is het bepalen en instellen van de positie van de actuator. Tenslotte moet de actuator in sommige gevallen ook een krachtuitlezing kunnen doen.

De motorbesturing stuurt de motor aan met een variabel PWM signaal om zo de snelheid te regelen van de actuator [35]. De motorbesturing kan elektrische eigenschappen van de motor meten zoals statorstroom en spanning waaruit de snelheid en het koppel afgeleid kan worden. Een motorbesturing kan al geïntegreerd zijn in de actuator, maar kan ook een aparte eenheid zijn. Een voorbeeld van een alleenstaande motorbesturing met onderdelen is te zien in Figuur 10.



Figuur 10: Voorbeeld motorbesturing en onderdelen [36, p. 2]

3.2.2 Bewegingsprofiel

In deze paragraaf wordt besproken hoe een elektrische actuator aangestuurd dient te worden om een correct bewegingsprofiel te bekomen en wat de gevolgen zijn van een incorrect bewegingsprofiel. Niet alle soorten actuatoren hebben een instelbaar bewegingsprofiel. Solenoïdes en klem modules hebben maar twee werkingsmodi, bekrachtigd of onbekrachtigd. Alle andere actuatoren waarbij een motor en een motormotorbesturing gebruikt wordt, hebben een instelbaar bewegingsprofiel en dus niet simpelweg “aan of uit”.

Het bewegingsprofiel beschrijft de positie, snelheid, versnelling en de ruk van een actuator in functie van de tijd. Deze vier elementen moeten gecontroleerd worden zodat geen van de vier oneindig groot wordt en schade kan berokkenen aan het mechanisme. Indien het positie-, snelheids- of versnellingsprofiel sprongen vertoont, zullen er door de plotse veranderingen in de motor grote stroomveranderingen optreden. Door dit stotend gedrag zal het mechanisme ook sneller slijten. Wanneer versnellingen te hoog oplopen kan de actuator voorbij de ingestelde positie schieten en terug proberen te corrigeren. Dit resulteert ook weer in schokken. De snelheid, versnelling en ruk zijn respectievelijk 1^e, 2^e en 3^e afgeleide van de positie. Om bovenstaande effecten te vermijden dienen de 1^e en 2^e afgeleide geen “sprongen” te hebben in het functieverloop. De 1^e, 2^e en 3^e afgeleide mogen dus nergens oneindig worden. De 3^e afgeleide, of de ruk, mag wel sprongen vertonen aangezien dit geen groot gevolg zou hebben voor de rest van de actuator [37] [38]. Een profiel wat in de industrie veel gebruikt wordt

en voldoet aan de bovenstaande voorwaarden is de S-curve. Met de S-curve komt de actuator 25% sneller tot een stabiele eindpositie dan met een andere curve die niet aan de continuïteitsvoorwaarden voldoet (zoals de trapezoïde curve) [39]. Figuur 11 toont het effect van een S-curve besturing op het snelheid en versnellingsprofiel. Het S-curve profiel is vloeiender en zonder sprongen.



Figuur 11: Invloed van een S-curve besturing [39]

3.2.3 Positiebepaling

Positiebepaling van de actuator gebeurt met verschillende soorten sensoren (hall-sensoren, potentiometers, reed-sensoren, optische sensoren) waarmee een “closed loop feedback” gerealiseerd wordt [40]. Een actuator kan ook geen positie sensoren hebben en gebruikmaken van een “open loop feedback” systeem. Een closed loop feedback systeem zal de werkelijke positie van de actuator uitlezen en dit signaal gebruiken in het aansturen. Een open loop feedback systeem telt enkel het aantal signalen dat naar de motor is gestuurd en kan dus de positie voorspellen, maar weet geen fysieke positie van de actuator. Wanneer een mechanisch probleem (zoals tandwielen die verspringen) optreedt, zal de motorbesturing niet weten waar de actuator precies gepositioneerd is. De closed loop feedback methode is dus de meest betrouwbare optie. Het signaal wordt ingelezen door de motorbesturing en vergeleken met de gewenste digitale positie van de actuator. Indien er een verschil is tussen de gewenste en de

werkelijke waarde kan de motor aangedreven worden tot dit verschil weg is. Wanneer de sensorwaarde overeenkomt met de gewenste positie mag de actuator niet verder bewegen [41, p. 2].

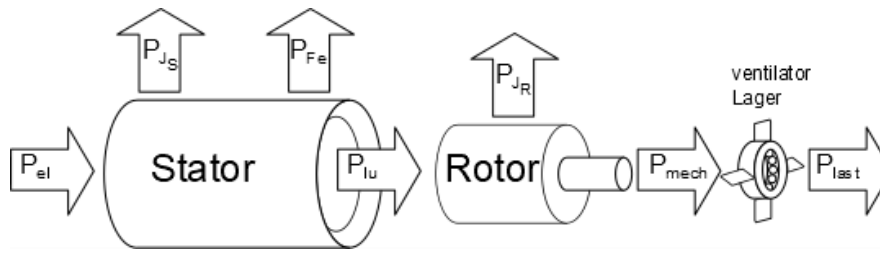
Het verwerken van deze signalen gebeurt met behulp van een PID (*Proportional Integral Derivative*). Dit soort motorbesturing is enkel bruikbaar bij een *closed loop feedback* systeem waarbij de sensormeting met het stuursignaal wordt vergeleken. De PID motorbesturing zorgt ervoor dat de gewenste eindpositie zo snel mogelijk en zo stabiel mogelijk bekomen wordt [42].

De actuator is ook uitgerust met eindschakelaars die functioneren als veiligheid en kalibratiemethode. In het geval dat de motor een foute sturing zou krijgen of de motorbesturing een foute positielezing zou doen, kan dit resulteren in een actuator die voorbij zijn fysieke grenzen gestuurd wordt en dus defecten creëert. De eindschakelaar zal als veiligheid dit kunnen voorkomen. Voordat de actuator fysiek te ver beweegt, zal de schakelaar schakelen en de actuator tot stilstand kunnen komen zonder defecten. Een tweede toepassing van deze schakelaars is kalibreren; wanneer de motorbesturing opgestart wordt zal deze de actuator doen bewegen tot de eindschakelaar. Zo weet de motorbesturing waar de actuator zich bevindt [43].

3.3 Verliesfactoren

Een elektrische actuator ondervindt verschillende soorten energieverliezen. Figuur 12 toont de verschillende soorten actieve vermogens die kunnen optreden in een motor. De verhouding van het ingaand vermogen (P_{el}) en het nuttig vermogen (P_{last}) bepaalt het rendement. De statorjouleverliezen (P_{js}), ijzerverliezen (P_{Fe}) en de rotorjouleverliezen (P_{jr}) zullen verloren gaan in de vorm van warmte (Figuur 12) [44]. Deze warmteverliezen zijn niet onnuttig. Deze spelen een rol in het dynamisch gedrag van de motor en helpen de performantie van de motor.

Een motor kan ook als rem gebruikt worden door in generatorwerking te treden. De mechanische energie wordt hierbij omgezet in elektrische energie. Deze energie kan door de verschillende verliezen omgevormd worden tot warmte. Wanneer de interne motorverliezen niet groot genoeg zijn om de mechanische arbeid op te vangen wordt er een extra remweerstand gekoppeld aan de motor. Deze remweerstand is gemaakt om alle mechanische energie om te kunnen zetten in warmte.



Figuur 12: Actieve vermogens in een motor[44]

De meeste elektromotoren zijn ontworpen om te werken op 50% tot 100% van de nominale belasting. Het maximale rendement ligt meestal in de buurt van 75% van de nominale belasting [45, p. 1]. Daarom is het belangrijk om ook een motor te kiezen die correct geschaald is. In de motorbesturing treden ook beperkte verliezen op in de vorm van warmte.

3.4 Berekening energieverbruik

Het netvermogen wordt bepaald aan de hand van de motorlast, het motorrendement en het motorbesturing rendement (vergelijking (21))[45].

$$P_{net} = \frac{P_{gem}}{\eta_{motor} * \eta_{motorbesturing}}$$

(21)

P_{net} = Netvermogen (Watt)

P_{gem} = Motorlast of het gemiddeld actuatorvermogen (Watt)

η_{motor} = Motor rendement

$\eta_{motordriver}$ = Motorbesturing rendement

De energiekosten worden bepaald volgens dezelfde methode die besproken is in paragraaf 2.6.22.6.2. Kostenbepaling

3.5 Bestaande actuatoren

Pneumatische componenten vervangen in situaties waar het nuttig is, is geen nieuwe ontdekking. Een aantal bedrijven zijn op de hoogte van de vraag naar meer elektrische alternatieven en hebben al producten ontworpen. Deze producten zijn specifiek gericht op het vervangen van een pneumatische actuator. Er kan reeds dus gebruik gemaakt worden van deze bestaande oplossingen. Een aantal interessante fabrikanten zijn: Festo, Tolomatic, SMC,

SMAC, Linmot, Schunk, IHG, Sensata, Kendrion. De bedoeling van deze paragraaf is om een beeld te krijgen van de verschillende opties.

3.5.1 Klemmodule

Een toepassing waar pneumatiek wordt voor gebruikt, is het vastklemmen van onderdelen. Hiervoor worden klemmodules gebruikt. In een toepassing zoals frezen dient het onderdeel sterk vastgeklemd te worden en is een hoge positioneringsnauwkeurigheid vereist. Ook is het onderdeel vaak langere tijd ingeklemd. Ideaal zou de klemmodule enkel stroom verbruiken bij het inklemmen en daarna niet meer. Dit alles is mogelijk met onderstaande klemmodule van Schunk (zie Figuur 13). Gewoonlijk wordt het werkstuk niet rechtsreeks met deze module vastgeklemd, maar wordt een palet hierin vastgeklemd waarop het werkstuk vast zit. Zo kunnen paletten snel uitgewisseld worden in freesmachines en blijft de nodige nauwkeurigheid behouden.



Figuur 13: Elektrische klem module Schunk [46]

3.5.2 Stopper

In een machine bevindt zich regelmatig een mechanische aanslag. Een aanslag dient om bewegende onderdelen binnen de machine te stoppen op een bepaalde positie. Wanneer het onderdeel verder mag bewegen, dient de aanslag weg te bewegen, hiervoor worden pneumatische cilinders gebruikt. Belangrijk bij een stoppercilinder is dat er geen aanslagkrachten op de zuigerstang zelf mogen komen. Deze zuigerstang is hier niet voor ontworpen. Er bestaan ook elektrische varianten van zulke stoppers die dezelfde taak kunnen volbrengen. Ook hier wordt de aanslagkracht niet direct doorgegeven naar de actuator, maar wel naar de behuizing die op deze krachten voorzien is. Figuur 14 en Figuur 15 tonen twee voorbeelden van elektrische stoppers.



Figuur 14: Festo elektrische stopper [47, p. 1]



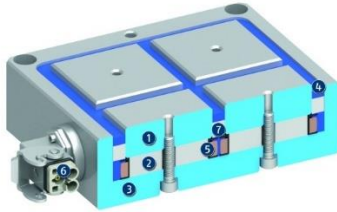
Figuur 15: SMC elektrische stopper [48]

3.5.3 Grippers

Een gripper is een veelgebruikt mechanisme bij *pick & place* modules. Grippers dienen om objecten vast te klemmen en te verplaatsen, net zoals een hand kan. Grippers moeten vaak compact zijn en worden dus hiervoor ook grotendeels pneumatisch uitgevoerd. Het aanbod elektrische grippers is kleiner dan het aanbod aan pneumatische grippers. Het voordeel van elektrische grippers is dat er meerder gripperposities ingesteld kunnen worden. Pneumatische actuatoren zijn moeilijk of niet te positioneren buiten de twee uiterste standen. Figuur 16 toont een standaard elektrische paralelgripper. In Figuur 17 is een elektromagneet te zien die hier in functie van een gripper wordt gebruikt. Figuur 18 toont een gripper met drie klauwen die wordt gebruikt om cilindrische voorwerpen te hanteren.



Figuur 16: Festo elektrische parallele gripper[49, p. 1]



Figuur 17: Schunk elektromagnetische gripper [50]



Figuur 18: Drieklaauw elektrische gripper [51, p. 57]

3.5.4 Lineaire actuator

Pneumatische lineaire actuatoren zijn compact, kunnen hoge krachten leveren en hoge snelheden bereiken. Het voordeel van de elektrische variant is dat deze energiezuiniger en beter controleerbaar zijn ten opzichte van een pneumatische tegenhanger. De lineaire beweging wordt op verschillende manieren gerealiseerd. Een roterende beweging van een motor wordt omgezet in een lineaire beweging via een schroefstaaf of via een tandriem.

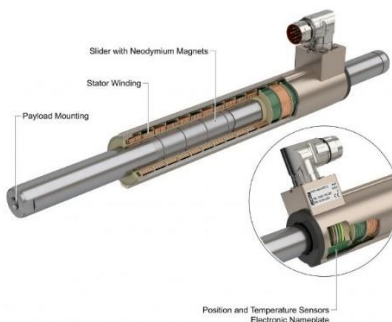
In Figuur 19 is een lineaire actuator met slede te zien. Deze slede beweegt over de lengte van de actuator. In Figuur 20 is een cilindrische lineaire actuator te zien. Dit soort actuator beweegt uit de behuizing en kan zo langer of korter worden. Tot nu toe werd elektriciteit omgezet in een draaibeweging om die draaibeweging om te zetten in een lineaire beweging, maar elektriciteit rechtstreeks omzetten in een lineaire beweging is ook mogelijk (Figuur 21). Dit soort actuatoren wordt een “*tubular electric actuator*” genoemd, Zij zijn hoog nauwkeurig, snel en krachtig.



Figuur 19: Festo elektrische lineaire slede actuator [52]



Figuur 20: Festo elektrische lineaire actuator [53]



Figuur 21: Linmot tubular elektrische actuator [6]

3.5.5 Lineaire solenoïdes

Een Lineaire solenoïde bestaat uit een geleidende spoel en een vrij bewegende ijzeren of magnetische kern. Bij het bekrachtigen van de spoel beweegt de kern. In tegenstelling tot een *tubular* motor, die gelijkaardig functioneert, heeft de solenoïde maar een beperkt aantal posities waar tussen gekozen kan worden. Zulke actuatoren zijn dus niet interessant voor het volgend van nauwkeurige bewegingsprofielen, maar eerder om te functioneren als positioneerpin, stopper of mechanische schakelaar, een functie waar enkel de twee uiterste posities van belang zijn en niet het type van afgelegde weg. Solenoïdes zijn goedkoop en compact en worden al veel toegepast in de industrie.

Solenoïdes bestaan in verschillende bouwsoorten, maar het mechanisme achter de beweging blijft hetzelfde. Een belangrijk soort solenoïde is de bistabiele solenoïde. Dit soort bevindt zich in twee posities in een stabiele stand. Indien de bekrachtiging weg valt, blijft de solenoïde in één van de twee standen staan. Dit is in tegenstelling tot een traditionele solenoïde waar de kern vrij kan bewegen bij het wegvallen van de bekrachtiging. Een monostabiele solenoïde bevat een veer die ervoor zorgt dat de kern terug naar de beginpositie gaat bij het wegvallen van de bekrachtiging. Figuur 22 toont een voorbeelden van solenoïdes gemaakt door Kendrion [54].



Figuur 22: Voorbeeld solenoïdes van Kendrion [55]

3.5.6 Draai actuator

Een draai actuator is de elektrische vervanging voor een pneumatische draaicilinder. Een rotatiebeweging is eenvoudig te verwezenlijken met behulp van een motor. De meest voorkomende soorten motoren zijn stappenmotoren en servomotoren. Elektrische draaiactuatoren zijn nauwkeurig aan te sturen en kunnen hoge koppels en snelheden bekomen. Vaak worden dit soort actuatoren ook gecombineerd met een tandwielkast om zo hogere koppels te verwezenlijken. Zulke tandwielkasten kunnen “*non-backdrivable*” worden

uitgevoerd. Dit wil zeggen dat de motor de uitgang kan aandrijven, maar niet andersom, generatorwerking is niet mogelijk. Het voordeel hiervan is dat de motor niet constant bekrachtigd moet worden om de last te kunnen dragen. Ook in geval van stroomuitval is het belangrijk dat de actuator zijn positie niet verliest. Figuur 23 toont een voorbeeld van een draai actuator (stappenmotor met tandwielkast).



Figuur 23: Draai-actuator van Festo [56]

3.5.7 Lineaire-draai combinatie

Paragraaf 3.5.4 en 3.5.6 bespreken respectievelijk de lineaire en draai actuatoren. Een combinatie van deze twee kan gemaakt worden om een lineaire beweging en draaibeweging te realiseren. Dit kan een mogelijke vervanging zijn voor pneumatische lineaire draaicilinders. Dit zijn cilinders die naast een lineaire slag ook een draaibeweging uitvoeren. Dit soort actuator kan nauwkeurig bestuurd worden. Een tandwielkast toevoegen om hogere koppels te bekomen is mogelijk. Figuur 24 toont een voorbeeld van zulke actuator.



Figuur 24: Lineaire Draai-actuator combinatie met tandwielkast van Linmot [57]

3.5.8 Draai solenoïde

Een minder gekend soort solenoïde is de draai solenoïde of “*rotary solenoid*”. Dit soort solenoïde werkt aan de hand van een permanente magneet of ijzeren kern die aangetrokken wordt door het magnetisch veld van een elektrisch geleidende spoel. Deze kern is mechanisch gekoppeld aan een as. Bij het bekrachtigen van de spoel wordt de kern bewogen en zal de as een rotatiebeweging uitvoeren. Een draai solenoïde is compact en eenvoudig te besturen, maar kan maar een beperkt koppel leveren. Deze solenoïdes dienen net zoals lineaire solenoïdes om kleine snelle bewegingen te maken tussen een beperkt aantal posities. Ook deze kunnen bistabiel uitgevoerd worden zoals besproken in paragraaf 3.5.4. Figuur 25 toont een voorbeeld van een draai solenoïde.



Figuur 25: Voorbeeld bistabiele draaisolenoïde van Kendrion [58]

4 Automatisering luchtverbruik berekeningen

Dit hoofdstuk past alle theorie van hoofdstuk 2 toe op de machines van IPTE Factory automation. Hier wordt overlopen hoe de luchtberekeningen geautomatiseerd zijn met behulp van Excel. De resultaten worden geïnterpreteerd en vergeleken met de werkelijkheid. Programma's zoals *Festo QuickSearchPlus* en *SMC Energy Saving* zijn veelgebruikte tools in de industrie om het luchtverbruik van een bepaalde instelling te bepalen [9], [59]. Beide programma's melden dat de berekeningen enkel een benadering van de realiteit zijn.

4.1 Vaste gegevens

Een eerste stap is het verzamelen van alle vereiste vaste gegevens. De vaste gegevens zijn de gegevens die niet bedrijf- of situatieafhankelijk zijn. Deze worden verzameld uit verschillende bronnen: datasheets, onderdeellijsten, machinecyclustijdberekeningen, 3D Creo modellen, pneumatische schema's, werkelijke machines en video's van de machines in werkelijkheid. De vereiste vaste gegevens zijn;

- Alle gebruikte cilinders,
- cilinder boringsdiameter,
- cilinder zuigerstangdiameter,
- cilinder slaglengte,
- cilinderprijs,
- cilinder werkdruk,
- leiding binnendiameter,
- leiding lengte,
- slagtijd.

Alle cilinder afmetingen werden opgezocht in enerzijds de datasheets aan de hand van de bestelcode die gegeven was in de onderdelenlijst en anderzijds de 3D Creo modellen. Sommige werkelijke cilinderslagen verschillen van de datasheets door toegevoegde remblokken, deze worden gecontroleerd in de 3D modellen. De cilinderprijs is terug te vinden in de onderdeellijsten maar kan ook opgezocht worden.

De leiding lengtes zijn niet exact te vinden aangezien deze niet in de 3D Creo modellen gemodelleerd waren. In de 3D Creo modellen waren wel alle verschillende koppelingen en magneetventielen gemodelleerd. Eerst wordt beredeneerd aan de hand van de pneumatische schema's welke koppelingen en magneetventielen verbonden zijn met welke cilinder en welke leidinglengtes bij elke slag gevuld worden met perslucht. Aan de hand van de werkelijke machines en video's wordt onderzocht hoe alle leidingen geleid worden doorheen de machine. De lengte van dit pad wordt opgemeten in 3D Creo modellen. De leidingbuitendiameters zijn soms terug te vinden in de pneumatische schema's maar kunnen ook opgemeten worden in de werkelijkheid. Ook in de 3D Creo modellen kan aan de koppelingbinnendiameter afgeleid worden wat de leidingbuitendiameter is. In de datasheets van de leidingen kan de binnendiameter afgelezen worden op basis van de buitendiameter.

De cilinder- en leiding werkdruk kan afgeleid worden door het pneumatisch schema van elke machine te interpreteren. De slagtijd van een actuator wordt opgezocht in de machinecyclustijdberekeningen of kan getimed worden aan de hand van de video's.

4.2 Variabele gegevens

De variabele gegevens zijn de parameters die voor elk bedrijf anders kunnen zijn. Enerzijds zijn er machinespecifieke parameters zoals de machinecyclustijden en het aantal cilinderslagen per cyclus. Anderzijds zijn er ook globale parameters zoals het compressorrendement die verschillen per bedrijf.

4.2.1 Machine specifieke variabelen

De werking van elke machine is gekend en het is mogelijk om het aantal cilinderslagen per machine te bepalen in functie van het aantal te verwerken eenheden. De cyclustijd zou ook in functie van het aantal te verwerken eenheden berekend kunnen worden, maar hier gaat de masterproef niet verder op in.

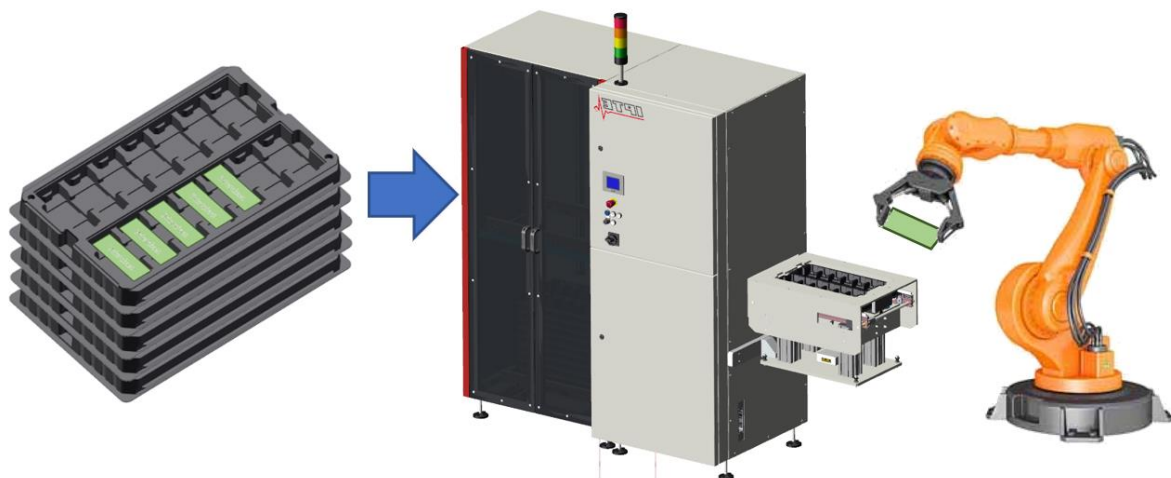
Voorbeeld:

De *Easytray* (MTF_AP0022) is een machine van IPTE waarmee printplaten in- en uitgeladen kunnen worden. De printplaten worden vervoerd op een gestandaardiseerde bak (of *tray*). In één *tray* passen een aantal printplaten. Hoeveel printplaten hier in passen hangt van de printplaatgrootte af. Een stapel *tray*'s wordt een *stack* genoemd (zie Figuur 26).



Figuur 26: Voorbeeld tray en stack met 5 printplaten

De *stack* wordt in de *Easytray* geladen waarna de *Easytray* de *tray's* één voor één naar een uitlaadstation brengt. Hier worden de printplaten uitgeladen door bijvoorbeeld een *Pick & Place* robot (zie Figuur 27). Deze machine kan ook besteld worden met twee uitlaadplaatsen. De *trays* worden hierna terug in de machine gestapeld tot een *stack*.



Figuur 27: Flowchart van de Easytray

De parameters die hier kunnen variëren per machine zijn: het aantal printplaten per *tray*, het aantal *tray's* per *stack* en het aantal uitlaadplaatsen. Het aantal printplaten per *tray* heeft invloed op de uitlaadtijd van de *pick & place* robot en dus op de cyclustijd. Het aantal *tray's* per *stack* heeft een invloed op het aantal cilinderslagen in de machine omdat de machine minder of meer *tray's* moet verwerken. Het aantal uitlaadplaatsen heeft invloed op welke cilinder wordt geactiveerd en dus lucht verbruikt.

4.2.2 Bedrijfsspecifieke variabelen

Eens het luchtverbruik van elke machine bekend is, zijn er nog factoren die de eindkost doen verschillen van bedrijf tot bedrijf. Dezelfde stappen als in paragraaf 2.6 worden gevolgd waardoor de invloed van de verschillende parameters telkens duidelijk wordt.

Eerst wordt het gemiddeld vermogen omgerekend tot een netvermogen via het compressorsysteem rendement. Dit rendement hangt af van veel factoren waar deze masterproef niet in zal verdiepen. Het aantal megawattuur dat op een jaar verbruikt wordt, hangt af van de werkingstijd van de machine. In deze masterproef wordt verondersteld dat de machines 365 dagen per jaar, 24 uur per dag operationeel zijn.

De prijs, die een bedrijf betaalt voor een hoeveelheid megawattuur, hangt af van de energieleverancier, de regio waarin het bedrijf zich bevindt, of ze al dan niet groene energie genereren en wat de huidige distributie en transmissiekosten zijn. Al deze variabelen zijn in de functie “=Energiekosten_factuur(P_net(Watt))” verwerkt. Een tweede optie om de luchtverbruikskosten te bepalen is via de luchtprijs per nm^3 .

4.3 Excel berekeningen

De tot nu toe besproken berekeningen zijn geautomatiseerd met behulp van Excel. Deze paragraaf toont het document en zijn functionaliteiten. Het document is zo gebruiksvriendelijk mogelijk opgesteld. Deze paragraaf beschrijft de werking van het document aan de hand van een voorbeeld machine (MTF *Easytray*). Extra uitleg is ook voorzien in de het document in de vorm van notities. Het volledig rekenblad met alle machines en -actuatorgegevens samen is terug te vinden in Bijlage C.

4.4 Rekenblad: actuator en machinegegevens

Dit is het eerste rekenblad van het document dat ingevuld dient te worden voor elke berekening (zie Figuur 28). Alle oranje cellen met vetgedrukte letters zijn parameters die ingevuld dienen te worden. Ten eerste worden de luchtprijs, het pneumatische installatierendement en het aantal piek- en daluren per bedrijf ingevuld. Hierna kan per machine de cyclustijd worden ingevuld samen met de bijhorende machinevariabelen.

Het luchtverbruik van de ATU (AP0028), MFT *Easytray* (AP0022) en de MLL (AP0065) is opgemeten aan de hand van *factory tests*. Een *factory test* is een op voorhand ingesteld programma (een machinecyclus) om de werking van de machine te controleren.

De ATU is getest op vijf factory tests na elkaar maar in de werkelijkheid zal de machine af en toe moeten wachten om een handeling uit te voeren. De ATU zal nooit meer verbruiken dan tijdens de testen, tenzij de werkdruk opgevoerd wordt, maar dit is niet de bedoeling.

De MFT is getest op één machinecyclus waarbij een uitlaadtijd van 2 seconden was ingesteld. In de praktijk gaat de uitlaadtijd langer dan 2 seconden zijn, de machine zal dus ook nooit meer verbruiken dan in de *factory test*.

De MLL (AP0065) en de MLL (AP0050) hebben dezelfde functionaliteit maar de AP0050 is een grote versie (met meer laadplaatsen). De MLL_AP0065 is getest op een machinecyclus met 10 printplaten. Enkel de pneumatische bewegingen van de machine zijn getest. Een werkelijke machinecyclus bevat ook elektrisch gestuurde bewegingen. Hierdoor kan weer gesteld worden dat een werkelijke machinecyclus langer zal duren door de extra elektrische bewegingen en dus ook nooit meer zal verbruiken dan in de *factory test*. De MLL_AP0050 is niet getest maar eenzelfde cyclustijd en werking wordt aangenomen.

Prijs per nm ³ lucht (€)	0,027	
n_inst (%)	0,11	
Piekuren per jaar (uur)	5460	
Daluren per jaar (uur)	3276	
ATU (AP0028)		ATU (AP0028) was getest op 5 factory tests: -10 keer 90° draaien -10 keer op en af bewegen -67 seconden -Verbruik = 29nL
Cyclustijd (sec)	67	
Rotatiehoek (°)	90	
ETH (AP00241)		
Cyclustijd (sec)	8	
#Prinplaten per cyclus	10	
MFT 19" (AP0363)		MTF (Easytray) was getest op 1 factory test: -10 trays -2 seconden unload time -158 seconden -Verbruik = 31nL
Cyclustijd (sec)	5	
# prinplaten per cyclus	1	
MTF (Easytray)		
Cyclustijd (sec)	158	
#Trays per stack	10	
MLL (AP0050)		MLL (AP0050) was niet getest maar er wordt eenzelfde cyclustijd verondersteld als de AP0065 (voor eenzelfde aantal bewegingen)
Cyclustijd (sec)	63	
#Printplaten	10	
MLL (AP0065)		
Cyclustijd (sec)	63	
#Printplaten	10	MLL (AP0065) was getest op 10 pusher tests: -10 keer pusher op, af en draaien -1 keer alle klemcilinders op laadplaats 2 in en uit -63 seconden -Verbruik = 6nL
MTF (flextray)		
Cyclustijd (sec)	123	
#Trays per stack	9	
FLU (AP0058)		
Cyclustijd (sec)	8	

Figuur 28: Algemene bedrijfsafhankelijke parameters

Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5 en Tabel 6 zijn opeenvolgende tabellen die samen de jaarlijkse kostprijs per actuator bepalen. De verschillende kolommen worden verklaard in Tabel 2 om de functionaliteit en betekenis duidelijk te maken. Merk op dat voor elke kolom ook een subtotaal gemaakt kan worden om de berekeningen voor elke cilinder op te tellen (zie onderaan, vetgedrukt in Tabel 4 en Tabel 5).

Tabel 2: Verklaring van de gebruikte termen in Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5 en Tabel 6

Kolomnaam	beschrijving
Prioriteit	De volgorde van belang voor het vinden van een elektrisch alternatief. Deze volgorde is opgesteld door IPTE.
Commerciële naam	Een makkelijk herkenbare machinenaam.
Machine code	De code die het exacte model van de machine beschrijft.
Machineprijs	De prijs van alle pneumatische componenten samen (actuatoren, magneetventielen, filters...).
Machine cyclustijd	Het aantal seconden nodig om één beschouwde machinecyclus te voltooien.
Item no.	Het onderdeelnummer in de database van IPTE.
Omschrijving	Zeer korte beschrijving en categorisering van de actuator.
Producent	De producent van de actuator.
Producent bestelcode	De specifieke bestelcode van de actuator per producent.
Cilinder activatie	De cilinderactivatie kan 1 of 0 zijn afhankelijk of de cilinder gebruikt wordt of niet. Dit is nuttig om bepaalde cilinders makkelijk te kunnen elimineren uit de berekening.
D, d, S (mm)	Cilinderkamer afmetingen: boringdiameter (D), zuigerstangdiameter (d) en slaglengte (S).
dL, LL (mm)	De binnendiameter van de leiding en de leidinglengte.
Slagtijd (sec)	De tijd nodig om de positieve of negatieve slag af te leggen.
P (bar)	De werkdruk van de positieve of negatieve cilinderkamer.

#V/cyclus	Het aantal cilinderkamervullingen per cyclus voor de positieve en negatieve slag.
V (L)	Het positieve of negatieve cilinderkamer- of leidingvolume in liter.
Vn (nL)	Het positieve of negatieve cilinderkamer- of leidingvolume in normenliter.
W (J)	De arbeid verricht door de verplaatste luchtvolumes.
WL (J)	De potentiële arbeid van de verloren leidinglucht.
P (watt)	De hoeveelheid arbeid per seconde verricht door de lucht.
V/cyclus (L)	Het totale luchtverbruik per cyclus per cilinder in liter (per actuator).
Vn/cyclus (nL)	Het totale luchtverbruik per cyclus per cilinder in normenliter (per actuator).
W_cyclus (J)	De totale verrichte arbeid in 1 cyclus (per actuator).
Vn/min (nL)	Het totale luchtverbruik per cilinder per minuut in normenliter (per actuator).
L/min (L)	Het totale luchtverbruik per cilinder per minuut in liter (per actuator).
P_gem (Watt)	Het gemiddelde vermogen van 1 cyclus nodig voor de prijsberekening (per actuator).
P_net (	Het gemiddelde netvermogen van 1 cyclus nodig voor de prijsberekening (per actuator).
Kost per jaar (n_inst) (€)	De verbruikskost per jaar gebaseerd op het installatie rendement (n_inst) (per actuator).
Kost per jaar incl. installatie (n_inst) (€)	De verbruikskost per jaar en de pneumatische installatiekosten gebaseerd op het installatie rendement (n_inst) (per actuator).

Kost per jaar (luchtprijs) (€)	De verbruikskost per jaar gebaseerd op de gegeven luchtprijs (per actuator).
Kost per jaar incl. installatie (n_inst) (€)	De verbruikskost per jaar en de pneumatische installatiekosten gebaseerd op de gegeven luchtprijs (per actuator).
Cilinderprijs (€).	De aankoopprijs van de actuator, deze is confidentieel.

Tabel 3: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 1: Machine gegevens en cilinder gerelateerde gegevens

machine gerelateerde gegevens					Cilinder gerelateerde gegevens				
Prioriteit	Commerciële naam	Machine code	Machineprijs (pneumatisch)	Machine cyclustijd (sec)	ItemNo	Omschrijving	Producent	Producent bestelcode	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.004660.1	Draai cilinder stopper	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	CLR-20-10-L-P-A	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006624.1	Tray pusher	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-18-600-KF-PPV-A	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006628.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	MGPM32TF-25-XC56	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.2	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.3	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.4	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006631.1	Locking cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	ADN20-19	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006582.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDQSBS16-15DC	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006582.2	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDQSBS16-15DC	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.002354.1	Tray klem cilinder	SMC Belgium BV	CDU16-25D	
4	MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.002354.2	Tray klem cilinder	SMC Belgium BV	CDU16-25D	

Tabel 4: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 2: Cilinder afmetingen en kamervolumes

Cilinder activatie	Cilinder afmetingen			Positieve kamervolumes (zonder stang)								Negatieve kamervolumes (met stang)							
	D (mm)	d (mm)	S (mm)	Slagtijd+ (sec)	p+ (bar)	# V+/cyclus	V+ (L)	Vn+ (nL)	W+ (J)	P+ (Watt)	Slagtijd- (sec)	p- (bar)	# V-/cyclus	V- (L)	Vn- (nL)	W- (J)	P- (Watt)		
1	20	12	10	0,5	6	10	0,003	0,022	1,9	3,8	0,5	6	10	0,002	0,014	1,2	2,4		
1	18	0	620	0,8	6	10	0,158	1,104	94,7	118,3	0,8	6	10	0,158	1,104	94,7	118,3		
1	32	14	30	0,5	5	10	0,024	0,145	12,1	24,1	0,5	5	10	0,020	0,117	9,8	19,5		
0	20	10	52	0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6	0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7		
0	20	10	52	0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6	0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7		
0	20	10	52	0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6	0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7		
0	20	10	52	0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6	0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7		
1	20	12	19	0,2	6	1	0,006	0,042	3,6	17,9	0,2	6	1	0,004	0,027	2,3	11,5		
1	16	6	15	0,5	6	10	0,003	0,021	1,8	3,6	0,5	6	10	0,003	0,018	1,6	3,1		
1	16	6	15	0,5	6	10	0,003	0,021	1,8	3,6	0,5	6	10	0,003	0,018	1,6	3,1		
1	16	6	25	0,5	6	10	0,005	0,035	3,0	6,0	0,5	6	10	0,004	0,030	2,6	5,2		
1	16	6	25	0,5	6	10	0,005	0,035	3,0	6,0	0,5	6	10	0,004	0,030	2,6	5,2		

Tabel 5: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 3: Leidingvolume en totaalverbruik

Leiding afmetingen				leiding volumes								Totaal cilinderverbruik per cyclus				Verbruik per tijdseenheid			
dL (mm)	VL+ (mm)	VL- (mm)		VL+ (L)	VLn+ (nL)	WL+ (J)	PL+ (Watt)	VL- (L)	VLn- (nL)	WL- (J)	PL- (Watt)	V/cyclus (L)	Vn/cyclus (nL)	W_cyclus (J)		Vn/min (nL)	L/min (L)	P_gem (Watt)	P_net (Watt)
4	600	600		8E-03	5E-02	4,5	9,0	8E-03	5E-02	4,5	9,0	0,20	1,27	121,4		0,48	0,08	0,8	7,0
4	540	540		7E-03	4E-02	4,1	5,1	7E-03	4E-02	4,1	5,1	3,29	22,90	1974,7		8,70	1,25	12,5	113,6
4	1050	1450		1E-02	7E-02	6,6	13,2	2E-02	9E-02	9,1	18,2	0,75	4,19	375,3		1,59	0,29	2,4	21,6
2,5	300	300		1E-03	9E-03	0,9	1,8	1E-03	9E-03	0,9	1,8	0,00	0,00	94,6		0,00	0,00	0,6	5,4
2,5	700	700		3E-03	2E-02	2,1	4,1	3E-03	2E-02	2,1	4,1	0,00	0,00	106,4		0,00	0,00	0,7	6,1
2,5	300	300		1E-03	9E-03	0,9	1,8	1E-03	9E-03	0,9	1,8	0,00	0,00	94,6		0,00	0,00	0,6	5,4
2,5	700	700		3E-03	2E-02	2,1	4,1	3E-03	2E-02	2,1	4,1	0,00	0,00	106,4		0,00	0,00	0,7	6,1
2,5	230	330		1E-03	7E-03	0,7	3,4	2E-03	1E-02	1,0	4,9	0,01	0,09	7,5		0,03	0,00	0,0	0,4
2,5	520	920		3E-03	2E-02	1,5	3,1	5E-03	3E-02	2,7	5,4	0,13	0,82	76,1		0,31	0,05	0,5	4,4
2,5	520	920		3E-03	2E-02	1,5	3,1	5E-03	3E-02	2,7	5,4	0,13	0,82	76,1		0,31	0,05	0,5	4,4
2,5	1350	1350		7E-03	4E-02	4,0	8,0	7E-03	4E-02	4,0	8,0	0,23	1,45	135,6		0,55	0,09	0,9	7,8
2,5	1000	1000		5E-03	3E-02	2,9	5,9	5E-03	3E-02	2,9	5,9	0,19	1,24	115,0		0,47	0,07	0,7	6,6
												4,93	32,77	3283,52		12,443	1,871	20,8	188,9

Tabel 6: Rekenblad actuator en machinegegevens deel 4: Kostprijs per jaar

Kostprijs per jaar op basis van het installatierendement		Kostprijs per jaar op basis van de luchtprijs		
Kost per jaar (n_inst) (€)	Kost per jaar incl. installatie (n_inst) (€)	Kost per jaar (luchtprijs) (€)	Kost per jaar incl. installatie (luchtprijs) (€)	Cilinderprijs (€)
8,48	11,50	6,80	9,22	Confidentieel
138,02	187,15	123,08	166,89	Confidentieel
26,23	35,57	22,51	30,53	Confidentieel
6,61	8,96	0,00	0,00	Confidentieel
7,44	10,09	0,00	0,00	Confidentieel
6,61	8,96	0,00	0,00	Confidentieel
7,44	10,09	0,00	0,00	Confidentieel
0,53	0,72	0,46	0,62	Confidentieel
5,32	7,21	4,39	5,95	Confidentieel
5,32	7,21	4,39	5,95	Confidentieel
9,48	12,85	7,79	10,56	Confidentieel
8,04	10,90	6,68	9,06	Confidentieel
229,52	311,21	176,10	238,78	Som cilinderprijs

4.5 Rekenblad: energiefactuur

De kost per jaar (n_{inst}) van het rekenblad “actuator en machinegegevens” wordt berekend met behulp van het rekenblad “Energiefactuur” (zie Figuur 29). Op dit rekenblad kan de energierekening van een bepaald bedrijf ingevuld worden en een nauwkeurige energiekost berekend worden. Aan de hand van “*Slicers*” wordt de gewenste machine, functie of actuator geselecteerd waarvan de energiekost automatisch berekend wordt. Door gebruik te maken van de “Lambda()” functie in Excel worden de energiekosten berekend in Tabel 6. De Lambda() functie laat toe om een eigen functie op te stellen met bepaalde parameters van eender welk rekenblad.

Dit is de berekening van een energierekening. Door de invulcellen in te vullen naargelang de klant wordt de energieprijis nauwkeurig berekend. De berekening gebeurt automatisch aan de hand van de formule: =energiekosten_factuur(P_net (Watt))				Machine code			Omschrijving			ItemNo		
				MFT_AP0363_1 MFT			Cilinder kleine slag ...			AIR.002354.1		
				MLL_AP0050_1 ML...			Draai cilinder stopper			AIR.002354.2		
				MLL_AP0065_1 MLL			Locking cilinder			AIR.004660.1		
				MTF_AP0021_1 Fle...			Tray klem cilinder			AIR.006582.1		
				MTF_AP0022_1 Ea...			Tray pusher			AIR.006582.2		
				Vergeet niet de draaitabel te vernieuwen!								
				Rijlabels		P_net (Watt)						
				Cilinder kleine slag klem		53,47						
				AIR.006582.1		4,38						
				AIR.006582.2		4,38						
				AIR.006628.1		21,59						
				AIR.007094.1		5,44						
				AIR.007094.2		6,12						
				AIR.007094.3		5,44						
				AIR.007094.4		6,12						
				Draai cilinder stopper		6,98						
				AIR.004660.1		6,98						
				Locking cilinder		0,43						
				AIR.006631.1		0,43						
				Tray klem cilinder		14,42						
				AIR.002354.1		7,80						
				AIR.002354.2		6,62						
				Tray pusher		113,62						
				AIR.006624.1		113,62						
				Eindtotaal		188,93						

Figuur 29: Rekenblad energiefactuur

4.6 Resultaten luchtverbruik berekeningen

Een werkelijk eindresultaat kan niet bekomen worden door de vele variabele parameters. Toch zijn de variabele parameters die tot nu toe zijn gebruikt realistisch waardoor er wel een schatting van de resultaten mogelijk is. Ten eerste wordt gecontroleerd of de luchtberekening correct is. Dit is mogelijk aangezien de variabele parameters nodig voor deze berekening gekend zijn.

Om de berekeningen te vergelijken met de werkelijkheid zijn een aantal luchtmetingen gedaan met behulp van een luchtverbruiksmeter. De gebruikte luchtmeter is een *SMC PFMB7* series met een nauwkeurigheid van 1 nL (zie Bijlage D) [60, p. 10]. Zoals vermeld in paragraaf 4.4 zijn er 3 machines getest: de *ATU_AP0028*, *MTF Easytray* en de *MLL_AP0065*. De machineparameters van de meting zijn overgenomen in het rekenblad. Figuur 28 vermeldt de gemeten waarden per machine. In onderstaande tabel worden deze waarde samengevat en vergeleken met de berekende waarden.

Tabel 7: Vergelijking meting en berekening voor een machinecyclus

	Meting (Vn/cyclus (nL))	Berekening (Vn/cyclus (nL))
<i>ATU_AP0028</i>	29	29,22
<i>MTF_AP0022</i>	31	32,77
<i>MLL_AP0065</i>	6	6,40

De berekeningen zijn een goede benadering van de metingen. In het geval van de ATU en de MLL is het niet mogelijk om de exacte afwijking te bepalen aangezien de luchtverbruiksmeter een nauwkeurigheid heeft van 1 nL. De MTF toont wel een kleine aanvaardbare afwijking. Deze resultaten tonen dat de berekening betrouwbaar is. Voor de machines die niet opgemeten zijn, wordt verondersteld dat het berekende luchtverbruik ook een goede benadering is van de werkelijkheid mits de correcte variabelen. Het luchtdebiet van elke actuator wordt berekend en gesommeerd voor elke machine. De waarden worden samengevat in Tabel 8.

Tabel 8: Samenvatting luchtverbruik per minuut per machine

Rijlabels	▼↓ Som van Vn/min (nL)	Som van Kost per jaar (luchtprijs) (€)
ATU_AP0028_1 ATU	26,16	370,26
MTF_AP0021_1 Flextray	22,42	317,23
MTF_AP0022_1 Easytray	12,44	176,10
MLL_AP0050_1 MLL-XP	7,68	108,62
FLU_AP0058_1 FLU	7,48	105,82
MLL_AP0065_1 MLL	6,09	86,21
ETH_AP0241_1 ETH pneu Slidedoor	5,05	71,52
MFT_AP0363_1 MFT	3,91	55,40

De luchtdebieten zijn voor alle machines laag, ter referentie verbruikt een luchtlek van 1mm² 55 nL/min en kost dit 780€ per jaar (zie paragraaf 2.3.2). Bijlage C vermeld het luchtverbruik van elke actuator samen met de jaarlijkse kosten. De meeste actuatoren kosten jaarlijks een tiental euro's, wat op tien jaar (de levensduur van de machine) geen significant effect gaat hebben (in vergelijking met een simpel luchtlek).

Toch zijn er voor IPTE bepaalde actuatoren die beduidend meer verbruiken dan andere. Ten eerste zijn alle zuigerstangloze slede cilinders grote verbruikers. Dit omdat ze allemaal een hoog aantal slagen per minuut behalen en een relatief groot cilindervolume hebben. Ten tweede is de draaiactuator een van de grotere verbruikers door het continu gebruik en dus een hoog aantal slagen per minuut behaalt. Ten derde zijn er twee zeer grote actuatoren die gebruikt worden om een *stack* op te tillen. Deze hebben een laag aantal slagen per minuut maar hebben een groot intern luchtvolume.

5 Ontwerp mogelijke elektrische oplossing

Het ontwerpen van een elektrisch alternatief is complex. Het grote verschil tussen pneumatische en elektrische aandrijving is dat de meeste pneumatische aandrijvingen lineair zijn en de meeste elektrische aandrijvingen roteren. De meeste toepassingen van pneumatische actuatoren zijn toepassingen waar een lineaire beweging nodig is en de meeste toepassingen van elektrische actuatoren zijn toepassingen waar een draaibeweging gewenst is. De pneumatische machines zijn ontworpen om te werken met lineaire bewegingen in gedachten. Om van een elektrische draaibeweging een lineaire beweging te maken is dus al een soort overbrenging nodig waardoor meer bewegende delen gebruikt worden en dus meer complexiteit.

Een pneumatische actuator wordt bekrachtigd door een compressor. Het voordeel van dit soort bekrachtiging is dat de krachtbron ver van de actuator kan afstaan. Hierdoor kunnen verschillende actuatoren met hoge krachten dicht bij elkaar geplaatst worden om zo een compacte machine te vormen. Bij elektrische actuatoren is de motor de krachtbron en deze bevindt zich gewoonlijk vlak naast de actuator waardoor de actuator minder compact is dan de pneumatische tegenhanger. Indien een machine vanaf het begin ontworpen wordt met de intentie om deze volledig elektrisch uit te voeren, zal deze minder compact zijn dan een pneumatische machine. Wanneer een volledig bedrijf enkel elektrische machines bezit heeft het geen nood aan een volledige compressorruimte waardoor de extra benodigde elektrische machineplaats mogelijks terug gewonnen kan worden. Toch is de vraag om een pneumatische machine om te vormen tot een elektrisch alternatief waardoor de nodige inbouwruimte vaak beperkt is.

Het voordeel van pneumatische actuatoren is dat deze krachtig en snel zijn door de verder afgelegen krachtbron. Indien dit elektrisch mogelijk was zouden kleine actuatoren ook snel en krachtig zijn. Dit is helaas niet het geval waardoor er soms een afweging gemaakt moet worden tussen kracht en snelheid. Indien beide snelheid en kracht toch vereist zijn gaat de elektrische actuator groter zijn dan de pneumatische actuator waardoor mogelijks meer delen van de machine aangepast moeten worden.

Een volledig andere optie is het compleet herontwerpen van een bepaalde functie maar dit ontwerp is anders voor elke machine en elke actuator waardoor de complexiteit weer stijgt. Toch kan dit ook in het voordeel van elektrische actuatoren spelen. Indien een bepaalde functie van een pneumatische actuator ook volbracht kan worden door een draaibeweging, is er geen

omvorming van de draaibeweging naar een lineaire beweging nodig waardoor het elektrisch alternatief mogelijk is een voordeel heeft.

Dit hoofdstuk bespreekt het ontwerp van een elektrisch alternatief. Een optie is om voor elke actuator apart een ontwerp uit te werken, maar voor IPTE is het waardevoller om een meer universeel ontwerp te hebben per soort actuator. Daarom worden de actuators eerst opgedeeld in categorieën waarna per categorie ontwerpeisen opgesteld kunnen worden.

5.1 Functioneel categoriseren actuators

De pneumatische actuators kunnen ingedeeld worden op basis van hun functie. Veel functies komen meerdere keren terug in de verschillende machines. Het is niet altijd nodig om de exacte beweging van een pneumatische actuator na te bootsen. Indien eenzelfde functie volbracht kan worden met een andere beweging of mechanisme is dit ook goed. De verschillende functies zijn:

- **Printplaat *pusher***

Deze actuator is een dubbelwerkende zuigerstangloze cilinder met een slede. De bedoeling van deze actuator is om een printplaat uit of in een printplathouder te duwen of trekken.

- **Printplaat *pusher* draaifunctie**

Deze actuator is een kleine dubbelwerkende zuigerstangcilinder. Deze zorgt ervoor dat de printplaat *pusher* uit de weg draait wanneer deze niet nodig is. Het maakt deel uit van de functie “printplaat in of uit een houder duwen”. Deze functie moet goed samenwerken met de printplaat *pusher*.

- **Tray *pusher***

Deze actuator is een dubbelwerkende zuigerstangloze cilinder met een slede en duwt *trays* uit een houder maar moet de *trays* niet terug in de houder kunnen trekken.

- **Tray klem cilinder**

Deze actuator is een dubbelwerkende zuigerstangcilinder. De actuator klemt een individuele *tray* langs twee zijdes zodat deze verticaal of horizontaal verplaatst kan worden.

- **Grote *stack* lift**

Dit is een grote dubbelwerkende zuigerstangloze cilinder met een slede. Deze cilinder dient om een *stack* van maximaal tien *trays* mee omhoog te tillen over een afstand van 350 *mm*. Het is een krachtige cilinder.

- ***Semi-rotary Drive***

Dit is een draai-actuator waarmee een printplaat gedraaid wordt. De printplaat kan 90° of 180° horizontaal gedraaid worden of 180° verticaal gedraaid worden. De printplaat bevindt zich nog in een assemblage die ook meegedraaid moet worden.

- **Slede cilinder**

Dit is een grote dubbelwerkende zuigerstangloze cilinder met een slede. Deze dient om grote assemblages te verplaatsen.

- **Cilinder *slidedoor***

Deze actuator is een dubbelwerkende zuigerstangcilinder. Deze actuator bedient een deurtje dat verticaal op en neer gaat. De cilinder is krachtbeperkt zodat een hand niet gekwetst kan worden indien deze onder het deurtje komt.

- **Cilinder kleine slag klem**

Dit is een dubbelwerkende zuigerstangcilinder met een kleine slag. Deze actuator wordt gebruikt om objecten op de gewenste positie vast te klemmen.

- **Cilinder grote slag klem**

Dit is een dubbelwerkende zuigerstangcilinder met een grote slag. Deze actuator wordt gebruikt om objecten uit te lijnen tot op de gewenste positie en dan vast te klemmen.

- **Stopper cilinder**

Dit is een dubbelwerkende zuigerstangcilinder met een kleine slag. Deze actuator blokkeert het pad van een bewegend object en positioneert het object op deze manier. Daarna beweegt de cilinder weg uit het pad van het object zodat deze verder kan bewegen.

- ***Locking* cilinder**

Dit is een dubbelwerkende zuigerstangcilinder met een kleine slag. Deze actuator blokkeert grote verticaal bewegende massa's bij stilstand. In het geval van een stroomuitval valt de massa niet naar onder omdat de *locking* cilinder dit blokkeert. De actuator draagt de massa van de massa radiaal.

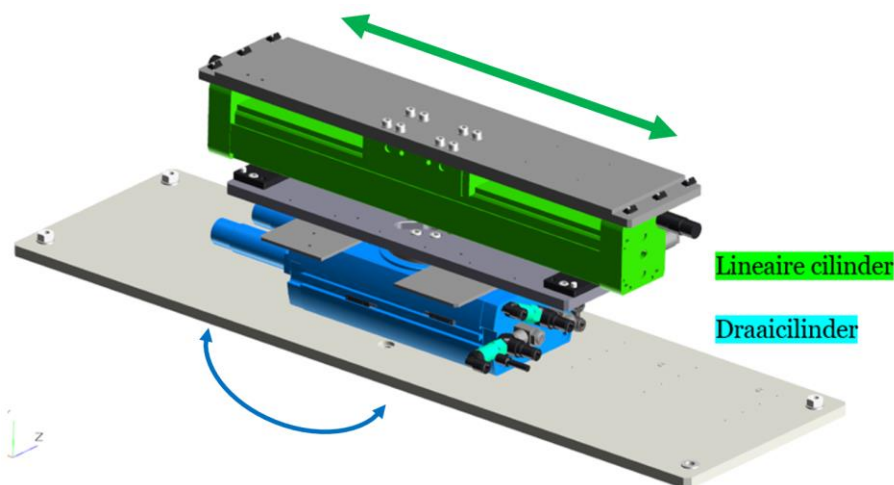
5.2 Ontwerp elektrische alternatieven

Om een goed ontwerp te maken zijn er een aantal streefdoelen opgesteld. Aangezien de prijs van de elektrische variant competitief moet zijn met de pneumatische tegenhanger dient de elektrische variant zo goedkoop mogelijk te zijn. Om een betrouwbare functie te ontwerpen wordt er gestreefd naar een beperkt aantal bewegende onderdelen zodat er minder faalpunten zijn. Pneumatische componenten zijn zeer compact, de elektrische variant zal ook naar een zo compact mogelijke versie streven. Per actuator zijn er ook individuele eisen die verder ook besproken worden.

5.2.1 Semi-Rotary drive

Het elektrisch alternatief moet mechanisch equivalent zijn aan de pneumatische draaicilinder. Dit betekent dat eerst de nodige mechanische specificaties opgezocht worden. De beschouwde actuator is de draaicilinder *DRRD – 40 – 180 – FH – Y14A* (zie Figuur 31) (zie Bijlage B) [26]. De as van de actuator is hol zodat er bekabeling door geleid kan worden. Het elektrisch alternatief moet eenzelfde koppel en snelheid behalen. Deze worden opgezocht in de datasheets. De elektrische actuator moet ook een instelbaar bewegingsprofiel hebben en een krachttuitlezing is gewenst.

De draaicilinder maakt deel uit van de *ATU_AP0028*. Het heeft als functie een lineaire slede cilinder en bijhorende assemblage te roteren. De lineaire slede cilinder heeft als functie een assemblage lineair te bewegen. Figuur 30 toont de verschillende actuatoren van de ATU en de bijhorende bewegingen.



Figuur 30: ATU Bewegingsmechanismes

Semi-Rotary drive DRRD – 40 – 180 – FH – Y14A :

Theoretisch koppel bij 0,6 MPa (6 bar, 87 psi) = 24,1 nm

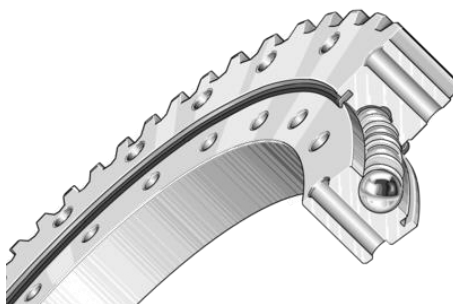
Gewenste draaisnelheid : 90° in 0,5 sec = 30 tpm



Figuur 31: Draaicilinder DRRD-40-180-FH-Y14-A

Ontwerp 1: *Slewing gear*

Dit ontwerp is gebaseerd op een *slewing gear* aangedreven door een stappenmotor. Een *slewing gear* is een tandwiel gecombineerd met een rollager. Het heeft een vast gedeelte, in dit geval de binnenring en een bewegend gedeelte, in dit geval de buitenring of het tandwiel (zie Figuur 32). Dit soort tandwielen zijn vaak terug te vinden in automatisch roterende zonnepanelen. Gekende producenten zijn: Schaeffler Medias en Qibr Bearings [61], [62].



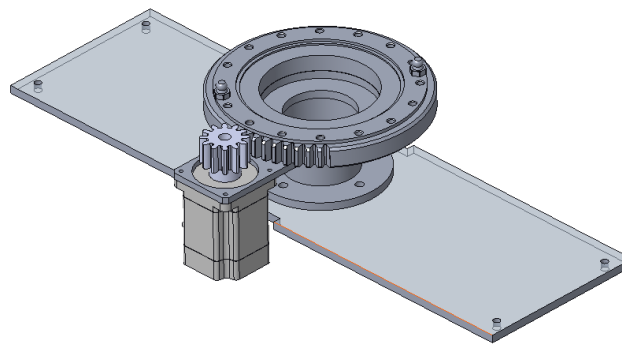
Figuur 32: Voorbeeld slewing gear [63]

Stappenmotoren zijn motoren met een hoog koppel bij lage snelheden en een goed dynamisch gedrag, ideaal voor deze toepassing aangezien de actuator maar maximaal 180° zal draaien voordat deze terug tot stilstand komt. Stappenmotoren kunnen ook een hoge positienauwkeurigheid behalen. Om een *closed loop feedback* systeem te hebben is wel nog

een extra positiesensor nodig. Figuur 33 toont een mogelijk ontwerp met deze componenten. De basisplaat is een basis overgenomen van de huidige pneumatische machine.

- + Het voordeel van dit ontwerp is dat er geen ingewikkelde componenten ontworpen moeten worden en de kost zo laag mogelijk gehouden kan worden. *Slewing gears* zeer stijf, dit is belangrijk voor een dynamische last. Het ontwerp vereist minimale aanpassingen aan de huidige structuren.
- Het nadeel van dit ontwerp is dat de tandwielen van een smering moeten voorzien zijn om slijtage te beperken. Tandwielen zijn ook minder geschikt voor het dynamisch gedrag van deze toepassing aangezien tandwielen geen schokken kunnen opvangen.

Dit ontwerp vergt een grote inbouwruimte maar dit vormt geen probleem aangezien de voetprint van de pneumatische variant niet veel kleiner is.



Figuur 33: Ontwerp slewing gear

De motor en *slewing gear* zijn in dit ontwerp al correct geschaald. Afhankelijk van de inbouwruimte kan de tandwielverhouding variëren. Dit ontwerp vertrekt van een *slewing gear* (VA140188 – V – VSP) met een buitendiameter van 260mm en 62 tanden (zie Bijlage E). Deze diameter past in de inbouwruimte [63]. Aangezien de snelheden beperkt zijn, is er geopteerd voor een grote tandwieloverbrengingsverhouding zodat de koppels wel voldoende hoog zijn om de dynamische werking te behouden. Het kleinst beschikbare tandwiel met eenzelfde tandwielmodulus als het *slewing gear* heeft 12 tanden en een modulus van 4mm.

De tandwieloverbrengingsverhouding is $12/62 = 0,2$ dit betekent dat het motorkoppel minstens $24,1 * 0,2 = 4,66$ nm moet bedragen. Het motortoerental dient dan minstens $30 / 0,2 = 150$ tpm te zijn. De PK299DW van Orientalmotors is een geschikte motor die ook nog in de inbouwruimte past (zie Bijlage F) [64]. Deze motor heeft ook een bijpassende motorbesturing.

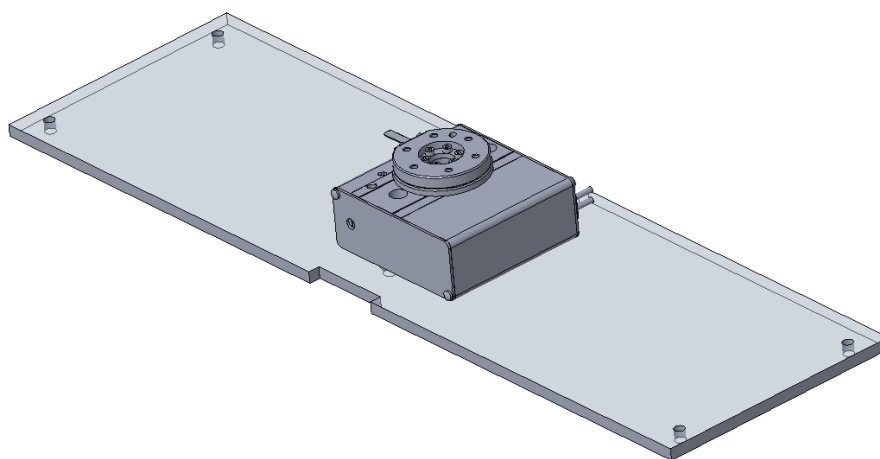
Ontwerp 2: tandriemschijf

Dit ontwerp functioneert op dezelfde wijze als ontwerp 1 maar in plaats van een tandwielaandrijving wordt nu gebruik gemaakt van een tandriem en tandriemschijf.

- + Het voordeel van een tandriem is het elastisch gedrag van de riem. De riem kan deels schokken opvangen in tegenstelling tot een tandwielaandrijving. Het ontwerp vereist minimale aanpassingen aan de huidige structuren.
- Het nadeel van deze oplossing is dat er een zeer grote tandriemschijf nodig is om een gepaste overbrengingsverhouding te bekomen. Deze grote schijven zijn niet eenvoudig commercieel beschikbaar. Een ander nadeel is de afwezigheid van een holle as. Een duur lagerhuis is nodig om deze constructie stabiel genoeg te maken.

Ontwerp 3: SMC *turntable*

SMC fabriceert elektrische draai-actuatoren specifiek om de pneumatische versies te vervangen. Dit soort actuator wordt ook wel een *turntable* of *rotary table* genoemd. De *LER50K* van SMC voldoet aan de juiste toerentallen en koppels waardoor deze perfect geschikt is als elektrische variant (zie Bijlage G). De inbouwruimte is beperkt en een holle as voor kabelgeleiding is voorzien. Figuur 34 toont de opstelling voor deze actuator. Deze actuator heeft ook een bijhorende motorbesturing, Een bewegingsprofiel instellen is mogelijk, maar zonder krachtmeting.



Figuur 34: SMC *turntable*

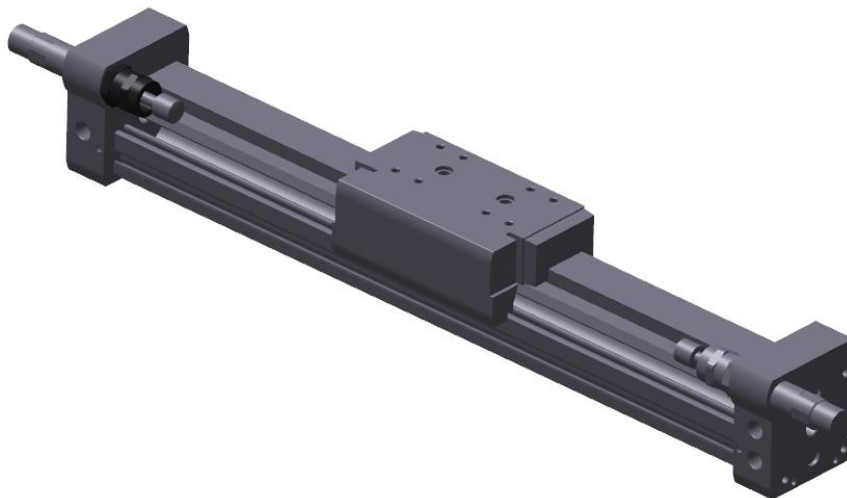
5.2.2 Slede cilinder

De beschouwde cilinder is een dubbelwerkende zuigerstangloze slede cilinder *DGC – 25 – 260 – KF – YSRW – A* (zie Bijlage H) in de *ATU_AP0028*. De cilinder die dient om een assemblage lineair te bewegen over een afstand van 355 mm (zie Figuur 30). De cilinder en de assemblage zelf maken een draaibeweging aan de hand van de *semi-rotary drive* die besproken werd in paragraaf 5.2.1. De beweging is zeer dynamisch, hier moet de actuator op voorzien zijn. De elektrische variant moet dezelfde krachten en snelheden behalen als de pneumatische actuator. Een instelbaar bewegingsprofiel is vereist voor deze toepassing aangezien dit een hoog dynamische toepassing is met veel versnellingen.

Pneumatische slede cilinder DGC-25-260:

Kracht bij $0,6\text{ MPa}$ (6 bar , 87 psi) = 295 N

Gewenste snelheid : $355\text{ mm in } 1\text{ sec} = 355\text{ mm/sec}$

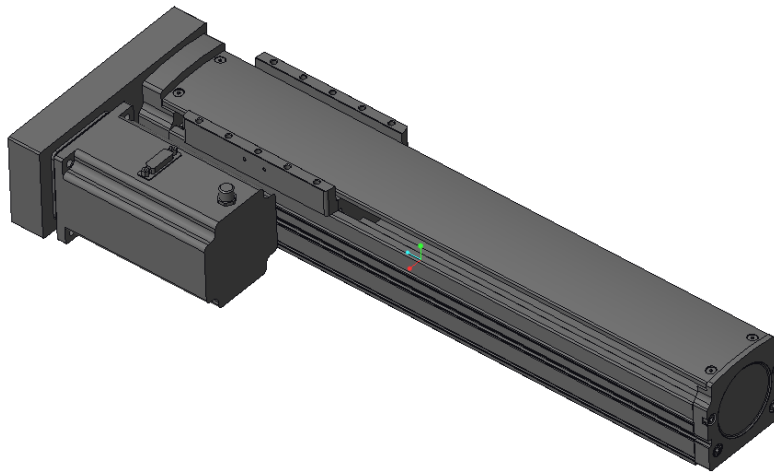


Figuur 35: Slede cilinder DGC-25-260

Ontwerp 1: Lineaire aandrijving met slede van Festo

Deze actuator van Festo is een combinatie van onderdelen. De Festo catalogus maakt het eenvoudig om de correct aansluitende onderdelen te selecteren. De geselecteerde lineaire slede is de *ELGT-BS-90-350-20* (zie Bijlage I) en werkt op basis van een draadspil. Een andere optie is een tandriem aandrijving maar hier zijn de aandrijfkrachten beperkt. Een tandriem aandrijving kan wel hogere snelheden behalen maar deze zijn hier niet nodig.

De maximale aandrijfsnelheid van de geselecteerde lineaire slede is 1 m/sec , dit is voldoende hoog. De geselecteerde bijhorende motor is de *EMCA – EC – 67* (zie Bijlage J). Deze motor is compatibel met de lineaire slede, kan de gepaste snelheden en koppels leveren en heeft een geïntegreerde motorbesturing. Om in de inbouwruimte te passen in een tandwielkast nodig waarmee de motor parallel langs de slede geplaatst kan worden. De geselecteerde tandwielkast is de *AMM – U – 87 – T46 – 67A – 114* (zie Bijlage K). Figuur 36 toont de samenstelling van al deze onderdelen. Merk op dat de afgebeelde motor niet de werkelijke motor is vanwege een onbereikbaar 3D model.



Figuur 36: Assemblage lineaire slede aandrijving

Zoals eerder vermeld in paragraaf 5.2.1 roteert deze lineaire actuator. Door de asymmetrie van de actuator ontstaat er een onevenwicht. Dit kan opgelost worden door een tegengewicht te installeren of de assemblage als een soort tegengewicht te gebruiken door deze niet te centreren bij het roteren.

5.2.3 Stopper/locking cilinder

Ontwerp 1: TLX Technologies lock

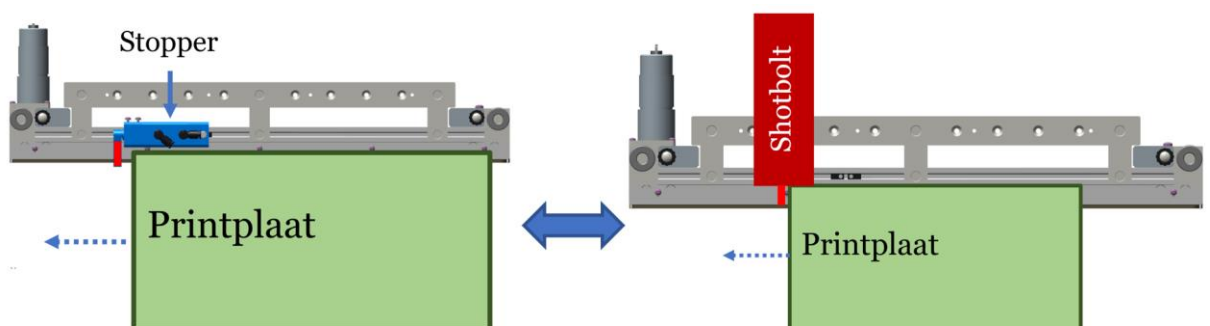
De *Shotbolt* is een product van TLX Technologies dat kan functioneren als stopper maar ook als *locking* cilinder, het is ontworpen om hoge radiale krachten (tot 450 kg) op te vangen [65]. De *Shotbolt* kan uitgerust worden met verschillende accessoires om aan de situatie aan te passen. Zo kan er bijvoorbeeld een rubberen omhulsel aan de ijzeren kern worden bevestigd om harde schokken enigszins te dempen. Deze actuator is uitgerust met een instabiele

solenoiden waardoor de actuator geen energie verbruikt wanneer de ijzeren kern niet beweegt. Figuur 37 toont een voorbeeld van een *Shotbolt*.



Figuur 37: Shotbolt locking of stopper actuator [65]

- + Het voordeel van deze actuator is dat het geen energie verbruikt wanneer deze niet in beweging is (in tegenstelling tot een monostabiele solenoïde). Het is een zeer eenvoudig en robuust ontwerp. Het kan uitgerust worden met accessoires afhankelijk van de toepassing.
- Het nadeel is dat de *shotbolt* lang is en de inbouwruimtes anders benut worden. In de machines van IPTE worden de meeste stoppers in de lengte van de printplaattransportbaan geplaatst. De printplaten bewegen langs de lengte van de actuator en botsen tegen een aanslag. Figuur 38 biedt verduidelijking.



Figuur 38: Stopper inbouwruimte versus shotbolt inbouwruimte

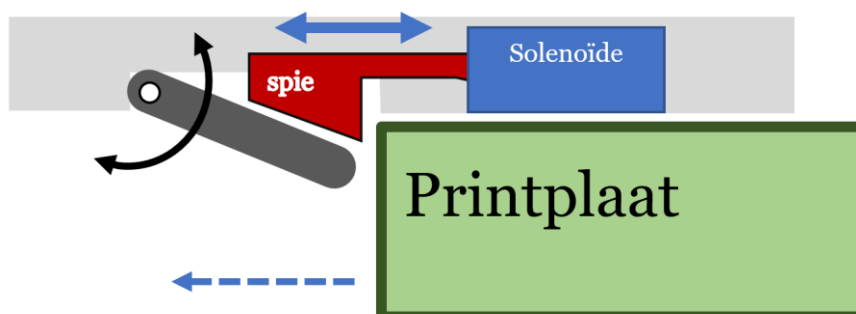
De “*Low-Profile Latching Solenoid Lock*” van TLX Technologies kan een oplossing bieden voor het inbouwruimte probleem [66] (zie Figuur 39). De aanslag ligt hier wel in de lengte van de actuator. Deze actuator heeft ook een laag verbruik door gebruik te maken van een bistabiel solenoïde.



Figuur 39: Low-Profile Latching Solenoid Lock [66]

Ontwerp 2: solenoïde met spie

Dit ontwerp voert alle grote krachten en stoten door naar een component dat hierop ontworpen kan worden terwijl de aansturing kan gebeuren met lager krachten. Een bistabiel solenoïde beweegt een spie waardoor een blokkeerpin in het pad van de printplaat bewogen wordt (zie Figuur 40). De pin is bevestigd op een scharnier dat de nodige krachten kan opvangen. De pin wordt ook lichtjes tegen gehouden met een veer zodat de pin niet vanzelf open kan scharnieren en zodat de pin weg beweegt zodra de spie terug trekt.



Figuur 40: Stopper spie principe

Ontwerp 3: Festo EFSD stopper

De Festo EFSD is een compacte stopper actuator die eenvoudig te besturen is en geen energie verbruikt in stilstand [47]. Het heeft een instelbare damping waardoor dit zeer geschikt is voor delicate applicaties. De actuator heeft enkel een klein aanslag oppervlakte vergeleken met de ontwerp 1 en 2. Hierdoor dient de stopper vlak naast de printplaat geplaatst te worden, dit is niet altijd mogelijk voor de machines van IPTE.

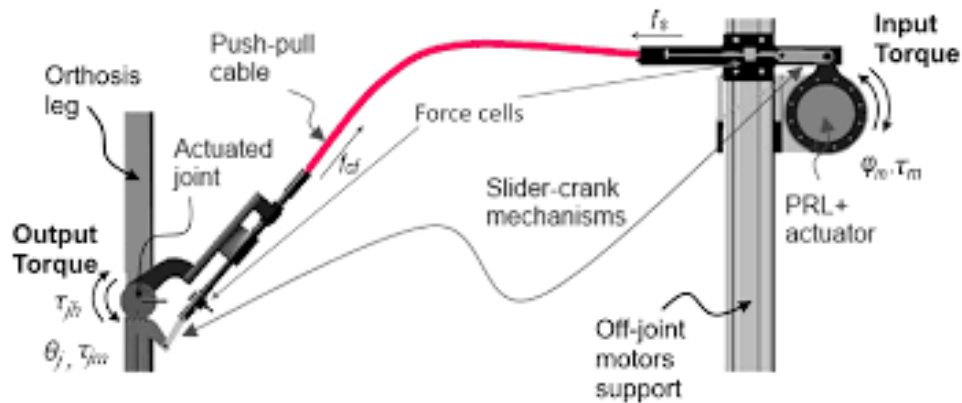


Figuur 41: Festo EFSD stopper [47]

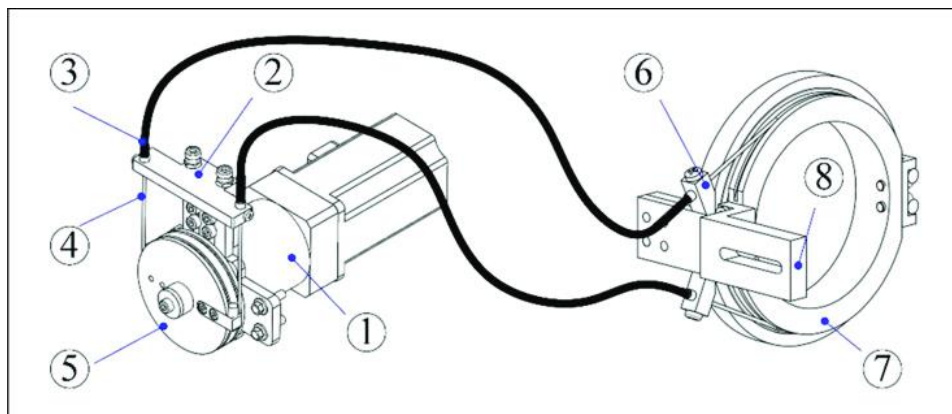
5.2.4 Algemene oplossing

Het groot voordeel van pneumatische actuatoren tegenover elektrische actuatoren is dat ze compact uitgevoerd kunnen worden. Dit komt omdat de krachtbron (de compressor) verwijderd kan staan van de beweging (de actuator). Commercieel beschikbare elektrische actuatoren plaatsen de krachtbron (de motor) telkens vlak naast de beweging. Hierdoor zijn de elektrische actuatoren minder compact en vaak niet geschikt als rechtstreekse vervanging voor een pneumatische actuator.

Een Bowdenkabel is een flexibele buis met hierin een vrij bewegende kabel. Dit soort kabel wordt gebruikt om bijvoorbeeld te schakelen of te remmen op een fiets. Het verplaatst de mechanische arbeid door een buis naar een verder gelegen locatie net zoals een pneumatische luchtleiding. Exact hetzelfde principe kan gebruikt worden voor de machines van IPTE: de actuator wordt verbonden met de vrij bewegende kabel en de kabel wordt geleid naar een plek in de machine waar er meer inbouwruimte is, daar wordt de kabel aangesloten op een motor. Het principe is niet nieuw en wordt onderzocht om toe te passen in robotarmen waar zoveel mogelijk gewicht in de gewrichten bespaard moet worden. Figuur 42 en Figuur 43 tonen een voorbeeld van de werking van het concept.



Figuur 42: Testopstelling Bowdenkabel aandrijving [67]



Figuur 43: Schema van het Bowdenkabel aandrijfsysteem (1-Servomotor en planetaire reductor; 2-Voorspanningsapparaat; 3-Buitenmantel; 4-Binnenkabel; 5-Proximale katrol; 6-Kabelsteunen; 7-Distale katrol; 8-actuatorverbinding) [68]

Een groot nadeel van dit concept is de wrijving van de kabel met het omhulsel. Er zijn veel factoren die hier invloed op hebben: Kabelconstructie, diameter van de kabel, manteldikte, kabel- en mantelmateriaal, buigingshoek, voorspanning en kabelsnelheid [69]. Deze paper gaat hier niet in detail op in. Wanneer al deze parameters correct geschaald worden zodat de wrijving beperkt blijft is dit een mogelijke oplossing voor veel actuatoren. Een kleinere buighoek, grotere kabeldiameter, grotere manteldikte, een materiaal met kleine wrijvingscoëfficiënt en beperkte kabelsnelheden helpen allemaal de krachtoverdrachthefficiëntie [69], [70].

- + Het voordeel van dit soort aandrijving is dat de krachtbron van de beweging gedistantieerd kan worden, de beweging compact uitgevoerd kan worden, het een flexibel ontwerp is (kan eenvoudig aangepast worden voor andere scenario's), er grote en kleine bewegingen zijn mogelijk en het is een goedkope bewegingsoverbrenging (in vergelijking met spindellassen en tandriemoverbrengingen).

- Nadelen zijn: het is experimenteel, nog niet extensief getest op slijtage, relatief grote wrijving ten opzichte van bijvoorbeeld een katrolsysteem, geen kant-en-klare aankoop componenten, minder nauwkeurig dan traditionele elektrische actuatoren en de motor moet bekrachtigd blijven om de actuatorkracht te behouden.

Het grote wrijvingsnadeel kan gecompenseerd worden door een motor te selecteren met een hoger vermogen. Deze neemt meer inbouwruimte in maar dit vormt geen probleem door de distantiering van de beweging.

5.3 Prijsvergelijking elektrische alternatieven

Deze paragraaf onderzoekt hoeveel duurder of goedkoper de initiele investering is voor elektrische alternatieven. De actuatoren die vergeleken worden zijn mechanisch equivalent of overstijgen zelfs de toepassing. Soms is er geen exact mechanisch equivalent elektrisch alternatief en is de gevonden actuator eigenlijk overgekwalificeerd, soms is de huidige pneumatische actuator overgekwalificeerd en kan een goedkoop elektrisch alternatief gevonden worden. De prijs van zowel pneumatische als elektrische varianten zijn niet exact bepaald in deze paragraaf wegens de vele variabelen (zoals extra opties en confidentialiteit), maar worden wel benaderd om toch een beeld te schetsen van het prijsverschil. De prijzen van de elektrische actuatoren die hier getoond worden zijn de gemiddelde huidige prijzen die online te vinden zijn. Indien de prijzen niet exact te vinden zijn worden gelijkaardige componenten opgezocht. Indien de prijzen helemaal niet te vinden zijn, is hier geen vergelijking van gemaakt.

Tabel 9: Vergelijking pneumatische en elektrische actuatoren

Pneumatische actuator	prijs	Elektrisch alternatief	prijs
draaiclinder	705 €	<i>Slewing gear</i> (tandwiel + motor)	1000 € + 200 € = 1200 €
		<i>SMC turntable</i>	1150 €
linneaire cilinder	447 €	lineaire slede + motor + tandwielkast	1.570 € + 1900 € + 350 € = 3800 €
Stopper cilinder	100 €	Festo EFSD	1000 €
		Solenöide	100 €

Er is geen duidelijk verband tussen de verschillende prijscategorieën, enkel dat de elektrische variant gewoonlijk duurder is. Wat deze tabel toont is dat het belangrijk is om goed te onderzoeken wat de noden zijn voor de applicatie en deze niet overstijgen. Zo is de Festo EFSD bijvoorbeeld een technologisch zeer geavanceerd maar dezelfde functie kan volbracht worden met een solenoïde. De lineaire elektrische actuator is 8 keer zo duur als de pneumatische tegenhanger maar deze actuator kan ook nauwkeuriger gepositioneerd en bestuurd worden dan de pneumatische variant, maar dit is niet nodig voor deze toepassing. De hoge vereiste stijfheid van de elektrische actuator wel nodig. Tijdens het onderzoek naar elektrische alternatieven is dit een vaker voorkomend probleem geweest: Bedrijven verkopen elektrische alternatieven die de pneumatische variant overstijgen op veel aspecten maar dit vertaalt zich ook in de prijs van de actuator.

6 Bepaling rentabiliteit

Nu een ontwerp geselecteerd is en het pneumatisch en elektrisch verbruik van beide actuatoren gekend is, kan de rentabiliteit onderzocht worden. Door de totale eigendomskosten van beide opties te vergelijken wordt afgeleid welke optie uiteindelijk goedkoper is en of de investering voor een elektrisch alternatief voordelig is.

6.1 Totale eigendomskost

De totale eigendomskost of de “*Total Cost of Ownership*” (TCO) van beide opties is de initiële investeringskost plus de jaarlijkse verbruikskosten. Deze stijgt continu.

$$TCO = \text{initiële investering} + \text{Kost per jaar} * \text{\#werkjaren}$$

(22)

Voor zowel het pneumatisch als het elektrisch alternatief dienen de initiële en verbruikskosten gekend te zijn. Wanneer beide TCO's geplot worden in een grafiek wordt het duidelijk welke optie voordeliger is, vanaf wanneer deze voordeliger is en hoeveel men bespaart op de levensduur van de machine.

6.1.1 Pneumatische TCO

De verbruikskosten voor alle actuatoren zijn eerder berekend in paragraaf 2.6.2 en worden hier nogmaals gebruikt. De initiële investeringskosten van een bepaalde actuator is niet exact berekenbaar. Deze kosten bedragen alle kosten van de pneumatische componenten die nodig zijn om een bepaalde actuator te bekrachtigen. Dit houdt in: de aankoopkost van de actuator, de bijhorende leidinglengtes, koppelingen en magneetventielen. Ook de luchtfilters en drukregelingen zijn een aanzienlijke kost. Indien een pneumatische machine volledig elektrisch uitgevoerd wordt spelen deze kosten ook een rol. Ter eenvoud is de kostensom van alle pneumatische componenten voor elke machine gemaakt en gedeeld door het aantal actuatoren. Zo is er een gemiddelde extrakost per actuator. Deze kost is slechts een benadering, maar niet verwaarloosbaar. De Excel-berekening geeft de flexibiliteit om deze extra kost mee te rekenen of niet.

6.1.2 Elektrische TCO

De verbruikskosten van een elektrische actuator zijn eerder in paragraaf 3.4 bepaald. Dezelfde methode wordt hier gebruikt. De initiële investeringskosten bedragen alle materiaalkosten en ontwikkelingskosten: aankoopdelen, materiaalkosten, materiaalbewerkingskosten en ingenieurskosten. Al deze kosten zijn van veel factoren afhankelijk onder andere van de seriegrootte en het gekozen ontwerp. Deze masterproef gaat niet verdiepen in dit soort exacte kostenanalyse, maar een schatting is wel mogelijk door enkel met de aankoopkosten te rekenen. In het Excel rekenblad is de initiële kost een variabele parameter.

6.2 Rekenblad: TCO

Het eerder besproken Excel document (zie paragraaf 4.3) wordt hier verder uitgebreid met nog een TCO-berekening volgens vergelijking (22). Het rekenblad is uitgerust met verschillende instelbare parameters die ook verder verklaard worden.

6.2.1 Voorbeeld draai-actuator

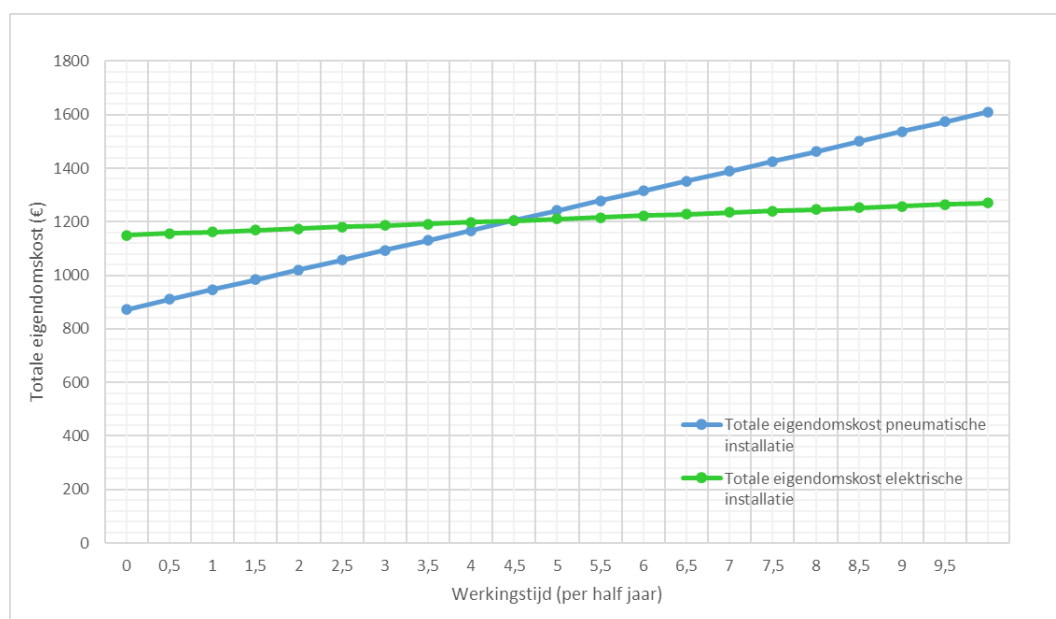
Ter voorbeeld wordt de draai-actuator van de *ATU_AP0028* beschouwd. De initiële kosten zijn gekend (maar confidentieel) en de verbruikskosten zijn gekend. Deze pneumatische actuator wordt vergeleken met de elektrische oplossing van Ontwerp 3, de SMC *turntable*. Van de *turntable* zijn de initiële kosten gekend (1150€ excl. btw.) en de verbruikskosten worden berekend rekening houdend met het actuator rendement. Dit actuator rendement is niet gegeven in de datasheet, maar het type motor en de verschillende overbrengingen zijn wel vermeld. De motor is een stappenmotor met een gemiddelde efficiëntie van 65%. De eerste overbrenging is een tandriemoverbrenging met een efficiëntie van 95%. Dit wordt gevolgd door een enkele wormwieloverbrenging met een efficiëntie van 90% [71]–[73]. Het product van deze efficiëntie geeft een totale efficiëntie van 56%.

Om de totale eigendomskostberekening uit te voeren worden eerst alle relatieve gegevens verzameld vanuit het rekenblad dat in paragraaf 4.3 besproken wordt. Via een slicer worden de gewenste gegevens gefilterd (zie Figuur 44). De waardes gerelateerd met pneumatische actuatorprijzen zijn aangepast met een onbekende factor wegens confidentialiteit.

Actuator vermogen (Watt)	5,55		
Actuator rendement	0,56		
kost elektrische componenten (€)	1150		
kost elektrische energie per jaar (€)	12,04		
kost pneumatische componenten MET extra kost (€)	872,81		
Kost per jaar incl. installatie (luchtprijs) (€)	73,74		
Werkjaar	Totale eigendoms kost pneumatische installatie	Totale eigendoms kost elektrische installatie	Besparing
0	872,81	1150,00	-277,19
0,5	909,68	1156,02	-246,34
1	946,55	1162,04	-215,49
1,5	983,41	1168,06	-184,65
2	1020,28	1174,08	-153,80
2,5	1057,15	1180,10	-122,95
3	1094,02	1186,12	-92,10
3,5	1130,89	1192,14	-61,25
4	1167,75	1198,16	-30,41
4,5	1204,62	1204,18	0,44
5	1241,49	1210,20	31,29
5,5	1278,36	1216,22	62,14
6	1315,23	1222,24	92,99
6,5	1352,09	1228,26	123,83
7	1388,96	1234,28	154,68
7,5	1425,83	1240,30	185,53
8	1462,70	1246,32	216,38
8,5	1499,57	1252,34	247,23
9	1536,43	1258,36	278,07
9,5	1573,30	1264,38	308,92
10	1610,17	1270,40	339,77

Figuur 45: Overgenomen parameters en totale eigendomskosten per half jaar (draai-actuator)

De totale eigendomskosten in de tabel in Figuur 45 worden voor beide situaties geplott in een grafiek (zie Figuur 46).



Figuur 46: Totale eigendomskosten (pneumatisch en elektrisch) in functie van werktijd per half jaar (draai-actuator)

Figuur 46 toont het resultaat voor het voorbeeld van de ATU draai-actuator met bijhorende parameters. De totale eigendomskosten van een pneumatische installatie zijn na 4,5 jaar duurder dan het elektrisch alternatief. Figuur 45 toont een besparing van 338,77€ op 10 jaar tijd. Natuurlijk kan deze waarde variëren afhankelijk van de ingestelde bedrijf- en machineparameters

6.2.2 Voorbeeld slede cilinder

Een ander voorbeeld is de slede cilinder van de ATU. Deze cilinder verbruikt relatief veel ten opzichte van andere actuatoren van IPTE en heeft een jaarlijkse kost van 428€ (machine instellingen zijn dezelfde als in paragraaf 4.4)4.2. De geselecteerde oplossing werd besproken in paragraaf 5.2.2. Figuur 47, Figuur 48 en Figuur 49 tonen dezelfde gegevens als eerder besproken.

Machine code	Omschrijving	ItemNo
ATU_AP0028_1 ATU	Slede cilinder	AIR.001565.1
ETH_AP0241_1 ETH ...		
FLU_AP0058_1 FLU		
MFT_AP0363_1 MFT		
MLL_AP0050_1 MLL...		
MLL_AP0065_1 MLL		

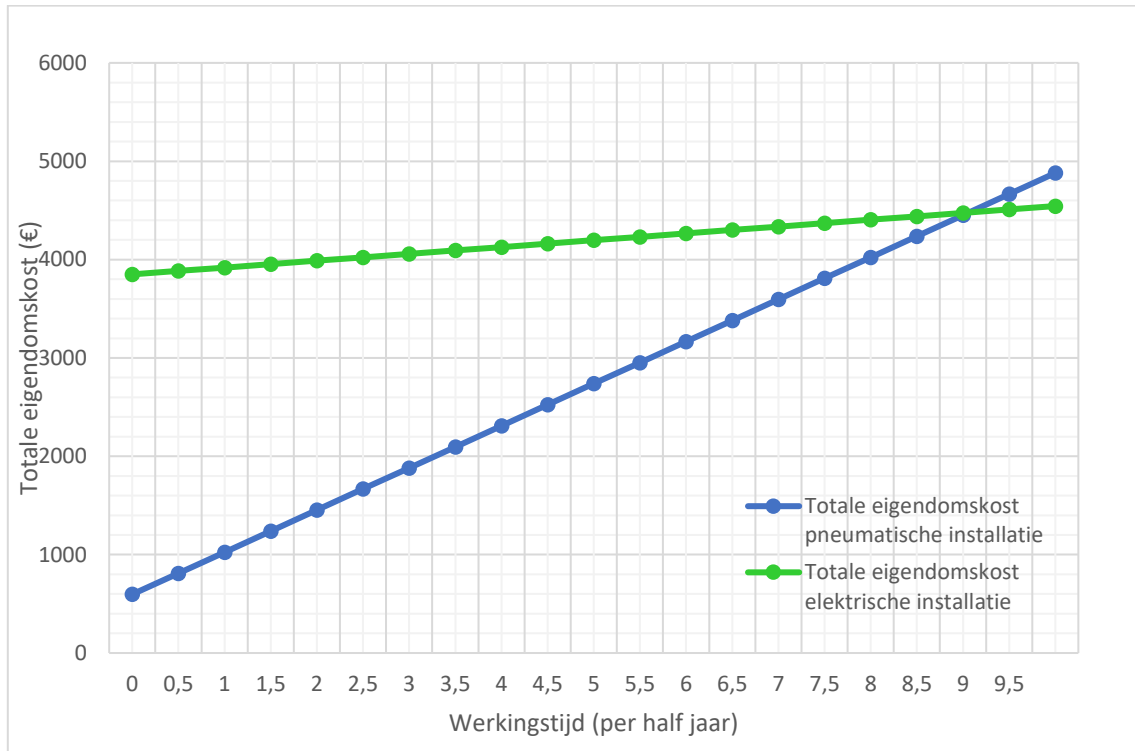
Machineprijs (pneaantal cilinders)	Som van Cilinderprijs (€)	Extra kost per cilinder (€)
1469,85	2	1135,14
		167,36

Rijlabels	Kost per jaar (n_inst) (€)	Kost per jaar incl. installatie (n_inst) (€)	Kost per jaar (luchtprijs) (€)	Kost per jaar incl. installatie (luchtprijs) (€)	P_gem (Watt)	Cilinderprijs (€)
Slede cilinder	353,38	479,16	315,88	428,32	32,00	429,69
AIR.001565.1	353,38	479,16	315,88	428,32	32,00	429,69
Eindtotaal	353,38	479,16	315,88	428,32	32,00	429,69

Figuur 47: Geselecteerde gegevens voor de totale eigendomskosten berekening (slede cilinder)

Actuator vermogen (Watt)	32	
Actuator rendement	0,56	
kost elektrische componenten (€)	3850	
kost elektrische energie per jaar (€)	69,42	
kost pneumatische componenten MET extra kost (€)	597,05	
Kost per jaar incl. installatie (luchtprijs) (€)	428,32	
Werkjaar ▼	Totale eigendomskost pneumatische installatie ▼	Totale eigendomskost elektrische installatie ▼ Besparing ▼
0	597,05	3850,00 -3252,95
0,5	811,21	3884,71 -3073,50
1	1025,37	3919,42 -2894,05
1,5	1239,52	3954,13 -2714,61
2	1453,68	3988,84 -2535,16
2,5	1667,84	4023,55 -2355,71
3	1882,00	4058,26 -2176,26
3,5	2096,15	4092,97 -1996,82
4	2310,31	4127,68 -1817,37
4,5	2524,47	4162,39 -1637,92
5	2738,63	4197,10 -1458,47
5,5	2952,78	4231,81 -1279,03
6	3166,94	4266,52 -1099,58
6,5	3381,10	4301,23 -920,13
7	3595,26	4335,94 -740,68
7,5	3809,41	4370,65 -561,24
8	4023,57	4405,36 -381,79
8,5	4237,73	4440,07 -202,34
9	4451,89	4474,78 -22,89
9,5	4666,05	4509,49 156,56
10	4880,20	4544,20 336,00

Figuur 48: Overgenomen parameters en totale eigendomskosten per half jaar (slede cilinder)



Figuur 49: Totale eigendomskosten (pneumatisch en elektrisch) in functie van werktijd per half jaar (slede cilinder)

Uit deze Figuur 49 wordt afgeleid dat het gevonden elektrisch alternatief na 9 jaar goedkoper is dan de pneumatische tegenhanger ondanks het grote aankooprijksverschil. Dit komt omdat het verschil in verbruik per jaar van de twee varianten groot is. Na 10 jaar is de uiteindelijke besparing 336€.

6.2.3 Voorbeeld stopper cilinder

Een laatste voorbeeld is een stoppercilinder van de MFT. IPTE gebruikt meerder stopper cilinders die allemaal gelijkaardig zijn in verbruik en investeringskost. De stopper cilinder van de MFT wordt vergeleken met de Festo EFSD (zie paragraaf 5.2.3). Het rendement van de actuator is niet exact gegeven en geschat op 70%. Bij zulke lage verbruiken is de invloed van dit rendement verwaarloosbaar. Figuur 50, Figuur 51 en Figuur 52 tonen dezelfde gegevens als eerder besproken.

Machine code

ATU_AP0028_1 ATU

ETH_AP0241_1 ETH ...

FLU_AP0058_1 FLU

MFT_AP0363_1 MFT

MLL_AP0050_1 MLL...

MLL_AP0065_1 MLL

Omschrijving

Stopper cilinder

ItemNo

AIR.001698.1

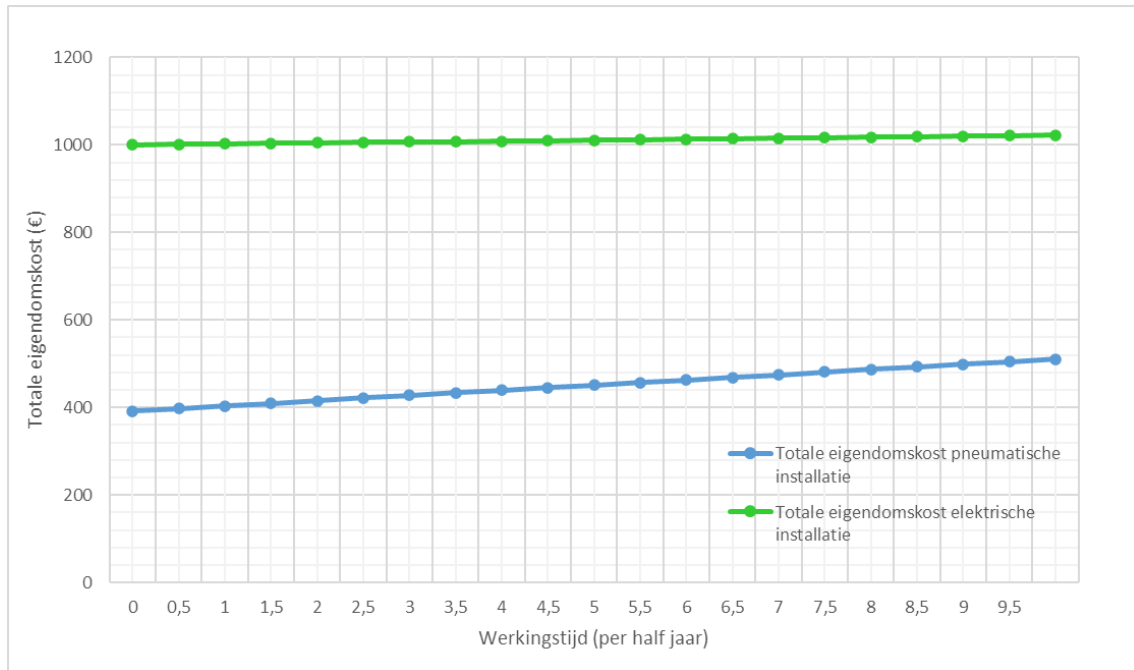
Machineprijs (pne aantal cilinders)	Som van Cilinderprijs (€)	Extra kost per cilinder (€)
747,61	2	89,02
		329,30

Rijlabels	Kost per jaar (n_inst) (€)	Kost per jaar incl. installatie (n_inst) (€)	Kost per jaar (luchtprijs) (€)	Kost per jaar incl. installatie (luchtprijs) (€)	P_gem (Watt)	Cilinderprijs (€)
Stopper cilinder	11,11	15,06	8,75	11,86	1,01	62,51
AIR.001698.1	11,11	15,06	8,75	11,86	1,01	62,51
Eindtotaal	11,11	15,06	8,75	11,86	1,01	62,51

Figuur 50: Geselecteerde gegevens voor de totale eigendomskosten berekening (stopper cilinder)

Actuator vermogen (Watt)	1,01		
Actuator rendement	0,7		
kost elektrische componenten (€)	1000		
kost elektrische energie per jaar (€)	1,75		
kost pneumatische componenten MET extra kost (€)	386,81		
Kost per jaar incl. installatie (luchtprijs) (€)	11,86		
Werkjaar ▼	Totale eigendomskost pneumatische installatie ▼	Totale eigendomskost elektrische installatie ▼	Besparing ▼
0	386,81	1000,00	-613,19
0,5	392,74	1000,88	-608,14
1	398,67	1001,75	-603,08
1,5	404,61	1002,63	-598,02
2	410,54	1003,50	-592,96
2,5	416,47	1004,38	-587,91
3	422,40	1005,25	-582,85
3,5	428,33	1006,13	-577,80
4	434,27	1007,00	-572,73
4,5	440,20	1007,88	-567,68
5	446,13	1008,75	-562,62
5,5	452,06	1009,63	-557,57
6	457,99	1010,50	-552,51
6,5	463,93	1011,38	-547,45
7	469,86	1012,25	-542,39
7,5	475,79	1013,13	-537,34
8	481,72	1014,00	-532,28
8,5	487,65	1014,88	-527,23
9	493,59	1015,75	-522,16
9,5	499,52	1016,63	-517,11
10	505,45	1017,50	-512,05

Figuur 51: Overgenomen parameters en totale eigendomskosten per half jaar (stopper cilinder)



Figuur 52: Totale eigendomskosten (pneumatisch en elektrisch) in functie van werktijd per half jaar (stopper cilinder)

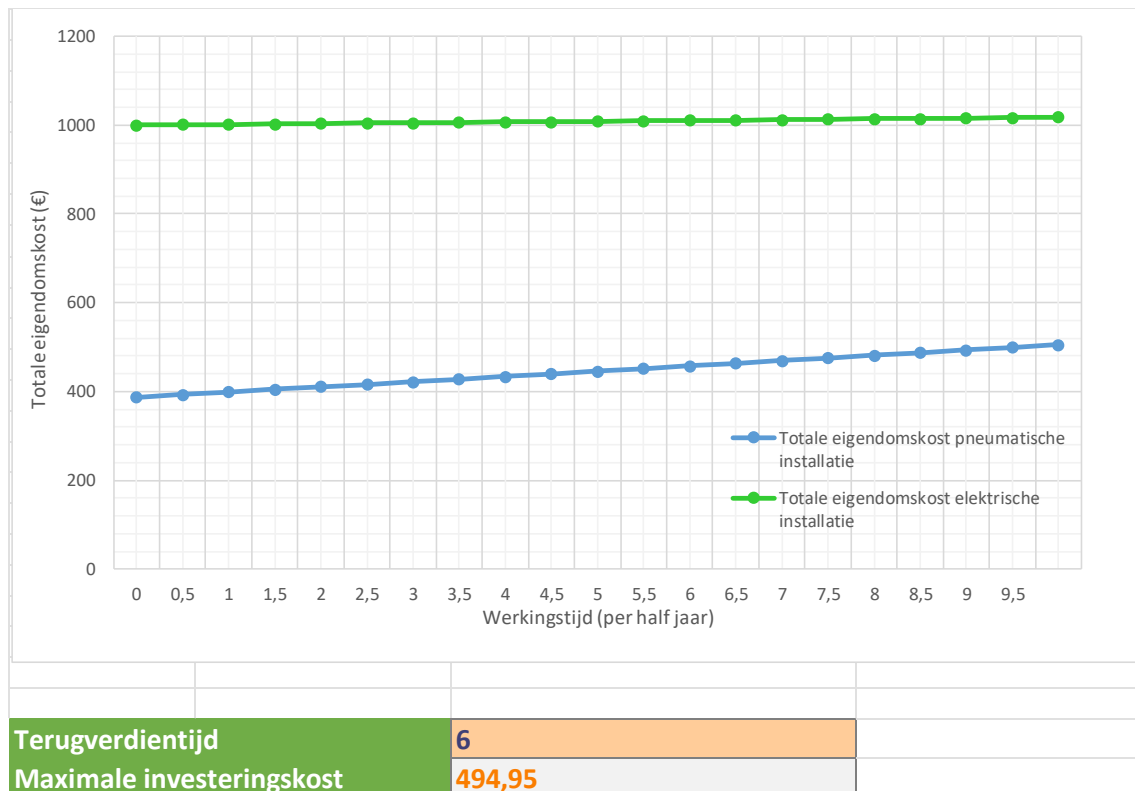
De totale eigendomskosten van de Festo EFSD zijn hoger dan die van de pneumatische stopper. De Festo EFSD is dus geen rendabele oplossing voor een simpele stopper. Het verbruik voor beide varianten is laag.

6.3 Maximale investering

Aan de hand van de totale eigendomskosten kan ook berekend worden wat de maximale initiële investeringskost is voor de elektrische installatie bij een gewenste terugverdientijd (mits een geschat actuatorrendement). Ook dit is verwerkt in het Excel rekenblad “TCO”. Het voorbeeld van de stopper cilinder is hier toegepast. Als voorbeeld is een terugverdientijd van zes jaar ingesteld. Vergelijking (23) toont de berekening die toegepast is in Excel.

$$\text{Maximale investeringskost (€)} = \text{Totale eigendomskost pneumatisch (€)} - \text{Terugverdientijd (jaar)} * \text{Kost elektrische energie per jaar (€)}$$

(23)



Figuur 53: Maximale investeringskost berekening (stopper cilinder)

Zoals te zien in Figuur 53 is de maximale investeringsprijs 494,95 € met een ingestelde terugverdientijd van zes jaar. Een simpele solenoïde zou dus wel een geschikte oplossing zijn.

7 Besluit

In deze masterproef werd een geparametriseerde automatische kostenanalyse van een pneumatisch systeem ontwikkeld en werden er potentiële elektrische alternatieven ontworpen. Aan de hand van de kostenanalyse kan worden bepaald of het elektrisch alternatief van een pneumatische aandrijving voor de machines en actuatoren van IPTE rendabel is.

Uit de resultaten is gebleken dat het mogelijk is om een volledig geparametriseerde automatische kostenanalyse te ontwikkelen en rendabele elektrische alternatieven te ontwerpen. De resultaten van deze kostenanalyse zijn situatieafhankelijk waardoor er geen definitief resultaat gegeven kan worden voor een bepaalde actuator.

De machines van IPTE verbruiken niet veel ten opzichte van een klein leidinglek of een blaaspistool. Daarom kan een klant van IPTE best eerst hun pneumatisch systeem optimaliseren en hun werkkraft sensibiliseren over de kosten van persluchtverbruik en -verspilling voordat er naar elektrische alternatieven gezocht wordt. Omdat hierdoor al grote besparingen verwezenlijkt kunnen worden. Indien een bedrijf al actief bezig is met het opsporen van lekkages en verbeteren van het pneumatisch systeem, kan er gezocht worden naar een elektrisch alternatief dat mogelijks goedkoper is.

Bibliografie

- [1] A. Copco, 'Energy-efficient industrial air compressors atlascopco', *Atlas Copco*. <https://www.atlascopco.com/en-lv/compressors/products/air-compressor> (geraadpleegd 16 november 2021).
- [2] 'Energy Tips – Compressed Air'. Geraadpleegd: 4 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/compressed_air1.pdf
- [3] A. T. GmbH, 'IPTE', *Company*. <https://www.ipite.com/company> (geraadpleegd 2 juni 2022).
- [4] 'Electric drives | Festo USA'. https://www.festo.com/us/en/c/products/industrial-automation/actuators-and-drives/electric-drives-id_pim205/ (geraadpleegd 2 juni 2022).
- [5] 'Electric Actuators - SMC'. https://www.smc.eu/no-no/products/featured-products/electric-actuators?keyword=&creative=597364386654&gclid=CjwKCAjwv-GUBhAzEiwASUMm4onVSImg-1q9jyISq4NAV4d9WUyxWdTDjP7AKbo_HMU6GrgBKfoNhoCdOIQAvD_BwE (geraadpleegd 2 juni 2022).
- [6] 'Linear motors - Electromagnetic direct drives | LinMot', *Linmot EN*. <https://linmot.com/products/linear-motors/> (geraadpleegd 25 november 2021).
- [7] 'High Speed Electric Linear Actuator, Ball Screw Actuator, Micro Linear Actuator, Motor', *Ultra Motion*. <https://www.ultramotion.com/linear-actuators/> (geraadpleegd 4 juni 2022).
- [8] 'Festo CO2-TCO | Festo BE'. https://www.festo.com/be/nl/s/co2-tco/?actuatorType=RODSTYLE_GUIDED&energyCost=0.1&mountingPosition=HORIZONTAL&movingLoad=4&stroke=50&utilizationDays=200&utilizationHours=8&utilizationMinutes=10 (geraadpleegd 2 juni 2022).
- [9] *QuickSearchPlus*. Festo. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.festo.com/quicksearch>
- [10] 'Rodless Pneumatic Cylinders'. Geraadpleegd: 23 mei 2022. [Online]. Beschikbaar op: https://www.parker.com/literature/Literature%20Files/pneumatic/Literature/Actuator-Cylinder/0900/0900P_Rodless.pdf
- [11] ATO.com, 'Working Principle of Solenoid Valve | ATO.com'. <https://www.ato.com/working-principle-of-solenoid-valve> (geraadpleegd 25 mei 2022).
- [12] 'Flow control valves'. Geraadpleegd: 22 december 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.festo.com/media/pim/369/D15000100122369.PDF>
- [13] 'VALVES | Elsevier Enhanced Reader'. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9780750671743500706?token=E7BA5F34D5B04A9D23231A92AED1FAFE6A88309383CEBF72A1F6B1DA438A643B8FB12B0041F08E92FC7F5AB72A4E0CF8&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211222105412> (geraadpleegd 22 december 2021).
- [14] Y. Shi, M. Cai, W. Xu, en Y. Wang, 'Methods to Evaluate and Measure Power of Pneumatic System and Their Applications', *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 32, nr. 1, p. 42, mei 2019, doi: 10.1186/s10033-019-0354-6.
- [15] 'Compressor persluchtsysteem zoveel mogelijk uit', *Stimular - De werkplaats voor duurzaam ondernemen*. <https://www.stimular.nl/maatregelen/compressor-zoveel-mogelijk-uit/> (geraadpleegd 23 december 2021).
- [16] 'Festo Energy Saving Services | Festo BE'. https://www.festo.com/be/nl/e/support/exploitatie-en-modernisering/energy-saving-services-id_21636/ (geraadpleegd 18 november 2021).
- [17] Koen Leeftang en Johan Depeyter, 'Festo: Webinar: Bepaal uw startpunt om het energieverbruik van perslucht te verminderen', Online, 28 april 2022.

- [18] 'How much could Electric Actuation save you? | Thomson Smart Actuator'.
https://www.thomsonlinear.com/micro/conversion_eng/savings_estimator.html
(geraadpleegd 21 mei 2022).
- [19] 'Hoeveel kost perslucht?', *EA Technical Services*.
<https://eatechnicalservices.be/tips/hoeveel-kost-perslucht> (geraadpleegd 23 december 2021).
- [20] C. Schmidt en K. Kissock, 'Modeling and Simulation of Air Compressor Energy Use'. 2005.
- [21] 'Luchtverzorging Festo4Students.pdf'. Geraadpleegd: 4 mei 2022. [Online]. Beschikbaar op: https://www.festo.com/net/nl-nl_nl/SupportPortal/Files/703392/Luchtverzorging%20Festo4Students.pdf
- [22] 'Pressure Loss from Fittings - Expansion and Reduction in Pipe Size | Neutrium'.
<https://neutrium.net/fluid-flow/pressure-loss-from-fittings-expansion-and-reduction-in-pipe-size/> (geraadpleegd 21 mei 2022).
- [23] 'Free Mount Cylinder Series CU'. Geraadpleegd: 22 mei 2022. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/CU.pdf>
- [24] 'Aandrijvingen Festo4Students.pdf'. Geraadpleegd: 22 november 2021. [Online]. Beschikbaar op:
<https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/703400/Aandrijvingen%20Festo4Students.pdf>
- [25] Toon M., 'Vraag i.v.m. verbruik van een draaicilinder', 31 april 2022.
- [26] 'Semi-rotary drive DRRD-40-180-FH-PA', p. 1.
- [27] 'Work Done by a Gas'. <https://wright.nasa.gov/airplane/work2.html> (geraadpleegd 23 december 2021).
- [28] 'Energie - VEELGESTELDE-VRAGEN - Meter - Wat zijn piek- en daluren en wanneer gaan deze uren in?', *Aanbieders.be*. <https://www.aanbieders.be/energie/veelgestelde-vragen/meter/piekuren-daluren-elektriciteit> (geraadpleegd 24 mei 2022).
- [29] Festo, 'Air is money | Festo IE'. https://www.festo.com/ie/en/e/journal/air-is-money-id_31317/ (geraadpleegd 23 november 2021).
- [30] 'Silvent catalogus by ERIKS Nederland - Issuu'.
https://issuu.com/eriksbv/docs/silvent_catalogus (geraadpleegd 23 december 2021).
- [31] 'Electric motors | IEC'. <https://www.iec.ch/government-regulators/electric-motors> (geraadpleegd 24 november 2021).
- [32] 'COMMISSION REGULATION (EU) 2019/1781'. Geraadpleegd: 24 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1781&from=DE>
- [33] 'Wat is een aandrijving en welke soorten aandrijvingen zijn er? | Technisch Werken'.
<https://www.technischwerken.nl/kennisbank/techniek-kennis/wat-is-een-aandrijving-en-welke-soorten-aandrijvingen-zijn-er/> (geraadpleegd 25 mei 2022).
- [34] 'Difference between Motor Driver and Motor Controller with Example', *ETechnoG - Electrical, Electronics and Technology*. <https://www.etechnog.com/2021/01/difference-motor-driver-motor-controller.html> (geraadpleegd 26 mei 2022).
- [35] 'Pulse Width Modulation - an overview | ScienceDirect Topics'.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pulse-width-modulation> (geraadpleegd 20 december 2021).
- [36] 'Installation and Maintenance Manual Stepper Motor Controller (24VDC) Series LECP6'. Geraadpleegd: 20 december 2021. [Online]. Beschikbaar op:
https://static.smc.eu/binaries/content/assets/smc_global/product-documentation/installationmaintenance-manuals/en/im_lecp6_en.pdf
- [37] C. Lewin, 'Mathematics of Motion Control Profiles'.
<https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/mathematics-of-motion-control-profiles-article> (geraadpleegd 18 december 2021).
- [38] D. Eric, 'Mechanismen - Nokken & Bewegingswetten', Uhasselt.
- [39] C. Lewin, 'S-Curve Motion Profiles - Vital For Optimizing Machine Performance'.
<https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/s-curve-profiles-deep-dive-article> (geraadpleegd 18 december 2021).

- [40] 'Electric Linear Actuators With Position Feedback - TiMOTION', *TiMOTION Technology*. <https://www.timotion.com/nl/news-and-articles/part-6:-electric-linear-actuators-with-feedback-sensors> (geraadpleegd 20 december 2021).
- [41] '6 Automation Strategies | Elsevier Enhanced Reader'. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/B9780124157798000061?token=CF1E36EB88352AB218983B438C0716626D7C4E750F8036FD20185A36C044332C3651346EC6E70D3E14A54DA85CDB89A5&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211221152855> (geraadpleegd 21 december 2021).
- [42] 'Proportional-Integral-Derivative Control - an overview | ScienceDirect Topics'. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/proportional-integral-derivative-control> (geraadpleegd 20 december 2021).
- [43] 'Intelligent movement by industrial actuators with integrated controller'. <https://www.linak.com/segments/techline/tech-trends/integrated-controller/> (geraadpleegd 21 december 2021).
- [44] Geert Vandensande, Palmers Yves, '2019-03-09 TELT-Actief-vermogen-DASM2', diepenbeek, 9 maart 2019.
- [45] U.S. Department of Energy, 'Determining Electric Motor Load and Efficiency', p. 16.
- [46] 'Individual modules NSE mini'. https://schunk.com/jp_en/clamping-technology/series/individual-modules-nse-mini-1/ (geraadpleegd 25 november 2021).
- [47] 'Stopper cylinders EFSD'. Geraadpleegd: 25 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.festo.com/media/pim/562/D15000100140562.PDF>
- [48] 'Electric Stopper Cylinder / LEBH-X3 Series'. Geraadpleegd: 25 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.smcworld.com/assets/pg/en-jp/files/SP147X-019E.pdf>
- [49] 'Parallel grippers EHPS, electric'. Geraadpleegd: 25 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.festo.com/media/pim/569/D15000100140569.PDF>
- [50] 'EGM'. https://schunk.com/jp_en/gripping-systems/series/egm/ (geraadpleegd 25 november 2021).
- [51] 'Electric Grippers LEH Series'. Geraadpleegd: 25 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: https://ca01.smcworld.com/catalog/Electric-en/mpv/Electric-LEH_en/data/Electric-LEH_en.pdf
- [52] 'Spindle axis units ELGS-BS-KF'. Geraadpleegd: 25 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.festo.com/media/pim/994/D15000100148994.PDF>
- [53] 'Electric cylinder units EPCS-BS'. Geraadpleegd: 25 november 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.festo.com/media/pim/482/D15000100149482.PDF>
- [54] 'KENDRION - innovative solutions for automotive and industry'. <https://www.kendrion.com/en/> (geraadpleegd 14 december 2021).
- [55] 'Single-Stroke Solenoids for Industrial Applications', p. 28.
- [56] 'Rotary drive units ERMS'. Geraadpleegd: 13 december 2021. [Online]. Beschikbaar op: <https://www.festo.com/media/pim/997/D15000100148997.PDF>
- [57] 'PRO1 Linear rotary motors - linear & rotary movements | LinMot | LinMot', *Linmot EN*. <https://linmot.com/products/linear-rotary-motors/linear-rotary-motors/> (geraadpleegd 13 december 2021).
- [58] 'Bistable-rotary-solenoid-PDM-Kendrion-EN.pdf'. Geraadpleegd: 14 december 2021. [Online]. Beschikbaar op: https://www.kendrion.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Brochures_and_Flyers/Electromagnets_Actuators/Bistable-rotary-solenoid-PDM-Kendrion-EN.pdf
- [59] *Energy Saving*. SMC. [Online]. Beschikbaar op: <https://dmss.smcworld.com/web2pc/index.php?mss=Energy>
- [60] 'Digital Flow Switch'. Geraadpleegd: 30 mei 2022. [Online]. Beschikbaar op: https://static.smc.eu/pdf/PFMB-C_EU.pdf
- [61] 'Schaeffler medias | Product catalogue & consulting platform'. <https://medias.schaeffler.be/en> (geraadpleegd 31 mei 2022).
- [62] 'Home - Luoyang QIBR Bearing Co.,Ltd All Rights Reserved.', *Luoyang QIBR Bearing Co.,Ltd All Rights Reserved.* - *Luoyang QIBR Bearing Co.,Ltd All Rights Reserved.* <https://www.qibr-bearing.com/> (geraadpleegd 31 mei 2022).

- [63] Schaeffler medias, 'VA140188-V-VSP Slewing ring, four Point contact bearings, external gear'. <https://medias.schaeffler.be/en/product/rotary/rolling-and-plain-bearings/combined-axial-,radial-bearings/slewing-rings/va140188-v-vsp/p/398163> (geraadpleegd 31 mei 2022).
- [64] Orientalmotors, '2-Phase Stepping Motors PK Series'. [Online]. Beschikbaar op: https://www.orientalmotor.eu/media/files/pk2_en.pdf?dwnl=1
- [65] 'One-Inch Stroke Shotbolt Solenoid', *TLX Technologies*. <https://www.tlxtech.com/solutions/one-inch-stroke-shotbolt-solenoid> (geraadpleegd 5 juni 2022).
- [66] 'Low-Profile Latching Solenoid Lock', *TLX Technologies*. <https://www.tlxtech.com/solutions/low-profile-latching-solenoid-lock> (geraadpleegd 5 juni 2022).
- [67] S. Grosu, C. Rodriguez–Guerrero, V. Grosu, B. Vanderborght, en D. Lefeber, 'Evaluation and Analysis of Push-Pull Cable Actuation System Used for Powered Orthoses', *Front. Robot. AI*, vol. 5, p. 105, sep. 2018, doi: 10.3389/frobt.2018.00105.
- [68] Q. Wu, X. Wang, B. Chen, en H. Wu, 'Patient-Active Control of a Powered Exoskeleton Targeting Upper Limb Rehabilitation Training', *Frontiers in Neurology*, vol. 9, okt. 2018, doi: 10.3389/fneur.2018.00817.
- [69] D. Chen, 'Experimental Characterization of Bowden Cable Friction and Compliance', p. 65.
- [70] P. Letier, A. Schiele, M. Avraam, M. Horodinca, en A. Preumont, 'Bowden cable actuator for torque feedback in haptic applications', jun. 2022.
- [71] 'Comparing efficiency and capabilities of stepper motor actuators', *Linear Motion Tips*, 2 april 2015. <https://www.linearmotiontips.com/comparing-efficiency-and-capabilities-of-stepper-motor-actuators/> (geraadpleegd 31 mei 2022).
- [72] B. S. and J. S. of S. D. Inc, 'Gear efficiency — key to lower drive cost', *Machine Design*, juli 2000. <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21834720/gear-efficiency-key-to-lower-drive-cost> (geraadpleegd 31 mei 2022).
- [73] 'Belt Drive Efficiencies'. Geraadpleegd: 31 mei 2022. [Online]. Beschikbaar op: <https://ww2.gates.com/IF/facts/documents/Gf000188.pdf>

Bijlage lijst

Bijlage A: Lineaire zuigerstangcilinder CDU16-25D datasheet	99
Bijlage B: Draaicilinder DRRD40-180 datasheet	102
Bijlage C: Volledig rekenblad: Actuator en machinegegevens	103
Bijlage D: Luchtmeten SMC PFMB7 datasheet	107
Bijlage E: Slewing gear VA140188-V-VSP datasheet	108
Bijlage F: Stappenmotor PK299DW datasheet	109
Bijlage G: Turntable LER50K datasheet	110
Bijlage H: Pneumatisch lineaire aandrijving DGC-25	111
Bijlage I: Elektrische spindelas ELGT-BS-90	112
Bijlage J: Motor lineaire aandrijving EMCA-EC-67	114
Bijlage K: Tandwielkast parallelkit EAMM-U-87-T46-67A-144	116

Bijlage

Bijlage A: Lineaire zuigerstangcilinder CDU16-25D datasheet

Series 10-/11- 21-/22-**CDU** Free mount cylinder / ø6, ø10, ø16, ø20, ø25

How to Order

Clean series

10	Relief type
11	Vacuum suction type

Built-in magnet

D	Built-in magnet
---	-----------------

Bore size (mm)

Cylinder stroke (mm)

Copper, fluorine and silicon-free + low particle generation

21	Relief type
22	Vacuum suction type

Number of auto switches

Nil	2 pcs.
S	1 pc.
n	n pcs.

Type of auto switch

Reed switch	D-A93
Solid state switch	D-M9N, D-M9B

Action

D	Double acting
---	---------------



Model

Model		Cushion Bore size (mm)	Port size	Lubrication	Action	Standard stroke (mm)	Auto switch mounting	Cushion	
								Rubber	Air
Relief type	10-/21-CDU6	6	M5 x 0.8	Non-lube	Double acting single rod	5, 10, 15, 20, 25, 30	○	○	—
	10-/21-CDU10	10							
	10-/21-CDU16	16							
	10-/21-CDU20	20							
	10-/21-CDU25	25							
Vacuum suction type	11-/22-CDU6	6				5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50			
	11-/22-CDU10	10							
	11-/22-CDU16	16							
	11-/22-CDU20	20							
	11-/22-CDU25	25							
						5, 10, 15, 20, 25, 30			
						5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50			

Specifications

Item	Bore size (mm)	6	10/16	20/25
Proof pressure		1.05MPa		
Max. operating pressure		0.7MPa		
Min. operating pressure		0.12MPa	0.06MPa	0.05MPa
Ambient and fluid temperature		Without auto switch : -10°C to 70°C With auto switch : -10°C to 60°C (With no condensation)		
Piston speed		50 to 400mm/s		
Stroke length tolerance		$\begin{smallmatrix} +1.0 \\ 0 \end{smallmatrix}$		
Grease		10-/11-: Fluorine grease 21-/22-: Lithium soap base grease		
Particle generation grade		10-: Grade 2, 21-: Grade 3		
(Refer to front matter pages 13 to 22 for details.)		11-/22-: Grade 1		

Suction flow rate of vacuum suction type (Reference values)

Size	Suction flow rate ℓ/min (ANR)
6	6
10	10
16/20/25	12



Free mount cylinder 10-CDU/21-CDU

Auto switch specifications (Refer to Best Pneumatics catalog for detailed specifications and auto switches not in the following table.)

Switch type	Auto switch part no.	Load voltage	Load current range	Indicator light	Application
Reed switch	D-A93	24 VDC	5 to 40mA (24 VDC)	○	Relay, PLC
Solid state switch	2-wire type D-M9B	28 VDC or less	40mA or less	○	IC circuit, Relay, PLC
	3-wire type D-M9N	24 VDC (10 to 28 VDC)	5 to 40mA	○	24 VDC Relay, PLC

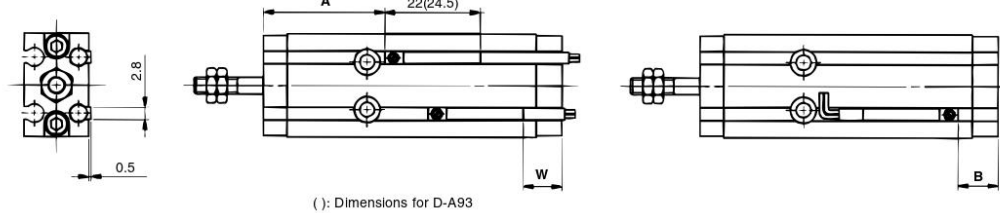
Refer to applicable auto switch list — Page 182.

PLC: Programmable Logic Controller

Auto switches / Proper mounting position at stroke end detection

D-A9□

D-M9□



Bore size (mm)	D-A9□			D-M9□		
	A	B	W	A	B	W
6	29.5	5.5	-3.5(-1)	33.5	9.5	0.5
10	29.5	9.5	-7.5(-5)	33.5	13.5	-3.5
16	36	11.5	-9.5(-7)	40	15.5	-5.5
20	41	15	-13(-10.5)	45	19	-9
25	40.5	16.5	-14.5(-12)	45.5	20.5	-10.5

Note) The above mentioned values are indicated as a guide for auto switch mounting position for stroke end detection. When actually mounting an auto switch, adjust the position after confirming the operating state of the auto switch.

Note 2) The negative values in the table indicate that the auto switch is mounted inside the cylinder body in case of W and outside in case of B.

Note 3) In case of 5mm stroke (with 1 pc.) or 10mm stroke (2 pcs.), the switch(es) may not go off or more than one switch may turn on simultaneously. Set them at 1 to 4mm out of the values in the above table.

Note 4) (): Dimensions for D-A93.



Specific Product Precautions

Be sure to read before handling.

Mounting

Caution

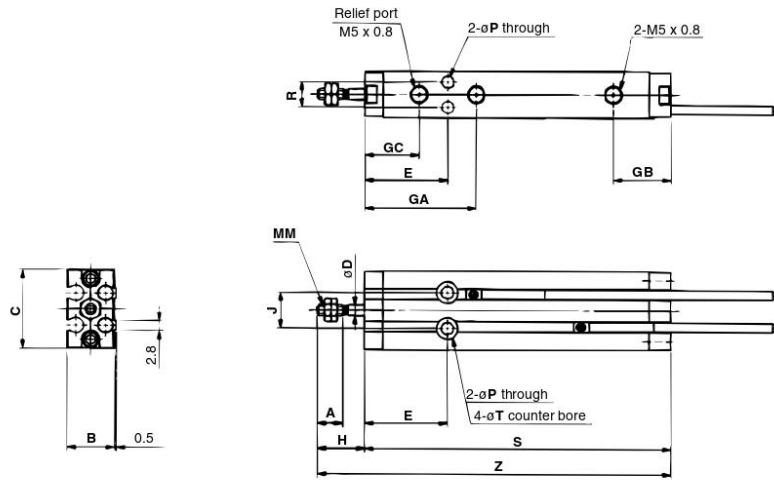
1. Observe the proper tightening torque in the right table in mounting.

Appropriate tightening torque

Bore size (mm)	Hexagon socket head cap bolt size(mm)	Appropriate tightening torque N·m
ø6, ø10	M3	1.08 ±10%
ø16	M4	2.45 ±10%
ø20, ø25	M5	5.10 ±10%

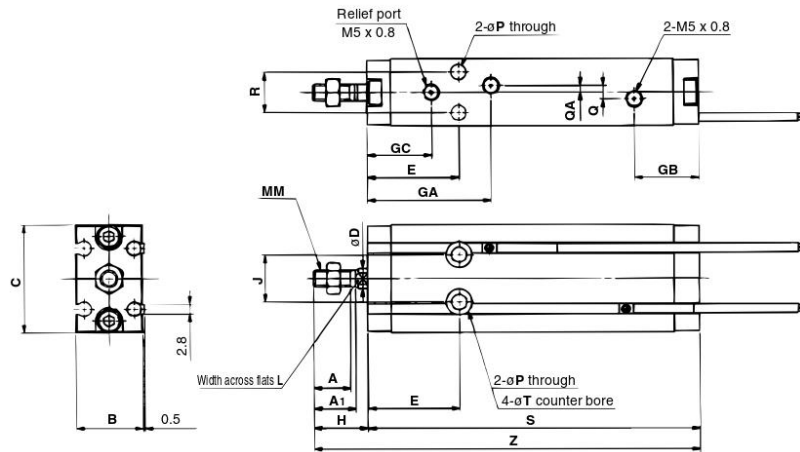
10-**CDU6 to 25**, 21-**CDU6 to 25**

ø6/ø10



(mm)																										
Bore size	A	B	C	D	E	GA	GB	GC	H	J	MM	P	R	T	S						Z					
6	7	13	22	3	23	31	16	15	13	10	M3 x 0.5	3.2	7	6 depth 4.8	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
10	10	15	24	4	24	33.5	16	15.5	16	11	M4 x 0.7	3.2	9	6 depth 5	64	65	70	75	80	85	80	85	90	95	100	105

ø16 to ø25



(mm)																																						
Bore size	A	A ₁	B	C	D	E	GA	GB	GC	H	J	L	MM	P	Q	QA	R	T	S										Z									
																			5	10	15	20	25	30	40	50	—	—	—	—	5	10	15	20	25	30	40	50
16	11	12.5	20	32	6	27	36.5	19	19	16	14	5	M5 x 0.8	4.5	4	2	12	7.5 depth 6.5	72.5	77.5	82.5	87.5	92.5	97.5	—	—	—	—	88.5	93.5	98.5	103.5	108.5	113.5	—	—		
20	12	14	26	40	8	30	40	21.5	22	19	16	6	M6 x 1.0	5.5	9	4.5	16	9.5 depth 8	81	86	91	96	101	106	116	126	100	105	110	115	120	125	130	135	145			
25	15.5	18	32	50	10	29	40.5	22	22	23	20	8	M8 x 1.25	5.5	9	4.5	20	9.5 depth 9	83	88	93	98	103	108	118	128	106	111	116	121	126	131	141	151				

Semi-rotary drives DRRD-16 ... 63, twin pistons

Data sheet

Forces and torques								
Size	16	20	25	32	35	40	50	63
Theoretical torque at 6 bar [Nm]	1.6	2.4	5.1	10.1	15.8	24.1	53	112
Max. permissible mass moment of inertia								
Rotation from end position to end position								
DRRD-...-P [kgcm ²]	175	400	900	1500	2500	6700	–	–
DRRD-...-Y9 [kgcm ²]	700	1250	1500	26000	15000	23000	40000	40000
DRRD-...-Y10 [kgcm ²]	–	–	5500	–	45000	67000	200000	420000
DRRD-...-Y12 [kgcm ²]	900	1500	5500	26000	45000	67000	200000	420000
DRRD-...-Y14 [kgcm ²]	100	150	100	2000	2000	23000	–	–
Rotation with intermediate position								
DRRD-...-P [kgcm ²]	150	300	400	500	–	–	–	–
DRRD-...-Y9 [kgcm ²]	500	900	1500	8000	15000	23000	40000	–
DRRD-...-Y12 [kgcm ²]	500	900	1500	8000	15000	23000	40000	–

 Note

If, in the end positions, a torque which exceeds 50% of the theoretical torque acts against the direction of rotation, no exact end position is guaranteed.

This can be avoided by using external shock absorbers (Y12) or a semi-rotary drive with double the torque.

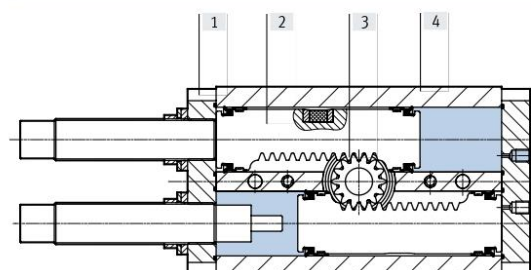
 Note

The cushioning for the intermediate position corresponds to the cushioning for the basic drive. Except in the case of cushioning Y12, when shock absorbers Y9 are used.

In combination with cushioning P, the intermediate position is only available for sizes 16 ... 32.

Materials

Sectional view



Semi-rotary drive	
[1] Cover	Anodised wrought aluminium alloy
[2] Piston	Stainless steel
[3] Flange shaft	Tempered steel
[4] Housing	Smooth-anodised wrought aluminium alloy
Seals	NBR
Piston seal	TPE-U(PU)
Note on materials	RoHS-compliant
	Contains paint-wetting impairment substances

Bijlage C: Volledig rekenblad: Actuator en machinegegevens

machine gerelateerde gegevens					Cilinder gerelateerde gegevens			
Prioriteit	Commerciële naam	Machine code	Machineprijs (pneumatisch)	Machine cyclustijd (sec)	ItemNo	Omschrijving	Producent	Producent bestelcode
1	1 ATU turn Unit	ATU_AP0028_1 ATU	1469,85	67	AIR.001565.1	Slede cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-25-260-KF-YSRW-A
2	1 ATU turn Unit	ATU_AP0028_1 ATU	1469,85	67	AIR.005238.1	Semi-Rotary Drive	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DRRD-40-180-FH-Y14A
3	2 ETH EasyTest Handler	ETH_AP0241_1 ETH pneu Slidedoor	677,95	8	AIR.002812.1	Cilinder slidedoor	SMC Belgium BV	CD85N12-80C-B
4	3 ETH EasyTest Handler	ETH_AP0241_1 ETH pneu Slidedoor	678,95	8	AIR.001698.1	Stopper cilinder	SMC Belgium BV	MKB12-10R
5	3 MFT 19"	MFT_AP0363_1 MFT	747,61	8	AIR.006558.1	Cilinder slidedoor	SMC Belgium BV	CD85N16-150C-B
6	3 MFT 19"	MFT_AP0363_1 MFT	747,61	8	AIR.001698.1	Stopper cilinder	SMC Belgium BV	MKB12-10R
7	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.004660.1	Stopper cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	CLR-20-10-L-P-A
8	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006624.1	Tray pusher	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-18-600-KF-PPV-A
9	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006628.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	MGPM32TF-25-XC56
10	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM
11	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.2	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM
12	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.3	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM
13	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.007094.4	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDUJB20-50DM
14	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006631.1	Locking cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	ADN20-19
15	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006582.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDQSB16-15DC
16	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.006582.2	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CDQSB16-15DC
17	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.002354.1	Tray klem cilinder	SMC Belgium BV	CDU16-25D
18	4 MTF Easytray	MTF_AP0022_1 Easytray	3571,34	158	AIR.002354.2	Tray klem cilinder	SMC Belgium BV	CDU16-25D
19	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.003088.1	Cilinder grote slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	CLR-20-20-R-P-A
20	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.005731.1	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-60
21	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.005732.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-30
22	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.003088.2	Cilinder grote slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	CLR-20-20-R-P-A
23	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.005731.2	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-30
24	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.005732.2	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-30
25	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.005159.1	Printplaat pusher Draaifunctie	SMC Belgium BV	CDJP2D10-25D
26	5 MLL Magazine line loader	MLL_AP0065_1 MLL	992,07	63	AIR.005681.1	Printplaat pusher	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-12-419-KF-P-A
27	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.001617.1	Cilinder kleine slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	ADVUL-16-10-PA
28	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006155.1	Cilinder kleine slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	SLS-16-20-PA
29	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006810.1	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD85N20-145C-B
30	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006808.1	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-140
31	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.005732.1	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-30
32	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.001617.2	Cilinder kleine slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	ADVUL-16-10-PA
33	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006155.2	Cilinder kleine slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	SLS-16-20-PA
34	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006810.2	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD85N20-145C-B
35	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006808.2	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-140
36	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.005732.2	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-30
37	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.001617.3	Cilinder kleine slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	ADVUL-16-10-PA
38	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006155.3	Cilinder kleine slag klem	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	SLS-16-20-PA
39	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006810.3	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD85N20-145C-B
40	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006808.3	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-140
41	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.005732.3	Cilinder kleine slag klem	SMC Belgium BV	CD55B20-30
42	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.005159.1	Printplaat pusher Draaifunctie	SMC Belgium BV	CDJP2D10-25D
43	5 MLL Magazine line loader XL	MLL_AP0050_1 MLL-XP	4217,83	63	AIR.006244.1	Printplaat pusher	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-12-559-KF-P-A
44	6 Flextray	MTF_AP0021_1 Flextray	4475,17	123	AIR.000821.1	Tray klem cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DSNU-16-60-PPV-A
45	6 Flextray	MTF_AP0021_1 Flextray	4475,17	123	AIR.000821.2	Tray klem cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DSNU-16-60-PPV-A
46	6 Flextray	MTF_AP0021_1 Flextray	4475,17	123	AIR.006637.1	Slede cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-K-18-462-PPV-A-GK
47	6 Flextray	MTF_AP0021_1 Flextray	4475,17	123	AIR.006833.1	Cilinder grote slag klem	SMC Belgium BV	CD55B40-70M
48	6 Flextray	MTF_AP0021_1 Flextray	4475,17	123	AIR.006844.1	Grote stack lift	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-K-40-700-PPV-A-GK
49	6 Flextray	MTF_AP0021_1 Flextray	4475,17	123	AIR.006844.2	Grote stack lift	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DGC-K-40-700-PPV-A-GK
50	7 FLU Flip Unit	FLU_AP0058_1 FLU	700,81	8	AIR.003264.1	Semi-Rotary Drive	SMC Belgium BV	EMSQB100A
51	7 FLU Flip Unit	FLU_AP0058_1 FLU	700,81	8	AIR.000781.1	Stopper cilinder	FESTO PNEUMATIC BELGIUM	DFM-12-20-P-A-KF

		Cilinder afmetingen			Positieve kamervolumes (zonder stang)								Negatieve kamervolumes (met stang)							
Cilinder activatie		D (mm)	d (mm)	S (mm)	Slagtijd+ (sec)	p+ (bar)	# V+/cyclus	V+ (L)	Vn+ (nL)	W+ (J)	P+ (Watt)		Slagtijd- (sec)	p- (bar)	# V-/cyclus	V- (L)	Vn- (nL)	W- (J)	P- (Watt)	
1	1	25	0	355		1	6	10	0,174	1,220	104,6	104,6		1	6	10	0,174	1,220	104,6	104,6
2	1	40	0	45,35		0,5	6	5	0,057	0,399	34,2	68,4		0,5	6	5	0,057	0,399	34,2	68,4
3	1	12	6	80		1	6	1	0,009	0,063	5,4	5,4		1	6	1	0,007	0,048	4,1	4,1
4	1	12	6	10		0,5	6	10	0,001	0,008	0,7	1,4		0,5	6	10	0,001	0,006	0,5	1,0
5	1	16	6	150		1	5	1	0,030	0,181	15,1	15,1		1	5	1	0,026	0,156	13,0	13,0
6	1	12	6	10		0,5	6	1	0,001	0,008	0,7	1,4		0,5	6	1	0,001	0,006	0,5	1,0
7	1	20	12	10		0,5	6	10	0,003	0,022	1,9	3,8		0,5	6	10	0,002	0,014	1,2	2,4
8	1	18	0	620		0,8	6	10	0,158	1,104	94,7	118,3		0,8	6	10	0,158	1,104	94,7	118,3
9	1	32	14	30		0,5	5	10	0,024	0,145	12,1	24,1		0,5	5	10	0,020	0,117	9,8	19,5
10	0	20	10	52		0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6		0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7
11	0	20	10	52		0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6		0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7
12	0	20	10	52		0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6		0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7
13	0	20	10	52		0,5	6	5	0,016	0,114	9,8	19,6		0,5	6	5	0,012	0,086	7,4	14,7
14	1	20	12	19		0,2	6	1	0,006	0,042	3,6	17,9		0,2	6	1	0,004	0,027	2,3	11,5
15	1	16	6	15		0,5	6	10	0,003	0,021	1,8	3,6		0,5	6	10	0,003	0,018	1,6	3,1
16	1	16	6	15		0,5	6	10	0,003	0,021	1,8	3,6		0,5	6	10	0,003	0,018	1,6	3,1
17	1	16	6	25		0,5	6	10	0,005	0,035	3,0	6,0		0,5	6	10	0,004	0,030	2,6	5,2
18	1	16	6	25		0,5	6	10	0,005	0,035	3,0	6,0		0,5	6	10	0,004	0,030	2,6	5,2
19	0	20	12	45		1	6	1	0,014	0,099	8,5	8,5		1	6	1	0,009	0,063	5,4	5,4
20	0	20	10	65		1	6	1	0,020	0,143	12,3	12,3		1	6	1	0,015	0,107	9,2	9,2
21	0	20	10	30		1	6	1	0,009	0,066	5,7	5,7		1	6	1	0,007	0,049	4,2	4,2
22	1	20	12	40		1	6	1	0,013	0,088	7,5	7,5		1	6	1	0,008	0,056	4,8	4,8
23	1	20	10	65		1	6	1	0,020	0,143	12,3	12,3		1	6	1	0,015	0,107	9,2	9,2
24	1	20	10	30		1	6	1	0,009	0,066	5,7	5,7		1	6	1	0,007	0,049	4,2	4,2
25	1	10	4	25		0,1	6	10	0,002	0,014	1,2	11,8		0,1	6	10	0,002	0,012	1,0	9,9
26	1	12	0	420		1,2	4	10	0,048	0,238	19,0	15,8		1,2	4	10	0,048	0,238	19,0	15,8
27	0	16	8	10		0,5	6	1	0,002	0,014	1,2	2,4		0,5	6	1	0,002	0,011	0,9	1,8
28	0	16	3	20		0,5	6	1	0,004	0,028	2,4	4,8		0,5	6	1	0,004	0,027	2,3	4,7
29	0	20	8	45		1	6	1	0,014	0,099	8,5	8,5		1	6	1	0,012	0,083	7,1	7,1
30	0	20	10	140		1	6	1	0,044	0,308	26,4	26,4		1	6	1	0,033	0,231	19,8	19,8
31	0	20	10	30		1	6	1	0,009	0,066	5,7	5,7		1	6	1	0,007	0,049	4,2	4,2
32	0	16	8	10		0,5	6	1	0,002	0,014	1,2	2,4		0,5	6	1	0,002	0,011	0,9	1,8
33	0	16	3	20		0,5	6	1	0,004	0,028	2,4	4,8		0,5	6	1	0,004	0,027	2,3	4,7
34	0	20	8	45		1	6	1	0,014	0,099	8,5	8,5		1	6	1	0,012	0,083	7,1	7,1
35	0	20	10	140		1	6	1	0,044	0,308	26,4	26,4		1	6	1	0,033	0,231	19,8	19,8
36	0	20	10	30		1	6	1	0,009	0,066	5,7	5,7		1	6	1	0,007	0,049	4,2	4,2
37	0	16	8	10		0,5	6	1	0,002	0,014	1,2	2,4		0,5	6	1	0,002	0,011	0,9	1,8
38	0	16	3	20		0,5	6	1	0,004	0,028	2,4	4,8		0,5	6	1	0,004	0,027	2,3	4,7
39	0	20	8	45		1	6	1	0,014	0,099	8,5	8,5		1	6	1	0,012	0,083	7,1	7,1
40	0	20	10	140		1	6	1	0,044	0,308	26,4	26,4		1	6	1	0,033	0,231	19,8	19,8
41	0	20	10	30		1	6	1	0,009	0,066	5,7	5,7		1	6	1	0,007	0,049	4,2	4,2
42	1	10	4	25		0,1	6	10	0,002	0,014	1,2	11,8		0,1	6	10	0,002	0,012	1,0	9,9
43	1	12	0	560		1,2	4	10	0,063	0,317	25,3	21,1		1,2	4	10	0,063	0,317	25,3	21,1
44	1	16	6	60		0,5	6	9	0,012	0,084	7,2	14,5		0,5	6	9	0,010	0,073	6,2	12,4
45	1	16	6	60		0,5	6	9	0,012	0,084	7,2	14,5		0,5	6	9	0,010	0,073	6,2	12,4
46	1	18	0	462		1,2	6	9	0,118	0,823	70,5	58,8		1,2	6	9	0,118	0,823	70,5	58,8
47	1	40	16	70		1	6	1	0,088	0,616	52,8	52,8		1	6	1	0,074	0,517	44,3	44,3
48	1	40	0	700		1,2	6	1	0,880	6,158	527,8	439,8		1,2	6	1	0,880	6,158	527,8	439,8
49	1	40	0	700		1,2	6	1	0,880	6,158	527,8	439,8		1,2	6	1	0,880	6,158	527,8	439,8
50	1	32	0	79		0,5	6	1	0,063	0,442	37,9	75,8		1	6	1	0,063	0,442	37,9	75,8
51	1	12	8	20		0,2	6	1	0,002	0,016	1,4	6,8		0,2	6	1	0,001	0,009	0,8	3,8

Leiding afmetingen				leiding volumes								Totaal cilinderverbruik per cyclus				Verbruik per tijdseenheid			
dL (mm)	LL+ (mm)	LL- (mm)	VL+ (L)	VLn+ (nL)	WL+ (J)	PL+ (Watt)	VL- (L)	VLn- (nL)	WL- (J)	PL- (Watt)	V/cyclus (L)	Vn/cyclus (nL)	W_cyclus (J)	Vn/min (nL)	L/min (L)	P_gem (Watt)	P_net (Watt)		
1	4	350	350	4E-03	3E-02	2,6	2,6	4E-03	3E-02	2,6	2,6	3,57	24,92	2143,9	22,32	3,20	32,0	290,9	
2	4	400	400	5E-03	3E-02	3,0	6,0	5E-03	3E-02	3,0	6,0	0,62	4,29	372,1	3,84	0,56	5,6	50,5	
3	2,5	400	10	2E-03	1E-02	1,2	1,2	5E-05	3E-04	0,03	0,03	0,02	0,12	10,7	0,92	0,13	1,3	12,2	
4	2,5	700	700	3E-03	2E-02	2,1	4,1	3E-03	2E-02	2,1	4,1	0,09	0,55	53,1	4,13	0,66	6,6	60,4	
5	2,5	2000	2200	1E-02	5E-02	4,9	4,9	1E-02	5E-02	5,4	5,4	0,08	0,44	38,3	3,30	0,58	4,8	43,6	
6	2,1	1650	1650	6E-03	3E-02	3,4	6,9	6E-03	3E-02	3,4	6,9	0,01	0,08	8,0	0,62	0,10	1,0	9,1	
7	4	600	600	8E-03	5E-02	4,5	9,0	8E-03	5E-02	4,5	9,0	0,20	1,27	121,4	0,48	0,08	0,8	7,0	
8	4	540	540	7E-03	4E-02	4,1	5,1	7E-03	4E-02	4,1	5,1	3,29	22,90	1974,7	8,70	1,25	12,5	113,6	
9	4	1050	1450	1E-02	7E-02	6,6	13,2	2E-02	9E-02	9,1	18,2	0,75	4,19	375,3	1,59	0,29	2,4	21,6	
10	2,5	300	300	1E-03	9E-03	0,9	1,8	1E-03	9E-03	0,9	1,8	0,00	0,00	94,6	0,00	0,00	0,6	5,4	
11	2,5	700	700	3E-03	2E-02	2,1	4,1	3E-03	2E-02	2,1	4,1	0,00	0,00	106,4	0,00	0,00	0,7	6,1	
12	2,5	300	300	1E-03	9E-03	0,9	1,8	1E-03	9E-03	0,9	1,8	0,00	0,00	94,6	0,00	0,00	0,6	5,4	
13	2,5	700	700	3E-03	2E-02	2,1	4,1	3E-03	2E-02	2,1	4,1	0,00	0,00	106,4	0,00	0,00	0,7	6,1	
14	2,5	230	330	1E-03	7E-03	0,7	3,4	2E-03	1E-02	1,0	4,9	0,01	0,09	7,5	0,03	0,00	0,0	0,4	
15	2,5	520	920	3E-03	2E-02	1,5	3,1	5E-03	3E-02	2,7	5,4	0,13	0,82	76,1	0,31	0,05	0,5	4,4	
16	2,5	520	920	3E-03	2E-02	1,5	3,1	5E-03	3E-02	2,7	5,4	0,13	0,82	76,1	0,31	0,05	0,5	4,4	
17	2,5	1350	1350	7E-03	4E-02	4,0	8,0	7E-03	4E-02	4,0	8,0	0,23	1,45	135,6	0,55	0,09	0,9	7,8	
18	2,5	1000	1000	5E-03	3E-02	2,9	5,9	5E-03	3E-02	2,9	5,9	0,19	1,24	115,0	0,47	0,07	0,7	6,6	
19	2,5	1000	1000	5E-03	3E-02	2,9	2,9	5E-03	3E-02	2,9	2,9	0,00	0,00	19,8	0,00	0,00	0,3	2,9	
20	2,5	1400	1400	7E-03	4E-02	4,1	4,1	7E-03	4E-02	4,1	4,1	0,00	0,00	29,7	0,00	0,00	0,5	4,3	
21	2,5	1550	1550	8E-03	5E-02	4,6	4,6	8E-03	5E-02	4,6	4,6	0,00	0,00	19,0	0,00	0,00	0,3	2,7	
22	2,5	1400	1400	7E-03	4E-02	4,1	4,1	7E-03	4E-02	4,1	4,1	0,03	0,23	20,6	0,22	0,03	0,3	3,0	
23	2,5	2200	2200	1E-02	6E-02	6,5	6,5	1E-02	6E-02	6,5	6,5	0,06	0,38	34,4	0,36	0,05	0,5	5,0	
24	2,5	2400	2400	1E-02	7E-02	7,1	7,1	1E-02	7E-02	7,1	7,1	0,04	0,26	24,0	0,24	0,04	0,4	3,5	
25	2,5	400	400	2E-03	1E-02	1,2	11,8	2E-03	1E-02	1,2	11,8	0,08	0,49	45,2	0,47	0,07	0,7	6,5	
26	2,5	750	750	4E-03	1E-02	1,5	1,2	4E-03	1E-02	1,5	1,2	1,02	5,04	409,5	4,80	0,97	6,5	59,1	
27	2,5	2700	2700	1E-02	8E-02	8,0	15,9	1E-02	8E-02	8,0	15,9	0,00	0,00	18,0	0,00	0,00	0,3	2,6	
28	2,5	2700	2700	1E-02	8E-02	8,0	15,9	1E-02	8E-02	8,0	15,9	0,00	0,00	20,6	0,00	0,00	0,3	3,0	
29	2,5	1800	1800	9E-03	5E-02	5,3	5,3	9E-03	5E-02	5,3	5,3	0,00	0,00	26,2	0,00	0,00	0,4	3,8	
30	2,5	2350	2350	1E-02	7E-02	6,9	6,9	1E-02	7E-02	6,9	6,9	0,00	0,00	60,0	0,00	0,00	1,0	8,7	
31	2,5	2350	2350	1E-02	7E-02	6,9	6,9	1E-02	7E-02	6,9	6,9	0,00	0,00	23,7	0,00	0,00	0,4	3,4	
32	2,5	2200	2200	1E-02	6E-02	6,5	13,0	1E-02	6E-02	6,5	13,0	0,00	0,00	15,1	0,00	0,00	0,2	2,2	
33	2,5	2200	2200	1E-02	6E-02	6,5	13,0	1E-02	6E-02	6,5	13,0	0,00	0,00	17,7	0,00	0,00	0,3	2,6	
34	2,5	600	600	3E-03	2E-02	1,8	1,8	3E-03	2E-02	1,8	1,8	0,00	0,00	19,1	0,00	0,00	0,3	2,8	
35	2,5	1900	1900	9E-03	6E-02	5,6	5,6	9E-03	6E-02	5,6	5,6	0,00	0,00	57,4	0,00	0,00	0,9	8,3	
36	2,5	1900	1900	9E-03	6E-02	5,6	5,6	9E-03	6E-02	5,6	5,6	0,00	0,00	21,1	0,00	0,00	0,3	3,0	
37	2,5	1600	1600	8E-03	5E-02	4,7	9,4	8E-03	5E-02	4,7	9,4	0,00	0,00	11,5	0,00	0,00	0,2	1,7	
38	2,5	1600	1600	8E-03	5E-02	4,7	9,4	8E-03	5E-02	4,7	9,4	0,00	0,00	14,2	0,00	0,00	0,2	2,0	
39	2,5	1200	1200	6E-03	4E-02	3,5	3,5	6E-03	4E-02	3,5	3,5	0,00	0,00	22,7	0,00	0,00	0,4	3,3	
40	2,5	1450	1450	7E-03	4E-02	4,3	4,3	7E-03	4E-02	4,3	4,3	0,00	0,00	54,7	0,00	0,00	0,9	7,9	
41	2,5	1450	1450	7E-03	4E-02	4,3	4,3	7E-03	4E-02	4,3	4,3	0,00	0,00	18,4	0,00	0,00	0,3	2,7	
42	2,5	1500	1500	7E-03	4E-02	4,4	44,2	7E-03	4E-02	4,4	44,2	0,18	1,14	110,0	1,08	0,17	1,7	15,9	
43	2,5	1500	1500	7E-03	3E-02	2,9	2,5	7E-03	3E-02	2,9	2,5	1,41	6,92	565,6	6,59	1,35	9,0	81,6	
44	4	200	200	3E-03	2E-02	1,5	3,0	3E-03	2E-02	1,5	3,0	0,25	1,68	148,3	0,82	0,12	1,2	11,0	
45	4	200	200	3E-03	2E-02	1,5	3,0	3E-03	2E-02	1,5	3,0	0,25	1,68	148,3	0,82	0,12	1,2	11,0	
46	4	900	900	1E-02	7E-02	6,8	5,7	1E-02	7E-02	6,8	5,7	2,32	16,03	1391,8	7,82	1,13	11,3	102,9	
47	4	1400	1400	2E-02	1E-01	10,6	10,6	2E-02	1E-01	10,6	10,6	0,20	1,34	118,2	0,66	0,10	1,0	8,7	
48	4	1900	1900	2E-02	1E-01	14,3	11,9	2E-02	1E-01	14,3	11,9	1,81	12,60	1084,2	6,15	0,88	8,8	80,1	
49	4	1900	1900	2E-02	1E-01	14,3	11,9	2E-02	1E-01	14,3	11,9	1,81	12,60	1084,2	6,15	0,88	8,8	80,1	
50	4	250	450	3E-03	2E-02	1,9	3,8	6E-03	3E-02	3,4	6,8	0,14	0,94	81,1	7,03	1,01	10,1	92,1	
51	2,5	600	600	3E-03	2E-02	1,8	8,8	3E-03	2E-02	1,8	8,8	0,01	0,06	5,6	0,45	0,07	0,7	6,4	
												18,92	124,58	11649,91	91,234	14,109	141,9	1290,1	

Kostprijs per jaar op basis van het installatierendement		Kostprijs per jaar op basis van de luchtprijs	
▼ Kost per jaar (n_inst) (€)	▼ Kost per jaar incl. installatie (n_inst) (€)	▼ Kost per jaar (luchtprijs) (€)	▼ Kost per jaar incl. installatie (luchtprijs) (€)
1	353,38	479,16	315,88
2	61,33	83,16	54,38
3	14,78	20,04	13,05
4	73,31	99,40	58,47
5	52,94	71,78	46,65
6	11,11	15,06	8,75
7	8,48	11,50	6,80
8	138,02	187,15	123,08
9	26,23	35,57	22,51
10	6,61	8,96	0,00
11	7,44	10,09	0,00
12	6,61	8,96	0,00
13	7,44	10,09	0,00
14	0,53	0,72	0,46
15	5,32	7,21	4,39
16	5,32	7,21	4,39
17	9,48	12,85	7,79
18	8,04	10,90	6,68
19	3,47	4,71	0,00
20	5,20	7,05	0,00
21	3,34	4,53	0,00
22	3,61	4,89	3,06
23	6,03	8,18	5,12
24	4,21	5,71	3,46
25	7,93	10,75	6,58
26	71,78	97,33	67,99
27	3,16	4,28	0,00
28	3,62	4,91	0,00
29	4,59	6,22	0,00
30	10,52	14,26	0,00
31	4,16	5,64	0,00
32	2,64	3,58	0,00
33	3,10	4,20	0,00
34	3,36	4,56	0,00
35	10,06	13,64	0,00
36	3,70	5,02	0,00
37	2,02	2,74	0,00
38	2,48	3,36	0,00
39	3,97	5,38	0,00
40	9,59	13,00	0,00
41	3,23	4,38	0,00
42	19,29	26,16	15,32
43	99,14	134,43	93,30
44	13,31	18,05	11,63
45	13,31	18,05	11,63
46	124,97	169,45	110,70
47	10,61	14,39	9,28
48	97,35	132,00	87,00
49	97,35	132,00	87,00
50	111,91	151,74	99,45
51	7,79	10,56	6,37
	1567,17	2124,98	1291,17
			1750,74

PFMB7 Series

For flow switch precautions and specific product precautions, refer to the "Operation Manual" on the SMC website.

Specifications

Model		PFMB7201	PFMB7501	PFMB7102	PFMB7202
Fluid	Applicable fluid *1	Dry air, N ₂ (Air quality grade is JIS B 8392-1 1.1.2 to 1.6.2, ISO 8573-1 1.1.2 to 1.6.2)			
	Fluid temperature range	0 to 50°C			
Flow	Detection method	Thermal type			
	Rated flow range	2 to 200 L/min	5 to 500 L/min	10 to 1000 L/min	20 to 2000 L/min
	Set point range	2 to 210 L/min	5 to 525 L/min	10 to 1050 L/min	20 to 2100 L/min
	Accumulated flow	0 to 999,999,999 L		0 to 999,999,990 L	
	Smallest settleable increment	1 L/min			
	Accumulated flow	1 L		10 L	
	Accumulated volume per pulse (Pulse width = 50 ms)	1 L/pulse			
Pressure	Accumulated value hold function *2	Intervals of 2 or 5 minutes can be selected.			
	Rated pressure range	0 to 0.75 MPa		0 to 0.8 MPa	
	Proof pressure	1.0 MPa		1.2 MPa	
	Pressure loss	Refer to "Pressure Loss" graph.			
	Pressure characteristics *3	±5% F.S. (0 to 0.75 MPa, 0.35 MPa standard) ±5% F.S. (0 to 0.8 MPa, 0.6 MPa standard)			
Electrical	Power supply voltage	12 to 24 VDC ±10%			
	Current consumption	55 mA or less			
Accuracy	Protection	Polarity protection			
	Display accuracy	±3% F.S.			
	Analog output accuracy	±3% F.S.			
	Repeatability	±1% F.S. (±2% F.S. when the response time is set to 0.05 s)			
	Temperature characteristics	±5% F.S. (0 to 50°C, 25°C standard)			
Switch output	Output type	NPN open collector PNP open collector			
	Output mode	Select from Hysteresis, Window comparator, Accumulated output, or Accumulated pulse output modes.			
	Switch operation	Select from Normal or Reversed output.			
	Maximum load current	80 mA			
	Maximum applied voltage (NPN only)	28 VDC			
	Internal voltage drop (Residual voltage)	NPN output type: 1 V or less (at load current of 80 mA) PNP output type: 1.5 V or less (at load current of 80 mA)			
	Response time *4	Select from 0.05 s, 0.1 s, 0.5 s, 1 s, or 2 s.			
Analog output	Hysteresis *5	Variable from 0			
	Protection	Short circuit protection			
	Output type	Voltage output: 1 to 5 V, Current output: 4 to 20 mA			
	Impedance	Output impedance: Approx. 1 kΩ			
	Response time *7	Maximum load impedance at power supply voltage of 24 V: 600 Ω, at power supply voltage of 12 V: 300 Ω			
External input	External input	Linked to the response time of the switch output			
	Input mode	Input voltage: 0.4 V or less (Reed or Solid state) for 30 ms or longer			
	Reference condition *9	Select from Accumulated value external reset or Peak/Bottom value reset.			
Display	Reference condition *9	Select from Standard conditions or Normal conditions.			
	Display mode	Select from Instantaneous flow or Accumulated flow.			
	Unit *10	L/min or cfm can be selected.			
	Accumulated flow	L or ft³ can be selected.			
	Display range	-10 to 210 L/min (Displays [0] when value is within the -1 to 1 L/min range) -25 to 525 L/min (Displays [0] when value is within the -4 to 4 L/min range) -50 to 1050 L/min (Displays [0] when value is within the -9 to 9 L/min range) -100 to 2100 L/min (Displays [0] when value is within the -19 to 19 L/min range)			
	Accumulated flow	0 to 999,999,999 L			
	Minimum display unit	1 L/min			
Environment	Accumulated flow *13	1 L			
	Display	LED, Color: Red/Green, 3 digits, 7 segments			
	Indicator LED	LED ON when switch output is ON (OUT1: Green, OUT2: Red)			
	Enclosure	IP40			
	Withstand voltage	1000 VAC for 1 minute between terminals and housing			
Standards	Insulation resistance	50 MΩ or more (500 VDC measured via megohmmeter) between terminals and housing			
	Operating temperature range	Operating: 0 to 50°C, Stored: -10 to 60°C (No condensation or freezing)			
	Operating humidity range	Operating/Stored: 35 to 85% RH (No condensation or freezing)			
Piping	Piping specification	CE, UL (CSA), RoHS			
	Piping entry direction	Rc1/4, NPT1/4, G1/4, ø8 One-touch fitting			
Main materials of parts in contact with fluid *12		Straight, Bottom			
		FIM, Stainless steel 304, PPS, PBT, Brass (Electroless nickel plating), HNBR, Si, Au, GE4F			
Weight	ADC, PPS, Stainless steel 304, Au, HNBR, Si, GE4F				
	Body	Rc1/4, NPT1/4/Straight: 70 g, Bottom: 85 g G1/4/Straight: 115 g, Bottom: 130 g ø8 One-touch fitting/Straight: 50 g, Bottom: 65 g			
	Flow adjustment valve	100 g			
	Lead wire	+45 g			
	Bracket	+35 g			
Weight	Panel mount adapter	+20 g			
	DIN rail mounting bracket	+15 g			
		+65 g			

*1 Refer to the "Example of recommended pneumatic circuit" on page 2.

*2 When using the accumulated value hold function, use the operating conditions to calculate the product life, and do not exceed it. The maximum access limit of the memory device is 1 million times. If the product is operated 24 hours per day, the product life will be as follows:
 • 5 min interval: life is calculated as 5 min x 1 million = 5 million min = 9.5 years
 • 2 min interval: life is calculated as 2 min x 1 million = 2 million min = 3.8 years
 If the accumulated value external reset is repeatedly used, the product life will be shorter than the calculated life.

*3 Do not release the OUT side piping port of the product directly to the atmosphere without connecting piping. If the product is used with the piping port released to atmosphere, accuracy may vary.

*4 The time from when the flow is changed by a step input (when the flow rate changes from 0 to the maximum value of the rated flow range instantaneously) until the switch output turns ON (or OFF) when set to be 90% of the rated flow rate

*5 If the flow fluctuates around the set value, the width for setting more than

the fluctuating width needs to be set. Otherwise, chattering will occur.

*6 When using a product with an analog output

*7 The time from when the flow is changed by a step input (when the flow rate changes from 0 to the maximum value of the rated flow range instantaneously) until the analog output reaches 90% of the rated flow rate

*8 When using a product with an external input

*9 The flow rate given in the specifications is the value under standard conditions.

*10 Setting is only possible for models with the units selection function.

*11 For details, refer to "IN Side Straight Piping Length and Accuracy" on page 12.

*12 For details, refer to "Construction: Parts in Contact with Fluid" on page 14.

*13 The accumulated flow display is the upper 3-digit, middle 3-digit, and lower 3-digit (total of 9 digits) display. The position of the dots on the upper part of the screen indicates which digits are displayed.

* Products with tiny scratches, marks, or display color or brightness variations which do not affect the performance of the product are verified as conforming products.





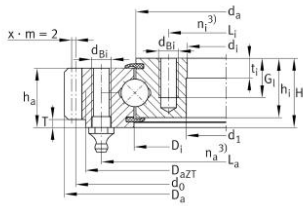
VA140188-V-VSP

Slewing ring, four Point contact bearings, external gear

Schaeffler ID:
0011452070079

Slewing ring, Four Point contact bearing,
internal gear teeth

Technical information



Main Dimensions & Performance Data

d _i	136 mm	Bore Diameter
	0,5 mm	Bore diameter upper tolerance
	-0,5 mm	Bore diameter lower tolerance
d _{iZT}	135 mm	Diameter centring inner ring
	0,2 mm	Diameter centring inner ring upper tolerance
	0 mm	Diameter centring inner ring lower tolerance
H	35 mm	Height
D _a	259,36 mm	Outside Diameter
D _{iZT}	238 mm	Diameter centring outer ring
	0 mm	Diameter centring outer ring upper tolerance
	-0,07 mm	Diameter centring outer ring lower tolerance
T	4	Length centering outer ring
t	10	Length centering inner ring
h _a	30 mm	Width outer ring
h _i	30 mm	height of individual ring
	0,03	Normal radial clearance min.
	0,1	Normal radial clearance max.
	0,05	Normal axial clearance min.
	0,2	Normal axial clearance max.
	7,1 kg	Weight

The datasheet is only an overview of dimensions and basic load ratings of the selected product. Please always observe all further information and guidelines for this product. For further information you can use the contact form on our website.

Step Angle 1.8° Frame Size 85 mm (4 lead wires)
Standard Type with Cable

Specifications (RoHS)

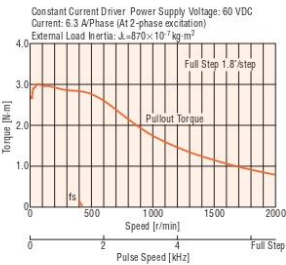


Product Name	Connection Type	Maximum Holding Torque N·m	Rotor Inertia J: kg·m ²	Rated Current A/Phase	Voltage VDC	Resistance per Phase Ω/Phase	Inductance mH/Phase	Basic Step Angle	Wiring and Connections (See Page A-334)
Single Shaft									
PK296DW	Bipolar	3.1	1400×10^{-7}	6.3	1.4	0.24	1.5	1.8°	1
PK299DW		6.2	2700×10^{-7}	6.3	1.9	0.33	2.5		
PK2913DW		9.3	4000×10^{-7}	5.6	2.6	0.49	4.2		

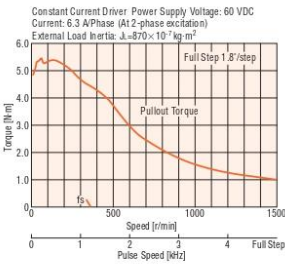
● Degree of Protection: IP54 (Excluding the motor mounting surface)

Speed – Torque Characteristics

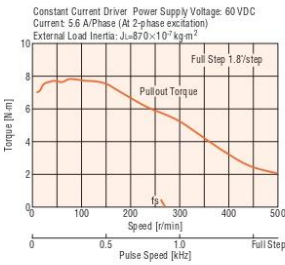
PK296DW



PK299DW



PK2913DW

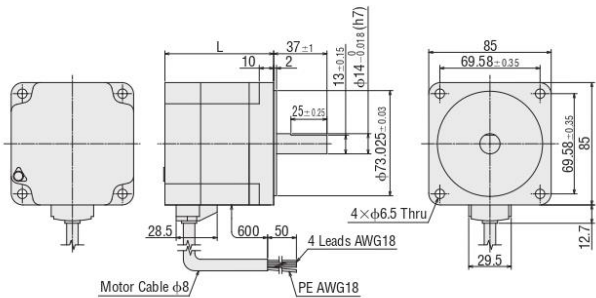


Note

● Depending on the driving conditions, a considerable amount of heat may be generated by the motor. Be sure to keep the motor case temperature at 100°C or less.

Dimensions (Unit = mm)

Product Name	L	Mass kg
PK296DW	75.5	2.0
PK299DW	105.5	3.1
PK2913DW	135.5	4.2



Electric Rotary Table **LER Series**

Step Motor (Servo/24 VDC)

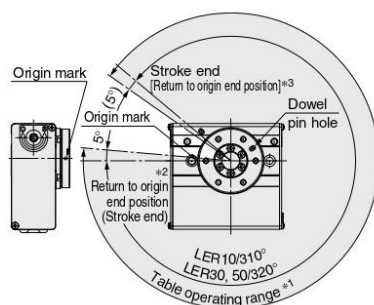
Specifications

Step Motor (Servo/24 VDC)

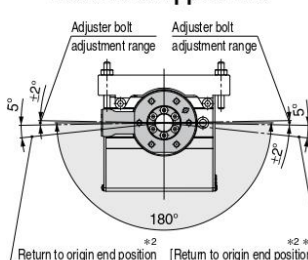
Model		LER□10K	LER□10J	LER□30K	LER□30J	LER□50K	LER□50J	
Actuator specifications	Rotation angle [°]	310		320				
	Lead [°]	8	12	8	12	7.5	12	
	Max. rotating torque [N·m]	0.32	0.22	1.2	0.8	10	6.6	
	Max. pushing torque 40 to 50 % [N·m] ^{*1+3}	0.13 to 0.16	0.09 to 0.11	0.48 to 0.60	0.32 to 0.40	4.0 to 5.0	2.6 to 3.3	
	Max. moment of inertia [kg·m ²] ^{*2+3}	JXC□1	0.0040	0.0018	0.035	0.015	0.13	0.05
		LECPA			0.027	0.012	0.10	0.04
	JXC□2							
	Angular speed [°/sec] ^{*2+3}	20 to 280	30 to 420	20 to 280	30 to 420	20 to 280	30 to 420	
	Pushing speed [°/sec]	20	30	20	30	20	30	
	Max. angular acceleration/deceleration [°/sec ²] ^{*2}	3000						
	Backlash [°]	Basic type	±0.3	±0.2				
		High-precision type		±0.1				
	Positioning repeatability [°]	Basic type	±0.05	±0.05				
		High-precision type		±0.03				
	Lost motion [°] ^{*4}	Basic type	0.3 or less	0.3 or less				
High-precision type		0.2 or less						
Impact/Vibration resistance [m/s ²] ^{*5}	150/30							
Actuation type	Special worm gear + Belt drive							
Max. operating frequency [c.p.m.]	60							
Operating temp. range [°C]	5 to 40							
Operating humidity range [%RH]	90 or less (No condensation)							
Weight [kg]	Basic type	0.49		1.1		2.2		
	High-precision type	0.52		1.2		2.4		
Rotation angle [°]	-2/ arm (1 pc.)	180						
	-3/ arm (2 pcs.)	90						
Repeatability at the end [°] with external stopper	±0.01							
External stopper setting range [°]	±2							
Weight [kg]	-2/external arm (1 pc.)	0.55		1.2		2.5		
	High-precision type	0.61		1.4		2.7		
Weight [kg]	-3/external arm (1 pc.)	0.57		1.2		2.6		
	High-precision type	0.63		1.4		2.8		
Motor size	□20			□28		□42		
Motor type	Step motor (Servo/24 VDC)							
Encoder	Incremental							
Power supply voltage [V]	24 VDC ±10%							
Power [W] ^{*6}	Max. power 14			Max. power 42		Max. power 57		

- *1 Pushing force accuracy is LER10: ±30% (F.S.), LER30: ±25% (F.S.), LER50: ±20% (F.S.).
- *2 The angular acceleration, angular deceleration and angular speed may fluctuate due to variations in the moment of inertia.
- *3 The speed and force may change depending on the cable length, load and mounting conditions. Furthermore, if the cable length exceeds 5 m, then it will decrease by up to 10% for each 5 m. (At 15 m: Reduced by up to 20%)
- *4 A reference value for correcting an error in reciprocal operation
- *5 Impact resistance: No malfunction occurred when the slide table was tested with a drop tester in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (The test was performed with the actuator in the initial state.)
- Vibration resistance: No malfunction occurred in a test ranging between 45 to 2000 Hz. The test was performed in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (The test was performed with the actuator in the initial state.)
- *6 Indicates the max. power during operation (including the controller)
- This value can be used for the selection of the power supply.

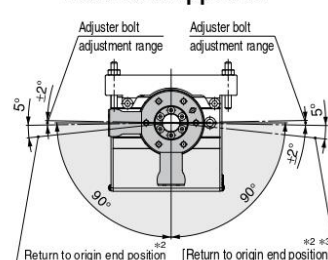
Table Rotation Angle Range



External stopper: 180°



External stopper: 90°



- *1 This is the range within which the table can move when it returns to origin.
Make sure workpieces mounted on the table do not interfere with the workpieces and facilities around the table.
- *2 Position after returning to origin. The position varies depending on whether there is an external stopper.
- *3 [] for when the direction of return to origin has changed

* The figures show the origin position for each actuator.

Lineaire aandrijving DGC-25 -

Artikelnummer: 532447

FESTO



Gegevensblad

Algemeen gegevensblad - Individuele waarden zijn afhankelijk van uw configuratie.

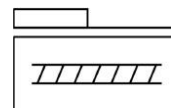
Functie	Waarde
Slag	1 mm ... 8500 mm
Zuiger-Ø	25 mm
Demping	Elastische dempingsringen/-platen aan beide zijden Pneumatische demping, aan beide kanten instelbaar Schokdemper, harde karakteristiek Schokdemper, zachte karakteristiek
Inbouwpositie	Willekeurig
Geleiding	Glijgeleiding Basisgeleiding Kogelomloopgeleiding
Positiedetectie	Voor naderingssensor
Varianten	Klemmenheid as Beschermd kogelomloopgeleiding Bijkomende slede, standaard, links Bijkomende slede, standaard rechts
Bedrijfsdruk	2 bar ... 8 bar
Werking	dubbelwerkend
CE-teken (zie conformiteitsverklaring)	volgens EU Ex-veiligheidsrichtlijn (ATEX)
Explosiebescherming	Zone 1 (ATEX) Zone 2 (ATEX) Zone 22 (ATEX)
ATEX-categorie gas	II 2G
ATEX-categorie stof	II 3D
Ontstekingsbeschermingsklasse gas	Ex h IIC T4 Gb X
Ex-ontstekingsbeschermingsklasse stof	Ex h IIIC T120°C Db X
Ex-omgevingstemperatuur	-10°C ≤ Ta ≤ +60°C
Bedrijfsmedium	Perslucht conform ISO 8573-1:2010 [7:...]]
Aanwijzing bij het bedrijfs-/stuurmedium	Geoliede werking mogelijk (in het verdere werking vereist)
Corrosiebestendigheidsklasse KBK	0 - geen corrosiebelasting 1 - lage corrosiebelasting 2 - matige corrosiebelasting
Geschiktheid voor levensmiddelen	Zie uitgebreide informatie over het materiaal
Omgevingstemperatuur	-10 °C ... 60 °C
Dempingslengte	15,5 mm
Theoretische kracht bij 6 bar, terugloop	295 N
Theoretische kracht bij 6 bar, uitgaand	295 N
Alternatieve aansluitingen	Zie producttekening
Bevestigingstype	Met toebehoren

Pneumatische aansluiting klemmenheid	M5
Materiaal-informatie	Koper- en PTFE-vrij RoHS conform
Materiaal deksel	Aluminium kneedlegering
Materiaal afdichtingen	NBR TPE-U (PU)

Spindelas ELGT-BS-90 -

Artikelnummer: 8121224

FESTO



Gegevensblad

Algemeen gegevensblad - Individuele waarden zijn afhankelijk van uw configuratie.

Functie	Waarde
Werkslag	50 mm ... 1000 mm
Bouwgrootte	90
Slagreserve	0 mm
Omkeerspel	≤ 0.15 µm
Spindel diameter	15 mm ... 16 mm
Spindel spoed	10 mm/U ... 20 mm/U
Inbouwpositie	Willekeurig
Geleiding	Kogelomloopgeleiding
Constructieve opbouw	Elektromechanische lineaire as met kogelomloopspindel
Motortype	Stappenmotor Servomotor
Type spindel	Kogelomloopspindel
Symbool	00991211
Varianten	Metalen met koper, zink of nikkel als hoofdbestanddeel mogen niet worden gebruikt. Met uitzondering van nikkel in staal, chemisch vernikkelde oppervlakken, printplaten, leidingen, elektrische connectoren en spoelen.
Max. versnelling	15 m/s ²
Max. toerental	3000 1/min
Max. snelheid	0.5 m/s ... 1 m/s
Herhaalnauwkeurigheid	± 0.02 mm
Inschakelduur	100%
Geschiktheid voor de productie van Li-ion-batterijen	Metalen met een gewichtsaandeel van meer dan 1% koper, zink of nikkel als zijn uitgesloten voor toepassing. Uitzondering vormen nikkel in staal, chemisch vernikkelde oppervlakken, printplaten, leidingen, elektrische connectoren en spoelen
Cleanroomklasse	Klasse 6 volgens ISO 14644-1
Beschermingsklasse	IP20
Omgevingstemperatuur	0 °C ... 50 °C
Continue toevoerkraft	810 N ... 1054 N
Oppervlaktmomenten 2e graad ly	631000 mm ⁴
Oppervlaktmomenten 2e graad lz	1948000 mm ⁴
Nullast draaimoment bij maximale verplaatsingssnelheid	0.2 Nm ... 0.3 Nm
Nullast draaimoment bij minimale verplaatsingssnelheid	0.04 Nm ... 0.08 Nm
Max. kracht Fy	4710 N
Max. kracht Fz	5600 N

Functie	Waarde
Fy bij theoretische levensduur van 100 km (zuivere geleidingsbeoordeling)	17352 N
Fz bij theoretische levensduur van 100 km (enkel vanuit geleidingsperspectief)	20631 N
Max. moment Mx	65 Nm
Max moment My	51 Nm
Max. moment Mz	51 Nm
Mx bij theoretische levensduur van 100 km (enkel vanuit geleidingsperspectief)	239 Nm
My bij theoretische levensduur van 100 km (zuivere geleidingsbeoordeling)	188 Nm
Mz bij theoretische levensduur van 100 km (enkel vanuit geleidingsperspectief)	188 Nm
Max. radiaalkracht aan de aandrijfschacht	290 N
Max. toevoerkraft Fx	810 N ... 1054 N
Torsietraagheidsmoment It	151000 mm ⁴
Massatraagheidsmoment JH per meter slag	0.2522 kgcm ² ... 0.3453 kgcm ²
Massatraagheidsmoment JL per kg nuttige last	0.0253 kgcm ² ... 0.1013 kgcm ²
Massatraagheidsmoment JO	0.1252 kgcm ² ... 0.2291 kgcm ²
Massatraagheidsmoment JW voor bijkomende slede	0.0358 kgcm ² ... 0.1435 kgcm ²
Toevoerconstante	10 mm/U ... 20 mm/U
Verplaatste massa	1628 g ... 1645 g
Gewicht extra slede	1416 g
Productgewicht	4865 g ... 14802 g
Basisgewicht bij 0 mm slag	4353 g ... 4380 g
Gewichtstoeslag per 10 mm slag	104 g
Dynamische doorbuiging (last beweegt)	0,05 % van de lengte van de as, maximaal 0,5 mm
Statische doorbuiging (last bij stilstand)	0,1 % van de lengte van de as
Interfacecode actuator	T46
Materiaal afsluitdeksel	Persgegoten aluminium, gelakt
Materiaal profiel	Aluminium kneedlegering, geanodiseerd
Materiaal-informatie	LABS-houdende stoffen inbegrepen RoHS conform
Materiaal aandrijfdeksel	Persgegoten aluminium, gelakt
Materiaal geleiding slede	Staal
Materiaal geleidingsrail	Staal
Materiaal slede	Aluminium kneedlegering, geanodiseerd
Materiaal spindelmoer	Staal
Materiaal spindel	Staal

Geïntegreerde aandrijving EMCA-EC-67-

Artikelnummer: 1509036

FESTO



Gegevensblad

Algemeen gegevensblad - Individuele waarden zijn afhankelijk van uw configuratie.

Functie	Waarde
Bedrijfsmodus controller	PWM-MOSFET-vermogens eindtrap Cascaderegelaar met P-positieregelaar PI-snelheidsregelaar PI-stroomregelaar
Rotorpositiesensor	Encoder absoluut single turn Encoder absoluut, multi-turn
Rotorpositiegever meetprincipe	magnetisch
Beschermfunctie	I ² t bewaking Temperatuurbewaking Stroombewaking Spanningsuitvaldetectie Sleepfoutbewaking Software-eindpositiedetectie
Veiligheidsfunctie	Veilige operationele stop (SOS)
Safety Integrity Level (SIL)	Veilig afgeschakeld koppel (STO) / SIL 2
Performance Level (PL)	Veilig afgeschakeld koppel (STO) / categorie 3, Performance Level d
Indicator	LED
Max. toerental	3300 1/min ... 3500 1/min
Nominaal toerental	3100 1/min ... 3150 1/min
Remweerstand, extern	6 Ohm
Diagnosedekkingsgraad	90 %
Eigenschappen digitale logische uitgangen	Gedeeltelijk vrij configureerbaar Niet galvanisch gescheiden
Hardware-fouttolerantie	1
Max. stroom digitale logische uitgangen	100 mA
Max. positieve testimpuls bij signaal 0	10000 µs
Max. negatieve controle-impuls bij 1 signaal	600 µs
Nominaal vermogen motor	120 W ... 150 W
Nominale spanning DC	24 V
Parametreerinterface	Ethernet
SFF Safe Failure Fraction	>90 %
Max. aantal verplaatsingssets	64
Rotorpositiesensor resolutie	12 bit
Toegepaste spanningsschommelingen	+/- 20 %
Goedkeuring	RCM Mark c UL us - Recognized (OL)
KC-kenteken	KC-EMC

Functie	Waarde
Certificaat instantie van afgifte	TUV 01/205/5514.00/16 UL E331130
CE-teken (zie conformiteitsverklaring)	Conform EU-EMC-richtlijn Conform EU-machinerichtlijn
Trillingsbestendigheid	Transportcontrole met scherpptegraad 2 conform FN 942017-4 en EN 60068-2-6
Schokbestendigheid	Schoktest met scherpptegraad 2 conform FN 942017-5 en EN 60068-2-27
Corrosiebestendigheidsklasse KBK	1 - lage corrosiebelasting
Lagertemperatuur	-25 °C ... 70 °C
Relatieve luchtvochtigheid	0 - 95 % Niet condenserend
Beschermingsklasse	IP54 IP65
Omgevingstemperatuur	0 °C ... 50 °C
Aanwijzing bij de omgevingstemperatuur	Boven een omgevingstemperatuur van 20 °C moet een vermogensreductie van 1,75 % per °C in acht worden genomen.
Houdmoment rem	0 Nm ... 1 Nm
Nominaal draaimoment	0.37 Nm ... 0.45 Nm
PFH	1.0E-9
PFD	1.86E-5
Proof-test-interval	20 y
Specificatie logische ingang	In aansluiting op IEC 61131-2
Bedrijfsbereik logische ingang	24 V
Eigenschappen logische ingang	Galvanisch met logica-potentiaal verbonden
Ethernet, ondersteunde protocollen	TCP/IP
Schakellogica ingangen	PNP (plus schakelend)
Schakellogische uitgangen	PNP (plus schakelend)
Bevestigingstype	vastgeschroefd met doorgangsboring
Materiaal-informatie	LABS-houdende stoffen inbegrepen RoHS conform

Parallelkit
EAMM-U-87-T46-67A-114
 Artikelnummer: 8084496

FESTO



Gegevensblad

Functie	Waarde
Bouwgrootte	87
Middenafstand	114 mm
Inbouwpositie	Willekeurig
Tandwieloverbrenging	1:1
Max. toerental	3000 1/min
LABS-conformiteit	VDMA24364-zone III
Lagertemperatuur	-20 °C ... 60 °C
Relatieve luchtvochtigheid	0 - 95 %
Beschermingsklasse	IP40
Omgevingstemperatuur	0 °C ... 50 °C
Massatraagheidsmoment	41.2 kgmm ²
Nullastaandrijfmoment	0.22 Nm
Overdraagbaar draaimoment	3 Nm
Productgewicht	966 g
Interfacecode actuator	T46
Interfacecode motor In	67A
Materiaal-informatie	RoHS conform