

Onderzoek en implementatie van een C-as op een draaibank met een Sinumerik NC-controller

Technology

bachelor in de **elektromechanica**

afstudeerrichting **automatisering**

campus **Brugge Station**

Ruben Mees

bedrijfsmentor: Wim De Coene, Cadcamatic

VIVES-mentor: Tommy Verbeerst

Onderzoek en implementatie van een C-as op een draaibank met een Sinumerik NC-controller

Technology

bachelor in de **elektromechanica**

afstudeerrichting **automatisering**

campus **Brugge Station**

Ruben Mees

bedrijfsmentor: Wim De Coene, Cadcamatic

VIVES-mentor: Tommy Verbeerst

academiejaar **2024-2025**

Research and implementation of a C-axis on a lathe using a Sinumerik NC controller

Technology

bachelor in de **elektromechanica**

afstudeerrichting **automatisering**

campus **Brugge Station**

Ruben Mees

bedrijfsmentor: Wim De Coene, Cadcamatic

VIVES-mentor: Tommy Verbeerst

academiejaar **2024-2025**

Mededeling

Deze eindverhandeling was een examen. De tijdens de verdediging geformuleerde opmerkingen werden niet opgenomen.

Voorwoord

Voor u ligt mijn bachelorproef, geschreven ter afronding van mijn opleiding Professionele Bachelor Elektromechanica, afstudeerrichting Automatisering, aan Hogeschool VIVES te Brugge. In deze bachelorproef wordt onderzocht hoe een bestaande Computer Numerical Control (CNC)-draaibank kan worden uitgebreid. Het project werd gerealiseerd bij Cadcamatic, van februari tot juni 2025.

Ik wil hierbij graag de volgende personen en organisaties bedanken:

Alexandre Rogiers, managing director van Cadcamatic, voor de kans om dit project binnen het bedrijf uit te voeren en een werkend prototype te realiseren.

Wim De Coene, mijn bedrijfsmentor, voor zijn begeleiding en opvolging doorheen het volledige traject.

Tommy Verbeerst, mijn docent automatisering en VIVES-mentor, voor mij in contact te brengen met Cadcamatic, de opvolging van mijn traject en het nalezen van deze bachelorproef.

Markoen Vanthuyne, productspecialist bij Siemens, voor zijn technische ondersteuning en voor het ter beschikking stellen van een demorack en softwarelicentie.

Augustin Roegiers, voor het ontwerpen van de mechanische opstelling en zijn hulp bij diepgaandere theorie.

Stijn Neiryndck, die de productie van de testopstelling coördineerde en ervoor zorgde dat alles tijdig klaar was.

Bart Allemeersch, monteur bij Cadcamatic, voor de hulp bij de opbouw van de testopstelling.

Siemens, voor de unieke leerervaring tijdens mijn duaal traject in het eerste semester. Dankzij hun opleidingen kon ik mijn kennis van PLC, HMI, *data handling*, aandrijftechniek en *motion control* verder verdiepen. Ik kreeg ook de kans om deel te nemen aan het examen Siemens Certified Programmer, dat ik met succes heb afgelegd. Tijdens dit traject mocht ik twee extra cursussen volgen als voorbereiding op deze proef: een verdiepende cursus over *motion control* en een cursus over Sinumerik.

Freya De Ruyver, voor haar begeleiding binnen Siemens.

Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor hun blijvende steun. Zonder hen was deze opleiding niet mogelijk geweest.

Ruben Mees
Brugge, juni 2025

Abstract

Deze bachelorproef, uitgevoerd bij Cadcamatic, had als doel te onderzoeken hoe een bestaande XZ-CNC-draaibank met aangedreven gereedschap uitgebreid kon worden om complexe bewerkingen uit te voeren op het kopvlak van de as. Eerst werd een grondige voorstudie uitgevoerd naar de bestaande machineconfiguratie en naar de manier waarop de werkstukken vervaardigd konden worden. Vervolgens werd onderzocht welke aanpassingen aan de machine nodig waren. Uit deze analyse bleek dat twee zaken gewijzigd moesten worden: er moest een C-as toegevoegd worden – waarbij de hoofdspil (klauwplaat met werkstuk) als gecontroleerde rotatieas werd ingezet – en er was een besturingssysteem nodig dat interpolatie tussen twee assen ondersteunde.

Omdat het vlak waarin geïnterpoleerd moest worden (het XC-vlak) bestond uit een lineaire en een rotatieas, was een transformatie vereist. Er werd een diepgaande vergelijking gemaakt tussen een Siemens-T-CPU en een Sinumerik-NC-besturing, waarbij werd onderzocht hoe deze transformatie gerealiseerd kon worden. Al snel bleek dat de Sinumerik-besturing dit op een eenvoudige manier ondersteunde. Toch werd ook nagegaan of dit met een T-CPU mogelijk was. Op basis van deze studie werd gekozen om verder te werken met de Sinumerik-besturing.

Er werd een testopstelling ontworpen om het concept te evalueren. Het mechanisch ontwerp werd uitgewerkt door een ontwerper van Cadcamatic. Er werd materiaal verzameld, geschikte componenten geselecteerd en de nodige berekeningen uitgevoerd om de correcte werking van de opstelling te controleren. Siemens stelde een Sinumerik One-besturing en een licentie voor de Create My Virtual Machine (CMVM)-software ter beschikking.

Terwijl het mechanisch gedeelte van de testopstelling in productie was, werd een virtuele machine van de bestaande draaibank geconfigureerd. Deze virtuele machine maakte het mogelijk om een deel van de inbedrijfname vooraf uit te voeren en het gedrag van de machine realistisch te simuleren. Nadien werd ook van het prototype van de testopstelling een virtuele versie ontwikkeld. Na de montage van de testopstelling werd het tweede deel van de inbedrijfname uitgevoerd en werden de werkstukken succesvol vervaardigd, zoals verwacht.

Trefwoorden:

Sinumerik, C-as, polaire interpolatie, virtuele inbedrijfname, CNC-besturing, motion control, transformatie XC-vlak

Inhoudsopgave

Voorwoord	iv
Abstract	v
Lijst van figuren	viii
Lijst van tabellen	xi
Lijst van afkortingen	xiii
1 Inleiding	1
1.1 Bedrijf	1
1.2 Situering	2
1.3 Doelstellingen	4
2 Voorstudie	5
2.1 Analyse van de bestaande machine	5
2.2 Analyse van de noodzakelijke aanpassingen	6
2.2.1 Verband tussen het XY- en het XC-vlak	7
2.2.2 Positionering en <i>Motion control</i>	9
2.2.3 Interpolatie tussen twee lineaire assen	10
2.2.4 Interpolatie tussen lineaire en roterende as (polaire interpolatie)	11
2.2.5 Grenzen van polaire interpolatie	14
2.2.6 Voorbeelden polaire interpolatie	16
2.2.7 Toepassing van polaire interpolatie bij numerieke besturing	18
2.2.8 Besluit van de aanpassingen	19
2.3 Besturingssysteem	20
2.3.1 Functionele eisen	20
2.3.2 T-CPU	20
2.3.3 Sinumerik	23
2.4 Vergelijking van de twee besturingssystemen	27
2.4.1 Mogelijkheden van visualisatie en bedieningsscherm	27
2.4.2 Mogelijkheden van perifere in- en uitgangen	27
2.4.3 Bedieningsmogelijkheden	28
2.4.4 Mogelijkheden van de aandrijfsystemen	28
2.4.5 Kostenvergelijking besturingssystemen	28
2.4.6 Besluit van het besturingssysteem	29
3 Virtuele machine	30
3.1 3D-model	30
3.2 Virtuele machine instellen	32
3.2.1 Inladen van 3D-model	32
3.2.2 Toegangs niveaus	32
3.2.3 Licenties	32
3.2.4 Configuratie van machine- en instellingsgegevens (MD/SD)	33
3.2.5 Gereedschapsbeheer	39
3.2.6 Kinematische keten	40
3.2.7 Configuratie van de TRANSMIT-transformatie	41
3.3 Programmeermethodes en simulaties	42
3.3.1 Hoofdspil: Spil-modus en as-modus (C-as)	42
3.3.2 Werkmethodes	42
3.4 Besluit van de virtuele machine	45
4 Mechanische opstelling	46
4.1 Omzetting van rotatie naar translatie via een spindel	46
4.1.1 Formules	46
4.1.2 Effect van de spindelspoed	47

4.2	Werkgebiedsbeperkingen	48
4.3	Massatraagheid en lambda-analyse	48
4.4	Krachten op de frees tijdens verspaning	50
4.4.1	Schatting van de optredende krachten uit de bewerkingsgegevens	51
4.4.2	Schatting van de maximaal optredende krachten uit de specificaties van de gereedschapsspil	51
4.4.3	Theoretisch maximale tangentiële kracht	51
4.4.4	Schatting van het maximaal optredende proceskoppel per as	52
4.4.5	Besluit en opmerkingen over de proceskoppels	52
4.5	Omkeerspel (Backlash)	53
4.5.1	Omkeerspel van de C-as	53
4.5.2	Omkeerspel van de X- en Z-as	54
4.5.3	Besluit	55
4.6	Positioneringsnauwkeurigheid en herhaalbaarheid	56
4.6.1	Positioneringsnauwkeurigheid	56
4.6.2	Encoderfout	56
4.6.3	Mechanische fout door <i>running parallelism</i>	57
4.6.4	Nuance: Herhaalbaarheid en invloed op toleranties	58
4.7	Resultaat mechanisch gedeelte	58
5	Elektrische componenten en aansluiting	59
5.1	Sinumerik One Demorack	59
5.1.1	Besturingseenheid: NCU 1750	60
5.1.2	Visualisatie en bedieningsscherm: ITC V3 22"	62
5.1.3	Bedieningspaneel: MCP 2200	62
5.2	Aandrijfsysteem: Sinamics S120	63
5.2.1	Werking van een frequentieomvormer	63
5.2.2	Modulair opbouwsysteem	64
5.2.3	Lijnreactor	65
5.2.4	Lijnfilter	67
5.2.5	Lijnmodule	68
5.2.6	Motor module	69
5.2.7	DC bus	73
5.2.8	DRIVE-CLiQ	74
5.3	In- en uitgangen via een I/O-eiland	75
5.4	Directe encoder op de C-as	75
5.5	Veiligheidsrelais	76
5.6	Resultaat elektrisch gedeelte	77
6	Programmering en inbedrijfname	78
6.1	Machine instellingen	78
6.2	PLC-programma	78
6.3	Control unit (CU) en motormodules	79
6.4	Opstelling data	80
6.4.1	Configureren van de spoed	80
6.4.2	Configureren van de overbrengingsverhouding tussen motor en hoofdspil	80
6.4.3	Configureren van het directe meetsysteem	81
6.4.4	Controle	81
6.5	Optimalisatie van de regelkring	81
6.5.1	Optimalisatie van een as	82
6.5.2	Optimalisatie van een spil	82
6.5.3	Optimalisatie van het interpolatiepad	82
6.6	Bepaling van de maximale versnelling	82
6.6.1	Traagheidsmoment van de as	82
6.6.2	Bepaling van het maximaal koppel van de aandrijflijn	83
6.6.3	Bepaling van de wrijving en het houdkoppel	83
6.6.4	Berekenen van de maximale versnelling per as	85
6.7	Instellen van de <i>jerk</i>	85
6.8	Configuratie van de veiligheidsfunctie	86

6.9	Referentieprocedure	87
6.9.1	Referentieprocedure incrementeel meetsysteem	87
6.9.2	Configuratie van de referentieprocedure voor de drie assen	92
6.10	Limieten	93
6.11	Aansturen van PLC-uitgangen via het NC-programma	93
7	Kalibratie van de machine	94
7.1	Keuze van het machinenulpunt	94
7.2	Z-as	94
7.3	X-as	95
7.4	C-as	95
7.4.1	Voordeel van een Y-as bij het afregelen van X ten opzichte van C	95
8	Testresultaten en bevindingen	96
9	Algemeen besluit	99
	Bibliografie	103
A	Sinumerik-modellen	104
B	Berekeningen massatraagheidsmoment en -verhouding	107
C	Berekeningen maximale acceleratie	111
D	Lijst gebruikte componenten	113
E	Specificaties	114
E.1	Enkele motor module	114
E.2	Dubbele motor module	115
E.3	Motor C	116
E.4	Motor X en Z	117
E.5	Lineaire slede X- en Z-as	118
E.6	Persluchtfrees	119
E.7	Directe encoder	120
E.8	Encoder module	121
E.9	Reductor	122
E.10	Koppeling X- en Z-as	123
F	Overzicht van alle toegangsniveaus	124
G	Overzicht van machineparameters	125
H	Algemene machine- en instellingsgegevens	126
I	Bit-instellingen voor de draairichting van een spil	129
J	M-code <i>mapping</i>	130
K	Elektrisch schema (EPLAN)	131

Lijst van figuren

1.1	Logo bedrijf (Caddcamatic, 2024)	1
1.2	Gebouw van Caddcamatic (Architect Naert, 2024)	1
1.3	3D-rendering van de bestaande machine (Caddcamatic, 2024)	2
1.4	Vooraanzicht van de onderdelen van de bestaande machine	2
1.5	Bewerkingen van de bestaande machine: boren (boven) en conisch slijpen (onder), met links het vooraanzicht en rechts het zijaanzicht van de as	3
1.6	Voorbeelden van bewerkingen die buiten de mogelijkheden van de bestaande machine vallen	3
2.1	Vooraanzicht van de onderdelen van de bestaande machine	5
2.2	Voorbeeld van een <i>gang tooling</i> -opstelling (Star Micronics, 2020)	5
2.3	Verband tussen de complexiteit en de bewerkingsmogelijkheden van CNC-draaibanken. Groen: huidige machine. Oranje: voorgestelde uitbreiding met C-as (Siemens AG, 2018).	6
2.4	Visualisatie van het XC-vlak (Mitsubishi Electric Corporation, 2008, p. 125)	7
2.5	Vooraanzicht van het draaistuk: frezen met enkel C-as (links) en met C- en Y-as (rechts) (Siemens AG, 2018, p. 13)	7
2.6	Weergave van een punt in het cartesische XY-vlak en het polaire XC-vlak	7
2.7	Polaire en cartesische weergave van het XC-vlak	8
2.8	Responsvergelijking tussen procesregeling en bewegingsregeling (<i>motion control</i>) (Real-Pars, 2025)	9
2.9	Trapeziumprofiel als voorbeeld van een <i>motion control</i> -profiel	9
2.10	Voorbeeld van gecombineerde beweging, waarbij twee assen loodrecht ten opzichte van elkaar zijn opgesteld en al dan niet gelijktijdig bewegen (Newport Corporation, 2024).	10
2.11	Lineaire interpolatie tussen twee punten P_A en P_B	10
2.12	Lineaire interpolatie tussen twee punten: de Y-as (groen), de X-as (rood) en het ruimtepad (zwart) (Newport Corporation, 2024)	11
2.13	Benadering van een cirkelboog door lineaire segmenten	11
2.14	Lineair pad op het kopvlak van een as, gedefinieerd in het XY-vlak en om te zetten naar het XC-vlak	12
2.15	Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een rechte lijn	12
2.16	Een lineaire verandering van zowel de radiale afstand als de hoek, weergegeven in het cartesische assenstelsel (links), leidt tot een spiraal in het polaire assenstelsel (rechts).	14
2.17	Een lineaire verandering van alleen de hoek leidt tot een cirkel in het polaire assenstelsel	14
2.18	Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een rechte lijn met beperkte interpolatiepunten	15
2.19	Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een gereedschapsbeweging door het middelpunt	16
2.20	Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een vierkante contour	16
2.21	Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor de tweede gewenste werkstuk (p. 3)	17
2.22	Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een excentrische cirkel	17
2.23	Transformatie van programmeerstelsel [X, Y, Z] naar machine-assenstelsel [X, C, Z] (ENCY, 2024)	18
2.24	Axiaal frezen op het kopvlak (OmniTurn, 2019, p. 2.77)	19
2.25	Illustratie van relatieve <i>gearing</i>	21
2.26	Illustratie van absolute <i>gearing</i>	21
2.27	Een voorbeeld van een camprofiel (Gürocak, 2016, p. 260).	21
2.28	Vergelijking tussen <i>kinematics control</i> (Siemens AG, 2024b, p. 5) en <i>kinematics language</i> (Siemens AG, 2022b, p. 6)	22
2.29	Basisprincipe van het kinematica-technologie-object met maximaal vier interpolerende kinematische assen (Siemens AG, 2023c, p. 21)	22
2.30	Principe van het TRANSMIT-commando (Siemens AG, 2022a, p. 9)	23
2.31	Overzicht van de Sinumerik One-modellen (Meriaho, 2020, p. Slide 9)	24
2.32	PPU 1740 (Meriaho, 2020, p. Slide 7).	25
2.33	PPU-topologie, voorbeeld 1 (Siemens AG, 2023b, p. 30).	25
2.34	PPU-topologie, voorbeeld 2 (Siemens AG, 2023b, p. 30).	25
2.35	NCU 1740 (Meriaho, 2020, p. Slide 7)	26

2.36 NCU-topologie, voorbeeld 1 (Siemens AG, 2023a, p. 26).	26
2.37 NCU-topologie, voorbeeld 2 (Siemens AG, 2023a, p. 26).	26
2.38 Bestaande machinebediening met HMI KTP1000 voor visualisatie, vier functiedrukknoppen en één noodstop rechts	27
3.1 Workflow voor inbedrijfname Sinumerik One (Siemens AG, 2024m, p. 476)	30
3.2 Referentie in het centrum van de klauwplaat	31
3.3 Weergave van de kinematische keten in de 3D Builder-software	31
3.4 Screenshot van de huidige machine geïmporteerd in 3D Builder-software	32
3.5 Modulo 360° map (Siemens AG, 2024d, p. 321)	35
3.6 Overzicht van de geconfigureerde assen	35
3.7 Mogelijke coördinatensystemen (Siemens AG, 2024e, p.226)	36
3.8 Bewerkingsvlakken: G17 (XY), G18 (ZX), G19 (YZ) (Siemens AG, 2024g, p. 39)	37
3.9 Overzicht van de instellingen voor gereedschapsbeheer	39
3.10 Kinematische keten van de machine	41
3.11 Configuratie-instelling van de TRANSMIT_KIN_MAIN-transformatie	41
3.12 Pad van een vierkant, gefreesd op een XYZ-freesmachine.	43
3.13 Vierkante contour met cartesische coördinaten, gefreesd op een XCZ-draaifreesmachine.	43
3.14 ShopTurn-programma met een geïmporteerd .dxf-bestand van gewenste vorm 2.	45
3.15 Resultaat van het ShopTurn-programma met .dxf-import van gewenste vorm 2.	45
4.1 Initiële schets van de mechanische opstelling (vooraanzicht)	46
4.2 Werkgebiedsbepijking door offset tussen de lineaire en rotatieas (Siemens AG, 2024j, p. 71)	48
4.3 Eerste 3D-ontwerp van de mechanische opstelling, met links het vooraanzicht	48
4.4 Aangepaste mechanische opstelling met reductor	50
4.5 Verloop van de tangentiële snijkracht. Links: voor één tand bij tegenlooppfreen en meelooppfreen. Rechts: voor meerdere tanden (K. et al., 2018, p. 166).	50
4.6 Omkeerspelijng bij tandwielen (Winsmith, z.d.)	53
4.7 Grafische voorstelling van rotoire omkeerspelijng (Nordin & Gutman, 2002, p. 4)	53
4.8 Direct meetsysteem op de C-as	54
4.9 Links: onderdelen van een kogelomloopspindel (Oriental Motor, 2009, p. 1), rechts: oorzaak van omkeerspelijng (Oriental Motor, 2009, p. 5)	54
4.10 Grafische voorstelling van lineaire omkeerspelijng (Siemens AG, 2024f, p. 211)	54
4.11 Spelingsvrije koppeling van Misumi (MISUMI, 2019)	55
4.12 Illustratie van positioneeruauwkeurigheid: afwijking tussen gevraagde en werkelijke positie (MISUMI, 2014)	56
4.13 Illustratie van <i>running parallelism</i> : afwijking ten opzichte van een ideaal vlak (THK, 2016)	57
4.14 Samengestelde fout in de C-as door encoder en mechanisch parallelisme. Afgebeeld is het rechterzijanzicht, waarbij het kopvlak van het werkstuk zichtbaar is. De Z-as komt uit het blad, en de X-as is naar boven gericht.	57
4.15 Eindresultaat van de mechanische opstelling	58
5.1 Schematisch weergave van de elektrische componenten	59
5.2 Foto van het Sinumerik One demorack (Siemens AG, 2024a)	60
5.3 Weergave van de NCU met genummerde relevante componenten	60
5.4 Het functionele principe van de Sinumerik One (Meriaho, 2020, p. 4)	61
5.5 Overzicht netwerkkinterfaces (Siemens AG, 2024k, p. 47)	62
5.6 Blokschema van een PWM-omvormer met een spanningsgestuurde DC-bus (Siemens AG, 2020a, p.18)	63
5.7 Motorspanning (fase-fase) en motorstroom (Siemens AG, 2020a, p.19)	63
5.8 Principiële werking van de Sinamics S120	64
5.9 Vervormde stroomopname van een enkelfasige bruggelijkrichter	65
5.10 Vervormde stroomopname van een driefasige bruggelijkrichter	65
5.11 Vervormde stroom (rood) als som van de grondgolf (grijs) en de 5e harmonische (zwart) (ABB Drives, 2017, p. 5)	65
5.12 Effect van niet-lineaire belasting op stroom, systeemverliezen en spanningsvervorming via systeemimpedantie (Van der Jeught, 2024, p 47)	66
5.13 Symbool lijnreactor	66

5.14	Typische lijnstroom van een 6-puls gelijkrichter­circuit zonder en met het gebruik van een lijnreactor (Siemens AG, 2020a, p.91)	66
5.15	Werking van een lijnfilter	67
5.16	Lijnfilter dempt interferentie in beide richtingen tussen net en omvormer (EMC Directory, 2024)	67
5.17	Aansluitingen van de SLM, 90° gedraaid (Siemens AG, 2023d, p. 175)	68
5.18	Aansluitschema van MM en DMM, 90° gedraaid (Siemens AG, 2023d, p. 222)	69
5.19	Schematische relatie tussen r0067 en de bepalende parameters r0289, p0323 en p0640 (Siemens AG, 2023e, p. 2360)	72
5.20	Foto van de 24V- en DC-busbars (Siemens AG, 2023d, p. 460)	73
5.21	DRIVE-CLiQ bekabelingsregels (Siemens AG, 2020a, p. 382)	74
5.22	Klemmen voor <i>STO</i> bij een <i>NCU 17x0</i> en een motormodule in <i>booksize</i> -formaat (Siemens AG, 2024i, p. 268)	76
5.23	Aansluitschema van het <i>PNOZ X3</i> veiligheidsrelais (PILZ GmbH & Co. KG, 2023, p. 8)	76
5.24	Eindresultaat van het elektrisch gedeelte	77
6.1	Topology in TIA Portal	78
6.2	Screenshot van de HMI: <i>Topology display</i>	79
6.3	Cascade-opbouw van de regelkring met stroom-, snelheids- en positielus (Siemens AG, 2024k, p. 1248)	81
6.4	Trace voor bepaling van M_{wh} . Groen: encodersnelheid. Blauw: positie­setpoint. Mo­mentopwekkende stroom I_{wh} (evenredig met M_{wh}) vertoont initiële piek door statische wrijving, die wordt genegeerd.	84
6.5	Overzicht van de <i>onboard terminals</i> van de NCU	86
6.6	Toewijzing van ingang X122.3 aan de SS1-functie van drie assen	86
6.7	Configurat­ie­overzicht van de veiligheidsfunctie	86
6.8	Principiële werking van een incrementele encoder (Lee, 2017, p. 376)	87
6.9	Meerdere referentie­pul­sen over het bereik bij een lineaire geleiding	87
6.10	Detectie van de referentiecam door een naderingssensor (BERO)	88
6.11	Referentiecam en naderingssensor van de Z-as. De naderingssensor van de X-as is ook zichtbaar, de bijhorende referentiecam bevindt zich buiten beeld.	88
6.12	Ladderdiagram waarin de naderingssensor de referentieprocedure van de X-as activeert	88
6.13	Drie fases van de referentieprocedure voor een incrementele encoder	89
6.14	Startpositie van de as en referentierichting bepaald via MD34010	90
6.15	Tijdsverloop van de homingprocedure – fase 1 t.e.m. 3. De synchronisatie met de referentie­puls (fase 2) vindt plaats na het verlaten van de referentiecam.	91
6.16	Referentiesymbool op de HMI na een geslaagde referentieprocedure	91
6.17	Overzicht van mechanische, hardwarematige en softwarematige limieten in het toegelaten verplaatsings­bereik van een as (Siemens AG, 2024c, p. 34)	93
7.1	Weergave van twee mogelijke machinenulpunten, de flens van de klauwplaatbevestiging, de voorkant van de klauwplaat en het opnamepunt van het gereedschap	94
7.2	Vergelijking van uitlijnmethoden op vlak van nauwkeurigheid, snelheid en gebruiksgemak (SKF Group, 2022, p. 3)	95
7.3	Uitlijning van gereedschap en klauwplaat op het zicht	95
8.1	Resultaat: Gewenste vorm 2	96
8.2	Resultaat: QR-code	97
8.3	Resultaat: Tekst graveren	97
8.4	Resultaat: 2de gewenste werkstuk met een vierkant	97
8.5	CAM-weergave van de geëxtrudeerde tweede gewenste vorm in Fusion 360	98
8.6	Resultaat: geëxtrudeerde tweede gewenste vorm	98

Lijst van tabellen

2.1	Interpolatiepunten tussen P_A en P_B in het XY- en XC-vlak	12
2.2	Vergelijking van geometrische meetfouten tussen interpolatie van X- en C-as en interpolatie van X- en Y-as voor een zeshoek met sleutelwijdte 41 mm (Regus et al., 2018, p 7)	15
2.3	Relatieve kostenvergelijking ($CU \approx 1$ eenheid)	28
3.1	Overzicht van G-codes per bewerkingsvlak	37
3.2	Betekenis van de aswaarden in kanaal MD52206[x] (Siemens AG, 2020b, p. 641)	38
4.1	Effect van kleine en grote spoed p op het aandrijfsysteem.	47
4.2	Theoretisch berekende massatraagheden en bijbehorende λ -waarden per as	49
4.3	Gecorrigeerde massatraagheden en λ -waarden per as (na reductie voor de C-as).	49
4.4	Maximaal optredende proceskoppels per motor	52
4.5	Overzicht van omkeerspel per as	55
5.1	Overzicht van relevante connectoren op de NCU	61
5.2	Nominale stroom van beschikbare motoren en motormodules	70
5.3	Verhouding $\frac{I_{module}}{I_{motor}}$ voor combinatie van motor en motormodule.	70
5.4	Koppelconstante en maximale stromen per as, inclusief parameterreferenties.	71
5.5	Maximaal elektrisch koppel per as	71
5.6	Overzicht van stroomparameters per aandrijf as	72
5.7	Pinout DRIVE-CLiQ RJ45-connector	74
6.1	Traagheidsmomenten per as: gemeten totaal, motor uit p341 en berekende last	83
6.2	Vergelijking van theoretisch berekende en gemeten traagheid van de last per as	83
6.3	Wrijvings- en houdkoppel per as op basis van gemeten stroom en koppelconstante k_T	85
6.4	Beperkingen van versnelling per as	85
6.5	Koppeling tussen asnummer en referentiebit in het datablock	88
6.6	Waarden van MD34210 bij incrementele encoders	91

Lijst van afkortingen

AST	Automatic Servo Tuning
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CMVM	Create My Virtual Machine
CNC	Computer Numerical Control
CP	Communication Processor
CU	Control Unit
DMS	Direct Measuring System
EMC	Elektromagnetische compatibiliteit
EMI	Elektromagnetische interferentie
HMI	Human-Machine Interface
I/O	Input/Output
ITC	Industrial Thin Client
MCP	Machine Control Panel
MCS	Machine Coordinate System
MDI	Manual Data Input
NC	Numerical Control
NCK	Numerical Control Kernel
NCU	Numerical Control Unit
PLC	Programmable Logic Controller
PPU	Panel Processing Unit
RMVM	Run My Virtual Machine
T-CPU	Technology CPU
WCS	Workpiece Coordinate System

1. Inleiding

1.1 Bedrijf

Cadcamatic, gevestigd in Torhout, is gespecialiseerd in mechatronica met meer dan twintig jaar ervaring in matrijzenbouw en een sterke focus op automatisering. Het bedrijf biedt op maat gemaakte oplossingen in machinebouw en de productie van precisie-onderdelen.



Figuur 1.1: Logo bedrijf (Cadcamatic, 2024)

Hoofdgroepen van diensten:

- Matrijzenbouw: Ontwikkeling en productie van hoogwaardige snij- en vormmatrijzen, progressieve matrijzen en extrusiematrijzen.
- Precisie-onderdelen: Fabricage van onderdelen met hoge nauwkeurigheid.
- Automatisering: Integratie van vision- en robotsystemen voor innovatieve automatiseringsprojecten.
- Machinebouw: Ontwerp en realisatie van op maat gemaakte machines volgens specifieke klantenbehoeften.

Geïntegreerde aanpak: Cadcamatic hanteert een geïntegreerde aanpak met de volgende stappen:

1. Concept: Samen met de klant ontwikkelen van een innovatief idee.
2. Engineering: Omzetten van het concept naar een gedetailleerd ontwerp.
3. Machining: In-house productie van onderdelen met technieken zoals EDM, CNC-frezen, draaien en slijpen.
4. Assembly: Montage van elektrische en mechanische componenten tot een compleet product.
5. Validation: Regelmatige controles om te verzekeren dat het product voldoet aan de gestelde eisen. ISO 9001-gecertificeerd, met gecontroleerde processen en eindinspecties om de hoogste kwaliteit te waarborgen.
6. Service: Wereldwijde ondersteuning na levering.

Referenties en toekomstvisie: Referentieprojecten omvatten sectoren zoals halfgeleiders, elektronica, farmaceutica, medische apparatuur, automobiel en elektrische voertuigen (EV).

De toekomstvisie van Cadcamatic betreft uitbreiding: het nieuwe gebouw in Torhout biedt groeimogelijkheden. Het bedrijf streeft ernaar om zowel het machinepark als het personeelsbestand verder uit te breiden en zich te focussen op innovatie en concurrentievoordeel in de sector.



Figuur 1.2: Gebouw van Cadcamatic (Architect Naert, 2024)

1.2 Situering

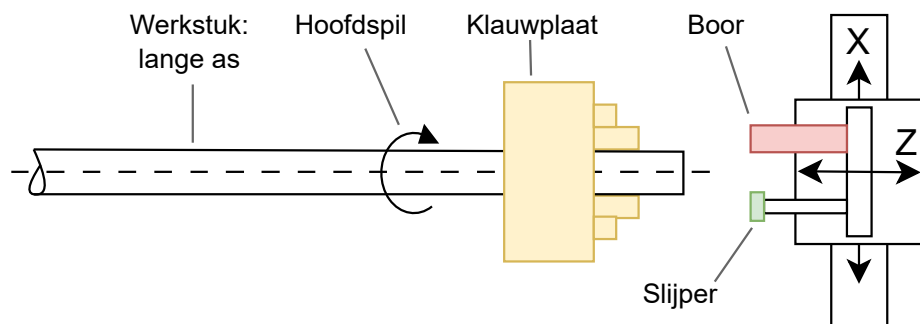
In 2018 ontwikkelde Cadcamatic een machine voor het boren van gaten in lange keramische assen voor een klant (zie Figuur 1.3).



Figuur 1.3: 3D-rendering van de bestaande machine (Cadcamatic, 2024)

De machine bestaat uit drie hoofdcomponenten, zoals weergegeven in Figuur 1.4:

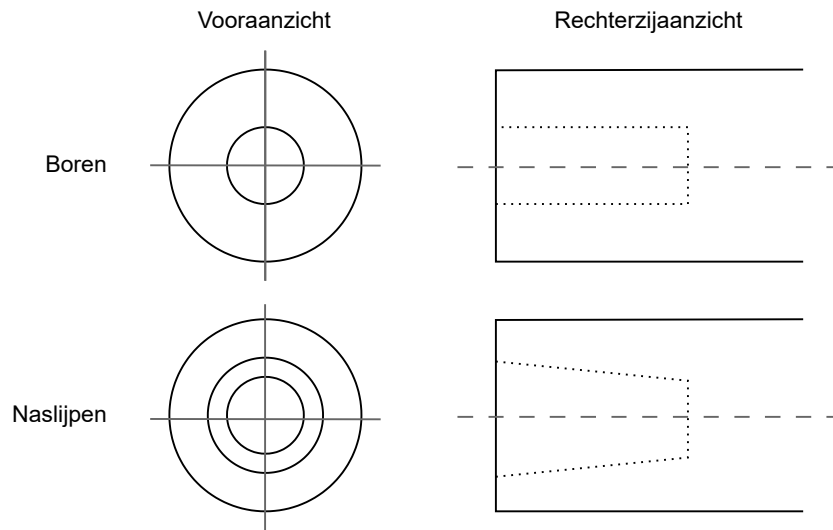
- De klauwplaat, die de as (het werkstuk) klemt en laat roteren.
- De Z-as¹, die de aangedreven boor en slijper in en uit het draaiend werkstuk beweegt.
- De X-as, die verticaal beweegt om te kiezen tussen boren of slijpen.



Figuur 1.4: Vooraanzicht van de onderdelen van de bestaande machine

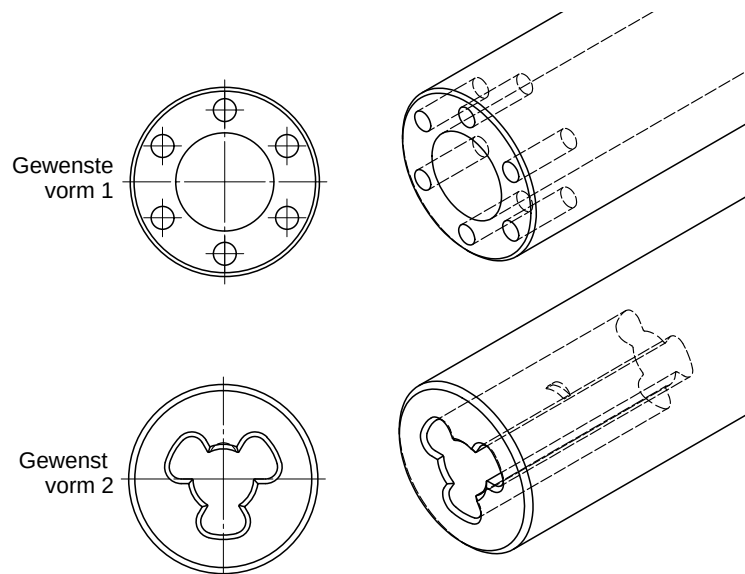
¹In deze bachelorproef worden de assen met een hoofdletter aangeduid (X, Y en Z wat gebruikelijk is in CNC-machines).

Het werkstuk roteert, waardoor enkel concentrische gaten kunnen worden gemaakt. Dit zijn gaten die in het midden van de as liggen. Naast boren kan de machine met een slijper het gat conisch maken, waarbij de diameter toeneemt naarmate het gereedschap zich verder uit de as beweegt, vergelijkbaar met de vorm van een kegel. Beide bewerkingen zijn weergegeven in Figuur 1.5.



Figuur 1.5: Bewerkingen van de bestaande machine: boren (boven) en conisch slijpen (onder), met links het vooraanzicht en rechts het zij aanzicht van de as

De bewerkingen in Figuur 1.6 vallen buiten de mogelijkheden van de huidige machine.²



Figuur 1.6: Voorbeelden van bewerkingen die buiten de mogelijkheden van de bestaande machine vallen

²In deze bachelorproef worden deze werkstukken aangeduid als *Gewenste vorm 1* en *Gewenste vorm 2*.

1.3 Doelstellingen

De klant wenst complexe bewerkingen uit te voeren op het kopvlak van de as, zoals te zien is in Figuur 1.6. Om dit mogelijk te maken, moet de bestaande machine aangepast worden zodat deze in staat is de vereiste bewerkingen uit te voeren en de werkstukken correct te produceren.

Het doel van deze bachelorproef is het onderzoeken van de noodzakelijke uitbreidingen aan de bestaande machine, zodat de gewenste bewerkingen realiseerbaar worden. Dit onderzoek bestaat uit drie onderdelen: een uitgebreide voorstudie, een simulatie en een testopstelling (prototype) voor de praktische evaluatie van het concept. De volgende stappen worden hierbij gevolgd:

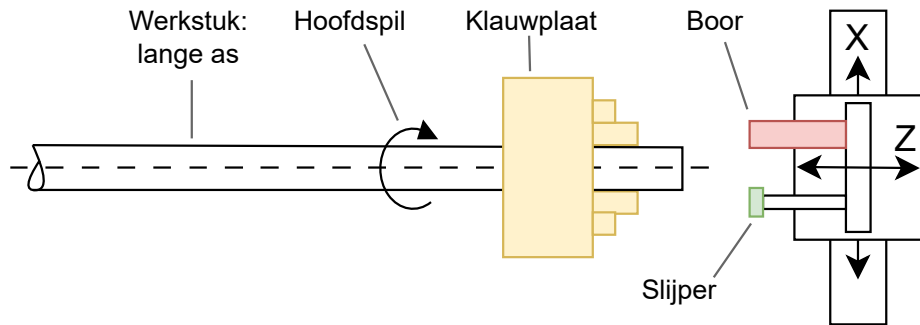
- Voorstudie
- Simulatie
- Prototyping
 - Mechanisch deel
 - Elektrisch deel
 - Programmering
 - Afregeling
 - Testen
- Conclusie

2. Voorstudie

Inleiding

In de voorstudie wordt onderzocht hoe de huidige machine werkt, op welke wijze de gewenste werkstukken vervaardigd kunnen worden, welke onderdelen aangepast moeten worden en welke componenten geschikt zijn als vervanging.

2.1 Analyse van de bestaande machine



Figuur 2.1: Vooraanzicht van de onderdelen van de bestaande machine

De onderdelen van de bestaande machine worden hieronder verder besproken.

De klauwplaat houdt het werkstuk vast en wordt aangedreven door een asynchrone motor met een reductor met overbrengingsverhouding i . Er is geen encoder aanwezig, waardoor positioneren niet mogelijk is. De motor heeft twee poolparen (p), waardoor de synchrone snelheid n_{s1} van de motor wordt berekend als:

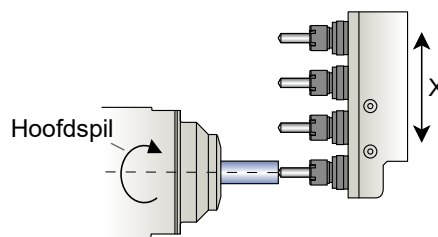
$$n_{s1} = \frac{f \times 60}{p} = \frac{50 \times 60}{2} = 1500 \text{ omw/min} \quad (2.1)$$

Met een overbrengingsverhouding $i = 14,4$ en rekening houdend met slip, draait de klauwplaat n_{s2} bij 50 Hz iets lager dan:

$$n_{s2} = \frac{n_{s1}}{i} = \frac{1500}{14,4} \approx 100 \text{ omw/min} \quad (2.2)$$

De motor is aangesloten op een frequentieomvormer en kan daardoor in snelheid worden geregeld. In de handleiding van de bestaande machine wordt een standaardwaarde van 60 omwentelingen per minuut opgegeven (Cadcamatic, 2018, p. 22).

De boor en slijper zijn bevestigd op een lineaire slede (de Z-slede). Beide zijn zogenaamde *live tools*, wat betekent dat ze tijdens het bewerken worden aangedreven. Wanneer meerdere gereedschappen vast gemonteerd zijn op een lineaire slede (de *gang plate*), wordt dit *gang tooling* genoemd. Het gewenste gereedschap wordt dan in positie gebracht door de slede lineair te verplaatsen.

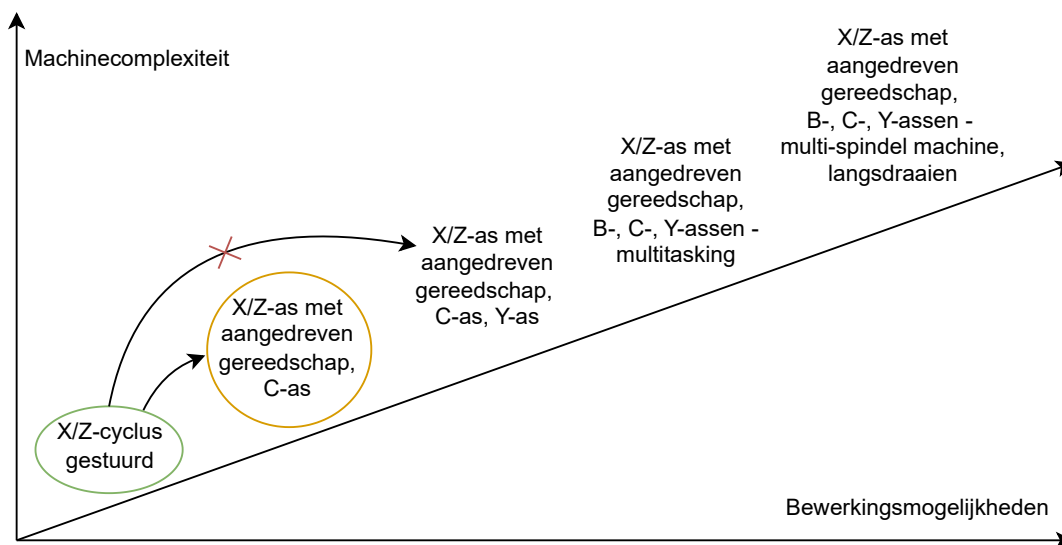


Figuur 2.2: Voorbeeld van een *gang tooling*-opstelling (Star Micronics, 2020)

De Z-slede is haaks gemonteerd op de X-slede. De Z-slede voert de axiale beweging uit, in en uit het werkstuk. De X-as beweegt radiaal op de as en maakt het mogelijk om te wisselen tussen de twee gereedschappen en zorgt er bij het slijpen voor dat conisch geslepen kan worden. Beide motoren beschikken over een encoder, waardoor positionering van de sledes mogelijk is. De motor van de X-slede is uitgerust met een rem, zodat de slede niet zakt door de zwaartekracht wanneer de motor niet geactiveerd (*enabled*) is.

De machine wordt aangestuurd door een S7-1200 Programmable Logic Controller (PLC).

De bestaande configuratie kan worden beschouwd als de eenvoudigste vorm van een draaibank, met X/Z-cyclusbesturing (maar wel al met een aangedreven gereedschap), zoals weergegeven in het groen in Figuur 2.3. Dit is het minst complexe type draaibank en biedt daardoor ook de minste bewerkingsmogelijkheden. Deze figuur wordt in de volgende sectie verder besproken.



Figuur 2.3: Verband tussen de complexiteit en de bewerkingsmogelijkheden van CNC-draaibanken. Groen: huidige machine. Oranje: voorgestelde uitbreiding met C-as (Siemens AG, 2018).

2.2 Analyse van de noodzakelijke aanpassingen

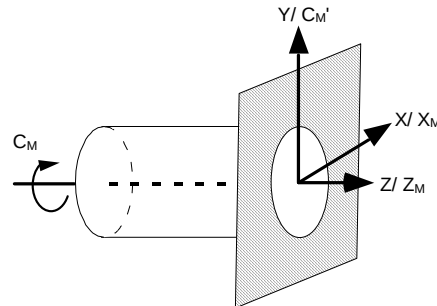
Om de werkstukken uit Figuur 1.6 te kunnen maken, moet de machine buiten het centrum van het werkstuk kunnen bewerken. De meest voor de hand liggende oplossing is het toevoegen van een Y-as. Tussen de huidige machine en een machine met Y-as ligt echter een tussenstap: het toevoegen van een C-as, zoals te zien is in Figuur 2.3. Bij gebruik van de C-as wordt de hoofdspil als een gecontroleerde rotatie-as ingezet. Hierdoor kunnen frees- en boorbewerkingen worden uitgevoerd op het cilindervlak of op het vlakke uiteinde (*front face*). De C-as wordt in dat geval beschouwd als een virtuele Y-as. Het gereedschap wordt in de X-richting bewogen, terwijl het werkstuk door de C-as wordt geroteerd. Zo ontstaat het XC-vlak, weergegeven in grijs in Figuur 2.4. Deze techniek wordt ook aangeduid als *polar milling*.

Het verschil tussen een draaibank met enkel een C-as en een met zowel C- als Y-as ligt vooral in de mogelijkheden voor bewerkingen op de cilindervlak van het werkstuk. Bij een draaibank met alleen een C-as blijft het gereedschap steeds naar het middelpunt gericht. Daardoor ontstaan automatisch gebogen bodems. Bij een draaibank met een Y-as kan het gereedschap ook zijwaarts bewegen, dus loodrecht op de X-as. Daardoor kunnen ook sleuven met vlakke bodems en parallelle wanden gefreesd worden (Smartlathe Machinery, 2023).

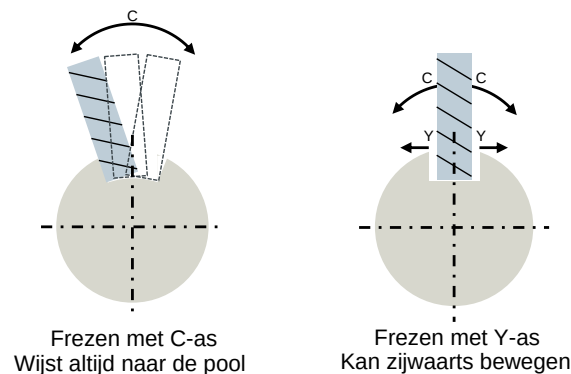
De gewenste bewerkingen in dit project vinden uitsluitend plaats op het kopvlak van de as en kunnen volledig uitgevoerd worden met enkel een C-as, zonder gebruik van een Y-as.

Figuur 2.4 toont de volgende elementen:

- De machineassen: X_M , C_M , en Z_M
- De geometrische assen waarin geprogrammeerd wordt: X , Y , en Z
- C_M' : een denkbeeldige as die de lineaire Y -as simuleert via rotatie om de C_M -as



Figuur 2.4: Visualisatie van het XC-vlak (Mitsubishi Electric Corporation, 2008, p. 125)

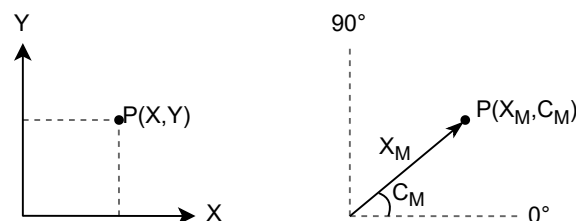


Figuur 2.5: Vooraanzicht van het draaistuk: frezen met enkel C-as (links) en met C- en Y-as (rechts) (Siemens AG, 2018, p. 13)

2.2.1 Verband tussen het XY- en het XC-vlak

Het vlak waarin doorgaans wordt geprogrammeerd en waarin bewegingen worden gedefinieerd, is het **XY-vlak**. Dit vlak bestaat uit twee lineaire assen die loodrecht op elkaar staan: de X - en de Y -as. Een punt in dit vlak wordt gedefinieerd door twee afstanden, genoteerd als $P(X,Y)$. Dit wordt een cartesiaans assenstelsel genoemd, ook wel een orthogonaal of rechthoekig stelsel.

Het werkvlak van de machine is het **XC-vlak**. Dit vlak bestaat uit een lineaire as X_M en een roterende as C_M . Een punt in dit vlak wordt beschreven door een radiale afstand en een hoek, genoteerd als $P(X_M, C_M)$. Dit is een polair assenstelsel.



Figuur 2.6: Weergave van een punt in het cartesiaanse XY-vlak en het polaire XC-vlak

Een punt in het XY-vlak (gedefinieerd door twee afstanden) kan worden omgezet naar het XC-vlak (bestaande uit een radiale afstand en een hoek) met behulp van de volgende transformatieformules. Deze worden aangeduid als de *transformatie van cartesische naar polaire coördinaten* (ENCY, 2024).

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.3)$$

$$\varphi = \text{atan2}(y, x) \quad (2.4)$$

Toegepast op de machineassen:

$$X_M = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.5)$$

$$C_M = \text{atan2}(Y, X) \quad (2.6)$$

waarbij:

- X_M : de radiale positie, d.w.z. de afstand van het punt tot de oorsprong;
- C_M : de rotatiepositie, d.w.z. de hoek ten opzichte van de X -as;
- X : de positie langs de eerste lineaire as;
- Y : de positie langs de tweede lineaire as.

De functie $\text{atan2}(Y, X)$ wordt gebruikt in plaats van de klassieke $\arctan(Y/X)$, omdat deze een correcte hoekberekening garandeert in alle vier de kwadranten van het coördinatenstelsel. Bij gebruik van $\arctan(Y/X)$ kunnen negatieve waarden van X leiden tot foutieve hoeken. De functie $\text{atan2}(Y, X)$ lost dit probleem op.

Een punt in het XC-vlak $P(X_M, C_M)$ kan worden omgerekend naar een punt in het XY-vlak $P(X, Y)$ met de volgende transformatieformules:

$$x = r \cdot \cos(\varphi) \quad (2.7)$$

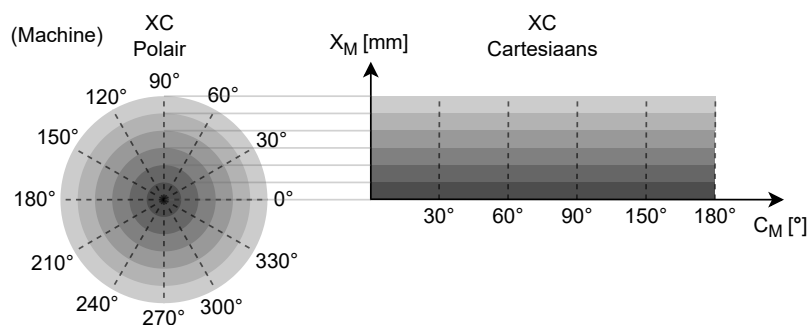
$$y = r \cdot \sin(\varphi) \quad (2.8)$$

Toegepast op de machineassen:

$$X = X_M \cdot \cos(C_M) \quad (2.9)$$

$$Y = X_M \cdot \sin(C_M) \quad (2.10)$$

In de volgende secties wordt het XC-vlak ook cartesiaans weergegeven, waarbij de hoek C_M op de horizontale as staat en de X_M op de verticale as. Dit verduidelijkt visueel het verband tussen beide waarden.



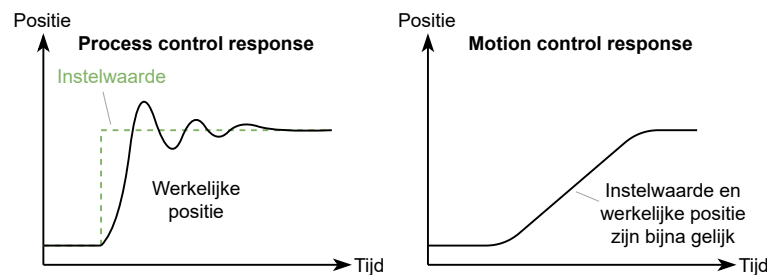
Figuur 2.7: Polaire en cartesische weergave van het XC-vlak

2.2.2 Positionering en *Motion control*

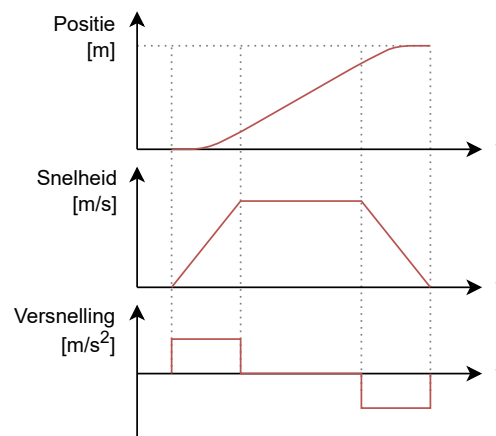
Eerst wordt de positionering van een enkele as besproken, gevolgd door de gecombineerde positionering van twee assen.

Voor het nauwkeurig stoppen op een specifiek punt is het noodzakelijk dat de motor kan positioneren. Dit houdt in dat de motor naar een vooraf bepaalde positie beweegt en daar exact stopt. Dit wordt gerealiseerd met een gesloten regelkring. Er wordt een gewenste waarde naar de besturing gestuurd, de besturing krijgt een actuele waarde van de encoder en stuurt de motor zo aan tot de fout (gewenste waarde min actuele waarde) nul is. Dit betekent dat de motor op de gewenste positie gepositioneerd is. Deze beweging is niet gecontroleerd, wat wil zeggen dat er geen controle is over met welke acceleratie en snelheid de motor naar die positie beweegt. Wanneer echter vereist is dat de beweging wel gecontroleerd gebeurt, wordt gebruikgemaakt van *motion control* (zie Figuur 2.8 voor het verschil met procesregeling). Hierbij gaat een interpolator de fout (de af te leggen weg) verdelen in tussenpunten (interpoleren). Aan de hand van de ingestelde acceleratie en maximale snelheid van de motor worden deze tussenpunten in de tijd naar de regelkring gestuurd, waardoor de motor gecontroleerd kan bewegen volgens een bepaalde acceleratie en snelheid naar de gewenste positie. Wanneer deze positie, snelheid en acceleratie van de motor uitgezet worden in de tijd, ontstaat een *motion control*-profiel, zoals weergegeven in Figuur 2.9. Dit wordt 'interpolatie in de tijd' genoemd.

In sommige gevallen wordt ook de verandering van de acceleratie begrensd. Dit wordt aangeduid als *jerk*. Dit wordt verder besproken in sectie 6.7 op pagina 85.

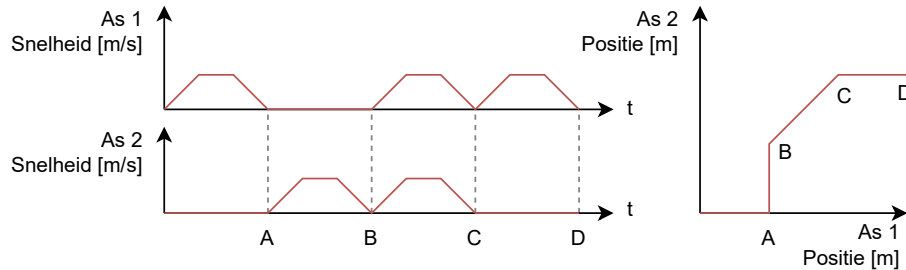


Figuur 2.8: Responsvergelijking tussen procesregeling en bewegingsregeling (*motion control*) (Real-Pars, 2025)



Figuur 2.9: Trapeziumprofiel als voorbeeld van een *motion control*-profiel

Wanneer twee assen, bijvoorbeeld twee lineaire sledes, gecombineerd worden door deze haaks op elkaar te monteren, wordt een vlak gevormd. In dit vlak kan gepositioneerd worden op basis van de gecombineerde beweging van beide sledes. De posities van de twee sledes vormen samen een coördinaat in dit vlak. In Figuur 2.10 is links de positie en snelheid van beide assen in de tijd weergegeven, en rechts de resulterende positie in de ruimte. In het geval van een C-as (roterende as) betreft het een combinatie van een lineaire en een roterende as.



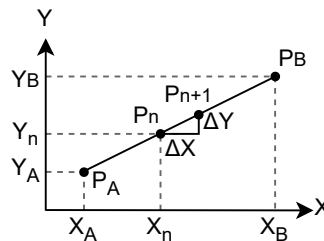
Figuur 2.10: Voorbeeld van gecombineerde beweging, waarbij twee assen loodrecht ten opzichte van elkaar zijn opgesteld en al dan niet gelijktijdig bewegen (Newport Corporation, 2024).

2.2.3 Interpolatie tussen twee lineaire assen

Wanneer niet alleen de eindpositie van belang is, maar ook het pad dat het gereedschap moet volgen, maakt men gebruik van **synchronisatie**. Hierbij worden de tussenpunten (interpolatiepunten) gesynchroniseerd tussen beide assen. Dit betekent dat voor coördinaat P_n de gewenste posities voor motor X en motor Y op hetzelfde tijdstip t_n worden aangestuurd. Op deze manier blijft het gereedschap het gewenste pad volgen.

Eerst wordt de interpolatie tussen twee lineaire assen (X en Y) behandeld, gevolgd door de combinatie van een lineaire en een roterende as (X_M en C_M).

Voor een lineair pad (zie Figuur 2.11) worden de tussenliggende punten berekend volgens Vergelijking 2.11 en 2.12.



Figuur 2.11: Lineaire interpolatie tussen twee punten P_A en P_B

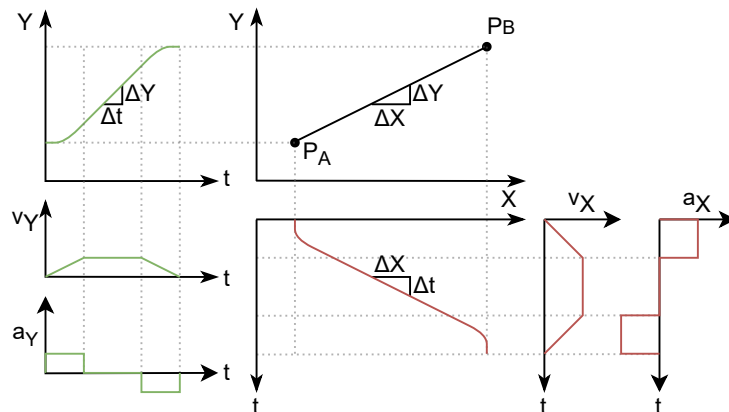
$$X(t) = X(n \cdot \Delta t) = X_A + \sum_{i=1}^n \frac{X_B - X_A}{N} \quad (2.11)$$

$$Y(t) = Y(n \cdot \Delta t) = Y_A + \sum_{i=1}^n \frac{Y_B - Y_A}{N} \quad (2.12)$$

waarbij:

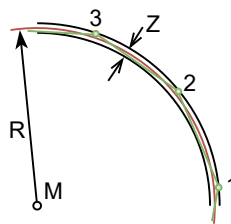
- N : het totaal aantal stappen of segmenten,
- n : de huidige stap (van 0 tot N).

Door de interpolatiepunten in de ruimte gesynchroniseerd naar de assen te sturen, kan een specifiek pad in de ruimte worden gerealiseerd, zoals weergegeven in Figuur 2.12.



Figuur 2.12: Lineaire interpolatie tussen twee punten: de Y-as (groen), de X-as (rood) en het ruimtepad (zwart) (Newport Corporation, 2024)

Met circulaire interpolatie kan het gereedschap een cirkelvormig pad volgen. Dit pad wordt benaderd door de boog op te delen in meerdere rechte lijnsegmenten. Hoe goed deze benadering is, hangt af van de ingestelde tolerantie Z . Een kleinere waarde van Z betekent meer tussenpunten N , en dus een nauwkeuriger pad. Dit zorgt wel voor meer rekenwerk voor de interpolator.

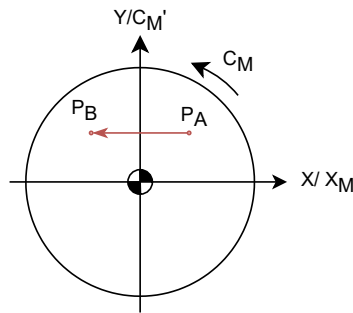


Figuur 2.13: Benadering van een cirkelboog door lineaire segmenten

2.2.4 Interpolatie tussen lineaire en roterende as (polaire interpolatie)

Wanneer een bepaald pad moet worden gerealiseerd in het XC-vlak, is een extra stap vereist. De beweging wordt eerst geïnterpoleerd in het XY-vlak, waarbij een reeks tussenpunten wordt berekend via lineaire interpolatie, zoals uitgelegd in vergelijking (2.11) en (2.12). Dit resulteert voor elk tijdstip $t = n \cdot \Delta t$ in een punt $(X(t), Y(t))$. Om deze punten, bestaande uit twee lineaire afstanden X en Y, om te zetten naar een radiale afstand en een hoek in het XC-vlak, worden de bijbehorende polaire coördinaten berekend met vergelijking (2.5) en (2.6):

Voorbeeld: Het gereedschap volgt een lineair pad op het kopvlak van het werkstuk, van P_A : $X = 10$, $Y = 10$ naar P_B : $X = -10$, $Y = 10$, zoals weergegeven in Figuur 2.14. De interpolatiepunten worden eerst berekend in het XY-vlak, resulterend in een reeks cartesische coördinaten (X, Y) . Vervolgens worden deze punten met behulp van de transformatieformules (2.5) en (2.6) omgezet naar het XC-vlak. Dit proces wordt aangeduid als **polaire coördinateninterpolatie**. De bijhorende punten zijn weergegeven in Tabel 2.1.



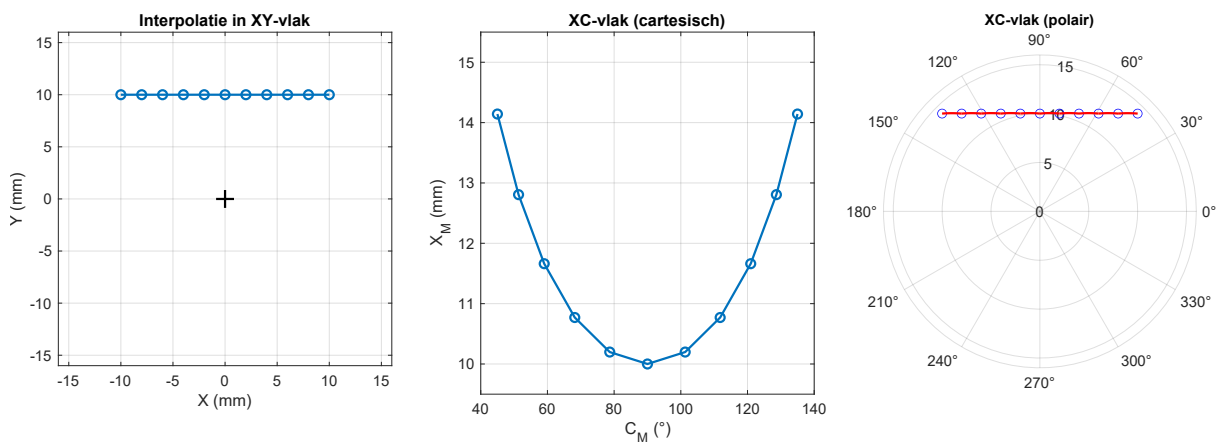
Figuur 2.14: Lineair pad op het kopvlak van een as, gedefinieerd in het XY-vlak en om te zetten naar het XC-vlak

Tabel 2.1: Interpolatiepunten tussen P_A en P_B in het XY- en XC-vlak

Punten	X	Y	X_M	C_M [°]
P_A	10	10	14,1	45,0
1	8	10	12,8	51,3
2	6	10	11,7	59,0
3	4	10	10,8	68,2
4	2	10	10,2	78,7
5	0	10	10,0	90,0
6	-2	10	10,2	101,3
7	-4	10	10,8	111,8
8	-6	10	11,7	121,0
9	-8	10	12,8	128,7
P_B	-10	10	14,1	135,0

Deze punten kunnen uitgezet worden op 3 grafieken, weergegeven in Figuur 2.15.

1. **XY-cartesiaans:** toont het gewenste pad van het gereedschap in het cartesische vlak, met beginpunt, eindpunt en de geïnterpoleerde tussenpunten, opgebouwd uit twee lineaire afstanden X en Y.
2. **XC-cartesiaans:** geeft dezelfde punten weer, maar omgerekend naar het XC-vlak. Elke coördinaat wordt daarbij uitgedrukt als een radiale afstand X_M en een rotatiehoek C_M .
3. **XC-polair:** toont het pad in een polair assenstelsel, waarbij de radiale afstand X_M wordt uitgezet tegenover de rotatiehoek C_M . Dit komt overeen met de gewenste gereedschapsbaan zoals die door de machine wordt uitgevoerd.



Figuur 2.15: Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een rechte lijn

De relatie tussen de radiale afstand r en de hoek θ van een rechte lijn tussen twee punten in een polair assenstelsel wordt weergegeven door Vergelijking 2.15. De twee punten zijn gedefinieerd in polaire coördinaten als (r_1, θ_1) en (r_2, θ_2) (Zhang et al., 2013, p. 3).

De afleiding is gebaseerd op de vergelijking van een rechte lijn in cartesische coördinaten:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (2.13)$$

Deze vergelijking wordt omgezet naar polaire vorm door de volgende substituties toe te passen:

$$\begin{aligned} x &= r \cos(\theta), & y &= r \sin(\theta) \\ x_1 &= r_1 \cos(\theta_1), & y_1 &= r_1 \sin(\theta_1) \\ x_2 &= r_2 \cos(\theta_2), & y_2 &= r_2 \sin(\theta_2) \end{aligned}$$

Na substitutie resulteert dit in:

$$r \sin(\theta) - r_1 \sin(\theta_1) = \frac{r_2 \sin(\theta_2) - r_1 \sin(\theta_1)}{r_2 \cos(\theta_2) - r_1 \cos(\theta_1)} (r \cos(\theta) - r_1 \cos(\theta_1)) \quad (2.14)$$

Door deze vergelijking op te lossen naar r en te vereenvoudigen, volgt:

$$r = \frac{r_1 r_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{r_1 \sin(\theta_1 - \theta) + r_2 \sin(\theta - \theta_2)} \quad (2.15)$$

Toegepast op de machineassen:

$$X_M(C_M) = \frac{X_{M1} X_{M2} \sin(C_{M1} - C_{M2})}{X_{M1} \sin(C_{M1} - C_M) + X_{M2} \sin(C_M - C_{M2})} \quad (2.16)$$

De begin- en eindpunten moeten in polaire coördinaten worden ingevoerd. Indien de punten oorspronkelijk in cartesische coördinaten (X,Y) beschikbaar zijn, kunnen deze worden omgerekend naar (X_M, C_M) via Vergelijking 2.5 en 2.6.

2.2.5 Grenzen van polaire interpolatie

Polaire interpolatie kent twee belangrijke beperkingen:

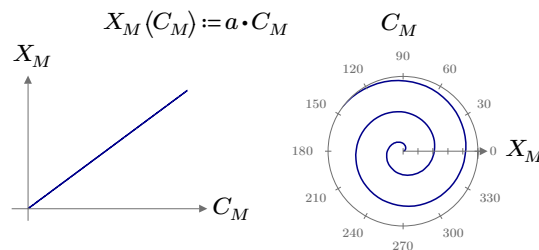
- de interpolatienauwkeurigheid,
- bewegingen in de nabijheid van de pool.

Deze beperkingen worden toegelicht aan de hand van drie mogelijke situaties in het XC-vlak:

- zowel de radiale afstand X_M als de hoek C_M verandert,
- alleen de hoek C_M verandert,
- alleen de radiale afstand X_M verandert.

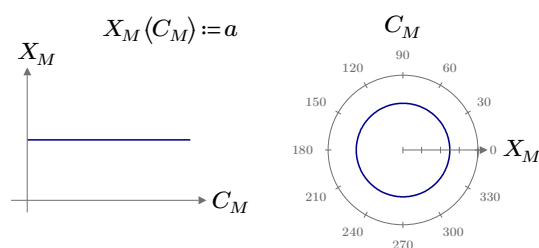
Interpolatienauwkeurigheid

Na interpolatie en transformatie liggen de interpolatiepunten in het XC-vlak. Deze posities worden door de besturing tijdgesynchroniseerd naar de assen doorgestuurd. In Figuur 2.16 is te zien dat zowel de radiale afstand X_M als de hoek C_M tussen de punten lineair veranderen. Wanneer in een polair coördinatenstelsel zowel de hoek als de radiale afstand lineair veranderen, ontstaat een spiraal van Archimedes. Dit geldt enkel wanneer $a \neq 0$.



Figuur 2.16: Een lineaire verandering van zowel de radiale afstand als de hoek, weergegeven in het cartesische assenstelsel (links), leidt tot een spiraal in het polaire assenstelsel (rechts).

Indien enkel de hoek C_M verandert en de radiale afstand X_M constant blijft, met andere woorden: het gereedschap bevindt zich op een vaste afstand van de pool (middelpunt) terwijl het werkstuk roteert, dan resulteert dit in een cirkelvormig pad op het kopvlak van het werkstuk. Dit geldt enkel wanneer $a \neq 0$.



Figuur 2.17: Een lineaire verandering van alleen de hoek leidt tot een cirkel in het polaire assenstelsel

Het voorbeeld uit Figuur 2.14 is herberekend met een lager aantal interpolatiepunten N . Figuur 2.18 toont links het gewenste rechte gereedschapspad en rechts het pad na interpolatie en transformatie. Tussen twee opeenvolgende interpolatiepunten veranderen de radiale afstand X_M en de hoek C_M lineair, zoals te zien is in de middelste grafiek. Hierdoor ontstaat een kromme in plaats van een rechte lijn. Dit effect treedt niet op wanneer enkel de radiale afstand verandert. In dat geval is er geen interpolatiefout.

Het volgende is bekend voor interpolatie in het XY-vlak:

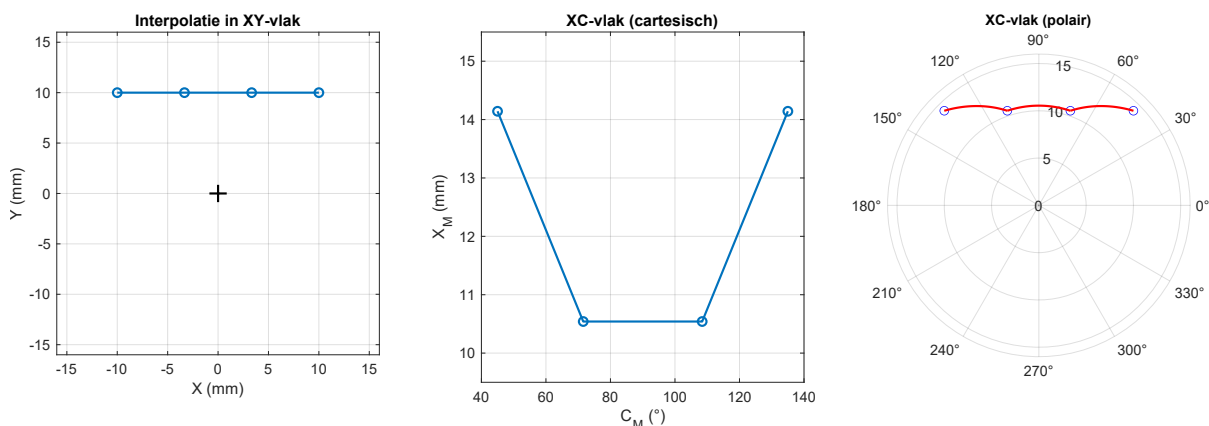
- Een lijnstuk in het XY-vlak wordt exact als rechte lijn weergegeven.
- Een cirkel in het XY-vlak wordt benaderd door opeenvolgende lijnsegmenten (zie Figuur 2.13).

Voor polaire interpolatie in het XC-vlak geldt:

- Een lijnstuk in het XC-vlak wordt benaderd door kromme segmenten, behalve wanneer uitsluitend de radiale afstand X_M verandert.

Gevolg: De nauwkeurigheid is bij polaire interpolatie lager dan bij cartesische lineaire interpolatie, tenzij een voldoende fijne segmentatie wordt toegepast (Zhang et al., 2013, p. 4).

Dit effect wordt bevestigd door meetresultaten van Regus et al. (2018). Daaruit blijkt dat een zeshoek, vervaardigd via interpolatie van de X- en C-as, grotere meetfouten vertoont dan een zeshoek die is gerealiseerd met interpolatie van de X- en Y-as.



Figuur 2.18: Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een rechte lijn met beperkte interpolatiepunten

Tabel 2.2: Vergelijking van geometrische meetfouten tussen interpolatie van X- en C-as en interpolatie van X- en Y-as voor een zeshoek met sleutelwijdte 41 mm (Regus et al., 2018, p 7)

Interpolatiemethode	Profielafwijking [mm]	Vlakheid [mm]	Evenwijdigheid [mm]
Interpolatie van X- en C-as	0,048	0,013	0,025
Interpolatie van X- en Y-as	0,026	0,006	0,015

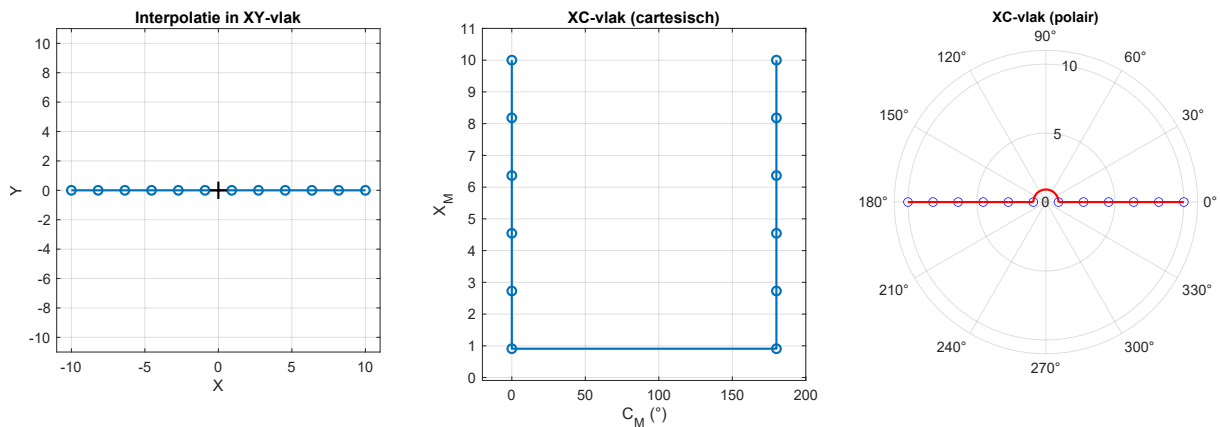
Beweging nabij de pool

Het tweede aandachtspunt betreft bewegingen waarbij het gereedschap dicht bij of door de pool beweegt. Om de voedingssnelheid v (mm/min) van het gereedschap constant te houden, moet de draaisnelheid ω van de C-as toenemen naarmate het gereedschap dicht bij de pool komt. De relatie tussen deze grootheden is als volgt:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.17)$$

Wanneer de straal r nadert tot nul, stijgt ω theoretisch naar oneindig. In de praktijk is dit niet haalbaar. De C-as heeft een maximale draaisnelheid en kan niet oneindig snel roteren.

Figuur 2.19 toont een voorbeeld van gereedschapsbeweging door de pool. De verticale segmenten in de figuur geven bewegingen weer waarbij alleen de radiale afstand X verandert. In het middelste horizontale segment draait de hoek C 180 graden. Om een constante voedingssnelheid te behouden, moet deze draaiing zeer snel verlopen. Dit kan leiden tot overbelasting van de C-as. Daarom is het aanbevolen om bewegingen door of nabij de pool te vermijden. Indien dit onvermijdelijk is, moet de draaisnelheid van de C-as begrensd worden.



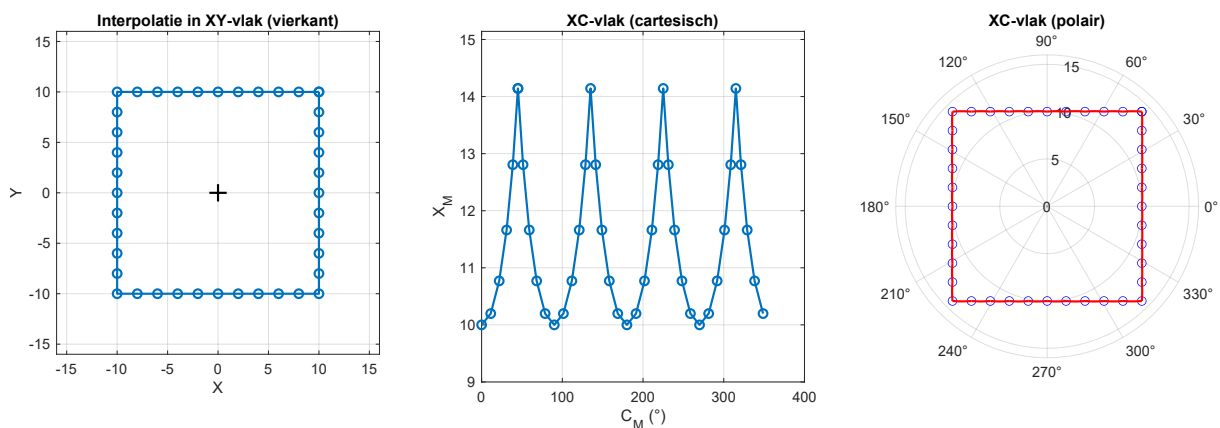
Figuur 2.19: Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een gereedschapsbeweging door het middelpunt

2.2.6 Voorbeelden polaire interpolatie

Om de verhouding tussen X_M en C_M extra te verduidelijken, zijn drie voorbeelden uitgewerkt:

1. Vierkant

Een vierkant bestaat uit vier opeenvolgende rechte lijnsegmenten. In Figuur 2.15 is één zo'n lijnsegment weergegeven.

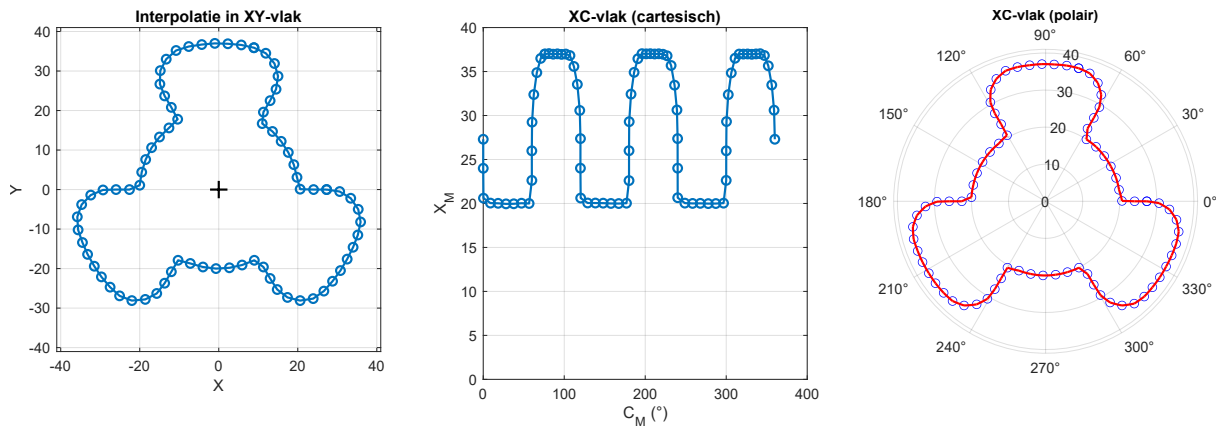


Figuur 2.20: Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een vierkante contour

2. Gewenste vorm 2 (p. 3)

Dit voorbeeld toont duidelijk de horizontale en verticale segmenten in de middelste grafiek. De horizontale segmenten geven aan dat de radiale afstand X_M constant blijft terwijl de hoek C_M verandert, wat resulteert in een cirkelvormige beweging. De verticale segmenten tonen dan weer dat de hoek constant blijft en enkel de radiale afstand verandert, wat wijst op een zuiver radiale beweging, richting of weg van pool (middelpunt).

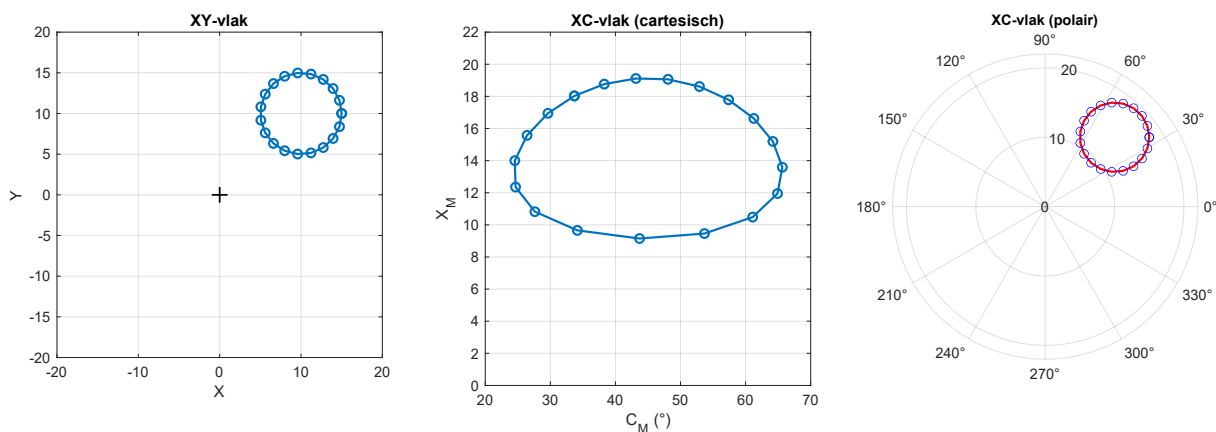
De interpolatiepunten in het XY-vlak zijn verkregen door de 2D-schets van het pad vanuit Autodesk Inventor te exporteren als een .dxf-bestand en deze vervolgens te importeren in AutoCAD. Met behulp van de *DIVIDE*-functie is het pad opgedeeld in een aantal punten met gelijke onderlinge afstand. Deze punten zijn vervolgens geëxporteerd via de *DATAEXTRACTION*-functie.



Figuur 2.21: Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor de tweede gewenste werkstuk (p. 3)

3. Excentrische cirkel

Een gesloten pad in het eerste kwadrant, met het middelpunt buiten de oorsprong.



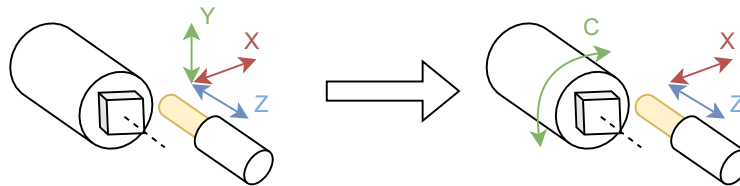
Figuur 2.22: Verband tussen het XY-vlak en het XC-vlak voor een excentrische cirkel

2.2.7 Toepassing van polaire interpolatie bij numerieke besturing

Bij numerieke besturing (*Numerical Control (NC)*) kan de transformatie naar polaire coördinaten op twee manieren plaatsvinden:

- in de besturing zelf
- vooraf in de *Computer-Aided Manufacturing (CAM)*-software.

In beide gevallen worden de interpolatie en de coördinatentransformatie uitgevoerd, en in beide gevallen worden de tussenpunten omgezet naar het XC-vlak. Het verschil zit in de plaats waar deze transformatie plaatsvindt: intern in de besturing, of extern voorafgaand aan de bewerking, tijdens het postprocessen in de CAM-software.



Figuur 2.23: Transformatie van programmeerstelsel [X, Y, Z] naar machine-assenstelsel [X, C, Z] (ENCY, 2024)

Tansformatie in de NC-besturing

Wanneer de besturing dit ondersteunt, kunnen de bewegingen rechtstreeks worden geprogrammeerd in het XY-vlak, alsof er gewerkt wordt op een traditionele freesmachine met een Y-as. De besturing voert de interpolatie uit op basis van deze XY-commando's en transformeert de tussenpunten intern naar het XC-vlak. De beweging wordt dus automatisch omgezet naar een pad in het XC-vlak. Bij een Siemens Sinumerik-besturing kan deze functionaliteit worden geactiveerd met het TRANSMIT-commando.

```
TRANSMIT
G1 X10 Y10
TRAFOOF
```

Voordelen van deze werkwijze:

- Kortere en beter leesbare programma's
- Een verbeterde oppervlakafwerking dankzij geoptimaliseerde interpolatie door de besturing
- Minder kans op facetten en een meer gecontroleerde snelheidsregeling

Het is belangrijk op te merken dat niet alle besturingen deze functionaliteit ondersteunen.

Tansformatie vooraf via CAM-software

Wanneer de besturing geen ondersteuning biedt voor polaire interpolatie, kan de transformatie vooraf worden uitgevoerd in de CAM-software. Daarbij wordt ingesteld dat de coördinaten moeten worden uitgedrukt in het XC-vlak. De software zet de geprogrammeerde bewegingen in het XY-vlak dan om naar equivalente bewegingen in het XC-vlak. Deze functie in de CAM-software wordt vaak aangeduid als *Polar output*.

Bij deze werkwijze bevat elk bewegingscommando in de gegenereerde NC-code een interpolatiepunt in (X,C). Dit type code wordt ook wel *longhand code* genoemd, wat betekent dat elke beweging afzonderlijk en volledig wordt uitgeschreven. De gegenereerde G-code bestaat dan uit een reeks opeenvolgende lineaire segmenten, zoals in onderstaand voorbeeld (BobCADCAM, 2020):

```
G1 X... C... ; interpolatiepunt 1
G1 X... C... ; interpolatiepunt 2
G1 X... C... ; interpolatiepunt 3
...
G1 X... C... ; interpolatiepunt n
G1 X... C... ; interpolatiepunt n+1
...
G1 X... C... ; eindpunt --> interpolatiepunt N
```

Nadelen:

- Grote NC-bestanden, elk segment is één G-code lijn
- Moeilijk leesbaar en lastig te onderhouden
- Kans op zichtbare facetten bij cirkelbewegingen, indien de puntverdeling te grof is gekozen

Voordelen:

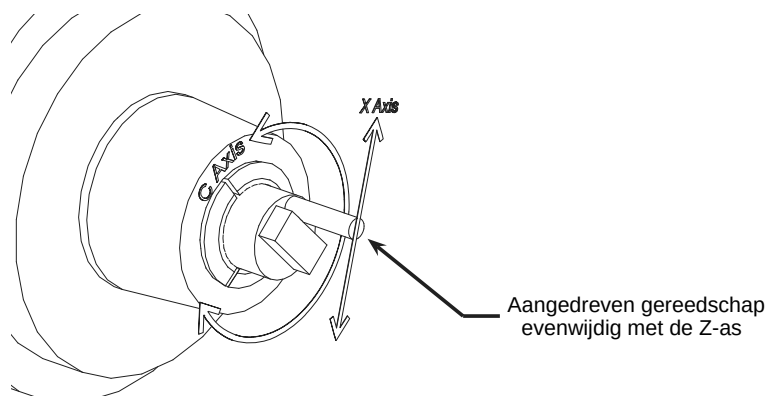
- Universeel toepasbaar, ook op besturingen zonder polaire interpolatie
- Volledige controle over elk individueel interpolatiepunt

2.2.8 Besluit van de aanpassingen

De bestaande machine beschikt niet over een C-as en over een besturingssysteem dat interpolatie van meerdere assen ondersteunt. Daarom zijn twee aanpassingen vereist:

- De aandrijving van de hoofdspil (klauwplaat) moet worden vervangen door een servosysteem. Hierdoor kan de hoofdspil positioneren en dus functioneren als een derde as: de zogenaamde C-as.
- Het besturingssysteem moet ondersteuning bieden voor interpolatie tussen meerdere assen, in dit geval tussen de X- en C-as voor bewerkingen op het kopvlak van het werkstuk, en tussen de X- en Z-as om conisch te kunnen werken.

Wanneer deze twee aanpassingen worden doorgevoerd, is het mogelijk om de bewerking uit te voeren zoals weergegeven in Figuur 2.24, en kunnen de gewenste werkstukken uit Figuur 1.6 op pagina 3 worden gerealiseerd.



Figuur 2.24: Axiaal frezen op het kopvlak (OmniTurn, 2019, p. 2.77)

2.3 Besturingssysteem

Gezien de samenwerking met Siemens, werd gezocht naar een besturingssysteem van dit merk dat ondersteuning biedt voor interpolatie tussen meerdere assen. In deze studie werden twee systemen met elkaar vergeleken: de Technology CPU (T-CPU) en de Sinumerik. Aan het begin van het onderzoek werd aangenomen dat de Sinumerik de meest geschikte optie zou zijn. Toch werd gevraagd om ook de functionaliteit en mogelijkheden van de T-CPU in kaart te brengen.

2.3.1 Functionele eisen

Het besturingssysteem moet voldoen aan een aantal eisen:

- Interpolatie van twee assen: het systeem moet in staat zijn om drie assen aan te sturen, waarbij twee assen naar keuze kunnen worden geïnterpoleerd om synchroon samen te werken, afhankelijk van de toepassing. Dit omvat:
 - De C-as (hoofdspil met klauwplaat) en de X-as (lineaire as), die samen worden geïnterpoleerd voor het uitvoeren van bewerkingen op het kopvlak van het werkstuk.
 - De X-as en de Z-as (voeding in en uit het werkstuk), die worden geïnterpoleerd om bijvoorbeeld conisch te kunnen slijpen.
- Aansturing van perifere in- en uitgangen: Naast interpolatie van 2 assen moet het systeem ook perifere componenten kunnen aansturen. Voorbeelden hiervan zijn:
 - De bediening van de machine-deur
 - Persluchtvoorzieningen
 - Koelvloeistof
 - ...
- Uitbreidbaarheid voor nieuwe programma's: Als de klant een nieuw programma wil toevoegen of een bestaand programma wil aanpassen, moet dit eenvoudig te programmeren zijn.
- Er zijn geen specifieke eisen gesteld aan de nauwkeurigheid, maar het feit dat er op de bestaande machine werd geslepen, geeft aan dat een zekere nauwkeurigheid en herhaalbaarheid vereist zijn.

2.3.2 T-CPU

Een T-CPU is een PLC met een speciale chip die padberekeningen kan uitvoeren. Daardoor kan deze PLC de positie van twee assen gecoördineerd laten bewegen. Een gewone PLC zonder T-CPU kan assen enkel synchroniseren op snelheid. In TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal), het programma waarmee een PLC geprogrammeerd wordt, zijn drie methoden beschikbaar om assen gecoördineerd te laten samenwerken: *gearing*, *camming* en *kinematics*. Hieronder wordt het verschil tussen deze methoden toegelicht.

Gearing (Synchronisatie)

Deze functie is niet geschikt voor de toepassing, maar wel relevant om het verschil tussen een standaard PLC en een T-CPU toe te lichten.

Gearing is een techniek binnen *motion control* waarbij de beweging van een as (de leidende as) wordt gekoppeld aan een andere as (de volgende as). De volgende as beweegt dan volgens een vaste verhouding ten opzichte van de leidende as. *Gearing* wordt toegepast in systemen waar twee assen synchroon moeten bewegen, zoals bij transportbanden of liften. Er zijn twee vormen van *gearing*: relatieve *gearing* en absolute *gearing*.

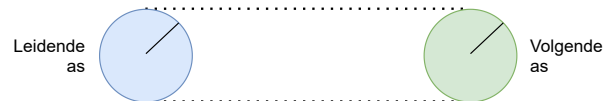
Bij relatieve *gearing* wordt de snelheid van de volgende as gesynchroniseerd met die van de leidende as, zonder rekening te houden met hun absolute positie. De synchronisatie gebeurt uitsluitend op basis van snelheidssignalen. Relatieve *gearing* kan worden uitgevoerd met een standaard PLC (geen T-CPU), omdat er geen interpolatie vereist is.



Figuur 2.25: Illustratie van relatieve *gearing*

Bij absolute *gearing* worden niet alleen de snelheden, maar ook de posities van de assen gesynchroniseerd. De volgende as houdt dus een vaste positie ten opzichte van de leidende as. Hiervoor is een T-CPU nodig om de padberekeningen uit te voeren.

Een voorbeeld is het gebruik van twee transportbanden met asynchrone motoren die parallel een profiel verplaatsen. In zo'n toepassing kan een virtuele as worden aangemaakt waarop beide motoren worden gesynchroniseerd via absolute *gearing*. Als een van de motoren slip vertoont, kan deze automatisch worden bijgestuurd op basis van de virtuele as als referentie.



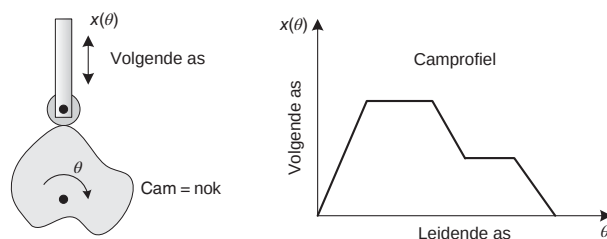
Figuur 2.26: Illustratie van absolute *gearing*

Camming

Camming is een methode waarbij de volgende as beweegt volgens een functie $f(x)$, afhankelijk van de positie van de leidende as x . Om deze functie te gebruiken, is een T-CPU nodig. Die voert de padberekeningen uit op basis van het camprofiel. Dit wordt beschreven door de relatie $x_{\text{volgend}} = f(x_{\text{leidend}})$. Dit is de softwarematige variant van een mechanische nok, zoals weergegeven in Figuur 2.27. Op deze manier kan een mechanische nok digitaal worden nagebootst. De vorm van de nok kan gezien worden als een pad dat het gereedschap moet volgen. De cartesische voorstellingen van het XC-vlak uit sectie 2.2.4 kunnen gezien worden als camprofielen. Met *camming* kunnen daarmee de gewenste vormen worden gerealiseerd. Het gereedschap beweegt lineair, het werkstuk roteert, en beide worden zo aangestuurd dat het pad exact gevolgd wordt.

Deze methode is bruikbaar, maar er zijn enkele aandachtspunten, vooral bij frezen of slijpen:

- Elke pas¹ vereist een nieuw camprofiel.
- De straal van het gereedschap moet verrekend worden in het camprofiel.
- De snijsnelheid (de relatieve snelheid tussen gereedschap en werkstuk) moet constant blijven. Hiervoor zou er een functie zijn in TIA Portal.



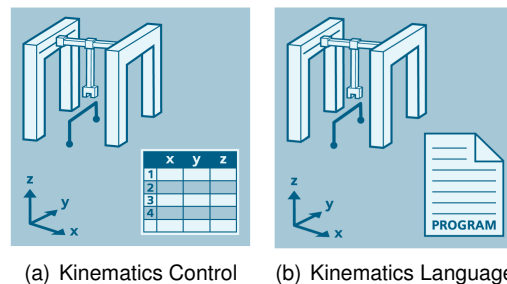
Figuur 2.27: Een voorbeeld van een camprofiel (Gürocak, 2016, p. 260).

¹Een pas is een beweging van het gereedschap waarbij een kleine hoeveelheid materiaal wordt weggenomen. Vaak zijn meerdere passen nodig om de volledige vorm te maken.

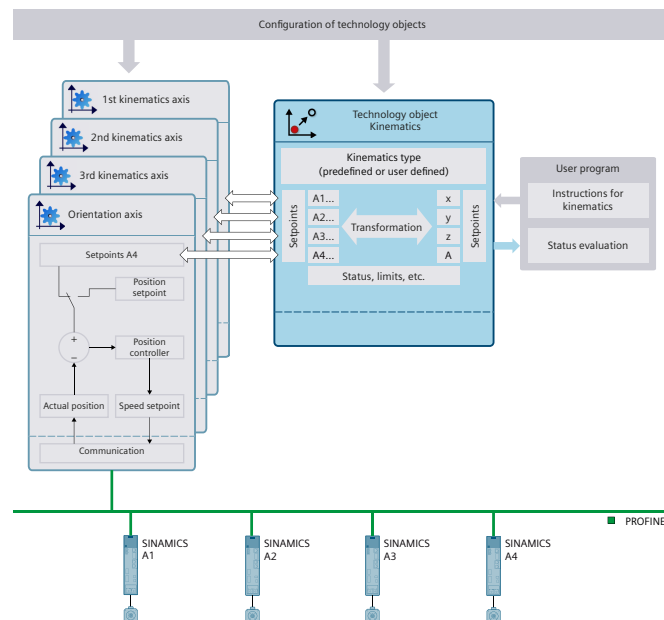
Kinematics

In deze toepassing wordt gebruikgemaakt van het *Kinematics Technology Object* in TIA Portal (zie Figuur 2.29). Dit object koppelt assen binnen een XYZ-coördinatenstelsel, waardoor meerassige bewegingen eenvoudig geprogrammeerd kunnen worden. TIA Portal bevat echter geen standaard kinematisch profiel dat geschikt is voor deze toepassing. Er is wel een mogelijkheid om G-code te gebruiken via de Kinematic Language Library (LKinLang). Bij het gebruik van *Kinematics* moet een kinematisch profiel gekozen worden. Aangezien er geen standaardprofiel beschikbaar is dat voldoet aan de eisen van deze toepassing, zijn er twee mogelijke oplossingen:

- Gebruik van een profiel met twee lineaire assen, waarbij in een externe CAM-software polaire coördinaten worden gegenereerd, zoals beschreven in subsectie 2.2.7. Deze coördinaten worden vooraf berekend en als tussenpunten in TIA Portal ingeladen. Elk tussenpunt wordt afzonderlijk aangestuurd.
- Aanmaken van een gebruikersgedefinieerd kinematisch systeem. Dit vereist verder onderzoek.



Figuur 2.28: Vergelijking tussen *kinematics control* (Siemens AG, 2024b, p. 5) en *kinematics language* (Siemens AG, 2022b, p. 6)



Figuur 2.29: Basisprincipe van het kinematica-technologie-object met maximaal vier interpolerende kinematische assen (Siemens AG, 2023c, p. 21)

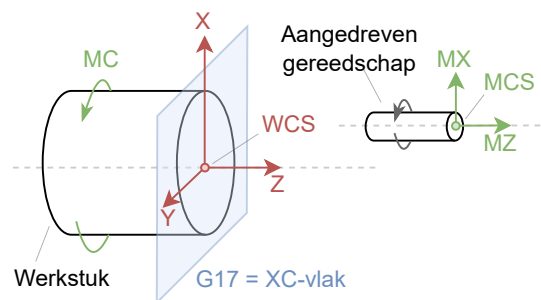
2.3.3 Sinumerik

Sinumerik is de CNC-besturingslijn van Siemens. De naam *Sinumerik* is een samenstelling van *Siemens* en *numeriek*. Numerical Control (NC) verwijst naar systemen waarbij machines worden aangestuurd door getallen en codes, zoals G-code (geometriecode). Sinumerik ondersteunt veel verschillende toepassingen, waaronder:

- Draaien
- Frezen
- Slijpen
- Snijden
- 3D-printen

De Sinumerik-familie bevat verschillende modellen, elk geschikt voor specifieke toepassingen. Deze lijn is ontworpen voor CNC-toepassingen en beschikt over verschillende ingebouwde functies. Een relevante functie voor deze toepassing is de automatische coördinatentransformatie.

Het machinecoördinatensysteem (Machine Coordinate System (MCS)) bestaat uit een lineaire X-as, een lineaire Z-as en een roterende C-as. Om bewerkingen in een cartesiaans coördinatensysteem mogelijk te maken, voegt Sinumerik een virtuele Y-as toe. Hierdoor kan in het werkstukcoördinatensysteem (Workpiece Coordinate System (WCS)) worden geprogrammeerd alsof een fysieke Y-as aanwezig is. Deze functionaliteit wordt aangeduid als de *Front-Face Transformation* en wordt uitgevoerd met het CNC-commando TRANSMIT (Transform Milling Into Turning).



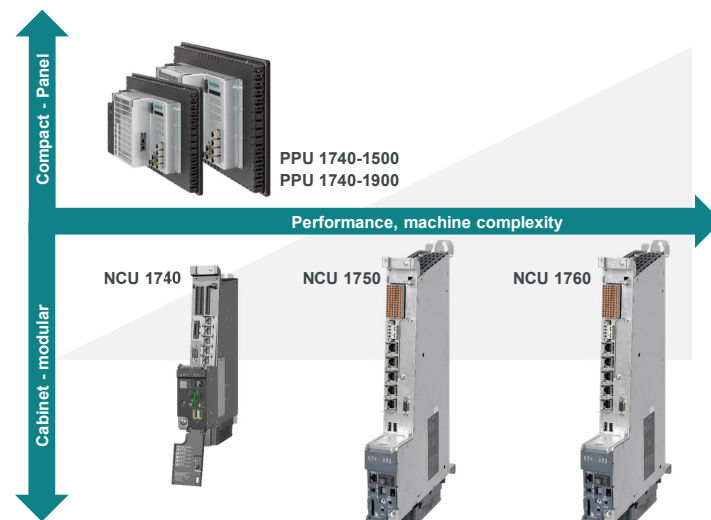
Figuur 2.30: Principe van het TRANSMIT-commando (Siemens AG, 2022a, p. 9)

Er bestaan meerdere modellen van Sinumerik. Een overzicht van deze modellen is opgenomen in Bijlage A. In deze studie ligt de focus op de Sinumerik One, de meest recente besturing binnen de reeks. Een Sinumerik One-besturing bestaat uit meerdere componenten:

- Human-Machine Interface (HMI): Hier draait de visualisatie op, het beheer van instellingen en de opslag van de NC-code.
- Numerical Control Kernel (NCK): Vertaalt de NC-code en berekent de positiepoints voor de assen. Deze worden doorgestuurd naar de Control Unit (CU).
- Control Unit (CU): Ontvangt de positiepoints van de NCK en bevat de gesloten regelkring. Met feedback van de encoders stuurt de CU het correcte stuursignaal naar de externe modermodule.
- Programmable Logic Controller (PLC): Stuurt de periferie componenten aan via digitale of analoge Input/Output (I/O). Een I/O-eiland kan via Profinet worden aangesloten.
- Communication Processor (CP): Verzorgt zowel de interne communicatie tussen componenten als de externe communicatie.

De CU is geïntegreerd in de Sinumerik One, waardoor een afzonderlijke aankoop niet nodig is, in tegenstelling tot bij een T-CPU.

Figuur 2.31 toont de verschillende uitvoeringen van de Sinumerik One.



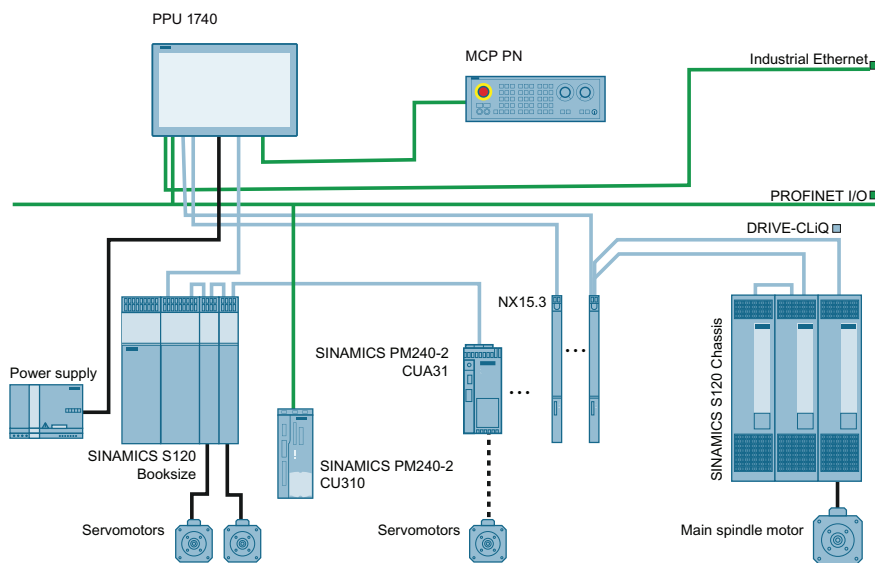
Figuur 2.31: Overzicht van de Sinumerik One-modellen (Meriaho, 2020, p. Slide 9)

Uit het Sinumerik One-gamma worden de twee lichtste modellen besproken: de Panel Processing Unit (PPU) 1740 en de Numerical Control Unit (NCU) 1740.

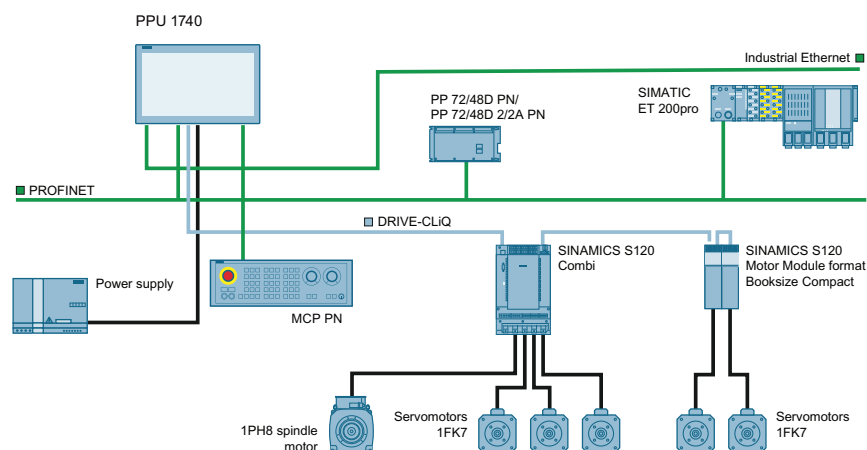
- **Panel Processing Unit (PPU) 1740:** Bij dit model is de besturing geïntegreerd achter het scherm, wat het geheel tot één compacte eenheid maakt. In Figuur 2.33 en 2.34 zijn twee voorbeelden te zien van componenten waarmee deze besturing kan samenwerken.



Figuur 2.32: PPU 1740 (Meriaho, 2020, p. Slide 7).



Figuur 2.33: PPU-topologie, voorbeeld 1 (Siemens AG, 2023b, p. 30).

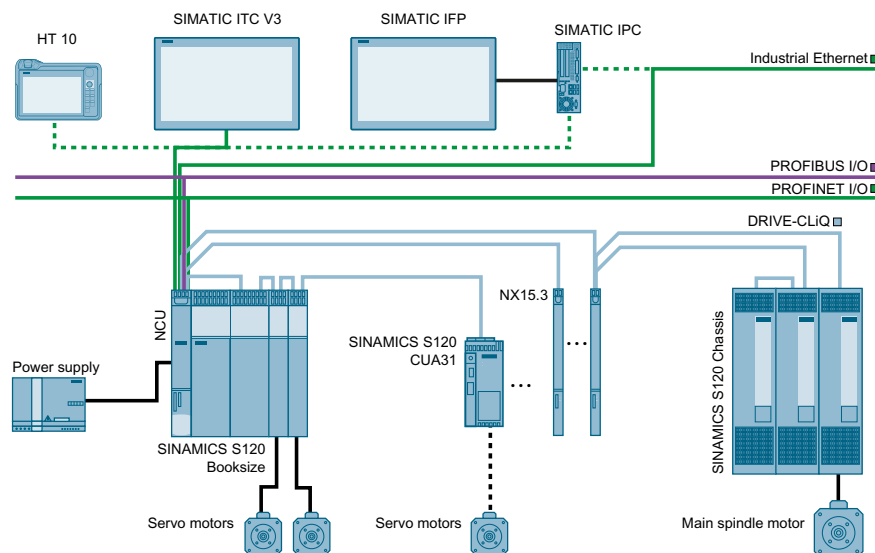


Figuur 2.34: PPU-topologie, voorbeeld 2 (Siemens AG, 2023b, p. 30).

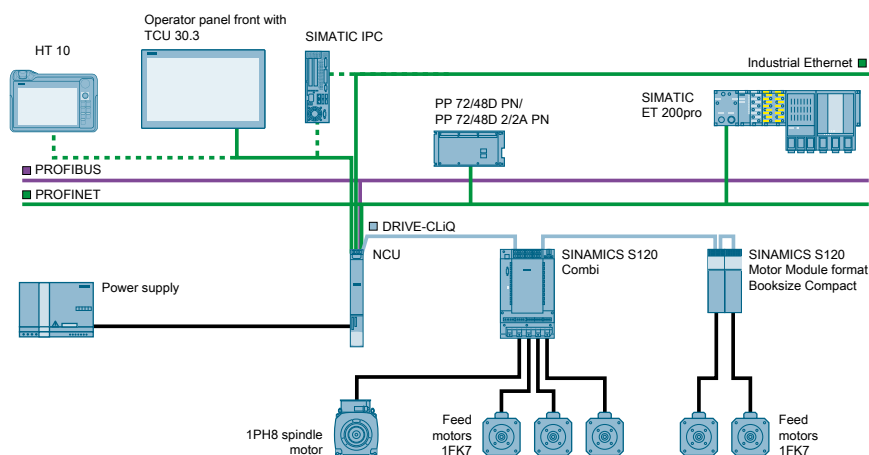
- **Numerical Control Unit (NCU) 1740:** Dit model heeft geen ingebouwd scherm, maar biedt dezelfde functionaliteit als de PPU. De NCU is uitgevoerd in het zogenaamde *booksize*-formaat en kan samen met de Sinamics S120-vermogenmodules in hetzelfde formaat worden geplaatst (zie Figuur 2.35). Deze modules worden aangestuurd via de geïntegreerde CU. Bediening en programmatie verlopen via een extern scherm, zoals een Simatic Industrial Thin Client (ITC) V3, zoals te zien is in Figuur 2.36.



Figuur 2.35: NCU 1740 (Meriaho, 2020, p. Slide 7)



Figuur 2.36: NCU-topologie, voorbeeld 1 (Siemens AG, 2023a, p. 26).



Figuur 2.37: NCU-topologie, voorbeeld 2 (Siemens AG, 2023a, p. 26).

2.4 Vergelijking van de twee besturingssystemen

Deze sectie behandelt onderwerpen zoals visualisatie, I/O-mogelijkheden, bediening, aandrijving en een prijsinschatting.

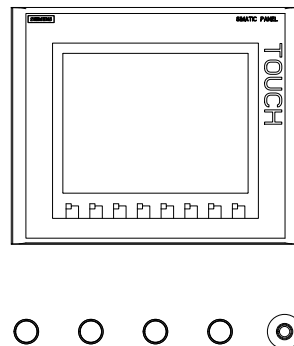
2.4.1 Mogelijkheden van visualisatie en bedieningsscherm

Op de huidige machine is een HMI KTP1000 aanwezig, die bij gebruik van een T-CPU eventueel hergebruikt kan worden. Deze HMI is te zien in Figuur 2.38 en in Figuur 1.3, waarop de bestaande machine is afgebeeld.

Bij keuze voor Sinumerik is de bestaande HMI niet bruikbaar. In dat geval is een speciaal scherm vereist dat compatibel is met het Sinumerik-systeem. De Sinumerik PPU combineert een scherm en een besturingseenheid in één behuizing, waardoor een afzonderlijk scherm overbodig is. Bij gebruik van een NCU moet daarentegen wel een extern scherm worden voorzien. De PPU is in vergelijking met een NCU met afzonderlijk scherm iets goedkoper. Een nadeel is dat bij een defect het volledige apparaat moet worden vervangen, terwijl bij een NCU het scherm afzonderlijk kan worden vervangen. Dit maakt het systeem onderhoudsvriendelijker en mogelijk kostenefficiënter.

Een ander belangrijk verschil tussen een NCU en een PPU is de bekabeling. Bij een PPU, die vaak in een arm van de CNC-machine wordt ingebouwd, moeten alle kabels door deze arm lopen. Bij de NCU daarentegen bevindt de besturing zich in de elektrische kast naast de S120 *booksize*-vermogensmodules, waardoor enkel een Ethernetkabel en een 24V-voeding naar het afzonderlijke scherm lopen. Hierdoor wordt de installatie eenvoudiger en overzichtelijker.

Voor de NCU zijn de meest voor de hand liggende schermen de ITC V3. Deze zijn beschikbaar in verschillende formaten, waarbij 15 inch de kleinste is die zelfstandig gebruikt kan worden. Schermen kleiner dan 15 inch worden doorgaans ingezet als tweede scherm.



Figuur 2.38: Bestaande machinebediening met HMI KTP1000 voor visualisatie, vier functiedrukknoppen en één noodstop rechts

2.4.2 Mogelijkheden van perifere in- en uitgangen

Bij het werken met een Sinumerik-systeem of een T-CPU bestaan er verschillende opties om extra I/O toe te voegen voor perifere apparaten, bijvoorbeeld koelvloeistof, machinedeurvergrendeling, perslucht-gestuurde klauwplaat en persluchtfrees. Bij een T-CPU is dit eenvoudig vanwege het identieke principe met de gangbare PLC-sturing van type 1200 in de machine. Twee mogelijkheden zijn beschikbaar: het toevoegen van extra I/O-kaarten naast de PLC, of het gebruik van een Profinet I/O-eiland dat via Profinet met de T-CPU wordt verbonden.

Bij een Sinumerik-systeem is er I/O aanwezig op de besturing zelf, maar deze zijn bedoeld voor specifieke toepassingen die zeer snel moeten worden gelezen of geschreven, zoals een ingang voor een taster of een uitgang voor het activeren van een laser bij lasersnijden.

De eerste en meest gebruikelijke optie om extra I/O toe te voegen, is het koppelen van een I/O-eiland via Profinet aan de Sinumerik, zoals bij een standaard PLC. De signalen worden verwerkt in de geïntegreerde 1500-PLC. Dankzij de interface tussen PLC en NCU (zie subsectie 5.1.1 op pagina 60) kan deze I/O rechtstreeks worden aangestuurd vanuit het NC-programma.

De tweede optie is het gebruik van Sinumerik-specifieke I/O-modules, zoals de PP72/48D PN en de PP72/48D 2/2A PN. Deze modules integreren direct met het Sinumerik-systeem en bieden extra digitale en analoge I/O-mogelijkheden. Beide mogelijkheden zijn te zien in Figuur 2.34 en 2.37.

2.4.3 Bedieningsmogelijkheden

De huidige machine is uitgerust met vijf fysieke drukknoppen, waaronder een noodstop. Bij gebruik van zowel de T-CPU als een Sinumerik-besturing kunnen deze knoppen in de bediening worden geïntegreerd, zoals eerder beschreven.

Bij een Sinumerik wordt echter sterk aangeraden om een Machine Control Panel (MCP) te gebruiken. Dit biedt meerdere voordelen. Ten eerste beschikt een MCP over een groot aantal knoppen waarmee eenvoudig de modus geselecteerd en verschillende functies bediend kunnen worden. Daarnaast bevat het paneel twee *override*-draaiknoppen: één voor de roterende assen (zoals de hoofd- en gereedschaps-spil) en één voor de lineaire assen. Deze draaiknoppen maken het mogelijk om de snelheid van de assen in te stellen als een percentage van de normaal ingestelde snelheid. Dit is vooral handig bij het testen en inbedrijfstellen van een machine, bijvoorbeeld wanneer nog niet zeker is of een as in de juiste richting beweegt.

2.4.4 Mogelijkheden van de aandrijfsystemen

De Sinumerik-besturing is compatibel met de Sinamics S120-aandrijfsystemen. Compacte machines maken doorgaans gebruik van de S120 *combi*-variant, terwijl bij modulaire of grotere machines vaker de S120 *booksize*-configuratie wordt toegepast.

Bij gebruik van een T-CPU zijn er meer mogelijkheden op het vlak van frequentieomvormers.

Sledes kunnen worden aangedreven met een motor-spindelcombinatie of met lineaire motoren. Lineaire motoren bieden een hogere nauwkeurigheid en worden vooral gebruikt bij precisiebewerkingen, zoals slijpen. Ze zijn echter duurder en complexer dan de klassieke motor-spindelcombinatie.

2.4.5 Kostenvergelijking besturingssystemen

Bij deze prijschatting zijn de gemeenschappelijke onderdelen, zoals vermogensmodules en servomotoren, niet meegerekend. Ook licentiekosten zijn buiten beschouwing gelaten. De vergelijking gaat alleen over de hardware. Er worden drie opties vergeleken. Voor de Sinumerik One zijn de twee lichtste modellen opgenomen. Voor de T-CPU is informatie gevraagd aan een productspecialist van Siemens, gespecialiseerd in *high-end motion control*. Na uitleg van de toepassing stelde deze het model 1505S_TF voor.

Optie	Kost ($\approx$)	Inclusief CU	Inclusief scherm
NCU 1740 (Sinumerik One)	≈ 5	Ja	Nee
PPU 1740 (Sinumerik One)	$\approx 7,5$	Ja	Ja
1505S_TF (T-CPU)	$\approx 2,5$	Nee (CU ≈ 1)	Nee

Tabel 2.3: Relatieve kostenvergelijking (CU ≈ 1 eenheid)

Bij deze vergelijking zijn er nog enkele opmerkingen:

- Bij de Sinumerik is het sterk aanbevolen om ook een Machine Control Panel (MCP) aan te schaffen.
- Voor de T-CPU moeten nog een Control Unit (CU) en een Human-Machine Interface (HMI) worden meegeteld.

Besluit van de kostenvergelijking: Op basis van deze benadering kan worden besloten dat de hardwarekost van de T-CPU-optie het laagst is, maar wel in de buurt komt van de optie met de Sinumerik.

De Sinumerik wordt standaard geleverd met een volledig gebruikersprogramma en uitgebreide functionaliteit. De T-CPU daarentegen bevat geen programma of ingebouwde functies. De werkuren die nodig zijn om de T-CPU te programmeren zijn in deze vergelijking buiten beschouwing gelaten.

De Sinumerik One is een moderne *high-end* besturing, geschikt voor complexe toepassingen. Voor deze toepassing zou een ouder en minder krachtig model volstaan.

2.4.6 Besluit van het besturingssysteem

De Sinumerik-besturing is het meest geschikt voor deze toepassing. Dankzij functies zoals TRANSMIT biedt het systeem meer mogelijkheden dan de T-CPU. Bij de T-CPU moet de volledige programmatie vanaf nul worden opgebouwd, wat meer tijd vraagt. In Sinumerik kan daarentegen snel een nieuw programma worden toegevoegd.

Een voordeel van de T-CPU is de grotere flexibiliteit in aandrijvingen. De Sinumerik ondersteunt enkel Sinamics S120. Wat hardware betreft, is de T-CPU ook goedkoper.

Deze voorstudie werd besproken met het bedrijf, waarna werd beslist om verder te gaan met het Sinumerik-besturingssysteem.

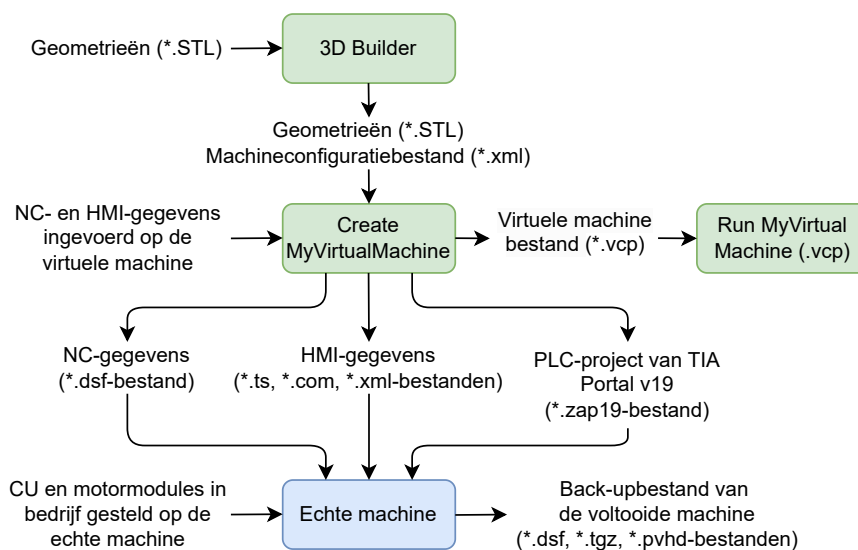
Hoewel het technisch mogelijk is om de toepassing met een T-CPU te realiseren, zou dit meer tijd vergen. Bovendien is het onzeker of de bewerkingskwaliteit daarmee even hoog zou zijn als bij gebruik van een Sinumerik.

3. Virtuele machine

Inleiding

Met de Sinumerik One-systeem kan een aanzienlijk deel van de inbedrijfname virtueel worden uitgevoerd, zonder dat de fysieke besturingseenheid vereist is. Deze aanpak wordt in dit project toegepast. Hiervoor worden drie applicaties gebruikt:

- **3D Builder:** Hiermee wordt een 3D-model van de machine opgesteld, dat gebruikt wordt voor visualisatie in CMVM.
- **Create My Virtual Machine (CMVM):** In deze omgeving wordt de besturing geconfigureerd voor virtuele inbedrijfname. De gegenereerde data kan zowel in de RMVM als op de fysieke machine worden gebruikt.
- **Run My Virtual Machine (RMVM):** Hiermee kunnen programma's gesimuleerd en getest worden. Deze omgeving is bedoeld voor gebruik tijdens de productie.



Figuur 3.1: Workflow voor inbedrijfname Sinumerik One (Siemens AG, 2024m, p. 476)

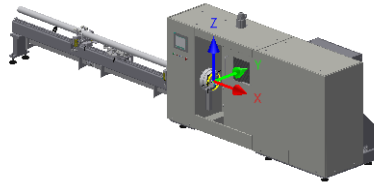
3.1 3D-model

Er wordt eerst een 3D-model van de machine opgesteld. Dit kan ook in een latere fase gebeuren. Hiervoor kan de Siemens-software *Create My Virtual Machine 3D Builder* worden gebruikt. De machineonderdelen moeten beschikbaar zijn in het STL-formaat (Standard Triangulation Language).

Van elk onderdeel of elke samenstelling die zich als één geheel beweegt ten opzichte van de rest van de machine, moet een eigen STL-bestand worden gegenereerd. De behuizing wordt eveneens afzonderlijk geëxporteerd, zodat hiervoor een afzonderlijke laag (*layer*) beschikbaar is die naar wens zichtbaar of onzichtbaar kan worden gemaakt.

- xSlede.stl
- zSlede.stl
- gereedschap.stl
- klauwplaat.stl
- behuizing.stl

Het is belangrijk dat deze elementen correct gerefereerd worden. De geëxporteerde STL-bestanden moeten een uniforme referentie hebben, die zich in het midden van de klauwplaat bevindt (zie Figuur 3.2). Dit zorgt ervoor dat het assenstelsel van de machine correct uitgelijnd is en voorkomt dat geometrieën achteraf verplaatst moeten worden.



Figuur 3.2: Referentie in het centrum van de klauwplaat

In Inventor kan dit gerealiseerd worden door een User Coordinate System (UCS) te definiëren. Dit verloopt als volgt: eerst wordt een UCS geplaatst in het midden van de klauwplaat binnen de hoofdsamenstelling van de machine. Vervolgens wordt een nieuwe, lege samenstelling aangemaakt waarin een tweede UCS wordt toegevoegd met coördinaten ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$). Dit UCS komt overeen met het nulpunt van de nieuwe samenstelling.

Daarna wordt de oorspronkelijke machinesamenstelling in deze lege samenstelling geïmporteerd. Door middel van een *constraints-set* wordt het UCS van de machine uitgelijnd met het nulpunt-UCS van de nieuwe samenstelling. Wanneer een onderdeel nu geëxporteerd wordt, zal het nulpunt van dat onderdeel overeenkomen met het centrum van de klauwplaat.

Om subsamenstellingen als STL-bestand te exporteren, kunnen irrelevante onderdelen onzichtbaar gemaakt worden. Enkel de zichtbare, relevante onderdelen worden dan geëxporteerd, zodat enkel de gewenste geometrie in het STL-bestand aanwezig is.

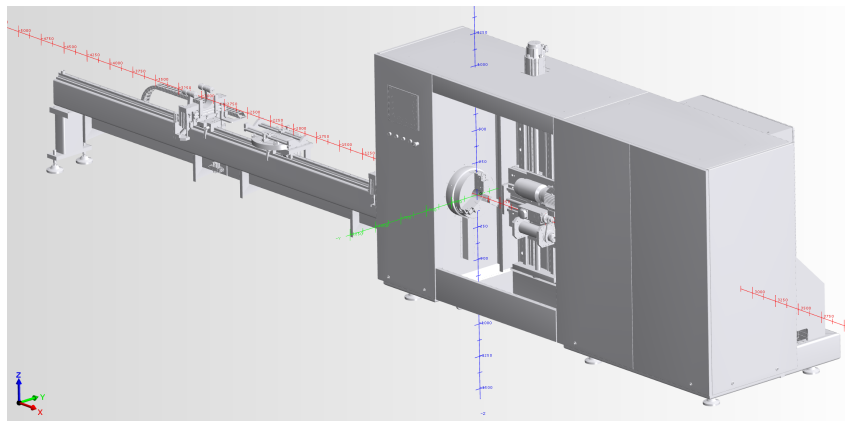
Eenmaal deze geometrieën geïmporteerd zijn in de 3D Builder, moet een kinematische keten worden gedefinieerd. Deze wordt weergegeven in Figuur 3.3.



Figuur 3.3: Weergave van de kinematische keten in de 3D Builder-software

De namen van de assen — MX1, MZ1, MCS1 en MCS3 — moeten overeenkomen met de namen van de machineassen die zijn ingevoerd in MD10000 (\$MN_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB). Dit wordt verder toegelicht op pagina 34.

Uit dit programma wordt een machineconfiguratiebestand (*.xml) gegenereerd, dat informatie bevat over de onderlinge relaties tussen de geometrieën (*.stl).



Figuur 3.4: Screenshot van de huidige machine geïmporteerd in 3D Builder-software

3.2 Virtuele machine instellen

3.2.1 Inladen van 3D-model

Rechtsboven in CMVM bevindt zich een pictogram van een SD-kaart, dat de opslag van de besturing representeert. Door hierop te klikken wordt een verkenner geopend die automatisch navigeert naar de volgende map:

```
%USERPROFILE%\AppData\Local\Siemens\Automation\SINUMERIK ONE\ncu\card
```

Binnen deze structuur wordt verder genavigeerd naar:

```
oem > sinumerik > 3d
```

In deze map wordt een nieuwe submap aangemaakt met de naam *model*. In deze submap worden de geometriebestanden (*.stl) en het machineconfiguratiebestand (*.xml) geplaatst. Na het herstarten van CMVM wordt het 3D-model correct geladen en is het beschikbaar binnen de virtuele omgeving.

3.2.2 Toegangs niveaus

Voor het wijzigen van parameters is het noodzakelijk om het *Manufacturer Access Level* te activeren. Dit niveau geeft volledige toegang tot de machineparameters. De activatie gebeurt via het menu. Daarbij wordt eerst de *softkey Setup* geselecteerd, gevolgd door *Password*, waarna het wachtwoord *SUNRISE* wordt ingevoerd. Een overzicht van alle toegangs niveaus is te vinden in Bijlage F op pagina 124.

3.2.3 Licenties

De besturing biedt basisfunctionaliteiten, zoals ondersteuning voor maximaal drie assen. Extra functionaliteiten vereisen de aankoop van een licentie. Deze licenties zijn gekoppeld aan de SD-kaart en worden gegenereerd via de *Siemens WEB License Manager*. De gegenereerde licentiesleutel werkt uitsluitend met de bijbehorende SD-kaart en moet worden ingevoerd in het licentiescherm van de besturing. Indien niet-gelicentieerde opties worden geactiveerd, zal de besturing niet kunnen starten.

Er wordt gebruikgemaakt van een testlicentie, waarmee gedurende een beperkte periode niet-gelicentieerde opties geactiveerd kunnen worden zonder invloed op de werking van de besturing.

In de virtuele machine zijn alle opties standaard beschikbaar en gelicentieerd. De benodigde licenties worden hier geselecteerd en vervolgens opgeslagen in het NC-archief. Bij het laden van het NC-archief in de echte machine (zoals te zien in Figuur 3.1 op pagina 30) worden deze licenties overgezet.

Voor deze toepassing zijn de volgende licenties vereist:

- TRANSMIT and Lateral Surface Transformation

Daarnaast worden enkele optionele licenties toegevoegd voor extra functionaliteit:

- ShopMill/ShopTurn
- Residual Material Detection and Machining
- Simultaneous Recording (real-time simulatie)
- 3D Simulation 1 (finished part)
- DXF-Reader
- QR code

3.2.4 Configuratie van machine- en instellingsgegevens (MD/SD)

De Numerical Control Kernel (NCK) gebruikt machine- en instellingsgegevens (MD/SD) voor de configuratie van functies, assen, kanalen en cycli. Deze gegevens zijn onderverdeeld per categorie en bereikbaar via specifieke *softkeys*. Een overzicht is te vinden in Bijlage G op pagina 125.

Overzicht van MD/SD-bereiken

Activatiemethodes van MD/SD

De manier waarop wijzigingen actief worden, verschilt per parameter. Er zijn vier activatiemethodes:

- **po** – *NCK-reset*: via de *softkey reset (po)* of door de besturing opnieuw op te starten.
- **cf** – *Set MD Active*: activeert de parameter via de bijhorende *softkey*.
- **re** – *Reset MCP*: via de resetknop op het MCP.
- **im** – *Input*: activeert de parameter onmiddellijk.

Kanalen en modegroepen

Elke NC-besturing bestaat uit één of meerdere kanalen. Elk kanaal voert één programma tegelijk uit. Bij besturingen met meerdere kanalen kunnen deze worden gegroepeerd in *modegroepen*. Binnen een modegroep:

- delen alle kanalen dezelfde modus: *Automatic*, *JOG* of *Manual Data Input (MDI)*;
- kunnen assen en spindels door meerdere kanalen worden aangestuurd.

Voorbeeld: Een configuratie met vier kanalen:

- Kanaal 1 en 3: bewerking
- Kanaal 2 en 4: transport

Modegroep 1:

- Kanaal 1 (bewerking)
- Kanaal 2 (transport)

Modegroep 2:

- Kanaal 3 (bewerking)
- Kanaal 4 (transport)

Voor deze toepassing is één kanaal voldoende.

Configuratie van assen en spindels

De fysieke testopstelling beschikt over drie NC-assen. Elke NC-as is een as die rechtstreeks wordt aangestuurd door de NCK. De gereedschapsspil werkt op perslucht en wordt daarom niet via de NCK bestuurd. Toch wordt een as geconfigureerd voor de gereedschapsspil. Dit is noodzakelijk voor de werking van de virtuele machine en voor de correcte werking van ShopTurn, zowel in de virtuele als in de fysieke machine. In de fysieke machine wordt geen motor toegewezen aan deze as, de as draait dan virtueel.

Standaard krijgen machine-assen namen zoals AX1, AX2, enzovoort. Met parameter MD10000 (\$MN_AXCONF_MACHAX_NAME_TAB) kunnen aangepaste namen worden toegekend. Dit maakt het programmeren leesbaarder. De letter M in de assennamen geeft aan dat het om machine-assen gaat. De letter S binnen de naam MCS1 duidt aan dat het om een spil (roterende as) gaat. De gereedschapsspil (MCS3) krijgt het nummer 3 in plaats van 2, aangezien in CNC-systemen de tweede spil (*counter spindle*) meestal nummer 2 krijgt.

```
MD10000[0] = MX1
MD10000[1] = MZ1
MD10000[2] = MCS1
MD10000[3] = MCS3
```

De machine maakt gebruik van één kanaal. De machine-assen worden gekoppeld aan de kanaal-assen via MD20070 (\$MC_AXCONF_MACHAX_USED). Machine-assen die niet aan een kanaal-as zijn gekoppeld, blijven inactief.

```
MD20070[0] = 1 (1e machine-as MX1 → 1e kanaal-as X1)
MD20070[1] = 2 (2e machine-as MZ1 → 2e kanaal-as Z1)
MD20070[2] = 3 (3e machine-as MCS1 → 3e kanaal-as C)
MD20070[3] = 4 (4e machine-as MCS3 → 4e kanaal-as CS3)
```

Elk kanaal beschikt over een X-, Y- en Z-geometrieas. In MD20050 (\$MC_AXCONF_GEOAX_ASSIGN_TAB) moet worden geconfigureerd welke kanaalassen gekoppeld worden aan welke geometrieassen. Niet-toegewezen geometrieassen zijn niet beschikbaar voor programmering (MD20060).

```
MD20050[0] = 1 (1ste geometrie-as X = 1ste kanaalas (X1))
MD20050[1] = 0 (2de geometrie-as Y is niet gedefinieerd)
MD20050[2] = 2 (3de geometrie-as Z = 2de kanaalas (Z1))
```

De naam van een geometrie-as per kanaal kan worden aangepast via MD20060 (\$MC_AXCONF_GEOAX_NAME_TAB). In deze configuratie wordt de standaard XYZ-indeling gebruikt.

```
MD20060[0] = X
MD20060[1] = Y
MD20060[2] = Z
```

De namen van de kanaalassen worden ingesteld in MD20080 (\$MC_AXCONF_CHANAX_NAME_TAB).

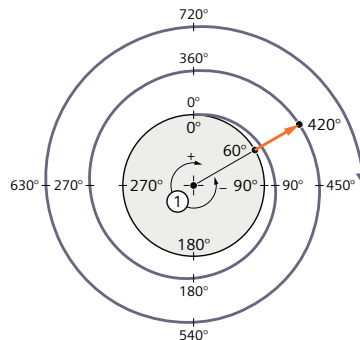
```
MD20080[0] = X1
MD20080[1] = Z1
MD20080[2] = C
MD20080[3] = CS3
```

De hoofdspil (MCS1) en de gereedschapsspil (MCS3) zijn roterende assen. De eenheden (graden, tr/min, ...) verschillen dus van die van een lineaire as (mm, mm/min, ...). Dit wordt ingesteld in MD30300 (\$MA_IS_ROT_AX).

```
AX3: MCS1
    MD30300 = 1 (as is roterend)
AX4: MCS3
    MD30300 = 1 (as is roterend)
```

Roterende assen hebben geen softwarelimieten¹, dit wil zeggen dat ze oneindig kunnen doordraaien. Een ander woord hiervoor is *modulo* (zie Figuur 3.5). Dit wordt ingesteld in MD30310 (\$MA_ROT_IS_MODULO).

```
AX3: MCS1
      MD30310 = 1 (modulo-conversie ingeschakeld)
AX4: MCS3
      MD30310 = 1 modulo-conversie ingeschakeld
```



Figuur 3.5: Modulo 360° map (Siemens AG, 2024d, p. 321)

Om de aspositie weer te geven tussen 0 en 359.999 graden, wordt MD30320 (\$MA_DISPLAY_IS_MODULO) geactiveerd.

```
AX3: MCS1
      MD30320 = 1 (360 graden weergave ingeschakeld)
AX4: MCS3
      MD30320 = 1 (360 graden weergave ingeschakeld)
```

De hoofdspil en de gereedschapsspil moeten als spilassen worden ingesteld. Dit gebeurt met parameter MD35000 (\$MA_SPIND_ASSIGN_TO_MACHAX). Door deze toewijzing worden de bijbehorende spilfunctionaliteiten geactiveerd.

```
AX3: MCS1
      MD35000 = 1 (Spil 1 toegewezen)
AX4: MCS3
      MD35000 = 3 (Spil 3 toegewezen)
```

Bij het openen van het tabblad Machineconfiguratie via Menu > Setup > NC verschijnt het scherm zoals weergegeven in Figuur 3.6.

Machine configuration		
Machine axis		
Index	Name	Type
1	MX1	Linear
2	MZ1	Linear
3	MCS1	Spindle
4	MCS3	Spindle

Figuur 3.6: Overzicht van de geconfigureerde assen

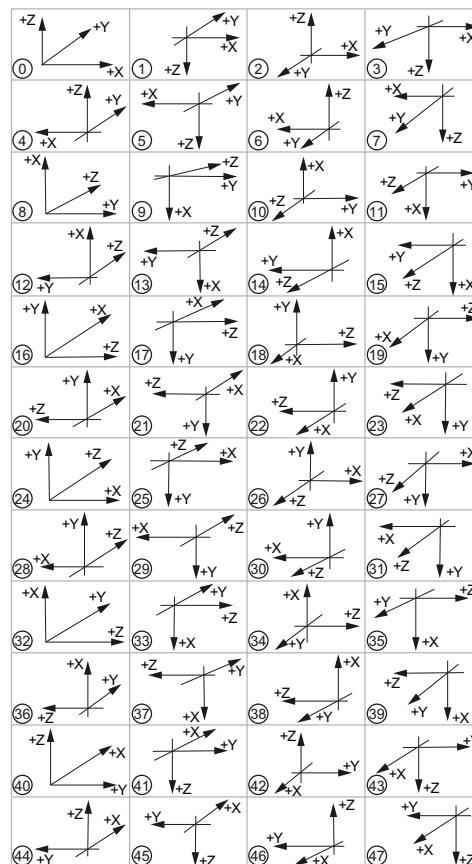
¹Softwarelimieten zijn digitale grenzen die in de besturing worden ingesteld om te voorkomen dat een as buiten het toegestane bewegingsbereik gaat. Dit wordt toegelicht in sectie 6.10 op pagina 93.

Met MD52000 (\$MCS_DISP_COORDINATE_SYSTEM) wordt het coördinatensysteem van de HMI afgestemd op dat van de machine. Het coördinatensysteem kan één van de posities aannemen zoals weergegeven in Figuur 3.7. Veelgebruikte instellingen zijn onder andere (Siemens AG, 2024l, p. 30):

- 34: Horizontale draaibank met bewerking achter het draaicentrum (schuinbed-draaibank).
- 33: Horizontale draaibank met bewerking voor het draaicentrum (vlakbed-draaibank).
- 0: Verticale draaibank (ronddraaiende draaibank) rechter kop.
- 6: Verticale draaibank (ronddraaiende draaibank) linker kop.

De machine-assen van de testopstelling komen overeen met configuratie 34. Deze waarde wordt dan ook ingesteld:

MD52000 = 34



Figuur 3.7: Mogelijke coördinatensystemen (Siemens AG, 2024e, p.226)

Bij CNC-bewerkingen worden gereedschapsbewegingen geprogrammeerd in een specifiek vlak. Er zijn drie mogelijke bewerkingsvlakken, weergegeven in Figuur 3.8. Doordat de machine is uitgerust met een aangedreven gereedschap (*live tooling*), kunnen naast draaibewerkingen ook frees- en boorbewerkingen worden uitgevoerd. Voor beide bewerkingen moet worden ingesteld in welk vlak de bewegingen plaatsvinden. Draaien gebeurt altijd in het XZ-vlak. Frezen en boren kunnen plaatsvinden in zowel het XY- als het YZ-vlak. In de testopstelling wordt enkel het XY-vlak gebruikt, omdat alleen een radiaal gereedschap beschikbaar is. Indien een axiaal gereedschap beschikbaar zou zijn, kunnen ook frees- en boorbewerkingen op de mantel van het werkstuk worden uitgevoerd, in het YZ-vlak.

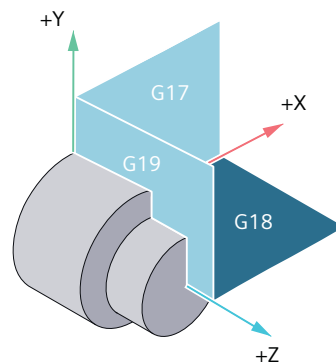
Tabel 3.1: Overzicht van G-codes per bewerkingsvlak

Vlak	G-code	Toepassing
X/Y	G17	Boren of frezen op het voorvlak
Z/X	G18	Draaien
Y/Z	G19	Boren of frezen op de mantel

MD52005 (\$MCS_DISP_PLANE_MILL) bepaalt het bewerkingsvlak voor frezen. Deze parameter wordt ingesteld op 0, wat betekent dat het bewerkingsvlak via de HMI wordt gekozen (standaard G17).

MD52006 (\$MCS_DISP_PLANE_TURN) bepaalt het bewerkingsvlak voor draaien. Dit vlak wordt vast ingesteld op G18.

MD52005 = 0
MD52006 = 18



Figuur 3.8: Bewerkingsvlakken: G17 (XY), G18 (ZX), G19 (YZ) (Siemens AG, 2024g, p. 39)

Bij draaibanken wordt één geometrie-as beschouwd als transversale as, meestal de X-as. In het WCS wordt de X-waarde weergegeven in diameter, dus als tweemaal de straal. De werkelijke X-waarde wordt weergegeven in het MCS. Deze instelling is noodzakelijk voor functies zoals diametercompensatie. Het verschil tussen het MCS en het WCS is duidelijk weergegeven in Figuur 2.30 op pagina 23. Dit wordt vastgelegd in: MD20100 (\$MC_DIAMETER_AX_DEF)

MD20100 = X

Instellingen voor ShopTurn

ShopTurn is een grafische programmeeromgeving van Siemens voor CNC-draaibanken. Het is ontwikkeld om het programmeren van draaibewerkingen eenvoudiger en intuïtiever te maken, vooral voor gebruikers die minder vertrouwd zijn met G-code. In subsubsectie 3.3.2 wordt hiervan een voorbeeld gegeven. Deze omgeving moet ingesteld worden.

De hoofdfunctie van de machine is draaien en wordt ingesteld via MD52200 (\$MCS_TECHNOLOGY). Hierdoor verschijnt de *softkey* *Turning*.

MD52200 = 1 (draaien)

Om naast draaien ook freestechnologie te activeren, wordt MD52201 (\$MCS_TECHNOLOGY_EXTENSION) als volgt ingesteld:

MD52201 = 2 (Frezen met behulp van aangedreven gereedschappen via TRANSMIT)

Hierdoor wordt de *softkey Milling* weergegeven.

De functie van de assen binnen het kanaal worden ingesteld in **MD52206[x]** `$MCS_AXIS_USAGE`. Mogelijke waarden zijn te zien in Tabel 3.2.

De derde as (index [2]) van het kanaal is de hoofdspil. Bij de virtuele machine is de vierde as (index [2]) de gereedschapspil.

```
MD52206[2] = 3 (Hoofdspil CS1)
MD52206[3] = 1 (Gereedschapspil CS3)
```

Tabel 3.2: Betekenis van de aswaarden in kanaal MD52206[x] (Siemens AG, 2020b, p. 641)

Waarde	Betekenis
0	Geen specifieke betekenis
1	Gereedschapspil (aangedreven gereedschap)
2	C-as van de gereedschapspil (aangedreven gereedschap)
3	Hoofdspil (draaien)
4	C-as van de hoofdspil (draaien)
5	Tegenlager (draaien)
6	C-as van het tegenlager (draaien)
7	Lineaire as van het tegenlager (draaien)
8	Meeneemspil (draaien)
9	Stabiele ondersteuning (draaien)
10	B-as (draaien)
12	B-as van het tegenlager (draaien)
13	X-as verplaatsing van het tegenlager (draaien)

De draairichting van de roterende assen wordt ingesteld in MD52207[x] (`$MCS_AXIS_USAGE_ATTRIB`). Er zijn 3 bits die ingesteld kunnen worden (Bijlage I, p. 129):

- Bit 3 bepaalt of de positieve draairichting, gezien vanaf de spilkop, met de klok mee (0) of tegen de klok in (1) is. Wij zetten deze op 0, zodat C+ betekent dat de spil met de klok mee draait wanneer men naar de spilkop kijkt.
- Bit 4 bepaalt of het M3-commando tegen de klok in (1) of met de klok mee (0) draait. Deze wordt op 0 gezet, waardoor M3 resulteert in een rotatie met de klok mee wanneer men naar de spilkop kijkt.
- Bit 5 zorgt ervoor dat de draairichting van M3 overeenkomt met de negatieve draairichting van de roterende as. Dit moet altijd overeenkomen met het PLC-signaal '`<Axis>.spindle.out.invertM3M4`'. We zetten deze op 0, zodat M3 betekent dat de beweging in de C+ richting plaatsvindt.

Voor de hoofdspil C (index [2]) worden de volgende waarden ingesteld:

```
MD52207[2] = C
Bit 3 = 0
Bit 4 = 0
Bit 5 = 0
```

Algemene instellingen

Ten slotte zijn er nog algemene basisinstellingen die aangepast moeten worden (Siemens AG, 2024I, p. 15-26). Deze zijn opgenomen in Bijlage H op pagina 126.

3.2.5 Gereedschapsbeheer

Veel CNC-machines maken gebruik van een automatische gereedschapswisselaar (*Automatic Tool Changer*, ATC). Hierdoor wordt de stilstandtijd verminderd.

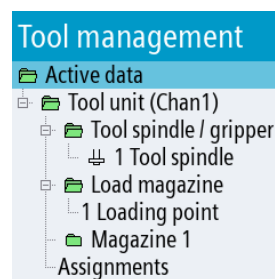
Gereedschapsbeheer (*Tool Management*) is een functie die ervoor zorgt dat op elk moment het juiste gereedschap beschikbaar is, inclusief de bijbehorende gereedschapsgegevens (*tooldata*). Het systeem beheert gereedschappen die zijn opgeslagen in verschillende types magazijnen, zoals kettingmagazijnen, ronde magazijnen of boxmagazijnen. Daarnaast bewaakt het systeem de toestand van de gereedschappen op basis van onder andere snijtijd en het aantal geproduceerde werkstukken.

Bij de proefopstelling is geen fysiek magazijn aanwezig. In plaats daarvan wordt een virtueel magazijn geconfigureerd, waarin de gereedschappen softwarematig worden beheerd. De gereedschapswissel gebeurt handmatig. Dankzij deze configuratie kan na een manuele wissel een ander gereedschap worden geselecteerd, zonder telkens opnieuw de gereedschapsgegevens in te voeren.

De configuratie van het gereedschapsbeheer gebeurt via de HMI:

Setup > NC > Tool Management > Active data

De instellingen voor deze opstelling zijn te zien in Figuur 3.9.



Figuur 3.9: Overzicht van de instellingen voor gereedschapsbeheer

Bij de echte machine is het belangrijk dat de volgende twee machineparameters ingesteld worden:

MD22562 (TOOL_CHANGE_ERROR_MODE), bit 1 = 1 (*Manual tools can be loaded*): nu kan een gereedschap gebruikt worden dat niet in een magazijn zit.

MD20310 (TOOL_MANAGEMENT_MASK), bit 9 = 1 (*Simulation of PLC acknowledgements*): normaal moet na een toolwissel (M6) een PLC-bevestiging gestuurd worden naar de NC. In deze testopstelling is er geen *toolchanger* en wordt het gereedschap handmatig verwisseld.

Wanneer bit 9 = 1, zal de besturing in een programma waarin halverwege van gereedschap gewisseld wordt (M6) automatisch de andere gereedschapsgegevens selecteren en ervan uitgaan dat het gereedschap effectief geladen is. Dit vormt een probleem. Een mogelijke oplossing is het voorzien van een knop op de MCP waarmee de manuele gereedschapswissel bevestigd kan worden, waarna het programma verdergaat. In dat geval moet bit 9 = 0.

3.2.6 Kinematische keten

De kinematische keten geeft de geometrische opbouw van de machine weer. Dit gebeurt aan de hand van de lineaire en roterende assen die in het systeem zitten. De keten wordt gebruikt voor onder andere:

- Simulatie van de bewegingen van de assen (visualisatie)
- Botsingpreventie via *Protect MyMachine*
- Transformatieberekeningen

Aangezien de machine een transformatie vereist (besproken in sectie 2.2), moet de kinematische keten correct worden geconfigureerd. Het machinemodel kan op twee manieren worden geconfigureerd:

- Via de HMI:

Menu > Setup > NC > Machine model > Active data

- Via systeemvariabelen: Door parameters handmatig in te stellen via het NC-programma. Deze methode is geschikt wanneer meerdere machines van hetzelfde type worden gebruikt.

De kinematische structuur van een machine omvat:

- Het aantal en type machineassen (lineair of roterend)
- De positionering en oriëntatie van de assen
- De onderlinge afhankelijkheden tussen de assen (welke assen bewegen samen)

Om de bijhorende *softkey* op de HMI beschikbaar te maken, moet parameter MD18866 (\$MN_MM_NUM_KIN_TRAFOS) een waarde groter dan nul krijgen. Deze parameter bepaalt het maximaal aantal beschikbare kinematische transformaties. Voor deze toepassing wordt de waarde ingesteld op 1, aangezien slechts één transformatie nodig is:

MD18866 = 1 (moet > 0)

Een element binnen de kinematische keten beschrijft de transformatie waarmee het lokale coördinatenstelsel van het vorige element wordt afgebeeld op dat van het huidige.

Er bestaan twee soorten transformaties:

- Constante transformaties
 - Verplaatsing: OFFSET
 - Rotatie: ROT_CONST
- Variabele transformaties (afhankelijk van de positie van een bijhorende as)
 - Verplaatsing: AXIS_LIN
 - Rotatie: AXIS_ROT

Het maximaal aantal elementen in de kinematische keten wordt bepaald via de parameter MD18880 (\$MN_KIN_NUM_ELEMENTS). In dit project is deze ingesteld op:

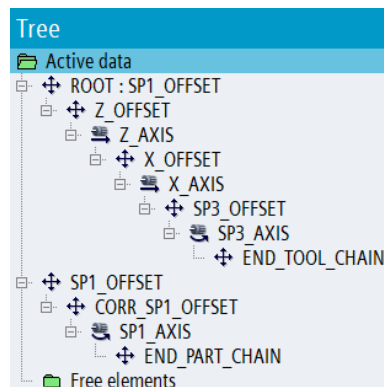
MD18880 = 50

Het *ROOT*-element representeert het nulpunt van de machine. De naam van dit element kan aangepast worden via de parameter MD16800 (\$MN_ROOT_KIN_ELEM_NAME).

Elke as of spil bestaat uit twee opeenvolgende elementen: een *offset*-element (de verplaatsing ten opzichte van het vorige element) en een as-element (lineair of roterend).

De keten begint bij het *ROOT*-element, waarop eerst een offset wordt geplaatst, gevolgd door de X-as. Aan dit as-element wordt de machine-as MX1 gekoppeld.

Op de X-as wordt vervolgens opnieuw een offset toegevoegd, gevolgd door een Z-as-element, waaraan MZ1 wordt gekoppeld. Daarna volgt een offset voor de spil, gevolgd door het spilelement zelf. Aan dit element wordt de machine-as MCS3 toegewezen. Voor deze spil wordt de rotatie-as ingesteld op de Z-richting, met een waarde van -1 . Dit ziet er dan als volgt uit in de HMI:



Figuur 3.10: Kinematische keten van de machine

3.2.7 Configuratie van de TRANSMIT-transformatie

Met de functie TRANSMIT wordt een niet-bestaande Y-as gesimuleerd door interpolatie tussen de X- en C-as. Dit is te zien in Figuur 2.30 op pagina 23. De TRANSMIT-transformatie kan geconfigureerd worden via het volgende menu:

Menu > Setup > NC > Transformations

Deze optie wordt pas zichtbaar wanneer parameter MD18866 (\$MN_MM_NUM_KIN_TRAFOS) is ingesteld op een waarde groter dan nul. Deze parameter bepaalt het aantal configureerbare transformaties in het menu. In deze toepassing is slechts één transformatie vereist, namelijk de TRANSMIT-transformatie.

De configuratie van de TRANSMIT_KIN_MAIN-transformatie is weergegeven in Figuur 3.11.

TRANSMIT_K - end face transformation	
Name	TRANSMIT_KIN_MAIN
Alternative call	Yes
	TRANSMIT 1
Assignment to chain	
Tool chain	
Start of tool chain	ROOT
Tool ref. point	SP3_OFFSET
End of tool chain	SP3_OFFSET
Workpiece chain	
Start of workpiece chain	ROOT
Rotation axis	SP1_AXIS
Rotary axis offset	0.000 °
End of workp. chain	END_PART_CHAIN
Linear axes	
Transformation axis	X_AXIS
Use compensating axis	No
Infeed axis	Z_AXIS

Figuur 3.11: Configuratie-instelling van de TRANSMIT_KIN_MAIN-transformatie

3.3 Programmeermethodes en simulaties

3.3.1 Hoofdspil: Spil-modus en as-modus (C-as)

De hoofdspil kan zich in twee modi bevinden: spil-modus en as-modus (Siemens AG, 2024d, p. 396). In **spil-modus** wordt de hoofdspil gebruikt als een draaias zonder positiebepaling. Enkel de draairichting en het toerental worden geregeld. Dit gebeurt via M3 (rechtsom), M4 (linksom) en M5 (stop). Er is geen positieterugkoppeling nodig. Dit is *closed-loop speed control*. In **as-modus** wordt de spil behandeld als een gewone as (C-as). De positie wordt opgevolgd via een encoder, en gestuurd via een gesloten regelkring. Dit is *closed-loop position control*. Deze modus is nodig voor bijvoorbeeld frezen op het kopvlak, positioneren met SPOS of oriënteren met M19. Standaard staat de machine in spil-modus. Om over te gaan naar as-modus (C-as) kan SPCON gebruikt worden, of M70. Beide activeren de positiecontrole van de spil. Bij gebruik van het TRANSMIT-commando schakelt de spil automatisch over naar as-modus. Om van as-modus terug te keren naar spil-modus, bijvoorbeeld om de hoofdspil continu te laten draaien, kan M3, M4 of SPCOF gebruikt worden.

3.3.2 Werkmethodes

In deze subsectie worden drie methoden besproken waarmee aangetoond wordt dat de gewenste vormen in Figuur 1.6 op pagina 3 op een eenvoudige wijze programmeerbaar zijn.

- De contour handmatig ingeven via ShopTurn, of importeren vanuit een *.dxf-bestand
- De G-code handmatig schrijven
- Gebruikmaken van Computer-Aided Design (CAD)/CAM-software

Handmatige generatie van G-code

Wanneer de afmetingen van een eenvoudig pad bekend zijn, kunnen we de G-code handmatig programmeren. Dit gebeurt typisch lineaire en circulaire interpolatie.

Lineaire verplaatsingen worden uitgevoerd met het commando:

```
G1 X Y Z
```

Hierbij geven X, Y en Z de absolute coördinaten van het eindpunt aan. De machine beweegt in een rechte lijn van de huidige positie naar deze eindcoördinaten.

Cirkelvormige verplaatsingen worden uitgevoerd met:

```
G2/G3 X Y Z I J K
```

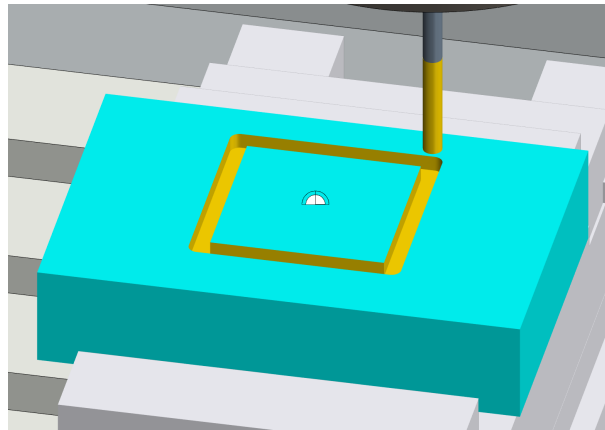
waarbij:

- G2 een cirkelbeweging met de klok mee uitvoert;
- G3 een cirkelbeweging tegen de klok in uitvoert;
- X, Y, Z het eindpunt van de cirkel beschrijven;
- I, J, K de afstand tot het middelpunt aangeven, relatief t.o.v. het startpunt.

Met AC(x) kunnen de IJK-waarden ook als absolute coördinaten worden ingevoerd.

Voor een vierkant van 60 mm bij 60 mm, met het middelpunt in het nulpunt van het assenstelsel, liggen de hoekpunten op (± 30 , ± 30). De bijhorende G-code om deze contour te frezen ziet er als volgt uit:

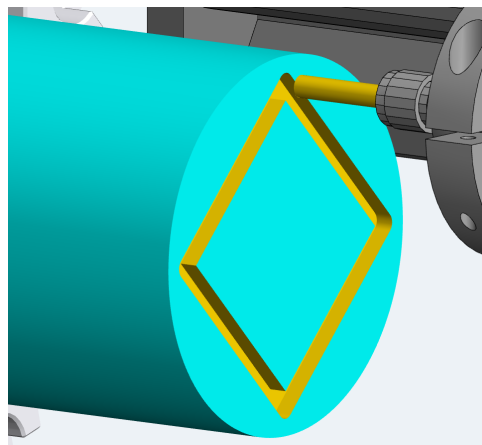
G0	X30 Y30 Z5	; Naar startpunt, boven het werkstuk
G1	X30 Y30 Z-5	; Z-as dalen naar freeshoogte
G1	X-30 Y30	; Eerste zijde
G1	X-30 Y-30	; Tweede zijde
G1	X30 Y-30	; Derde zijde
G1	X30 Y30	; Vierde zijde, terug naar start
G1	X30 Y30 Z5	; Terug omhoog



Figuur 3.12: Pad van een vierkant, gefreesd op een XYZ-freesmachine.

Door de bovenstaande code tussen TRANSMIT en TRAFOOF te plaatsen, kan deze ook gebruikt worden op een machine met een lineaire en een roterende as. De werking van TRANSMIT is uitgelegd in Figuur 2.30 op pagina 23. Op pagina 37 is de X-as ingesteld als transversale as. Daardoor moeten X-waarden in diameter worden geprogrammeerd. Met het commando DIAMOF wordt deze instelling uitgeschakeld.

```
DIAMOF
G17
TRANSMIT
G0 X30 Y30 Z5
G1 Z-5
G1 X-30
G1 Y-30
G1 X30
G1 Y30
G1 Z5
TRAFOOF
```



Figuur 3.13: Vierkante contour met cartesische coördinaten, gefreesd op een XCZ-draaifreesmachine.

Het is ook mogelijk om in polaire coördinaten te programmeren. Dit is handig wanneer afmetingen worden opgegeven met een hoek en een afstand. De polaire hoek is de hoek tussen de polaire straal en de horizontale as van het werkvlak. Negatieve hoeken draaien met de klok mee, positieve tegen de klok in.

De volgende parameters worden gebruikt:

- RP: polaire straal
- AP: polaire hoek

Het referentiepunt voor deze twee parameters wordt de **pool** genoemd. De pool kan worden opgegeven in cartesische coördinaten (X, Y, Z) of in polaire coördinaten (AP, RP). Een G-code legt de referentie van de pool vast:

- G110: ten opzichte van de huidige positie
- G111: ten opzichte van het werkstuknulpunt
- G112: ten opzichte van de vorige pool

Bij het frezen van een vierkant waarvan de hoekpunten op een straal van 40mm liggen, wordt de volgende G-code gebruikt:

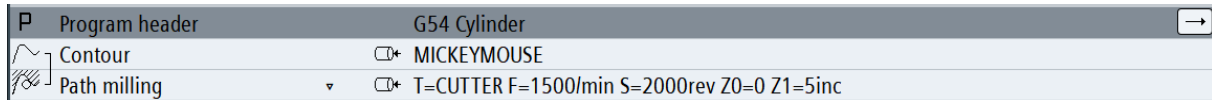
```
G17
TRANSMIT
G0 Z5
G1 RP=40 AP=0
G1 Z-5
G1 RP=40 AP=90
G1 RP=40 AP=180
G1 RP=40 AP=270
G1 RP=40 AP=0
G1 Z5
TRAFOOF
```

Het resultaat is gelijkaardig aan Figuur 3.13.

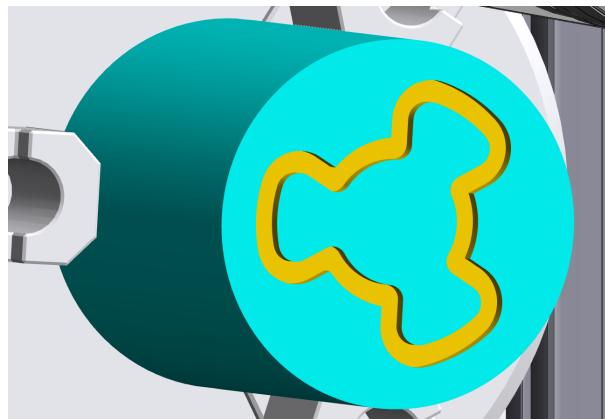
ShopTurn

Met ShopTurn kan het gatenpatroon van de eerste gewenste vorm snel worden geprogrammeerd. Ook contourfrezen kan op een eenvoudige manier worden uitgevoerd. Een contour kan handmatig worden aangemaakt of geïmporteerd via een .dxf-bestand.

De .dxf-functie is bijzonder nuttig bij complexe vormen, zoals bij gewenste vorm 2. Het .dxf-bestand wordt geëxporteerd vanuit Inventor en vervolgens geïmporteerd in ShopTurn. Daarna kan worden gekozen welke bewerking op de contour wordt toegepast. In dit voorbeeld wordt een sleuf gefreesd ter illustratie.



Figuur 3.14: ShopTurn-programma met een geïmporteerd .dxf-bestand van gewenste vorm 2.



Figuur 3.15: Resultaat van het ShopTurn-programma met .dxf-import van gewenste vorm 2.

CAD/CAM

Met behulp van CAD/CAM-software, zoals Fusion 360, wordt rechtstreeks G-code gegenereerd op basis van een CAD-model. Deze G-code kan daarna geïmporteerd worden in de numerieke besturing. De software kan de G-code genereren in zowel XYZ- als XCZ-coördinaten. Het onderscheid tussen deze twee coördinatensystemen werd toegelicht in sectie 2.2.4. Een voorbeeld op deze manier is gemaakt op de testopstelling, te zien op pagina 98.

3.4 Besluit van de virtuele machine

Via de virtuele machine zijn er twee zaken gerealiseerd:

1. Het is bevestigd dat het Sinumerik One-besturingssysteem het programmeren en bewerken van de gewenste werkstukken (pagina 3) enorm gemakkelijk maakt.
2. Een deel van de inbedrijfname is reeds virtueel uitgevoerd. Dit verkort de inbedrijfname van de echte machine aanzienlijk.

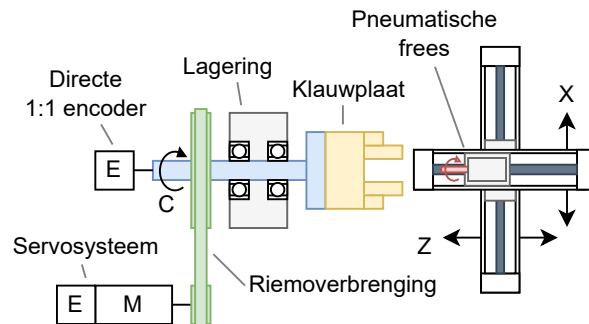
4. Mechanische opstelling

Inleiding

De mechanische opstelling werd ontworpen en uitgetekend door een mechanisch ontwerper van het bedrijf Cadcamatic. De maakstukken zijn vervaardigd in het interne machinepark. Aan de mechanische opstelling werden de volgende eisen gesteld:

- Bewegingsbereik:
 - X-as: 150 mm
 - Z-as: 150 mm
- Maximale inspanbare diameter van 150 mm.
- De opstelling moet toelaten om de C- of X-as zodanig te regelen dat het gereedschap exact door het centrum van de klauwplaat beweegt. Dit wordt toegelicht in sectie 4.2.
- Om omkeerspel in de overbrenging te compenseren, wordt gebruikgemaakt van een direct meetsysteem (Direct Measuring System (DMS)) op de hoofdspil. De werking hiervan wordt toegelicht in sectie 4.5.

Daarnaast werd een schets van de opstelling gemaakt. Deze is weergegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1: Initiële schets van de mechanische opstelling (vooraanzicht)

4.1 Omzetting van rotatie naar translatie via een spindel

De opstelling bestaat uit twee lineaire assen en één roterende as. Aangezien er gebruikt wordt gemaakt van motoren, moet de roterende beweging worden omgezet in een lineaire beweging. Dit wordt gerealiseerd met behulp van een spindel.

4.1.1 Formules

Wanneer een motor met een hoeksnelheid n een koppel M levert, wordt deze roterende beweging via een spindel met spoed p omgezet in een lineaire verplaatsing s en een kracht F op een slede. De spoed p geeft aan hoeveel millimeter lineaire verplaatsing overeenkomt met één volledige rotatie van de spindel, wat neerkomt op p millimeter per 2π radialen. De relatie tussen de roterende verplaatsing θ en de lineaire verplaatsing s volgt rechtstreeks uit de definitie van de spoed:

$$s = \theta \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.1)$$

De snelheid v en de versnelling a zijn de eerste en tweede afgeleide van de verplaatsing s naar de tijd. Dit levert de volgende uitdrukkingen op:

$$v = n \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.2)$$

$$a = \alpha \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.3)$$

Het geleverde koppel M resulteert in een kracht F op de slede. Uit het energie-evenwicht volgt:

$$M \cdot \theta = F \cdot s \quad \text{met } s = \theta \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.4)$$

$$M \cdot \theta = F \cdot \theta \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.5)$$

$$F = \frac{M}{\frac{p}{2\pi}} \quad (4.6)$$

Ten slotte kan een massa m op de slede worden omgerekend naar een equivalente rotatietraagheid J , door het gelijkstellen van de kinetische energie van de roterende massa en de lineaire massa:

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{met } v = \omega \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} m \left(\omega \cdot \frac{p}{2\pi} \right)^2 \quad (4.8)$$

$$J = m \cdot \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \quad (4.9)$$

Deze formules worden in de volgende secties gebruikt.

4.1.2 Effect van de spindelspoed

Voor CNC-machines is nauwkeurigheid belangrijk. Daarom kiest men vaak voor een kleine spoed. Toch komen spoeden tussen 10 mm en 20 mm ook voor in de praktijk. Hoe kleiner de spoed, hoe trager de as beweegt.

Voor deze opstelling is gekozen voor een spoed p van 10 mm.

Tabel 4.1: Effect van kleine en grote spoed p op het aandrijfsysteem.

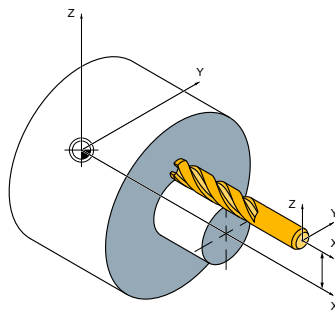
Eigenschap	Formule	Kleine spoed ($p \downarrow$)	Grote spoed ($p \uparrow$)
Lineaire verplaatsing per rotatie	$s \propto p$	Klein	Groot
Kracht op de slede	$F \propto \frac{1}{p}$	Groot	Klein
Traagheidsmoment	$J \propto p^2$	Klein	Groot
Nauwkeurigheid en controle	—	Hoog	Lager

4.2 Werkgebiedsbependingen

Om de TRANSMIT-functie te gebruiken, moet de mechanische opstelling toelaten dat het gereedschapsmiddelpunt exact in het draaicentrum kan worden gepositioneerd. Dit hangt af van twee voorwaarden:

- De as loodrecht op de rotatieas (X) bevindt zich in hetzelfde radiale vlak als de rotatieas (C).
- Beide assen staan onder een hoek van 90 graden ten opzichte van elkaar. Als dit niet het geval is, beweegt het gereedschap niet meer evenwijdig aan de rotatieas.

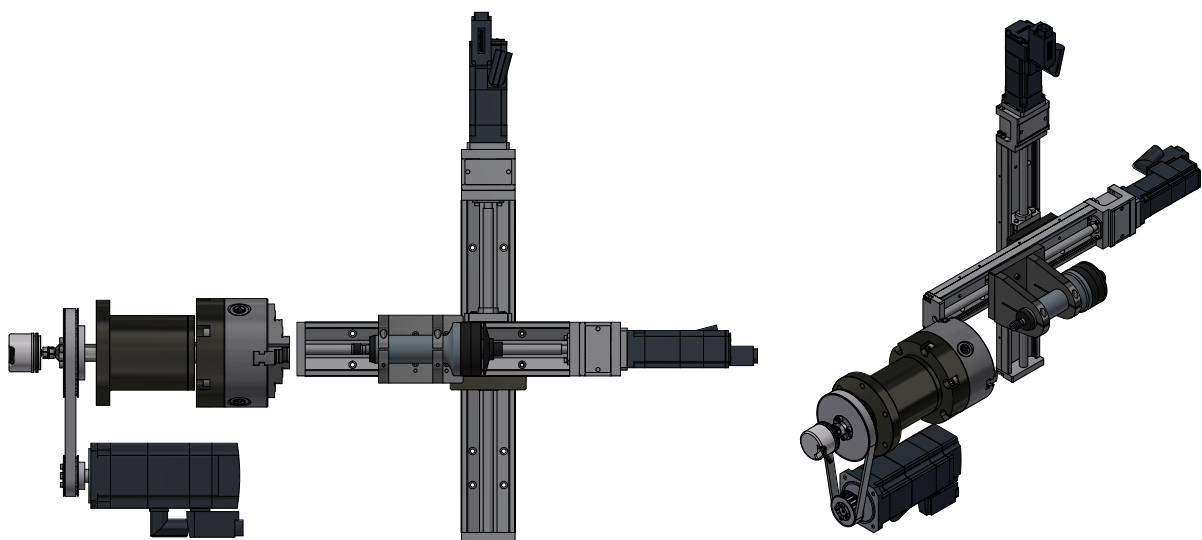
Er moet dus een mogelijkheid zijn om bij te regelen, zodat de X-as exact door het middelpunt van de C-as snijdt. Alleen dan kan het gereedschap correct gepositioneerd worden over het volledige werkgebied. Om dit mogelijk te maken, is het volledige frame opgebouwd uit ITEM-profielen. Deze constructie maakt het mogelijk om de opstelling nauwkeurig bij te regelen en correct af te stellen. Zoals te zien is in Figuur 4.2, wordt het werkgebied bepaald door de lineaire offset tussen de radiale vlakken van beide assen (Siemens AG, 2024j, p. 70). Het werkelijk afregelen wordt besproken in hoofdstuk 7 vanaf pagina 94.



Figuur 4.2: Werkgebiedsbepending door offset tussen de lineaire en rotatieas (Siemens AG, 2024j, p. 71)

4.3 Massatraagheid en lambda-analyse

Het eerste 3D-ontwerp van de opstelling is weergegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3: Eerste 3D-ontwerp van de mechanische opstelling, met links het vooraanzicht

Nadat het eerste ontwerp voltooid was, waren alle gebruikte componenten gekend, inclusief hun massatraagheidsmoment. Voor elke as werd het totale massatraagheidsmoment J berekend. Op basis hiervan werd de λ -waarde bepaald. Deze λ is de verhouding tussen de traagheid van de belasting en de traagheid van de motor (ook wel inertieratio of *inertia ratio* genoemd):

$$\lambda = \frac{J_{\text{belasting}}}{J_{\text{motor}}} \quad (4.10)$$

Hoe hoger de λ -waarde, hoe moeilijker het wordt voor de motor om de belasting snel te versnellen of te vertragen. Bij een te hoge λ wordt het systeem moeilijk regelbaar en kan het zelfs instabiel worden. Voor CNC-toepassingen mag de λ -waarde maximaal 3 zijn (Beckhoff, z.d.).

De berekende waarden voor de X-, Z- en C-as zijn weergegeven in Tabel 4.2. Voor de testopstelling wordt uitgegaan van een werkstuk met een maximale diameter van 150mm en een dikte van 50mm, uitgevoerd in aluminium.

Tabel 4.2: Theoretisch berekende massatraagheden en bijbehorende λ -waarden per as

As	J_{motor} [kg·cm ²]	J_{last} [kg·cm ²]	λ [-]
X	0,28	0,717	2,6
Z	0,28	0,44	1,6
C zonder werkstuk	3,45	108,6	31,5
C met werkstuk	3,45	122,2	35,4

De λ -waarden voor de X- en Z-as liggen binnen het gewenste bereik. De waarde voor de C-as is echter veel te hoog. Bij gebruik van een overbrenging geldt dat de traagheid aan de ingaande zijde van de aandrijving gelijk is aan de uitgaande traagheid gedeeld door het kwadraat van de overbrengingsverhouding i :

$$J_{\text{in}} = \frac{J_{\text{uit}}}{i^2} \quad (4.11)$$

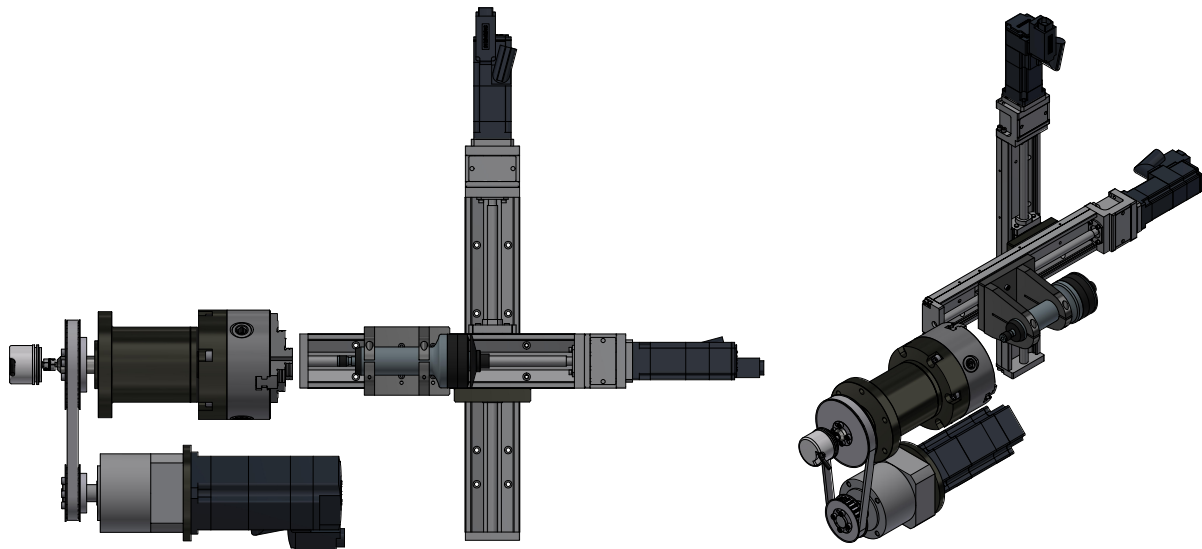
Om de λ -waarde te verlagen, is dus een grotere overbrengingsverhouding nodig. Dit werd opgelost door een bestaande reductor toe te voegen, direct na de motor. Hierdoor moest de eerste poelie iets groter gekozen worden, wat resulteerde in een iets kleinere riemoverbrengingsverhouding. Het massatraagheidsmoment van de grootste componenten (flens, klauwplaat en werkstuk) wordt nu gedeeld door het kwadraat van de totale overbrengingsverhouding i_{tot} . Deze overbrengingsverhouding is het product van de reductie- en de riemoverbrengingsverhouding:

$$i_{\text{tot}} = i_{\text{reductor}} \cdot i_{\text{riem}} \quad (4.12)$$

Door deze reductie daalt de λ -waarde van de C-as aanzienlijk. De waarden voor de X- en Z-as blijven ongewijzigd. De gecorrigeerde waarden worden weergegeven in Tabel 4.3. De uiteindelijke aangepaste mechanische opstelling is weergegeven in Figuur 4.4.

Tabel 4.3: Gecorrigeerde massatraagheden en λ -waarden per as (na reductie voor de C-as).

As	J_{motor} [kg·cm ²]	$J_{\text{belasting}}$ [kg·cm ²]	λ [-]
X	0,28	0,717	2,6
Z	0,28	0,44	1,6
C zonder werkstuk	3,45	4,48	1,3
C met werkstuk	3,45	4,86	1,4



Figuur 4.4: Aangepaste mechanische opstelling met reductor

4.4 Krachten op de frees tijdens verspaning

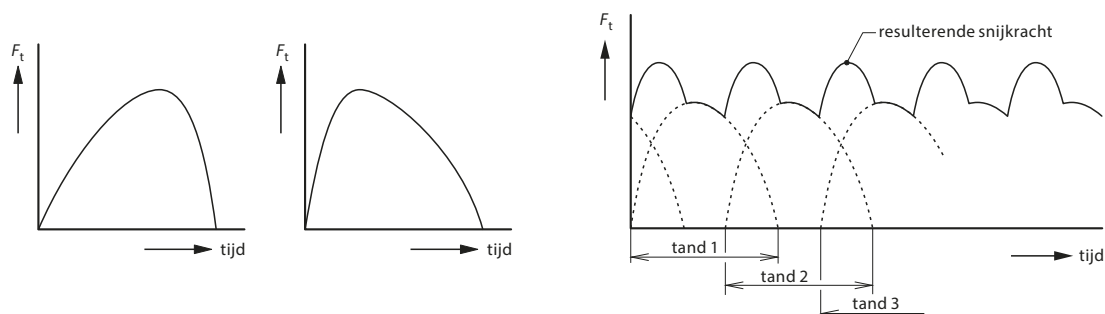
Tijdens het frezen ontstaan er drie krachten:

- **Tangentiële kracht** F_t : Deze kracht werkt in de draairichting van de frees en is verantwoordelijk voor het verwijderen van materiaal.¹
- **Radiale kracht** F_r : Deze kracht staat loodrecht op de draairichting en duwt de frees zijwaarts weg van of tegen het werkstuk.
- **Axiale kracht** F_a : Deze kracht werkt langs de as van de frees en duwt het gereedschap in of uit het werkstuk.

De totale kracht op de frees is de resultante van deze drie componenten:

$$F_{\text{tot}} = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2} \quad (4.13)$$

Deze drie componenten zijn afhankelijk van het type gereedschap, de bewerkingsparameters en de materiaaleigenschappen. De tangentiële snijkraft F_t is meestal de grootste. De grootte en richting van F_t variëren voortdurend, zoals te zien in Figuur 4.5.



Figuur 4.5: Verloop van de tangentiële snijkraft. Links: voor één tand bij tegenlooppfrezen en meellooppfrezen. Rechts: voor meerdere tanden (K. et al., 2018, p. 166).

¹In de literatuur wordt soms ook de term *cutting force* F_c gebruikt. Deze term wordt vaak gebruikt als synoniem voor de tangentiële kracht F_t , maar soms verwijst F_c juist naar de totale kracht F_{tot} .

4.4.1 Schatting van de optredende krachten uit de bewerkingsgegevens

Bij het ontwerp van een machine en het dimensioneren van een gereedschapspil wordt de spil gedimensioneerd op basis van bewerkingseisen, zoals het te verspanen materiaal, de gewenste verspanings-snelheid en -diepte, en het gereedschapstype. Op basis van deze parameters wordt het benodigde spilkoppel bepaald. Dit kan handmatig worden berekend, maar er zijn ook diverse hulpmiddelen beschikbaar, zoals:

- FSWizard (online)
- HSMAAdvisor (desktopapplicatie)
- Hoffmann Group Machining Calculator (mobiele app)
- machining power (Iscar, online)
- Modelgebaseerd bewerken (Sirris, online)
- Kennametal Machining Calculator (online)

4.4.2 Schatting van de maximaal optredende krachten uit de specificaties van de gereedschapspil

In dit project is er een bestaande gereedschapspil beschikbaar gesteld door het bedrijf. Daarom moet worden bepaald wat de maximale kracht is die deze kan uitoefenen op de machine (lineaire sledes, motoren, frame...). In de praktijk wordt vaak alleen met F_t gerekend, omdat F_r en F_a relatief klein en moeilijk nauwkeurig te bepalen zijn (Ziegert, 2021). Door een veiligheidsfactor toe te passen op F_t ontstaat doorgaans een hogere waarde dan de werkelijke F_{tot} .

De theoretisch maximale waarde van F_t kan worden geschat op basis van het maximale koppel van de spil en de diameter van het gereedschap. Volgens de specificaties van de gereedschapspil (Bijlage E.6, p. 119):

- Vermogen: $P = 0,66 \text{ kW}$
- Toerental: $n = 40000 \text{ omw/min}$

Het koppel T is:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} = \frac{0,66 \text{ kW}}{2\pi \cdot 40000 \frac{\text{omw}}{\text{min}}} \approx 0,16 \text{ Nm} \quad (4.14)$$

Bij gebruik van een frees met diameter $d = 6 \text{ mm}$ (straal $r = 3 \text{ mm}$) geldt:

$$F_{t,\text{max}} = \frac{T}{r} \approx 53 \text{ N} \quad (4.15)$$

4.4.3 Theoretisch maximale tangentiële kracht

Als op deze maximale kracht een veiligheidsfactor wordt toegepast, dan ligt de geschatte totale kracht onder de volgende grens:

$$F_{\text{tot}} < F_t \cdot 2 \quad (4.16)$$

$$F_{\text{tot}} < 53 \text{ N} \cdot 2 \quad (4.17)$$

$$F_{\text{tot}} < 106 \text{ N} \quad (4.18)$$

Bij frezen in het XC-vlak wordt deze kracht vooral opgevangen door de X- en C-as, en nauwelijks door de Z-as. Bij axiale bewerkingen, zoals boren in de Z-richting, wordt de Z-as wél zwaar belast. Aangezien het moeilijk is om exact te bepalen welke as welke kracht opvangt, gaan we ervan uit dat elke as de volledige kracht F_{tot} moet kunnen weerstaan.

4.4.4 Schatting van het maximaal optredende proceskoppel per as

X- en Z-as

Een kracht van 106 N op de X- of Z-as leidt via de kogelomloopspindel tot het volgende koppel op de motoras:

$$M = F \cdot \frac{p}{2\pi} = 106 \text{ N} \cdot \frac{0,01 \text{ m}}{2\pi} \approx 0,17 \text{ Nm} \quad (4.19)$$

C-as

Het maximale koppel op de C-as treedt op bij een bewerking op de maximale straal. De grootste opspanbare diameter $d_{\max}$ is 150 mm, wat overeenkomt met een straal $r_{\max}$ van 75 mm. Wanneer het gereedschap in het uiterste geval een kracht loodrecht op de straal uitoefent, dan ontstaat het volgende koppel op de werkstukas:

$$M_{\text{werkstuk}} = F_{\text{tot}} \cdot r_{\max} \approx 106 \text{ N} \cdot 0,075 \text{ m} \approx 8 \text{ Nm} \quad (4.20)$$

Met een overbrengingsverhouding $i = 40/3$ volgt:

$$M_{\text{motor}} = \frac{M_{\text{werkstuk}}}{i} \approx \frac{8 \text{ Nm}}{40/3} \approx \frac{7,95 \cdot 3}{40} \approx 0,6 \text{ Nm} \quad (4.21)$$

4.4.5 Besluit en opmerkingen over de proceskoppels

De lineaire sledes en motoren moeten deze krachten en koppels kunnen leveren.

Tabel 4.4: Maximaal optredende proceskoppels per motor

As	Max. proceskoppel [Nm]
X/Z	0,17
C	0,6

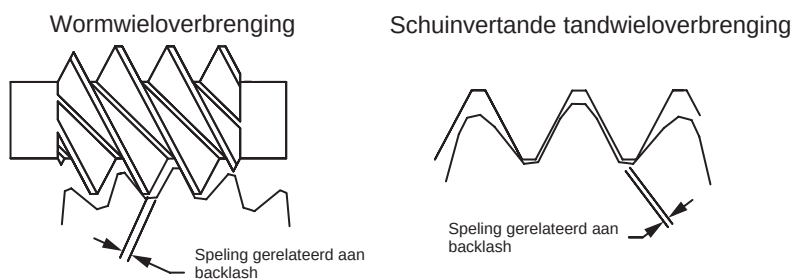
Bij de selectie van motoren voor de machineassen mag men zich niet uitsluitend baseren op de snijkrachten. De krachten die nodig zijn om de assen te versnellen en te vertragen ($F = ma$) en het versnellen van roterende massa's ($M = J\alpha$) zijn vaak groter dan de snijkrachten zelf. De motoren moeten dus primair worden gekozen op basis van de dynamische belastingen (CNC Cookbook, 2023).

4.5 Omkeerspel (Backlash)

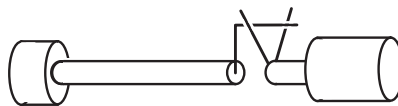
Omkeerspel, ook wel *backlash* genoemd, is de speling tussen twee mechanische onderdelen die beweging op elkaar overbrengen, zoals tandwielen of een kogelomloopspindel. Deze speling wordt vooral merkbaar wanneer een aandrijving van draairichting verandert: de motor draait al, maar het aangedreven onderdeel reageert niet onmiddellijk. Er ontstaat dan een korte dode zone in de beweging. Omkeerspel is meestal het gevolg van kleine tussenruimtes die nodig zijn voor smering, montage of thermische uitzetting (Siemens AG, 2024k, p. 1631). Bij toepassingen waar hoge positioneringsnauwkeurigheid vereist is, zoals in CNC-machines, kan omkeerspel leiden tot foutieve bewegingen of verminderde herhaalbaarheid. Daarom worden in dergelijke systemen maatregelen genomen om deze te beperken of te compenseren. In de volgende subsecties wordt beschreven waar in de opstelling omkeerspel optreedt en hoe dit, indien nodig, wordt aangepakt.

4.5.1 Omkeerspel van de C-as

De C-as maakt gebruik van twee overbrengingen: een planetaire reductor en een riemoverbrenging. De meeste speling ontstaat in de reductor, doordat er een kleine ruimte zit tussen de tanden van de tandwielen. Dit principe wordt weergegeven in Figuur 4.6 en Figuur 4.7.



Figuur 4.6: Omkeerspel bij tandwielen (Winsmith, z.d.)



Figuur 4.7: Grafische voorstelling van rotatoire omkeerspel (Nordin & Gutman, 2002, p. 4)

Volgens de specificaties van de reductor (Bijlage E.9 op pagina 122) bedraagt de omkeerspel $\theta_{b, \text{reductor}} = 0,12^\circ$. Dit betekent dat wanneer de motor in wijzerzin draait, tot stilstand komt en vervolgens in tegenwijzerzin begint te draaien, de uitgaande as van de reductor gedurende de eerste $0,12^\circ$ nog niet beweegt. De werkelijke omkeerspel op het werkstuk wordt gereduceerd met de overbrengingsverhouding van de riemaandrijving:

$$i_{\text{riem}} = \frac{40}{24} \quad (4.22)$$

$$\theta_b = \frac{\theta_{b, \text{reductor}}}{i_{\text{riem}}} = \frac{0,12^\circ}{\frac{40}{24}} = 0,072^\circ \quad (4.23)$$

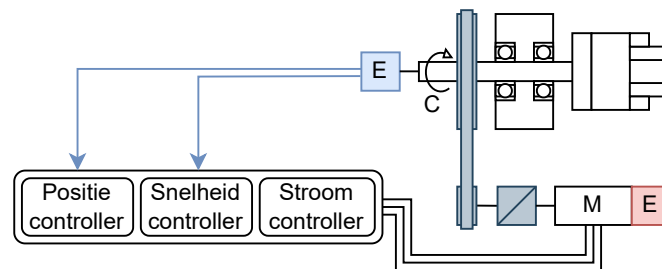
Er moet wel rekening mee gehouden worden dat de riem zelf ook een omkeerspel kan hebben, dus in werkelijkheid ligt deze waarde mogelijk iets hoger.

Om het effect van omkeerspel op het werkstuk te analyseren, kan de rotatoire omkeerspel worden omgerekend naar een lineaire omkeerspel aan de buitenrand van het werkstuk. De spelinghoek θ_b wordt hierbij omgerekend naar een booglengte op de maximale straal $r_{\max}$. De maximale opspanbare diameter bedraagt $d_{\max} = 150$ mm, wat resulteert in $r_{\max} = 75$ mm. Indien het gereedschap zich op deze straal bevindt, leidt dit tot een lineaire omkeerspel van:

$$s_b = \theta_b \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_{\max} = 0,072^\circ \cdot \frac{\pi}{180} \text{ rad/}^\circ \cdot 75 \text{ mm} \approx 0,1 \text{ mm} \quad (4.24)$$

Om de omkeerspel te elimineren, wordt gebruikgemaakt van een direct meetsysteem: een encoder die rechtstreeks de hoekpositie van het werkstuk meet. Dit wordt weergegeven in Figuur 4.8. De regelslus stuurt dus niet op de positie van de motoras, maar op die van het werkstuk zelf.

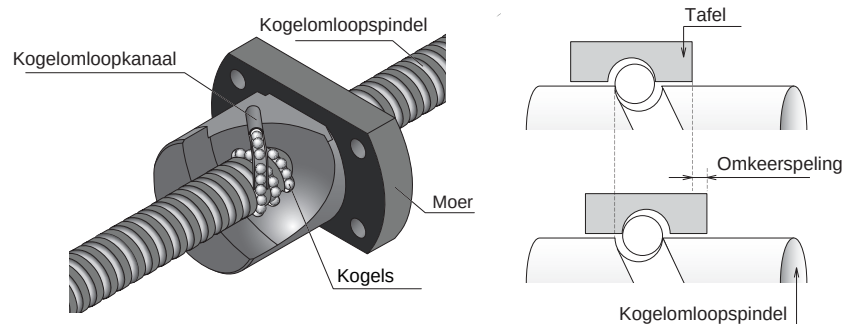
De aansluiting van deze directe encoder wordt besproken in sectie 5.4 op pagina 75, en de configuratie in sectie 6.4.3 op pagina 81.



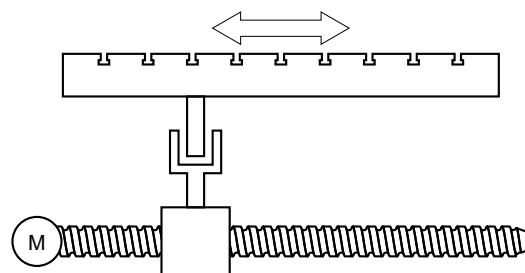
Figuur 4.8: Direct meetsysteem op de C-as

4.5.2 Omkeerspel van de X- en Z-as

De X- en Z-as zijn aangedreven via kogelomloopspindels. Ook daar kan omkeerspel optreden. Dit wordt weergegeven in Figuur 4.9. De grafische weergave van lineaire omkeerspel is te zien op Figuur 4.10.



Figuur 4.9: Links: onderdelen van een kogelomloopspindel (Oriental Motor, 2009, p. 1), rechts: oorzaak van omkeerspel (Oriental Motor, 2009, p. 5)



Figuur 4.10: Grafische voorstelling van lineaire omkeerspel (Siemens AG, 2024f, p. 211)

Volgens de specificaties heeft de slede een omkeerspel van $s_b = 0,02$ mm (Bijlage E.5, pagina 118). Deze waarde kan worden omgerekend naar een hoek van de motor met behulp van Vergelijking 4.1.

$$s_b = \theta_b \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (4.25)$$

Deze vergelijking wordt herleid tot θ_b .

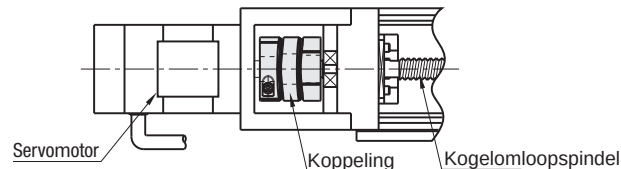
$$\theta_b = \frac{2\pi s_b}{p} \quad (4.26)$$

Door de waarden in te vullen met $s_b = 0,02$ mm en $p = 10$ mm:

$$\theta_b = \frac{2\pi \cdot 0,02 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0,01257 \text{ rad} \approx 0,72^\circ \quad (4.27)$$

De omkeerspel van 0,02 mm komt dus overeen met een hoekverdraaiing van ongeveer 0,72 graden op de motoras.

Voor de koppeling tussen motor en spindel is gekozen voor een koppeling van het merk Misumi, type SCPW34-9-10. Dit model is spelingsvrij (*backlash free*) en heeft een toelaatbaar koppel van 4 Nm. De koppeling wordt gemonteerd met een aandraaimoment van 1,5 Nm (Bijlage E.10, p. 123).



Figuur 4.11: Spelingsvrije koppeling van Misumi (MISUMI, 2019)

4.5.3 Besluit

Tabel 4.5 toont de omkeerspel per as, zowel in hoeken als in afstanden. Voor de X- en Z-as is de maximale spel bij richtingsverandering 0,02 mm. De hoekspel is het kleinst bij de C-as, maar omgerekend naar booglengte is deze groter dan bij de lineaire sledes.

Tabel 4.5: Overzicht van omkeerspel per as

As	Omkeerspel (graden)	Omkeerspel (mm)
X- en Z-as	max. $0,72^\circ$	max. 0,02 mm
C-as	max. $0,072^\circ$	$\approx 0,1$ mm (op straal 75 mm)

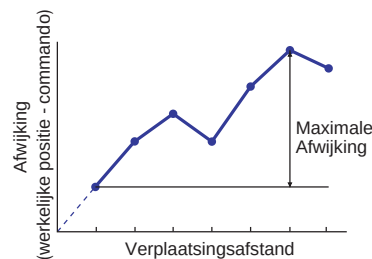
4.6 Positioneringsnauwkeurigheid en herhaalbaarheid

In deze sectie wordt onderzocht hoe nauwkeurig de lineaire assen (X en Z) en de roterende as (C) kunnen werken. Het gaat hierbij om de fysieke grenzen van de machine. Er wordt gekeken hoe nauwkeurig de encoder de positie kan meten en hoe nauwkeurig de actuator een positie kan bereiken. Omkeerspeeling, offsetfouten en interpolatiefouten worden hierbij buiten beschouwing gelaten.

4.6.1 Positioneringsnauwkeurigheid

De positioneringsnauwkeurigheid (*positioning accuracy*) is de maximale afwijking tussen de gevraagde (gecommandeerde) positie en de effectief bereikte positie van de actuator. Volgens de specificaties van de slede bedraagt deze waarde (Bijlage E.5, p. 118):

- X- en Z-slede: 0,1 mm



Figuur 4.12: Illustratie van positioneernauwkeurigheid: afwijking tussen gevraagde en werkelijke positie (MISUMI, 2014)

4.6.2 Encoderfout

De X- en Z-assen maken gebruik van een motor met een interne resolver. Deze heeft een opgegeven maximale hoekfout van 240, boogseconden, wat overeenkomt met ongeveer $0,0667^\circ$ (Siemens AG, 2021a, p. 43). De bijbehorende lineaire fout kan worden berekend met behulp van de spoed $p = 10$ en Vergelijking 4.1:

$$s = \theta \cdot \frac{p}{2\pi} = 0,0667^\circ \cdot \frac{10 \text{ mm}}{360^\circ} \approx 0,00185 \text{ mm} \quad (4.28)$$

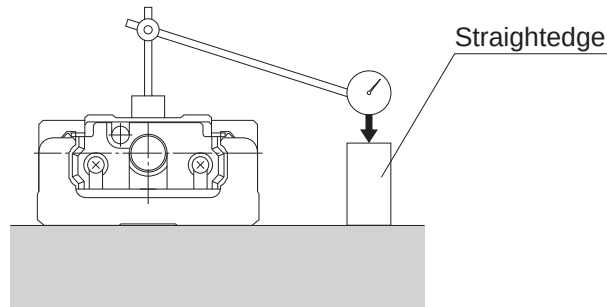
Deze fout is verwaarloosbaar klein in vergelijking met de mechanische positioneringsfout van 0,1 mm.

De directe encoder op de C-as heeft een opgegeven nauwkeurigheid van 26 boogseconden, overeenkomend met ongeveer $0,0072^\circ$ (Bijlage E.7, p. 120). Indien het gereedschap zich op een straal van $r_{\max} = 75 \text{ mm}$ bevindt, dan kan de lineaire afwijking als gevolg van de hoekfout worden berekend als:

$$r \cdot \theta = 75 \text{ mm} \cdot \frac{0,0072^\circ \cdot \pi}{180^\circ} \approx 0,01 \text{ mm} \quad (4.29)$$

4.6.3 Mechanische fout door *running parallelism*

Running parallelism is een maat voor de afwijking van de beweegbare slede ten opzichte van een ideaal vlak tijdens verplaatsing. Deze fout wordt gemeten als de maximale afwijking loodrecht op de bewegingsrichting over het volledige traject. Een visuele illustratie is weergegeven in Figuur 4.13.



Figuur 4.13: Illustratie van *running parallelism*: afwijking ten opzichte van een ideaal vlak (THK, 2016)

Volgens de specificaties van de slede bedraagt de *running parallelism* per slede maximaal 0,035 mm (Bijlage E.5, p. 118). Aangezien de Z-slede gemonteerd is op de X-slede en het gereedschap zich op de Z-slede bevindt, leidt dit tot een gecombineerde fout van:

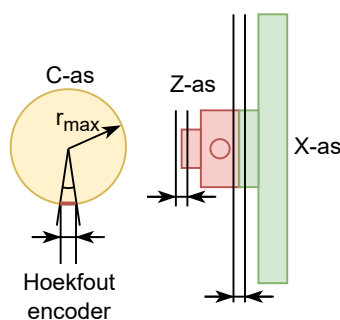
$$0,035 \text{ mm} + 0,035 \text{ mm} = 0,07 \text{ mm} \quad (4.30)$$

Deze afwijking beïnvloedt niet rechtstreeks de positie in X of Z, omdat ze optreedt in een richting die loodrecht staat op het XZ-vlak. In een klassieke XYZ-opstelling zou dit een fout in de Y-as zijn. In dit systeem neemt de C-as de rol van de Y-as over, waardoor deze fout aan de C-as wordt toegewezen, zoals te zien is in Figuur 4.14.

De totale fout in de C-as bestaat uit:

- Encoderfout: 0,01 mm
- Parallelisme: 0,07 mm

$$0,01 \text{ mm} + 0,07 \text{ mm} = 0,08 \text{ mm} \quad (4.31)$$



Figuur 4.14: Samengestelde fout in de C-as door encoder en mechanisch parallelisme. Afgebeeld is het rechterzijaanzicht, waarbij het kopvlak van het werkstuk zichtbaar is. De Z-as komt uit het blad, en de X-as is naar boven gericht.

4.6.4 Nuance: Herhaalbaarheid en invloed op toleranties

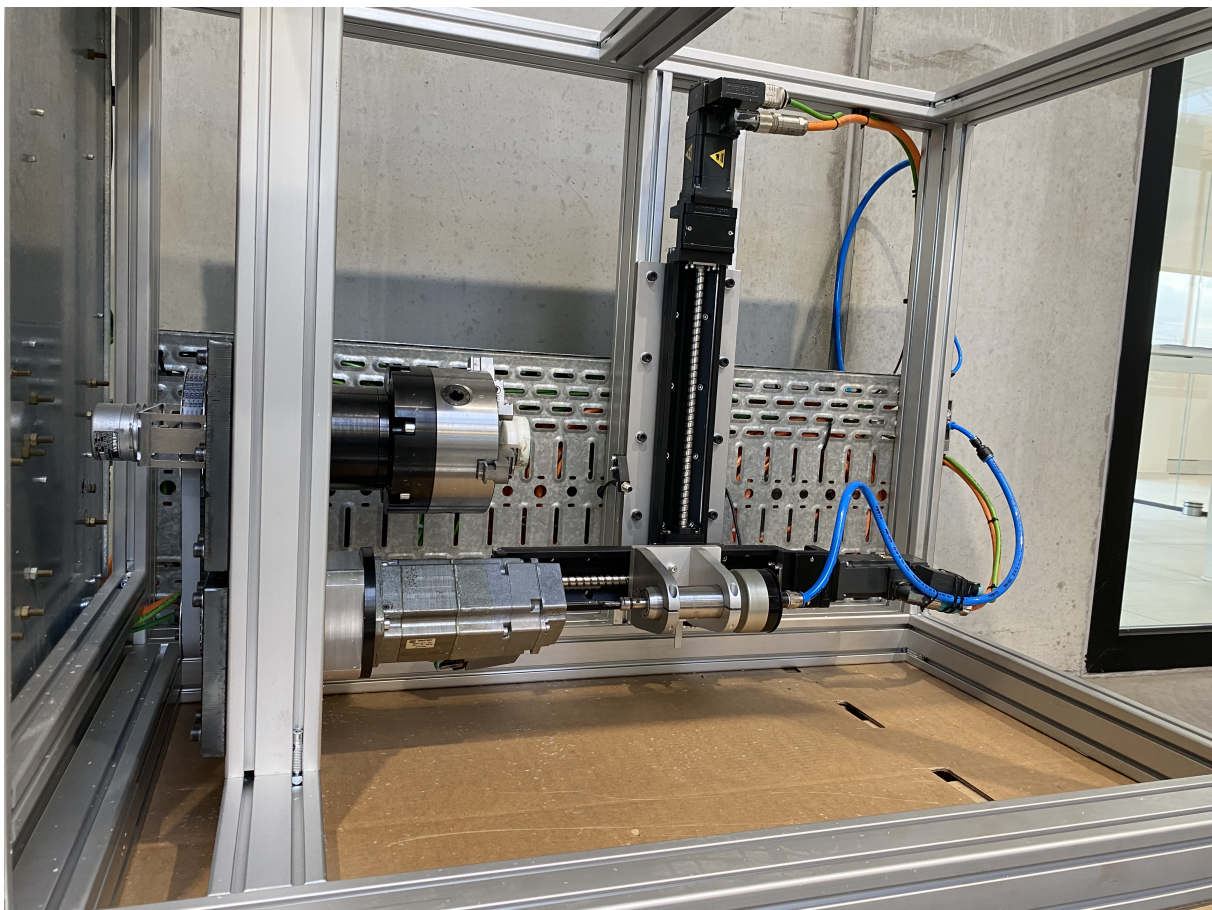
De X- en Z-slede hebben een herhaalbaarheid van 0,005 mm (Bijlage E.5, p. 118).

Stel dat de hoofdspil ronddraait en de X-as gebruikt wordt om het werkstuk rond te frezen op een bepaalde diameter.. Het kleinste mogelijke tolerantiebereik kan dan als volgt worden benaderd. Een positioneringsnauwkeurigheid van 0,1 mm betekent dat een commando naar bijvoorbeeld X100,00 resulteert in een werkelijke positie tussen X99,900 en X100,100. Stel dat het eerste werkstuk bewerkt wordt op X100,070, dus 0,070 mm te groot. Door het gereedschapsoffset aan te passen met -0,070 mm zal het gereedschap voortaan bewegen naar de correcte positie. Omdat de herhaalbaarheid slechts 0,005 mm bedraagt, zullen de volgende bewerkingen liggen tussen X99,955 en X100,005 — dus binnen een tolerantiebereik van $\pm 0,01$ mm (CADEM Technologies Pvt Ltd, 2024).

De machine maakt dus een positioneringsfout, maar doet dat op een consistente manier. Die voorspelbaarheid maakt het mogelijk om toch binnen nauwe toleranties te werken, ondanks een beperkte absolute nauwkeurigheid.

Besluit: Een rond werkstuk kan geproduceerd worden met een tolerantiebereik van $\pm 0,01$ mm, mits gecompenseerd wordt via het gereedschapsoffset. Deze redenering is relatief eenvoudig voor de X-as afzonderlijk. Voor toleranties op bewerkingen die gebruikmaken van gecoördineerde bewegingen van de X- en C-as is echter verder onderzoek nodig.

4.7 Resultaat mechanisch gedeelte



Figuur 4.15: Eindresultaat van de mechanische opstelling



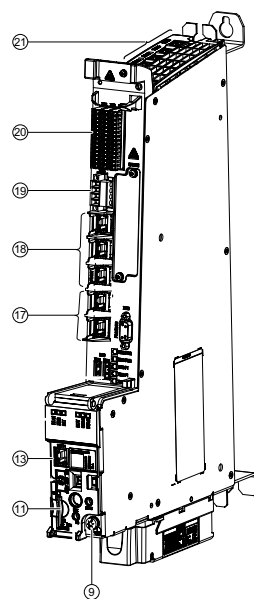
Figuur 5.2: Foto van het Sinumerik One demorack (Siemens AG, 2024a)

5.1.1 Besturingseenheid: NCU 1750

De NCU wordt gevoed met 24 VDC en vereist twee fysieke *enable*-signalen:

- X122.1 – Digitale ingang 1 (ON/OFF1): De lijn module (LM) heeft een digitale uitgang *ready* op X21.1, die hoog wordt zodra het systeem gereed is om pulsen naar de motor te sturen. Deze uitgang wordt verbonden met DI1, zodat de NCU weet dat de *infeed* klaar is.
- X122.2 – Digitale ingang 2 (OFF3 Fast Stop): Wanneer dit signaal laag wordt, stopt de motor via een OFF3-ramp en kan deze niet opnieuw worden gestart.

De noodstopconfiguratie, bestaande uit X122.3 of X122.4 in combinatie met een motormodule-aansluiting voor tweekanaalsinvoer in de besturing, wordt behandeld in sectie 5.5.



(a) ((Siemens AG, 2024h, p. 32))



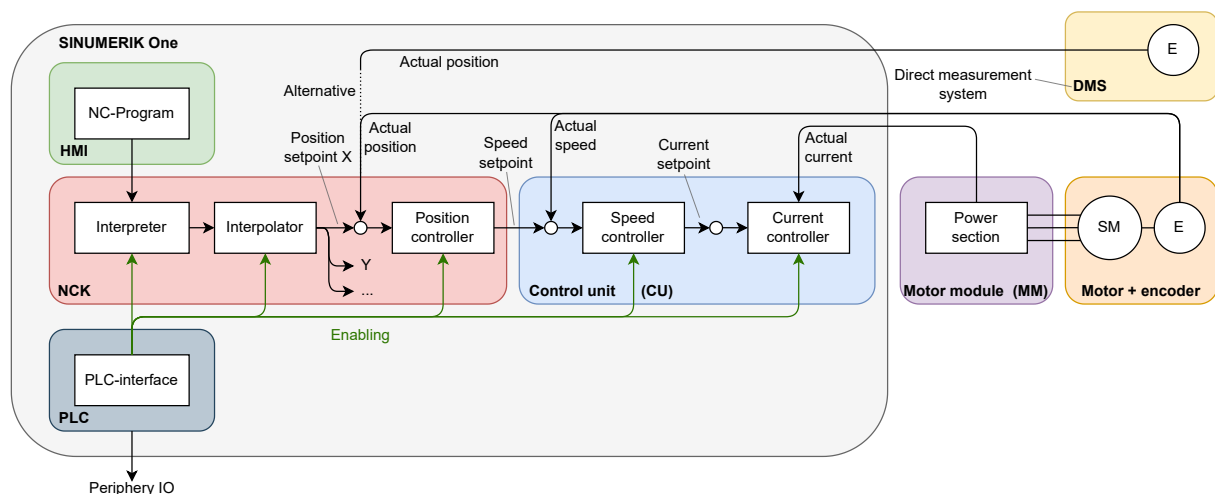
(b) ((Siemens AG, 2025))

Figuur 5.3: Weergave van de NCU met genummerde relevante componenten

Tabel 5.1: Overzicht van relevante connectoren op de NCU

Nr.	Connector	Beschrijving
9	Functional ground	Functionele aarding
11	X55	Sleuf voor SD-kaart
13	X127	PN/IE Ethernet-interface
17	X120, X130	Twee Ethernet-interfaces
18	X150 P1 R, X150 P2 R, X160 P1	Drie PROFINET IO-interfaces
19	X124	Voedingsaansluiting
20	X122, X132, X142	Digitale inputs en outputs
21	X100–X105	Zes DRIVE-CLiQ interfaces

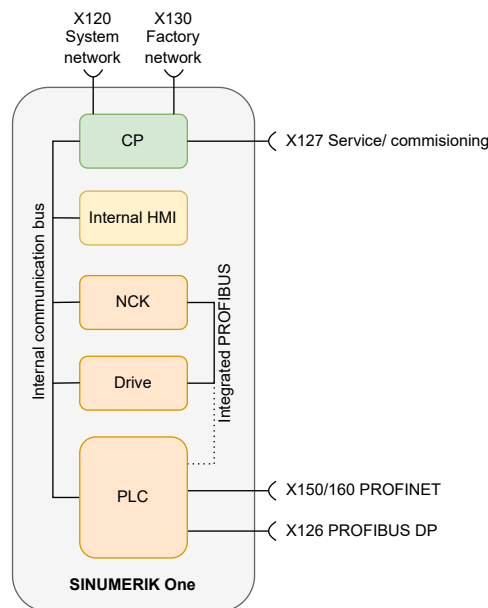
De werking van de Sinumerik One-besturing is weergegeven in Figuur 5.4. De regelkring is ook weergegeven in Figuur 6.3 op pagina 81.



Figuur 5.4: Het functionele principe van de Sinumerik One (Meriaho, 2020, p. 4)

- **NC-programma:** De G-code die door de gebruiker of CAM-software gegenereerd is. Deze bepaalt het gewenste bewegingsprofiel.
- **Interpreter:** Zet het NC-programma om in bewegingselementen (rechte lijnen, cirkels...).
- **Interpolator:** Bepaalt de exacte positie op elk moment in de tijd. De uitgang zijn gesynchroniseerde positie-setpoints voor elke as.
- **Positieregelaar:** Vergelijkt het positie-setpoint met de gemeten positie en genereert het bijbehorende snelheidsetpoint.
- **Snelheidsregelaar:** Vergelijkt het snelheidsetpoint met de gemeten snelheid en genereert het bijbehorende stroomsetpoint.
- **Stroomregelaar:** Vergelijkt het stroomsetpoint met de gemeten stroom en stuurt de vermogens-elektronica aan om het gewenste koppel in de motor te realiseren.
- **Power section:** Vermogensgedeelte van de aandrijving dat de motor voedt.
- **Motor + encoder:** De motor realiseert de verplaatsing en de encoder levert terugkoppeling van positie en snelheid.
- **PLC-interface:** Stuurt *enable*-signalen uit en leest machine-ingangen en -uitgangen.

De interne communicatie tussen de verschillende componenten en de communicatie naar buiten is te zien in Figuur 5.5.



Figuur 5.5: Overzicht netwerkinterfaces (Siemens AG, 2024k, p. 47)

- **Communication Processor (CP):** Verzorgt de communicatie tussen de CNC-besturing en externe systemen, zoals industriële netwerken en andere automatiseringscomponenten.
- **HMI:** Vormt de interface waarmee de operator de machine bedient en programmeert. Deze draait intern binnen de besturing. Het fysieke scherm is dus enkel een client waarop het beeld wordt weergegeven. Dit verschilt van een klassieke HMI die rechtstreeks op een PLC wordt aangesloten en waarbij de HMI-software effectief op het scherm zelf draait.
- **NCK:** Is het hart van de CNC-besturing. Deze verwerkt NC-programma's, voert interpolatie uit en genereert real-time bewegingscommando's voor de assen. Dit is het brein achter de beweging.
- **CU:** Stuur de motormodules aan die de motoren aansturen. Dit gebeurt via het Sinamics S120-systeem met behulp van DRIVE-CLiQ.
- **Geïntegreerde PROFIBUS:** Zorgt voor realtime gegevensuitwisseling tussen de NCK en de CU. Deze bus kan ook worden geconfigureerd voor communicatie met de PLC.
- **Interne communicatiebus:** Verbindt de interne componenten (PLC, CU, NCK, HMI en CP) binnen de NCU zodat ze gegevens met elkaar kunnen uitwisselen.

5.1.2 Visualisatie en bedieningsscherm: ITC V3 22"

De Industrial Thin Client (ITC), weergegeven in Figuur 5.2, dient als bedieningsinterface voor de machine. De HMI-software zelf draait op de NCU, terwijl de ITC deze weergeeft voor de gebruiker. Voeding gebeurt met 24 VDC, en de verbinding met de NCU verloopt via ethernet.

5.1.3 Bedieningspaneel: MCP 2200

De Machine Control Panel (MCP), weergegeven in Figuur 5.2, wordt gevoed door 24VDC. Het bedieningspaneel kan op twee manieren aangesloten worden op de NCU:

- Ethernet (systeemnetwerk)
- Profinet

De ITC wordt aangesloten via Ethernet en beschikt over twee poorten. Wanneer de MCP ook via Ethernet wordt aangesloten, kan de verbinding lopen van de NCU naar de ITC en vervolgens door naar de MCP. Het voordeel hiervan is dat slechts één netwerkkabel nodig is tussen de NCU en de ITC/MCP-combinatie, wat de bekabeling bespaart, zeker wanneer deze twee op grote afstand van de NCU geplaatst zijn.

5.2 Aandrijfsysteem: Sinamics S120

5.2.1 Werking van een frequentieomvormer

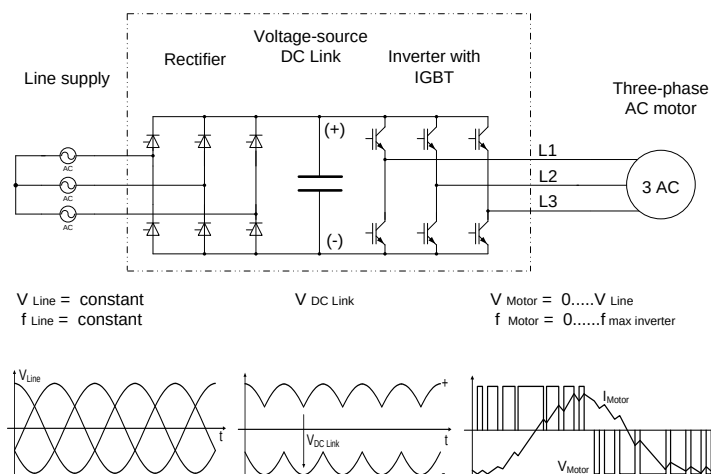
Om de rotatiefrequentie van een motor te regelen, wordt een frequentieomvormer gebruikt. Deze past zowel de frequentie als de spanning aan, waardoor het toerental gecontroleerd kan worden.

De frequentieomvormer wordt aangestuurd door een Control Unit (CU). Deze CU ontvangt terugkoppeling (*feedback*) van een encoder op de motor of op de last (zoals bij een directe encoder op de C-as). Op basis van het verschil tussen de gewenste en de actuele positie stuurt de CU de omvormer aan zodat de motor de juiste snelheid en positie bereikt.

Een omvormer bestaat uit drie hoofdcomponenten, weergegeven in Figuur 5.6.

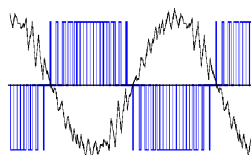
- Gelijkrichter (*Infeed*): Zet een constante wisselspanning (AC) met vaste frequentie om in een gelijkspanning (DC).
- DC-bus: Buffert en vlakt de gelijkspanning af.
- IGBT-wisselrichter: Zet de gelijkspanning om in een wisselspanning met variabele frequentie en amplitude.

Dit gebeurt via pulsebreedtemodulatie (PWM). Door zowel de spanning als de frequentie te variëren, kan het toerental van een driefasige motor nauwkeurig worden geregeld.



Figuur 5.6: Blokschema van een PWM-omvormer met een spanningsgestuurde DC-bus (Siemens AG, 2020a, p.18)

Omdat PWM wordt gebruikt, is de uitgangsspanning een blok golf en geen zuivere sinusgolf. Door de inductie van de motor wordt de stroom afgevlakt en lijkt die meer op een sinusgolf, zoals te zien is in Figuur 5.7.



Figuur 5.7: Motorspanning (fase-fase) en motorstroom (Siemens AG, 2020a, p.19)

5.2.2 Modulair opbouwsysteem

De Sinumerik One besturing werkt uitsluitend samen met de Sinamics S120 aandrijving. Dit is een modulair aandrijfsysteem van Siemens. Er bestaan vier bouwvormen van het Sinamics S120-aandrijfsysteem: *booksize*, *blocksize*, *combi* en *chassis*. Deze zijn weergegeven in de topologievoorbeelden van Figuur 2.33 tot en met Figuur 2.37, vanaf pagina 26.

In deze testopstelling wordt gebruikgemaakt van de *booksize*-variant. Deze modules zijn geleend van het EMAS-lab van Vives Brugge en van een contactpersoon van een werknemer van Cadcamatic. Bij gebruik van een NCU is de keuze voor *booksize* logisch, aangezien beide componenten hetzelfde formaat hebben. Er kan echter ook gewerkt worden met de *blocksize*- of *combi*-variant. De *blocksize*-modules kunnen worden aangesloten op de Sinumerik One via een *CUA31 Control Unit Adapter*. Deze adapter is afgebeeld in Figuur 2.33 en Figuur 2.36.

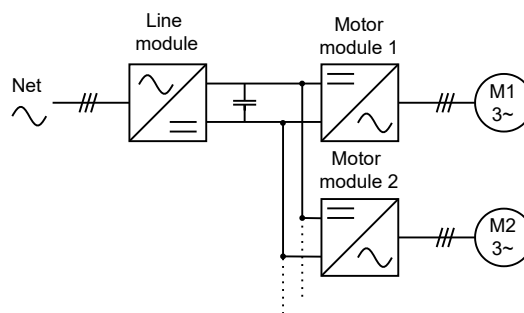
De omvormer is opgedeeld in drie hoofdcomponenten, die elk als afzonderlijke module bestaan:

- De gelijkrichter (AC/DC) bevindt zich in de *line module*.
- De wisselrichter (DC/AC) bevindt zich in de motormodule.
- De DC-bus met condensatoren loopt deels door de *line module* en deels door de motormodule. De busbars zijn zichtbaar in Figuur 5.20.

Dankzij de modulaire opbouw is het systeem schaalbaar en flexibel.

In plaats van elke as afzonderlijk te voorzien van een eigen AC/DC-omzetting, wordt één centrale voeding gebruikt die meerdere omvormers (DC/AC) van stroom voorziet via een gedeelde DC-bus. Dit staat bekend als een gemeenschappelijke DC-bus (*Common DC Bus*). Dit systeem biedt verschillende voordelen:

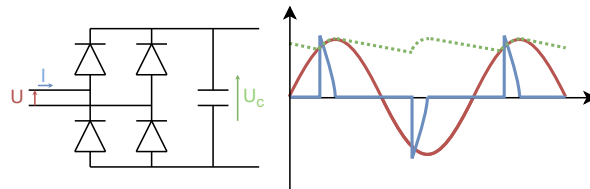
- **Energieterugwinning:** regeneratieve energie van remmende motoren kan onmiddellijk worden gebruikt door andere, aandrijvende motoren. Bij standalone drives zou deze energie doorgaans verloren gaan via remweerstanden.
- **Lagere netbelasting:** door hergebruik van energie binnen het systeem is minder vermogen nodig vanuit het net.
- **Minder componenten:** één centrale netfilter, reactor, voeding en een gedeelde DC-bus zorgen voor een besparing in ruimte, kosten en bekabeling.



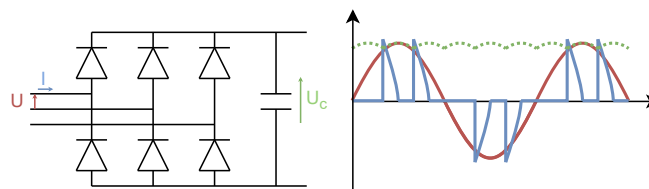
Figuur 5.8: Principiële werking van de Sinamics S120

5.2.3 Lijnreactor

Een lijnreactor moet aan de netzijde van de omvormer worden geplaatst om de vorm van de stroom die de omvormer uit het net trekt te verbeteren. De gelijkrichter (die zich bij de S120 bevindt in de lijnmodule) trekt stroom in korte, scherpe pulsen rond de pieken van de netspanning. Dat komt doordat de condensator op de DC-bus alleen stroom opneemt wanneer de netspanning hoger is dan de spanning op de condensator. Dit is te zien in Figuur 5.9 voor een enkelfasige bruggelijkrichter, en in Figuur 5.10 voor een driedfasige bruggelijkrichter.

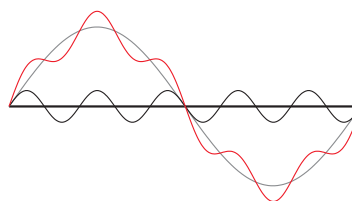


Figuur 5.9: Vervormde stroomopname van een enkelfasige bruggelijkrichter



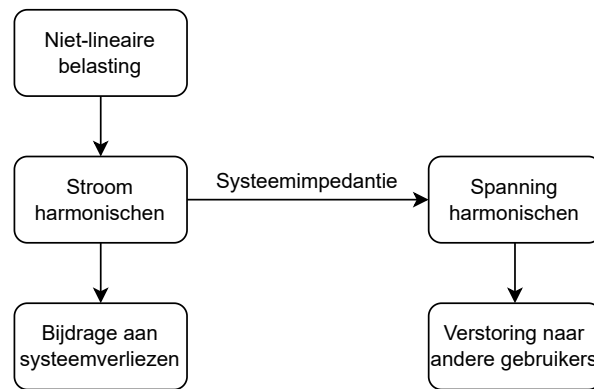
Figuur 5.10: Vervormde stroomopname van een driedfasige bruggelijkrichter

Wanneer men een niet-lineaire belasting aansluit, zal er dus een stroom vloeien die geen zuivere sinus is. Volgens de Fourieranalyse kan elk niet-sinusvormig signaal worden weergegeven als de som van de grondgolf (50 Hz) en sinusvormige signalen met frequenties die een veelvoud zijn van deze grondgolf (harmonischen). In Figuur 5.11 is te zien dat de rode vervormde stroom het resultaat is van de optelling van de grijze sinusgolf (50 Hz) en de zwarte vijfde harmonische.



Figuur 5.11: Vervormde stroom (rood) als som van de grondgolf (grijs) en de 5e harmonische (zwart) (ABB Drives, 2017, p. 5)

De vervormde stroom bestaat uit kleine stroomcomponenten met een hogere frequentie, de zogenaamde harmonischen. Deze harmonische stromen ontstaan aan de kant van de gebruiker en lopen door de impedantie van het net. Door die impedantie veroorzaken ze spanningsvervalsing: harmonische spanningen op het net. De harmonische stromen zorgen voor extra verliezen in kabels, transformatoren en motoren. Daarnaast kunnen de harmonische spanningen storingen veroorzaken in andere toestellen die op hetzelfde net zijn aangesloten.



Figuur 5.12: Effect van niet-lineaire belasting op stroom, systeemverliezen en spanningsvervorming via systeemimpedantie (Van der Jeught, 2024, p 47)

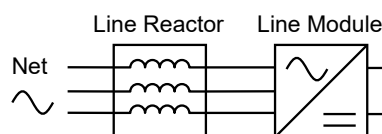
Dit effect kan worden verminderd door het plaatsen van een lijnreactor. Dit is een inductieve component (spoel) die tussen het net en de lijnmodule (de gelijkrichter) wordt geplaatst, zoals weergegeven in Figuur 5.13. De spanning over de spoel wordt gegeven door:

$$U_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (5.1)$$

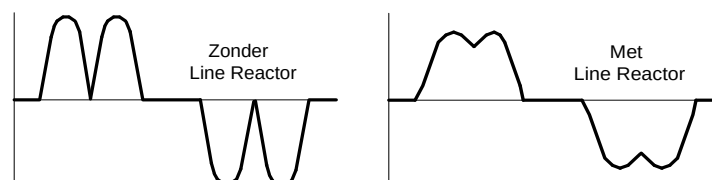
waarbij:

- U_L : spanning over de spoel [V]
- L : inductantie van de spoel [H]
- $\frac{di}{dt}$: snelheid van verandering van de stroom [A/s]

Wanneer de stroom snel verandert, is $\frac{di}{dt}$ groot en wordt de spanning U_L ook groot. Deze spanning vertraagt de stroomverandering, waardoor de stroom die door de omvormer wordt getrokken, wordt afgevlakt. In plaats van korte stroompieken ontstaat een stroomvorm die meer op een sinus lijkt zoals te zien in Figuur 5.14. Hierdoor worden beide zijden beschermd: de omvormer tegen harmonischen uit het net en het net tegen harmonischen afkomstig van de omvormer.



Figuur 5.13: Symbool lijnreactor



Figuur 5.14: Typische lijnstroom van een 6-puls gelijkrichtercircuit zonder en met het gebruik van een lijnreactor (Siemens AG, 2020a, p.91)

5.2.4 Lijnfilter

Een lijnfilter (*Line filter*) wordt geplaatst om te voldoen aan de Elektromagnetische compatibiliteit (EMC)-richtlijnen. Hoe hoger de schakelfrequentie van de wisselrichter bij de omzetting van DC naar AC, hoe beter de sinusvorm van de uitgangsspanning, hoe lager de verliezen en hoe dynamischer de regeling. Dit brengt echter ook nadelen met zich mee. Bij hoge schakelfrequenties ontstaan elektromagnetische storingen (ruis). Deze kunnen Elektromagnetische interferentie (EMI) veroorzaken, wat de werking van apparaten of systemen negatief beïnvloedt. Elektromagnetische ruis kan zich verspreiden via geleiders of elektromagnetische golven en kan leiden tot (Siemens AG, 2020a, p. 135) (Van der Jeught, 2024, p. 6):

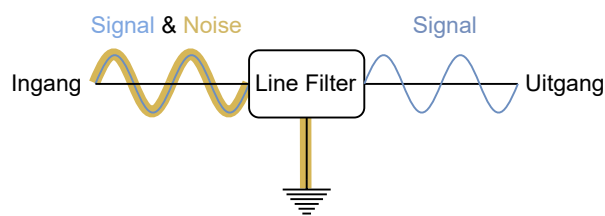
- Onstabiele regelsystemen
- Sporadische fouten
- Meetfouten bij instrumenten
- Communicatieproblemen
- Storingen of schade aan gevoelige apparatuur
- Flikkerende beeldschermen

Om aan de normen voor EMC te voldoen, moet de frequentieomvormer de uitstoot van storingen beperken en bestand zijn tegen externe storingen.

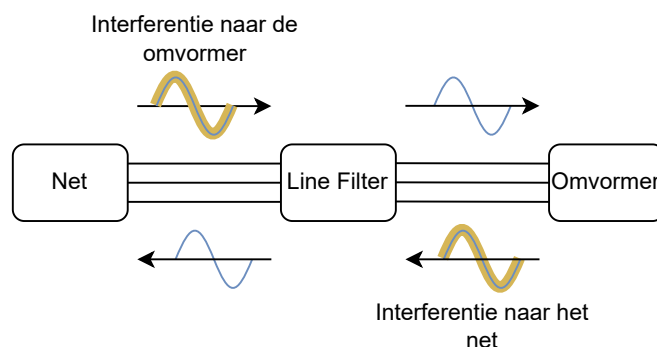
Dit wordt bereikt door eerst een goed conceptueel EMC-ontwerp toe te passen, zoals beschreven in (Van der Jeught, 2024, p. 88).

- Compartimentering
- Afgeschermd kabels
- Afgeschermd behuizingen
- Aarding en equipotentiaalverbinding

Daarnaast wordt er een lijnfilter geplaatst om ongewenste storingen verder te onderdrukken.



Figuur 5.15: Werking van een lijnfilter (Yates, 2023)



Figuur 5.16: Lijnfilter dempt interferentie in beide richtingen tussen net en omvormer (EMC Directory, 2024)

5.2.5 Lijnmodule

De lijnmodule (ook wel *infeed* genoemd) zet de wisselspanning van het net om in een gelijkspanning en bevat een deel van de condensatoren van de DC-tussenkring. Siemens biedt drie varianten aan:

- **Basic Line Module (BLM)**

Levert een ongeregelde DC-linkspanning en bevat geen mogelijkheid voor terugvoeding naar het net. Deze module is opgebouwd rond een passieve gelijkrichter en is altijd verbonden met de DRIVE-CLiQ-interface voor communicatie met de CU.

Tussenkringspanning:

$$U_{DC} \approx 1,35 \times U_{net} \quad (5.2)$$

- **Smart Line Module (SLM)**

Heeft dezelfde basisopbouw als de BLM, maar maakt terugvoeding mogelijk via lijn-gecommuteerde IGBT's. Ook deze levert een ongeregelde DC-spanning en is standaard voorzien van een DRIVE-CLiQ-interface, behalve bij de 5 kW- en 10 kW-uitvoeringen.

Tussenkringspanning:

$$U_{DC} \approx 1,35 \times U_{net} \quad (5.3)$$

- **Active Line Module (ALM)**

Is actief gestuurd met bidirectionele IGBT's en laat volledige terugvoeding naar het net toe. De ALM biedt een gereguleerde DC-linkspanning, minder netvervuiling (lagere harmonischen), en betere prestaties bij zwakke netten. Ook deze is verbonden met de DRIVE-CLiQ.

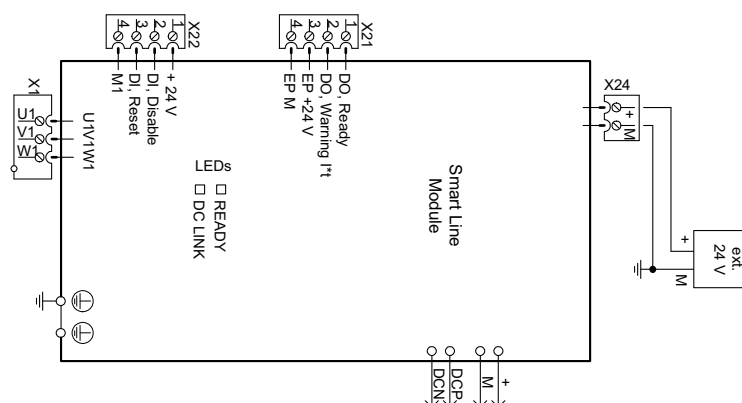
Tussenkringspanning:

$$U_{DC} = 1,5 \times U_{net} \quad (5.4)$$

Bij een ALM wordt de spanning actief geregeld, zodat deze constant blijft, ongeacht schommelingen in de netspanning. Bij de BLM en SLM is de tussenkringspanning direct afhankelijk van de netspanning.

De EMAS-opstelling bevat een **SLM van 10kW, 17A**. Deze versie heeft geen DRIVE-CLiQ-aansluiting voor communicatie met de CU. Daarom gebruiken we de fysieke aansluitterminals op de module.

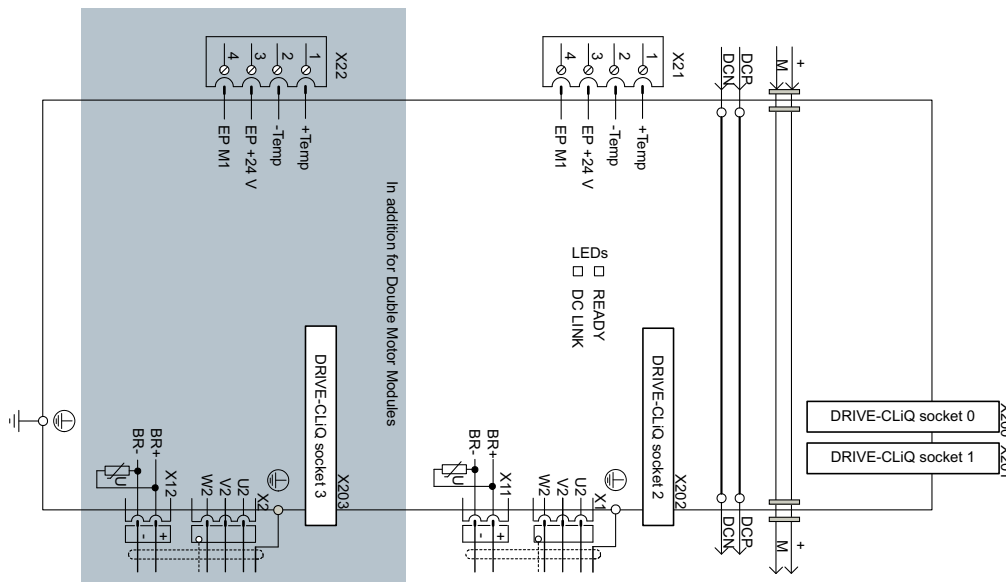
De driefasige spanning komt onderaan binnen op klem X1. Deze wordt gelijkgericht en via de DC-bus (DCP, DCN) doorgegeven aan de eerste motormodule rechts. De 24 V-voeding komt bovenaan binnen en wordt eveneens doorgegeven via een bus. De SLM moet geactiveerd worden door een +24 V-sigitaal aan te leggen op de EP +24 V-terminal.



Figuur 5.17: Aansluitingen van de SLM, 90° gedraaid (Siemens AG, 2023d, p. 175)

5.2.6 Motor module

De 24V- en 600V-DC-bussen komen aan de linkerkant binnen en worden aan de rechterkant doorgegeven naar het volgende component. In deze opstelling worden één dubbele en één enkele motormodule gebruikt. Voor elke motor is er een aansluiting voorzien voor de vermogenskabel, de signaalkabel (DRIVE-CLiQ), een temperatuursensor en een *enable*-signaal. De temperatuuraansluitingen worden niet gebruikt. De EP-aansluiting wordt gebruikt voor de noodstopconfiguratie en wordt besproken in sectie 5.5.



Figuur 5.18: Aansluitschema van MM en DMM, 90° gedraaid (Siemens AG, 2023d, p. 222)

Foutmelding bij test dubbele motormodule

Bij het testen van de dubbele motormodule werd de grootste motor (met rem) aangesloten op aansluiting X2 van de motormodule. Hierbij verscheen foutmelding 207930, een *Brake control error*. Wanneer dezelfde motor werd aangesloten op X1, werkte alles correct. Hierdoor konden de motor en de kabels worden uitgesloten als oorzaak en werd vermoed dat het probleem bij aansluiting X2 van de motormodule lag.

De fout kan veroorzaakt worden door een probleem in het remcircuit van de motormodule. Om dit verder te onderzoeken, is gekeken naar parameter r0949 (*Fault Value*). Dit is een array die extra informatie geeft over de aard van de fout. De volgende waarden werden uitgelezen van de laatste fout (index [0]):

- r0947[0]: foutnummer = 207930
- r0949[0]: foutwaarde = 10

Volgens de SINAMICS S120-documentatie betekent foutwaarde 10 bij fout 207930 dat er een probleem is bij het openen van de houdrem (*open holding brake operation error*). Bij het inschakelen van de as was hoorbaar dat de rem daadwerkelijk opende. Dit wijst erop dat de fout waarschijnlijk in de terugkoppeling zit die controleert of de rem geopend of gesloten is. Met parameter p1278 (*Brake control diagnostics evaluation*) kan deze terugkoppeling worden uitgeschakeld. Door p1278 = 1 in te stellen, wordt de remdiagnose gedeactiveerd. Hierdoor werkte de motor met rem wel correct op aansluiting X2 van de dubbele motormodule.

Compatibiliteit van motor en motormodule

Nadat de beschikbare motoren en motormodules in kaart zijn gebracht, is onderzocht of de motoren aangesloten konden worden op de beschikbare motormodules. Volgens Siemens AG (2020a, p. 367) moet de verhouding tussen de nominale stroom van de motor en die van de motormodule binnen een bepaalde grens liggen voor een correcte regeling. Voor servo- en vectorregeling geldt dat deze verhouding tussen 1:1 en 1:4 moet liggen. Tussen 1:4 en 1:8 neemt de regelnauwkeurigheid af, vooral op het vlak van koppel en toerental. Bij een verhouding groter dan 1:8 wordt enkel V/f-regeling aanbevolen. Dit wordt gecontroleerd door de nominale stroom van motor en module met elkaar te vergelijken. De verhouding $\frac{I_{motor}}{I_{module}}$ moet dan liggen tussen 0,25 en 1, of omgekeerd: $\frac{I_{module}}{I_{motor}}$ moet liggen tussen 1 en 4.

Er waren vier motoren ter beschikking: twee kleine en twee grote. Tijdens het mechanisch ontwerp werd ervoor gekozen om de twee kleine motoren te gebruiken voor de X- en Z-as, terwijl voor de C-as een grote motor werd geselecteerd. De specificaties zijn opgenomen in Bijlage E.4 en E.3. Er moet worden nagegaan of deze motoren aangesloten kunnen worden op de beschikbare motormodules en op welke wijze ze het best verdeeld kunnen worden.

Tabel 5.2: Nominale stroom van beschikbare motoren en motormodules

Component	I_n [A]
Enkele motormodule	5
Dubbele motormodule	3
Kleinste motor	1,4
Grootste motor	1,75

Voor elke combinatie berekenen werd de verhouding $\frac{I_{module}}{I_{motor}}$ berekent. De resultaten zijn te zien in Tabel 5.3.

Tabel 5.3: Verhouding $\frac{I_{module}}{I_{motor}}$ voor combinatie van motor en motormodule.

	Enkele motormodule	Dubbele motormodule
Kleinste motor	3,6	2,1
Grootste motor	2,9	1,7

Technisch gezien zijn alle combinaties compatibel, aangezien de verhouding $\frac{I_{module}}{I_{motor}}$ voor elke combinatie binnen de aanbevolen grens van $[1, 4]$ valt. Er werd gekozen om de 2 kleine motoren van de X- en Z-as aan te sluiten op de dubbele motormodule en de grootste motor voor de C-as op de enkele motormodule.

Maximaal elektrisch koppel

Het maximale koppel dat een motor effectief kan leveren, is afhankelijk van de koppelconstante k_T en de maximale stroom die erdoorheen vloeit. De maximale stroom wordt beperkt door de motor (om schade te voorkomen) of door de motormodule, die ook een eigen limiet heeft. Het maximumkoppel dat op het typeplaatje en in de datasheet van de motor wordt vermeld, geldt bij de maximale stroom die daar ook is opgegeven. Of dit koppel effectief gehaald kan worden, hangt af van de motormodule waarop de motor is aangesloten: deze moet de opgegeven maximale stroom kunnen leveren. Indien de motormodule deze maximale stroom niet kan leveren, zal het opgegeven koppel niet bereikt worden. In dat geval is het maximale haalbare koppel beperkt tot wat de motormodule aan stroom kan leveren. Dit maximale koppel kan dan berekend worden aan de hand van de maximale stroom van de motormodule en de koppelconstante k_T van de motor. Deze constante is terug te vinden in de datasheet en geeft aan hoeveel koppel (in Nm) de motor levert per ampère stroom. De relatie is lineair:

$$M_{\max} = k_T \cdot I_{\max} \quad (5.5)$$

De relevante waarden zijn opgenomen in de specificaties van zowel de motor als de motormodule. Tijdens de inbedrijfname worden deze parameters automatisch herkend en ingesteld via DRIVE-CLiQ. Ze kunnen nadien ook handmatig geraadpleegd worden in de parameterlijst van de CU. Deze zijn weergegeven voor de 3 motoren in Tabel 5.4.

Tabel 5.4: Koppelconstante en maximale stromen per as, inclusief parameterreferenties.

As	k_T [Nm/A] p316	$I_{\max,MM}$ [A] r67	$I_{\max,motor}$ [A] p323
X en Z	0,46	6	7,5
C	1,4	10	7,35

Voor de X- en Z-as geldt dat de motormodule de maximale stroom van de motor niet kan leveren. Het maximale koppel dat de motor in dit geval kan leveren, wordt dus beperkt door de maximale stroom van de motormodule. Dit geeft:

$$M_{\max} = 0,46 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \times 6 \text{ A} = 2,76 \text{ Nm} \quad (5.6)$$

Voor de C-as geldt dat de motormodule wél in staat is om de maximale stroom van de motor te leveren:

$$M_{\max} = 1,4 \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \times 7,35 \text{ A} = 10,29 \text{ Nm} \quad (5.7)$$

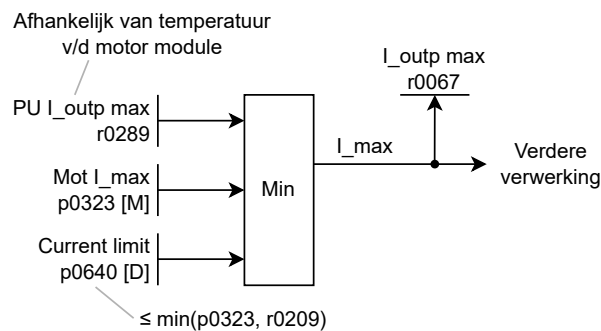
Tabel 5.5: Maximaal elektrisch koppel per as

As	Maximaal elektrisch koppel [Nm]
X/Z	2,76
C	10,29

Aanpassing van p0640 voor verhoogd motorkoppel

Bij het controleren van de parameter r0067 (*Output current maximum*) werd vastgesteld dat de waarde bij zowel de dubbele als de enkele motormodule lager lag dan de maximaal toelaatbare stroom van de motor of van de motormodule. Dit wijst erop dat de effectieve stroomlimiet van de aandrijvingen onbedoeld beperkt werd.

Bij het controleren van de parameter r0067 (*Output current maximum*) bleek dat deze de maximale uitgangsstroom van de motormodule weergeeft. Het is een *read-only* parameter die automatisch bepaald wordt als het minimum van drie andere parameters, zoals weergegeven in Figuur 5.19.



Figuur 5.19: Schematische relatie tussen r0067 en de bepalende parameters r0289, p0323 en p0640 (Siemens AG, 2023e, p. 2360)

- r0289 (*Maximum power unit output current*): de actuele maximale stroom die de motormodule kan leveren. Deze waarde verandert automatisch afhankelijk van de temperatuur van de vermogens-elektronica.
- p0323 (*Maximum motor current*): de maximale stroom volgens het motorontwerp, afgeleid van de motorspecificaties of typeplaat. Deze parameter wordt automatisch ingesteld bij de eerste inbedrijfname.
- p0640 (*Current limit*): de instelbare stroomlimiet. Deze wordt begrensd door zowel p0323 als r0209 (*Power unit maximum current*), de maximale fysieke uitgangsstroom van de motormodule.

Bij snelle inbedrijfname wordt p0640 automatisch ingesteld op p0338 (*Motor limit current*), de stroom die vereist is om het maximale koppel bij nominale snelheid te leveren bij een DC-linkspanning van 600 V (Siemens AG, 2023e, p. 390).

In Tabel 5.6 zijn de relevante stroomparameters samengevat zoals die ingesteld waren na de snelle inbedrijfname van de aandrijvingen.

Tabel 5.6: Overzicht van stroomparameters per aandrijf-as

Parameter	X-/Z-as [A]	C-as [A]
r0209 — Power unit maximum current	6.00	10.00
p0323 — Maximum motor current	7.50	7.35
p0338 — Motor limit current	3.00	5.30
p0640 — Current limit	3.00	5.30
r0289 — Maximum power unit output current	10.0	10.0
r0067 — Output current maximum	3.00	5.30

Uit de waarden in Tabel 5.6 blijkt dat de maximale uitgangsstroom (r0067) voor de X- en Z-as slechts 3 A bedroeg, terwijl de motormodule tot 6 A aankan. Dit betekent dat het maximale koppel, en dus ook de maximale versnelling, in de oorspronkelijke toestand slechts de helft bedroeg van wat technisch mogelijk is. Voor de C-as bedroeg de uitgangsstroom 5,3 A, terwijl de motor een maximale stroom van 7,35 A toelaat. Ook hier was dus slechts ongeveer drie vierde van het beschikbare koppel bruikbaar.

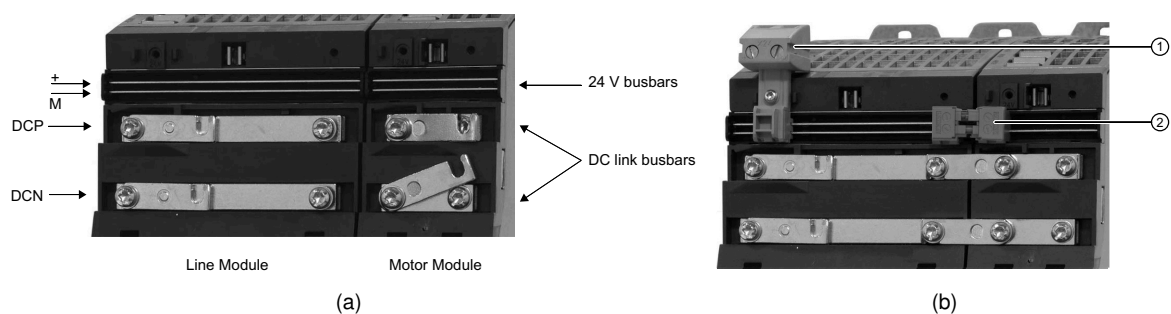
Om de motoren op volle capaciteit te laten werken, werd p0640 (*Current limit*) verhoogd: voor de X- en Z-as naar 6 A, overeenkomend met de maximale stroom van de motormodule, en voor de C-as naar 7,35 A, overeenkomend met de maximale stroom van de motor.

Opmerking: Er werd nergens in de documentatie teruggevonden waarom p0640 standaard wordt ingesteld op p0338 (*Motor limit current*) bij snelle inbedrijfname, en of deze waarde verhoogd mag worden. In theorie zou dit echter geen probleem mogen vormen, aangezien p0640 nooit hoger kan worden ingesteld dan wat technisch is toegestaan door p0323 (*Maximum motor current*) en r0209 (*Power unit maximum current*).

5.2.7 DC bus

Er zijn twee DC-busrails aanwezig op de modules:

- Een 24V busbar.
- Een DC-link busbar.



Figuur 5.20: Foto van de 24V- en DC-busbars (Siemens AG, 2023d, p. 460)

De 24V-spanning komt éénmaal binnen via connector **1** (zie Figuur 5.20(b)) en wordt via de interne jumper **2** doorgegeven aan de naastliggende modules. Deze spanning wordt gebruikt voor de voeding van de interne elektronica, voor DRIVE-CLiQ-componenten zoals encoders, en voor de houdrem van de motor indien aanwezig.

Het is belangrijk dat de spanning op de 24V-DC-busbar binnen de gespecificeerde toleranties blijft ($24V \pm 10\%$) om een correcte werking van de houdrem te garanderen. Bij een te lage spanning kan de rem niet volledig openen, waardoor de motor blijft werken tegen een (gedeeltelijk) gesloten rem. Dit veroorzaakt oververhitting en versnelde mechanische slijtage van zowel de rem als de motor. Om spanningsverlies over de kabels te compenseren, wordt aanbevolen de voeding op 26V in te stellen (Siemens AG, 2023d, p. 204).

In deze testopstelling wordt gebruikgemaakt van een Smart Line Module. Bij een netspanning $U_{\text{net}} = 400 \text{ V AC}$ ontstaat er volgens Vergelijking 5.3 een tussenkringspanning over de DC-bus van:

$$U_{\text{DC}} \approx 1,35 \times U_{\text{net}} = 1,35 \times 400 \text{ V} = 540 \text{ V DC} \quad (5.8)$$

Een beschermingskap zorgt ervoor dat deze delen niet aanraakbaar zijn. Voor het openen van de kap moet de spanning op de modules minstens vijf minuten uitgeschakeld zijn. Voor werkzaamheden aan de DC-bus moet altijd nagemeten worden of de spanning volledig verdwenen is.

5.2.8 DRIVE-CLiQ

De NCU, enkele motormodule, dubbele motormodule en encoders van de motoren zijn verbonden via DRIVE-CLiQ, een communicatie-interface van Siemens die gebruikt wordt in het Sinamics S120-aandrijfsysteem. Deze interface maakt het mogelijk dat verschillende componenten onderling gegevens uitwisselen. DRIVE-CLiQ werkt met een cyclustijd van 31,25 μ s, wat aanzienlijk sneller is dan bij standaard industriële Ethernetverbindingen.

Een DRIVE-CLiQ-kabel lijkt op een standaard RJ45 Ethernetkabel, maar bevat twee extra aders en pinnen voor de voeding. Hiermee kan bijvoorbeeld een encoder rechtstreeks van 24 V en tot 450 mA worden voorzien, waardoor een afzonderlijke voedingskabel overbodig wordt. Daarnaast biedt DRIVE-CLiQ ondersteuning voor automatische herkenning van componenten via elektronische typeplaatjes. Hierdoor kunnen aandrijfcomponenten zoals motoren en encoders automatisch worden geïdentificeerd en geconfigureerd.

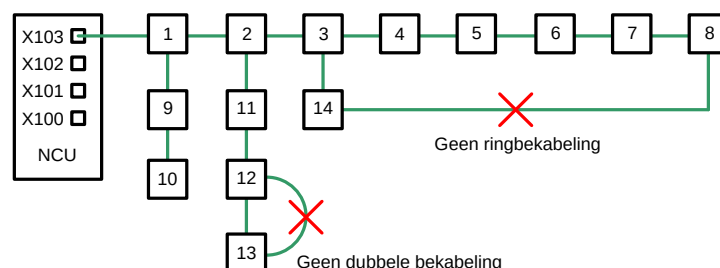
De topologie is te zien in Figuur 6.2 op pagina 79.

Tabel 5.7: Pinout DRIVE-CLiQ RJ45-connector

Pin	Naam	Functie
1	TXP	Zenddata (positief)
2	TXN	Zenddata (negatief)
3	RXP	Ontvangstdata (positief)
4	Gereserveerd	Niet gebruiken
5	Gereserveerd	Niet gebruiken
6	RXN	Ontvangstdata (negatief)
7	Gereserveerd	Niet gebruiken
8	Gereserveerd	Niet gebruiken
A	+24 V	Voedingsspanning
B	0 V (massa)	Elektronica-aarde

Er gelden een aantal regels voor DRIVE-CLiQ-bekabeling (Siemens AG, 2024k, p. 46):

- Maximaal 198 DRIVE-CLiQ-deelnemers per NCU.
- Maximaal 14 deelnemers per aansluiting (een dubbele motormodule telt als 2 deelnemers).
- Maximaal 8 deelnemers in serie per lijn. Een lijn start altijd vanaf de NCU.
- Ringvormige bekabeling is niet toegestaan.
- Dubbele bekabeling is niet toegestaan.
- Motorencoders (Sensor Modules) moeten altijd worden aangesloten op de bijbehorende motor-module.



Figuur 5.21: DRIVE-CLiQ bekabelingsregels (Siemens AG, 2020a, p. 382)

5.3 In- en uitgangen via een I/O-eiland

Een ET200SP-I/O-eiland wordt via PROFINET verbonden met de NCU. Het eiland bevat twee I/O-kaarten: een digitale ingangskaart en een digitale uitgangskaart. Op de ingangskaart zijn onder andere de naderingssensoren voor de referentie van de X- en Z-as aangesloten, evenals het statuscontact van het veiligheidsrelais. De uitgangskaart stuurt het persluchtventiel aan en schakelt via een interface-relais het resetcircuit van het veiligheidsrelais.

5.4 Directe encoder op de C-as

Voor het directe meetsysteem op de C-as is een incrementele sin/cos $1 V_{pp}$ -encoder gebruikt. Deze genereert twee analoge sinusvormige spanningssignalen: een sinus en een cosinus. Beide signalen zijn 90 graden in fase verschoven ten opzichte van elkaar. $1 V_{pp}$ (volt piek-tot-piek) betekent dat het spanningsverschil tussen het hoogste en laagste punt van elk signaal 1 V bedraagt. Elk signaal varieert dus tussen $-0,5 V$ en $+0,5 V$. Omdat de signalen analoog zijn, kunnen tussenliggende waarden via interpolatie worden berekend. Hierdoor wordt de resolutie van de positiebepaling verhoogd.

De encoder is uitgerust met een kabel met een 12-polige M23 Heidenhain-circulaire connector. Aangezien deze niet over een DRIVE-CLiQ-interface beschikt, is rechtstreekse aansluiting op een Sinamics-aandrijving niet mogelijk. Om de encoder toch binnen een DRIVE-CLiQ-systeem te kunnen gebruiken, is een geschikte sensormodule vereist. Twee opties zijn beschikbaar:

- SME20 (Sensor Module External)
- SMC20 (Sensor Module Cabinet)

Er is gekozen voor een SMC20-sensormodule, samen met een bijpassende DRIVE-CLiQ-kabel, zodat de encoder correct op het systeem kan worden aangesloten. De encoder is weergegeven links in Figuur 4.15 op pagina 58. De bijbehorende sensormodule is zichtbaar links in Figuur 5.24 op pagina 77.

De configuratie van deze directe encoder wordt besproken in subsectie 6.4.3 op pagina 81.

5.5 Veiligheidsrelais

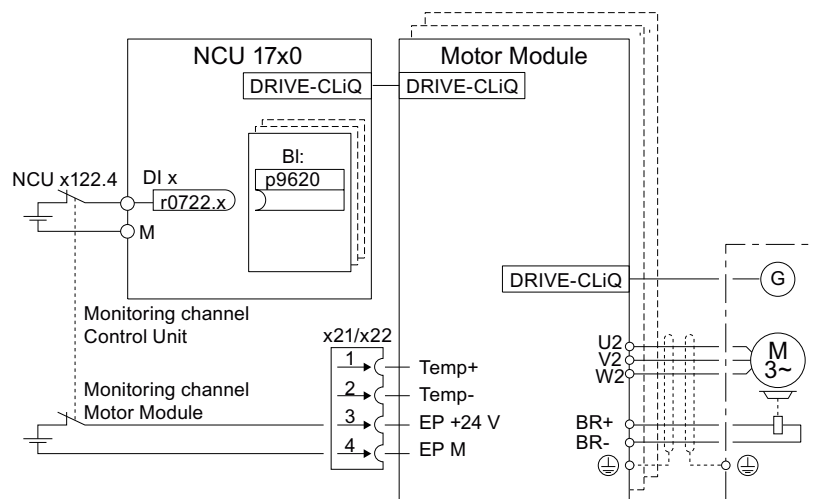
Wanneer er op een noodstop gedrukt wordt, moet de machine onmiddellijk stoppen. Op de NCU is hiervoor terminal X122.2 voorzien als *E-stop Circuit*. Hiermee kan een as gestopt worden, maar een noodstop moet volgens de veiligheidsvoorschriften twee-kanalig worden aangesloten. Dit kan via terminals X122.3 of X122.4 op de NCU en via de EP-klem op elke motormodule, zoals weergegeven in Figuur 5.22.

Bij het wegvallen van de 24V op deze klemmen wordt de veiligheidsfunctie *Safe Stop 1 (SS1)* met *OFF3* geactiveerd. Zodra de as tot stilstand is gekomen, schakelt het systeem automatisch over naar *Safe Torque Off (STO)*, waardoor de motor niet langer bekrachtigd wordt.

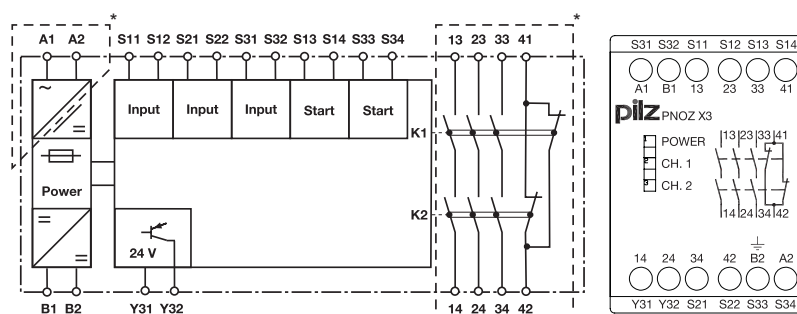
Volgens de regelgeving is dit echter nog niet voldoende: indien een noodstop op deze manier wordt aangesloten, kunnen de assen opnieuw in beweging komen zodra de noodstop wordt uitgeschakeld. Normaal is er eerst een bevestiging (*acknowledgement*) vereist. Daarom wordt een veiligheidsrelais geplaatst tussen de noodstop en de NCU/motormodule.

Er wordt gebruik gemaakt van een **PNOZ X3**-veiligheidsrelais. Het schema is weergegeven in Figuur 5.23. Het persluchtventiel dat gebruikt wordt om de persluchtfrees aan te sturen, wordt door de PLC geschakeld. Bij een noodstop moet ook dit ventiel gedeactiveerd worden. Dit wordt bereikt door het stuursignaal van de PLC eerst door een contact van het veiligheidsrelais te leiden. Bij activering van de noodstop wordt dit signaal onderbroken, waardoor het ventiel uitschakelt.

De configuratie van de veiligheidsfunctie in de besturing is beschreven in sectie 6.8 op pagina 86.



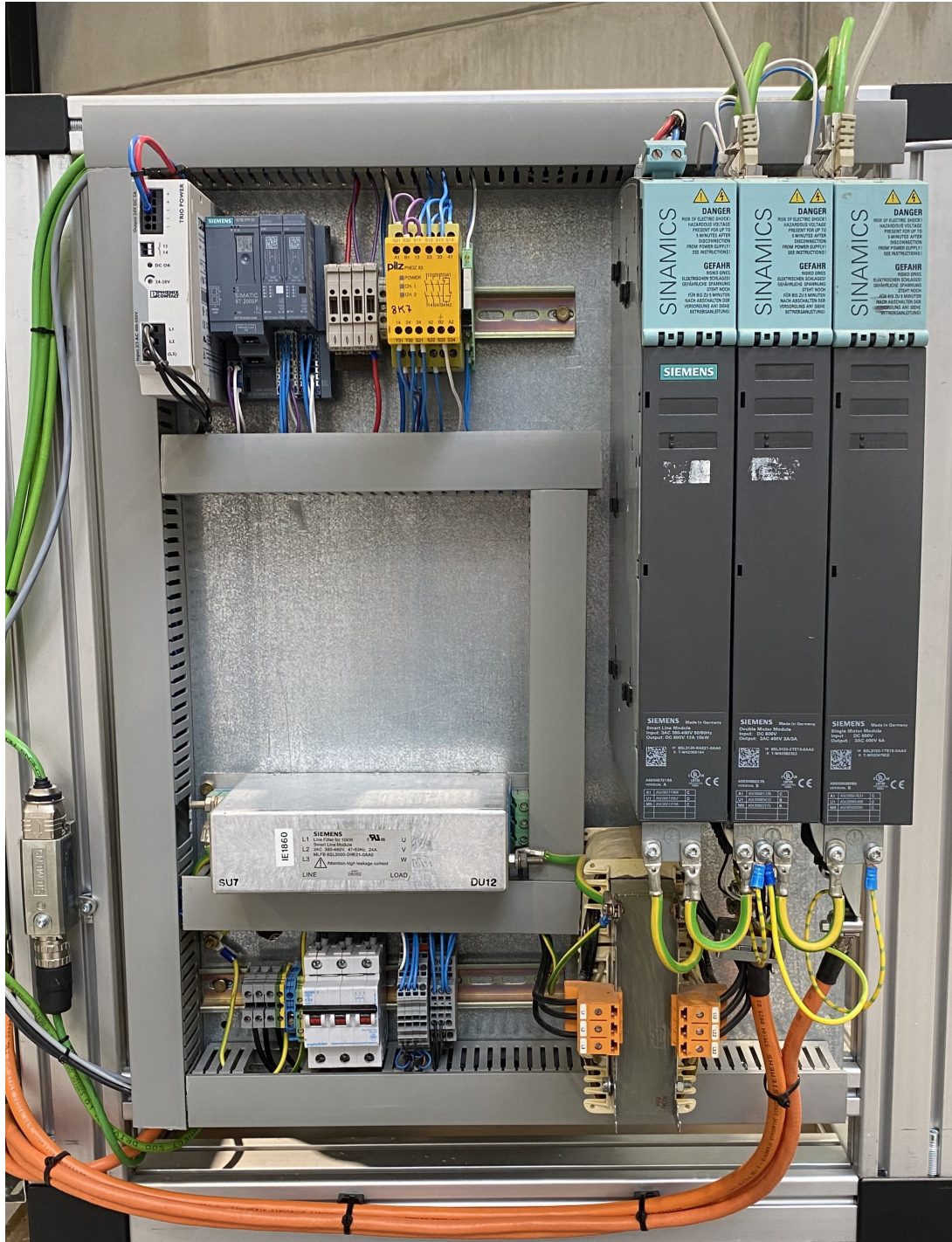
Figuur 5.22: Klemmen voor *STO* bij een *NCU 17x0* en een motormodule in *booksize*-formaat (Siemens AG, 2024i, p. 268)



Figuur 5.23: Aansluitschema van het *PNOZ X3* veiligheidsrelais (PILZ GmbH & Co. KG, 2023, p. 8)

5.6 Resultaat elektrisch gedeelte

Het eindresultaat van het elektrisch paneel is te zien op Figuur 5.24. De S120-modules zijn van links naar rechts: eerst de lijnmodule, dan de dubbele motormodule voor de X- en Z-as en ten slotte de enkele motormodule voor de C-as. Links boven is de 24V-voeding te zien, rechts daarvan het ET200SP I/O-eiland en in het geel het veiligheidsrelais. Linksonder is de sensormodule te zien voor de directe encoder van de C-as.



Figuur 5.24: Eindresultaat van het elektrisch gedeelte

6. Programmering en inbedrijfname

6.1 Machine instellingen

Zoals besproken in hoofdstuk 3 kan het NC-archief, dat geëxporteerd wordt uit de Create My Virtual Machine (CMVM), worden ingeladen in de reële NCU. Het enige wat nog vereist is, is het instellen van de aandrijving (CU en motormodules) en het PLC-programma.

6.2 PLC-programma

Er zijn twee manieren om verbinding te maken met de PLC (Programmable Logic Controller):

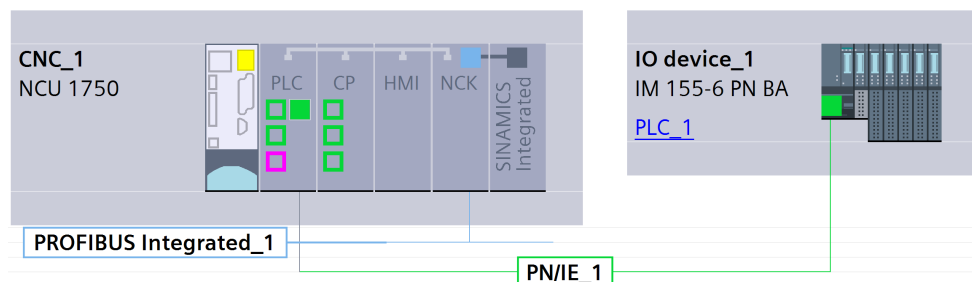
- Via de service- en commissioninginterface Profinet Industrial Ethernet (PN/IE) op poort X127. Dit netwerk beschikt over een Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)-server, waardoor de computer automatisch een Internet Protocol (IP)-adres toegewezen krijgt.
- Via het systeemnetwerk op poort X120. In dit geval moet handmatig een IP-adres aan de computer worden toegekend. De NCU (Numerical Control Unit) heeft het IP-adres 192.168.214.1; de computer gebruikt 192.168.214.151.

Voordat de NCU in het TIA-project kan worden ingevoegd, moet de Sinumerik One PLC Toolbox V19 SP1 worden geïnstalleerd. Dit is een optiepakket voor Simatic Step 7 Professional. Het pakket zorgt ervoor dat de NCU beschikbaar is in de hardwarecatalogus.

Na installatie van de toolbox is in de globale bibliotheek een basisprogramma voor de Sinumerik One PLC beschikbaar. Dit programma bevat een sjabloon met de benodigde blokken, die naar het project kunnen worden gekopieerd.

Het PLC-programma bestaat uit twee delen:

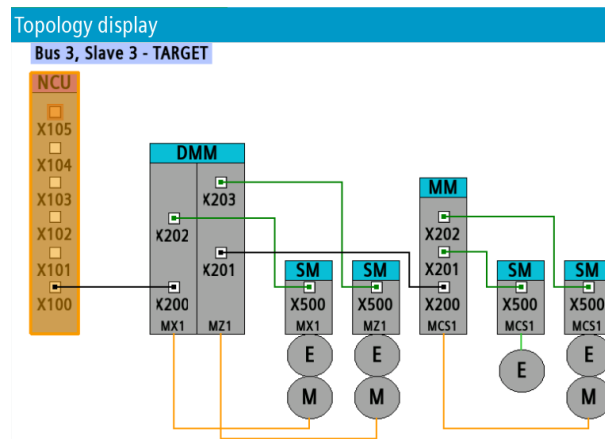
- **PLC-basisprogramma:** regelt de communicatie tussen de PLC, NCK, HMI en de machinebediening. Dit programma is standaard en maakt deel uit van de Sinumerik One TIA Portal Toolbox.
- **PLC-gebruikersprogramma:** breidt het basisprogramma uit en is specifiek voor de gebruiker.



Figuur 6.1: Topology in TIA Portal

6.3 Control unit (CU) en motormodules

Wanneer de aandrijving nog niet geconfigureerd zijn, start het systeem op met een melding om deze in te stellen. Na bevestiging voert de besturing een controle uit op de apparatuur die is aangesloten op de DRIVE-CLiQ-bus. Indien de firmware van een component niet up-to-date is, wordt deze automatisch bijgewerkt. De configuratie van de aangesloten hardware wordt vervolgens opgeslagen in de besturing. Na de automatische inbedrijfname ziet de topologie eruit zoals weergegeven in Figuur 6.2.



Figuur 6.2: Screenshot van de HMI: *Topology display*

Om de aandrijving te activeren (*Enable*), moeten specifieke signalen hoog gezet worden in de PLC. Elke as beschikt over een eigen datablock (DB), en voor alle drie de assen moeten de betreffende signalen hoog gezet worden. De activatie gebeurt via een knop op de MCP, zodat de aandrijving ook manueel gedeactiveerd kan worden indien nodig.

De volgende signalen moeten hoog gezet worden:

- *Controller Enable*: DBX21.1 (A_ContrEnable)
- *Pulse Enable*: DBX21.7 (A_PulseEnable)
- *Override Active*: DBX1.7 (A_ORActive)

Elke as beschikt over één of twee meetsystemen, waarvan er telkens één actief is. De X- en Z-as hebben elk één meetsysteem: de encoder die geïntegreerd is in de motor. Deze wordt dan actief gezet. De C-as heeft twee meetsystemen: een absolute encoder in de motor en een direct meetsysteem (1:1) op de C-as zelf. Hier wordt het tweede meetsysteem actief gezet. Het eerste meetsysteem staat dan automatisch passief.

Het activeren van het juiste meetsysteem gebeurt via de volgende signalen:

- *Positioning Measuring System 1*: DBX1.5 (A_PosMeas1)
- *Positioning Measuring System 2*: DBX1.6 (A_PosMeas2)

6.4 Opstelling data

Voor het correct functioneren van de assen moeten een aantal gegevens ingesteld worden. Met de volgende parameters worden de mechanische eigenschappen van de opstelling in de besturing ingevoerd:

6.4.1 Configureren van de speed

De speed (*ballscrew pitch*) van de lineaire geleiding wordt ingevoerd in MD31030:

```
AX1 MX1: MD31030 = 10
AX2 MZ1: MD31030 = 10
```

6.4.2 Configureren van de overbrengingsverhouding tussen motor en hoofdspil

De overbrengingsverhouding tussen de hoofdspil en de motor wordt ingesteld met behulp van de volgende machineparameters:

$$\frac{1}{i} = \frac{n_{\text{last}}}{n_{\text{motor}}} = \frac{\text{MD31050}}{\text{MD31060}} \quad (6.1)$$

- MD31050 GEAR_RATIO_NUMERATOR: teller van de overbrengingsverhouding
- MD31060 GEAR_RATIO_DENOMINATOR: noemer van de overbrengingsverhouding

Bij de C-as zijn er twee overbrengingen aanwezig. De totale overbrengingsverhouding wordt als volgt berekend:

$$i = i_{\text{reductor}} \times i_{\text{riem}} = 8 \times \frac{40}{24} = \frac{320}{24} = \frac{40}{3} \quad (6.2)$$

Er moet opgemerkt worden dat niet de gebruikelijke verhouding $i = \frac{n_{\text{motor}}}{n_{\text{last}}}$ wordt ingevoerd, maar de inverse:

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{\frac{40}{3}} = \frac{3}{40} = \frac{\text{MD31050}}{\text{MD31060}} \quad (6.3)$$

De machineparameters MD31050 en MD31060 zijn arrays met zes indexen. Elke index stelt een parameterset van de as voor. Zoals besproken in subsectie 3.3.1 kan de hoofdspil zich in twee modi bevinden: spilmodus en asmodus. In asmodus wordt parameterset 1 gebruikt, overeenkomend met index [0]. De vijf overige parametersets zijn bedoeld voor de spilmodus.

In draaibanken wordt vaak gewerkt met versnellingsbakken, waarbij meerdere overbrengingsverhoudingen mogelijk zijn. Er kunnen tot vijf overbrengingsverhoudingen ingesteld worden. In deze toepassing wordt echter slechts één vaste overbrengingsverhouding gebruikt. Er wordt dus gebruik gemaakt van twee parametersets: [0] voor asmodus en [1] voor spilmodus. Beide moeten ingevuld worden.

```
AX3 MCS1:
  Asmodus:
    MD31050[0] = 3
    MD31060[0] = 40
  Spilmodus:
    MD31050[1] = 3
    MD31060[1] = 40
```


6.4.3 Configureren van het directe meetsysteem

Om het tweede meetsysteem van de C-as als direct meetsysteem te configureren, moet MD31040 ENC_IS_DIRECT[1] op 1 ingesteld worden. Hiermee wordt aangegeven dat de encoder rechtstreeks op de machine-as gemonteerd is, zonder tussenliggende overbrenging. Volgende parameters die relevant zijn bij gebruik van meerdere meetsystemen, worden in deze toepassing niet ingesteld (Siemens AG, 2020b):

- MD30242 (ENC_IS_INDEPENDENT): bepaalt of correcties op de actieve encoder invloed hebben op andere encoders in dezelfde as. Bij waarde 2 wordt het passieve meetsysteem bijgesteld op basis van het actieve, zonder eigen referentie.
- MD32960 (POSCTRL_DUAL_FEEDBACK_TIME): activeert positieterugkoppeling met twee meetsystemen. Het directe meetsysteem wordt dan via een instelbare vertraging ingeschakeld, terwijl het indirecte wordt uitgefaseerd. Vereist een gekalibreerde koppeling tussen beide meetsystemen.
- MD34102 (REFP_SYNC_ENCS): synchroniseert passieve meetsystemen met het referentiesysteem tijdens referentieaanloop of inschakelen. Hiermee wordt het passieve systeem afgestemd op de absolute positie van het actieve systeem, zonder aparte referentie.

Deze functies worden niet geactiveerd in de huidige configuratie. Enkel het directe meetsysteem wordt gebruikt voor positieterugkoppeling.

6.4.4 Controle

Na het instellen wordt gecontroleerd of alle assen correct bewegen. Eerst wordt nagegaan of joggen in positieve richting effectief resulteert in een beweging in de juiste richting. Indien dit niet het geval is, moet parameter MD32100 MA_AX_MOTION_DIR worden aangepast. Dit was het geval bij de X en Z-as en werd de draairichting omgekeerd door deze parameter in te stellen op -1.

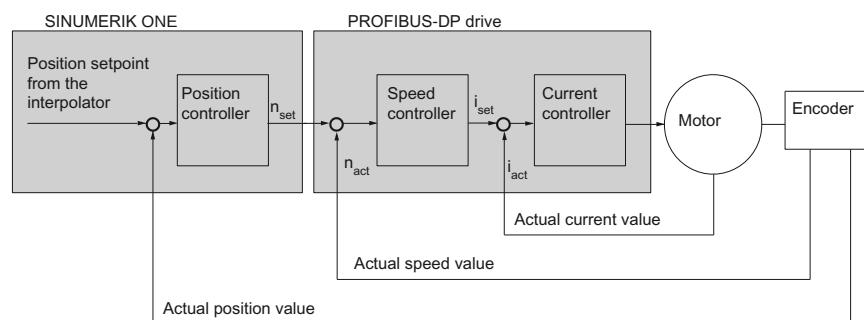
```
AX1 MX1: MD32100 = -1
AX2 MZ1: MD32100 = -1
```

Vervolgens wordt gecontroleerd of de verplaatsing van de lineaire assen overeenkomt met de comando's. Een verplaatsing van 100 mm in de besturing moet overeenkomen met een werkelijke verplaatsing van 100 mm. Tot slot wordt ook de roterende as op correcte werking gecontroleerd.

6.5 Optimalisatie van de regelkring

Optimalisatie (*tuning*) van de besturing is een complex onderwerp. Bij standaardmachines, zonder specifieke toepassingen, volstaat het echter om gebruik te maken van de Automatic Servo Tuning (AST)-functie (Siemens AG, 2024k, p. 1248).

De regelkring bestaat uit drie cascadesgewijs gesloten lussen: de stroom-, snelheids- en positielus, zoals weergegeven in Figuur 6.3. Deze regelkring is ook te zien in Figuur 5.4 op pagina 61. De lussen worden afzonderlijk afgestemd, en dit in de juiste volgorde: eerst de stroomregelaar, daarna de snelheidsregelaar en ten slotte de positieregelaar.



Figuur 6.3: Cascade-opbouw van de regelkring met stroom-, snelheids- en positielus (Siemens AG, 2024k, p. 1248)

Voor het opstarten moeten de basisparameters, zoals spoed, overbrengingsverhouding en de richting van de encoder, correct ingevoerd zijn, zoals besproken in sectie 6.4. Voor een optimale regeling wordt het gebruik van *torque feedforward control* aanbevolen. Daarnaast wordt aangeraden om de positie-, snelheids- en koppelinvoer (setpoints) af te vlakken met een zogenaamd *jerk filter*, in te stellen via parameter `AX_JERK_MODE = 2`.

De AST-functie is te vinden via het pad: Setup > Optim./test > Auto servo tuning

6.5.1 Optimalisatie van een as

Er kunnen verschillende optimalisatiestrategieën worden gekozen. Deze zijn onderverdeeld in drie categorieën (Siemens AG, 2024k, p. 1245):

1. **Axis:** Algemene optimalisatie-instellingen
Strategie: 102. Measure and retune speed and position control
2. **Speed:** Snelheidscontroller
Strategie: 303. With reference model and reserve 2000 Hz current setpoint filter
Opmerking: Moderate responsiveness
3. **Position:** Positiecontroller
Strategie: 203. Maximize Kv with no speed setpoint filter and FFW
Opmerking: Feedforward control (FFW) inschakelen, type instellen op *Torque*

6.5.2 Optimalisatie van een spil

De optimalisatiestrategieën voor een spil wijken af van die voor lineaire assen. Afhankelijk van de toepassing kan een strategie geselecteerd worden voor frezen, draaien, slijpen of voor een spil die gebruikt wordt als werkstukhouder (*work holding table spindle*). In deze opstelling wordt de strategie voor een *work holding table spindle* toegepast, aangezien de C-as het werkstuk vasthoudt. In het volgende menu moet worden aangegeven dat een spil wordt gebruikt in combinatie met de functie *Axis mode (C Axis, M70)*.

6.5.3 Optimalisatie van het interpolatiepad

Om een zo klein mogelijke contourfout te bereiken bij meerassige bewerkingen, moeten alle betrokken assen dezelfde volgfout hebben. De aanbevolen strategie is: 1105 *Dynamics matching element*. Voor deze optimalisatie zijn er geen metingen vereist. De besturing voert enkele berekeningen uit. De assen die samen moeten interpoleren worden gekozen: MX1, MZ1 en MCS1 (Siemens AG, 2024k, p. 1254-1255).

6.6 Bepaling van de maximale versnelling

Om de motor, de motormodule en het mechanisch systeem van de aandrijflijn te beschermen tegen overbelasting, wordt de versnellingslimiet berekend. Bij de padberekening houdt de NC hiermee rekening, zodat in alle situaties een pad kan worden gegenereerd dat door alle betrokken assen gevolgd kan worden zonder vervorming als gevolg van een koppelbeperking van een as.

6.6.1 Traagheidsmoment van de as

Het traagheidsmoment van de volledige as (motor + last) kan na het uitvoeren van een AST op twee manieren worden teruggevonden:

- In het overzicht van de AST kan deze worden afgelezen onder *Estimated total inertia*.
- In machineparameter MD32650 wordt 90% van het traagheidsmoment van de volledige as opgeslagen. Hieruit kan het totale traagheidsmoment worden afgeleid.

$$J_{MD32650} = 0,9 \cdot J_{tot, gemeten} \quad (6.4)$$

$$J_{tot, gemeten} = \frac{1}{0,9} \cdot J_{MD32650} \approx 1,11 \cdot J_{MD32650} \quad (6.5)$$

Het traagheidsmoment van de motor wordt bij inbedrijfname automatisch ingesteld in parameter p341. Voor de X- en Z-motor komt dit overeen met de specificaties. Voor de C-motor ligt het lager dan opgegeven. Het traagheidsmoment van de last wordt bepaald door het traagheidsmoment van de motor af te trekken van het totale traagheidsmoment. Dit wordt weergegeven in subsectie 6.1.

Tabel 6.1: Traagheidsmomenten per as: gemeten totaal, motor uit p341 en berekende last

As	$J_{\text{totaal, gemeten}} [\text{kg}\cdot\text{cm}^2]$	$J_{\text{motor, p341}} [\text{kg}\cdot\text{cm}^2]$	$J_{\text{last, gemeten}} [\text{kg}\cdot\text{cm}^2]$
X	1,035	0,28	0,76
Z	0,682	0,28	0,41
C zonder werkstuk	8,207	3,01	5,2

De theoretische waarden werden eerder bepaald in sectie 4.3.

In Tabel 6.2 worden de theoretisch berekende traagheidsmomenten van de last per as vergeleken met de gemeten waarden. Bij de X-as is de gemeten inertie iets groter, wat vermoedelijk te wijten is aan de kabels van de Z-motor en de persluchtleiding van de persluchtfrees, die niet in de theoretische berekening zijn opgenomen. De grotere gemeten waarde van de C-as kan worden verklaard doordat de theoretische inertie van de klauwplaat uit Inventor komt, waarbij de klauwen volledig naar binnen stonden. Tijdens de meting stonden deze echter meer naar buiten. Daarnaast zijn de inertie van de bouten die de flens op de as verbinden en de klauwplaat met de flens niet opgenomen in de berekening. Hierdoor ligt de werkelijke inertie hoger dan theoretisch berekend. Voor de Z-as is geen specifieke verklaring gevonden. Algemeen kan worden gesteld dat deze afwijking het gevolg is van toleranties in de motor- en lastgegevens.

Tabel 6.2: Vergelijking van theoretisch berekende en gemeten traagheid van de last per as

As	$J_{\text{last, theoretisch}} [\text{kg}\cdot\text{cm}^2]$	$J_{\text{last, gemeten}} [\text{kg}\cdot\text{cm}^2]$
X	0,72	0,76
Z	0,44	0,41
C zonder werkstuk	4,86	5,2

6.6.2 Bepaling van het maximaal koppel van de aandrijflijn

Het maximaal koppel in de aandrijflijn wordt bepaald door de omvormer, de motor en de mechanische opstelling. De omvormer en motor bepalen het maximaal beschikbare koppel, terwijl de mechanische opstelling het maximaal toelaatbare koppel van de componenten vastlegt. De laagste van deze waarden wordt als maximaal koppel voor de aandrijflijn gehanteerd.

6.6.3 Bepaling van de wrijving en het houdkoppel

In deze stap wordt bepaald hoeveel koppel continu nodig is om:

- de wrijving in het systeem te overwinnen, veroorzaakt door componenten zoals lagers, riemen, reductoren en spindels;
- de as tegen de zwaartekracht in op zijn plaats te houden wanneer deze een verticale oriëntatie heeft, zoals de X-as in dit geval.

Dit vereiste koppel is niet beschikbaar voor versnelling en moet daarom worden afgetrokken van het maximaal beschikbare koppel. De bepaling gebeurt door te meten hoeveel moment-opwekkende stroom I_{wh} nodig is om de as langzaam te verplaatsen (joggen) bij een zeer lage constante snelheid. Voor verticale assen moet de beweging omhoog gericht zijn. Via het onderstaande NC-programma wordt de trace gestart en beweegt de as traag.

```
SOFT
$AN_SLTRACE=0 ; Reset de triggerstatus
GO X0 ; Ga snel naar startpositie
$AN_SLTRACE=1 ; Activeer trace-trigger
G01 X20 F200 ; Beweeg langzaam met constante snelheid (200 mm/min)
M30 ; Programma-einde
```

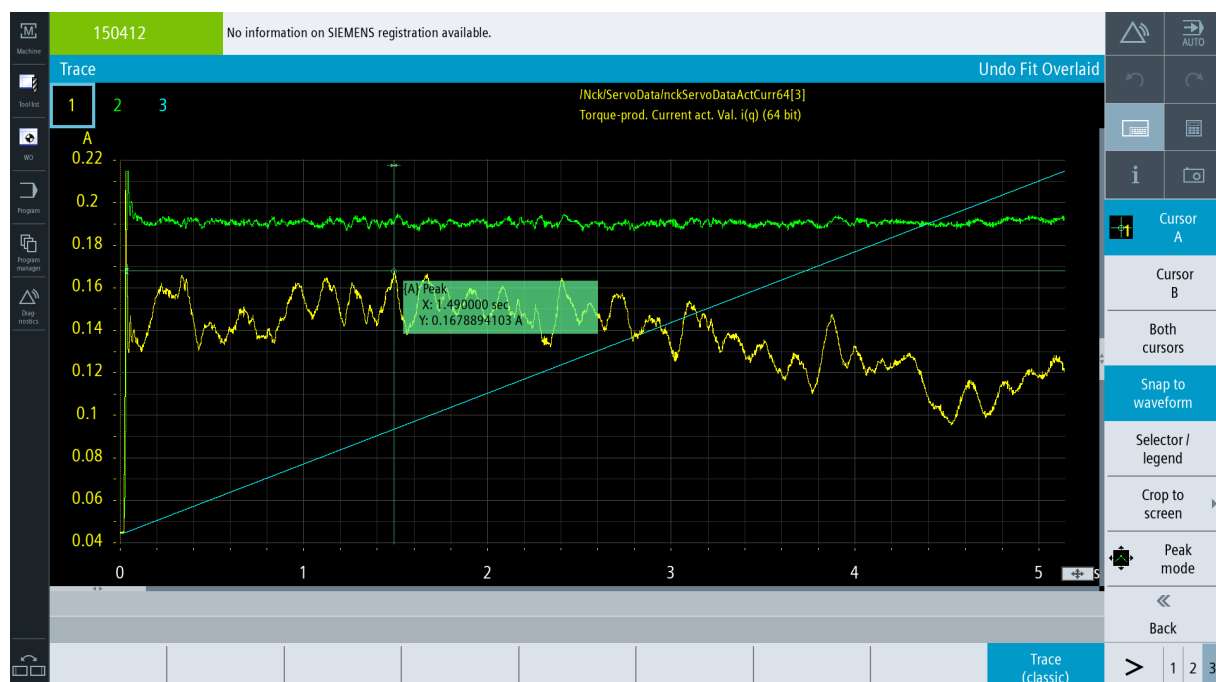
In het trace-venster van de HMI worden de volgende variabelen geselecteerd voor analyse:

- Nck/ServoData/nckServoDataActCurr64
(actuele waarde van het moment-opwekkende stroomsignaal),
- Nck/ServoData/nckServoDataCmdPosIndEnc64
(positie-setpoint van de eerste encoder),
- Nck/ServoData/nckServoDataActVel1stEnc64
(actuele snelheidswaarde van de eerste encoder).

De trace wordt gestart wanneer de variabele \$AN_SLTRACE de waarde 1 krijgt. De *elapsed time* wordt ingesteld op 5 seconden.

Na het starten van het programma via Cycle Start wordt ook de trace geactiveerd. In de grafiek verschijnt aanvankelijk een stroompiek ten gevolge van de statische wrijving. Deze piek wordt genegeerd. De maximale stroom tijdens het gebied met constante snelheid wordt bepaald met behulp van de cursor. Vervolgens wordt het wrijvings- en houdkoppel M_{wh} berekend op basis van de koppelconstante k_T :

$$M_{wh} = k_T \cdot I_{wh} \quad (6.6)$$



Figuur 6.4: Trace voor bepaling van M_{wh} . Groen: encodersnelheid. Blauw: positiesetpoint. Momentopwekkende stroom I_{wh} (evenredig met M_{wh}) vertoont initiële piek door statische wrijving, die wordt genegeerd.

Tabel 6.3: Wrijvings- en houdkoppel per as op basis van gemeten stroom en koppelconstante k_T .

As	I_{wh} [A]	k_T [Nm/A]	M_{wh} [Nm]
X	$\approx 0,54$	0,46	$\approx 0,25$
Z	$\approx 0,198$	0,46	$\approx 0,091$
C	$\approx 0,168$	1,4	$\approx 0,235$

6.6.4 Berekenen van de maximale versnelling per as

De maximale versnelling per as wordt bepaald op basis van het maximaal beschikbare koppel, het wrijvingskoppel en de totale inertie van de aandrijflijn (motor + last). De in Tabel 6.1 vermelde waarde voor de C-as is zonder werkstuk. Voor deze berekening wordt voor de C-as een totale inertie van $10 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ aangenomen.

De maximale toegelaten versnelling wordt ingesteld via MD32300 (MAX_AX_ACCEL). De opgegeven waarden voor acceleratiekoppel en totale inertie gelden aan de motorzijde. De versnelling die uit deze gegevens wordt berekend is dus die van de motoras, en moet omgerekend worden naar de lastzijde. De maximaal toegelaten asversnellingen zijn weergegeven in Tabel 6.4. Hogere waarden zijn niet toegestaan. De volledige berekeningen zijn opgenomen in Bijlage C, vanaf pagina 111.

Tabel 6.4: Beperkingen van versnelling per as

As	Zwakke schakel	Acceleratiekoppel [Nm]	Totale inertie [$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$]	Max. versnelling
X	motor	1,96	1,06	41 mm/s^2
Z	motor	2,12	0,69	82 mm/s^2
C	motor	5,7	10	68 rev/s^2

6.7 Instellen van de *jerk*

Jerk werd eerder besproken in subsectie 2.2.2 op pagina 9).

Bij dynamische asbewegingen treden vaak sterke veranderingen in versnelling op. Deze versnellings-sprongen worden aangeduid als *jerk* (eenheid: m/s^3). Wanneer de *jerk* te groot is, kunnen mechanische oscillaties ontstaan op de machineas, wat resulteert in onnauwkeurigheden in de werkstukcontour. Om dit effect te beperken, kan de besturing de *jerk* reduceren. Hierdoor wordt de overgang in versnelling gespreid over een langere tijd.

In het CNC-programma kan jerkbeperking worden geactiveerd met het commando `SOFT` en gedeactiveerd met `BRISK`. Indien geen van beide commando's gebruikt wordt, hanteert de besturing de standaardwaarde. Deze wordt vastgelegd in kanaalparameter MD20150 [20], waarbij waarde 1 de jerkbeperking inschakelt en 2 (standaardinstelling) deze uitschakelt (Siemens AG, 2024k, p. 1262).

De configuratie wordt hier niet besproken.

6.8 Configuratie van de veiligheidsfunctie

De noodstop is aangesloten op het veiligheidsrelais en komt tweekanaals binnen op de besturingseenheid. Dit is beschreven in sectie 5.5 op pagina 76. De configuratie begint met het toewijzen van de juiste digitale ingang op de NCU, via het volgende pad:

Setup > Drive System > Drive Device > Inputs / Outputs

In dit menu worden de in- en uitgangen van de *onboard terminals* weergegeven, zoals geïllustreerd in Figuur 6.5. De digitale ingang X122.3 wordt toegewezen aan drie assen, zichtbaar in Figuur 6.6.

Signal	O/I	DI/DO	X122	X132	DI/DO	O/I	Signal
Input infeed operation	1	DI 0	1	DI 1	DI 4	0	Freely available
2nd OC OFF3	1	DI 1	2	DI 2	DI 5	0	Freely available
Select safe stop (SH) group 1	0	DI 2	3	DI 3	DI 6	0	Freely available
Res. for user safe stop group 2	0	DI 3	4	DI 4	DI 7	0	Freely available
Freely available	0	DI 16	5	DI 5	DI 20	0	Freely available
Freely available	0	DI 17	6	DI 6	DI 21	0	Freely available
Status safe stop (SH) group 1	0	DO 8	9	DI 9	DI 12	0	Reserved for input 2nd OC OFF2
Res. for status safe stop group 2	0	DO 9	10	DI 10	DI 13	0	Reserved for standard signals
Res. for input external zero mark 1	0	DI 10	12	DI 12	DI 14	0	Reserved for standard signals

Figuur 6.5: Overzicht van de *onboard terminals* van de NCU

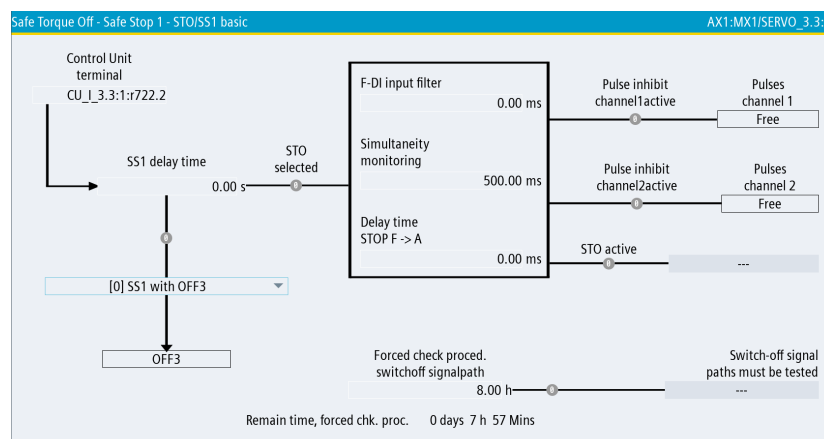
Drive		Select safe stop (SH) group 1
☒ SERVO_3.3:2		1
☒ SERVO_3.3:3		1
☒ SERVO_3.3:4		1

Figuur 6.6: Toewijzing van ingang X122.3 aan de SS1-functie van drie assen

Vervolgens wordt het volgende menu geopend:

Setup > Safety

Voor elke as moet de optie *Select safety function* ingesteld worden op *Basic functions via onboard terminals*. Na het openen van het *Functions*-menu wordt de veiligheidssituatie weergegeven zoals in Figuur 6.7. Bij het indrukken van de noodstop voert de as eerst een SS1 uit, gevolgd door een STO. Op de HMI wordt niet weergegeven dat het veiligheidsrelais is geactiveerd. Een melding kan geconfigureerd worden via DB2 in de PLC.



Figuur 6.7: Configuratieoverzicht van de veiligheidsfunctie

6.9 Referentieprocedure

Het refereren (*homen*) van een machine-as houdt in dat de positie in de besturing gesynchroniseerd wordt met de werkelijke positie van de as. Afhankelijk van het type encoder gebeurt dit met of zonder beweging. Bij assen zonder absolute encoder wordt de referentie uitgevoerd door de as naar een vast referentiepunt te verplaatsen. Dit is de **referentieprocedure**. Deze kan manueel uitgevoerd worden in JOG-modus, submodus REF, of automatisch via een NC-programma. Om te bepalen of een as voorzien is van een absolute of incrementele encoder, kan men de kenplaat raadplegen of de machineparameters 30240[0] en 30240[1] controleren, die slaan op het eerste en tweede meetsysteem.

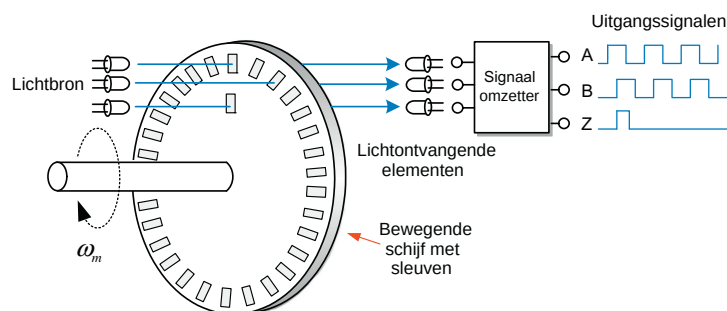
- Incrementele encoder: waarde = 1
- Absolute encoder: waarde = 4

De meetsystemen van de X- en Z-as zijn resolvers¹. Deze moeten ook gerefereerd worden en worden dus ingesteld zoals incrementele encoders. De C-as heeft twee meetsystemen: het eerste is een absolute encoder, het tweede een incrementele sincos-encoder. Aangezien het tweede meetsysteem actief zal zijn, wordt de referentieprocedure voor absolute encoders niet behandeld.

De referentieprocedure voor een incrementeel meetsysteem wordt eerst toegelicht in subsectie 6.9.1. Vervolgens wordt deze toegepast op de X- en Z-as in subsectie 6.9.2, en op de C-as in subsectie 6.9.2.

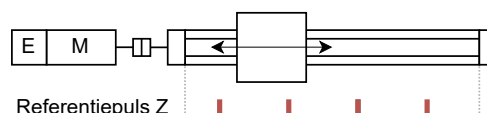
6.9.1 Referentieprocedure incrementeel meetsysteem

Incrementele encoders genereren pulsen op drie kanalen: A, B en een referentiepuls. Die referentiepuls komt slechts één keer per omwenteling voor, zoals te zien in Figuur 6.8.



Figuur 6.8: Principiële werking van een incrementele encoder (Lee, 2017, p. 376)

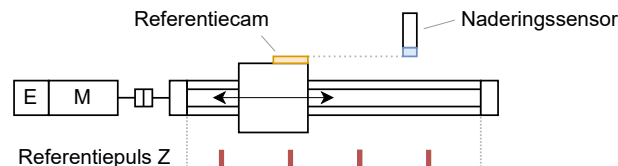
Deze encoders geven de relatieve verplaatsing door, niet de absolute positie. De referentiepuls zorgt ervoor dat de besturing weet waar de as zich bevindt binnen één omwenteling (360 graden). Bij een lineaire geleiding maakt de motoras, en daarmee ook de encoderas, meerdere omwentelingen over het volledige lineaire bereik. Hierdoor verschijnt de referentiepuls Z meerdere keren binnen dat bereik. Op basis van deze referentiepuls kan de besturing bepalen waar de as zich bevindt binnen één omwenteling, maar niet in welke specifieke omwenteling binnen het totale lineaire bereik de as zich bevindt.



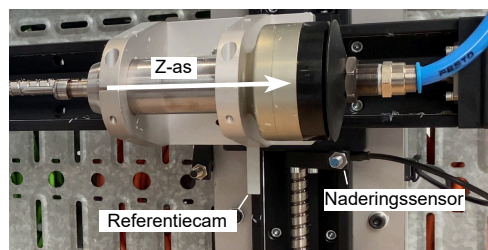
Figuur 6.9: Meerdere referentiepulsen over het bereik bij een lineaire geleiding

¹Een resolver is een analoge roterende sensor die via inductieve koppeling de absolute hoekpositie binnen één omwenteling bepaalt. Deze sensor wordt vaak gebruikt als robuust alternatief voor incrementele encoders.

Om de absolute positie te bepalen, moet de besturing weten in welke omwenteling van het lineaire bereik de as zich bevindt. Deze informatie wordt verkregen via een **referentiec**am in combinatie met een **naderingssensor**. Zodra de sensor de cam detecteert, weet de besturing in welke omwenteling de as zich bevindt. De referentiecam is geen sensor, maar een mechanisch onderdeel: een vast punt op de as, zoals een uitstulping of plaat, die meebeweegt met de as en een bepaalde breedte heeft. De naderingssensor — ook wel **BERO** genoemd (Siemens-merknaam) — staat vast opgesteld langs het bereik van de as en detecteert de cam wanneer die voorbij komt.



Figuur 6.10: Detectie van de referentiecam door een naderingssensor (BERO)



Figuur 6.11: Referentiecam en naderingssensor van de Z-as. De naderingssensor van de X-as is ook zichtbaar, de bijhorende referentiecam bevindt zich buiten beeld.

De naderingssensor wordt aangesloten op een digitale ingang van het I/O-eiland. In de PLC-gebruikersprogramma wordt deze ingang gekoppeld aan het interface-bit voor de as die gerefereerd moet worden. Voor as 1 wordt bijvoorbeeld het bit DB31.DBX12.7 gebruikt om de functie *Delay reference point approach* te activeren. Dit bit start de zoektocht naar de referentiepuls nadat de naderingssensor geactiveerd is. De sensorinvoer komt bijvoorbeeld van %I80.0.



Figuur 6.12: Ladderdiagram waarin de naderingssensor de referentieprocedure van de X-as activeert

Elke as heeft een eigen datablock (DB) waarin het referentiebit zich bevindt. De tabel hieronder geeft de koppeling tussen het asnummer en het correcte bit weer:

Tabel 6.5: Koppeling tussen asnummer en referentiebit in het datablock

Asnummer	Signaal
1e as	DB31.DBX12.7
2e as	DB32.DBX12.7
3e as	DB33.DBX12.7
...	...

Op de HMI wordt via machineparameter MD34000 (\$MA_REFP_CAM_IS_ACTIVE) ingesteld dat de referentieprocedure gebruikmaakt van een referentiecamlens. Wanneer deze parameter op 1 staat, zal de as bij het starten van de referentieprocedure eerst op zoek gaan naar een signaal van de naderingssensor. Een referentieprocedure zonder referentiecamlens (MD34000 = 0) wordt toegepast bij:

- Assen met één unieke referentiepuls over het volledige bereik (zoals roterende assen, maar ook mogelijk bij lineaire assen). Dit is het geval bij de directe encoder op de C-as.
- Assen met afstand-gecodeerde encoders (met meerdere referentiepulsen in een specifiek patroon, waardoor de besturing weet waar de as zich bevindt).

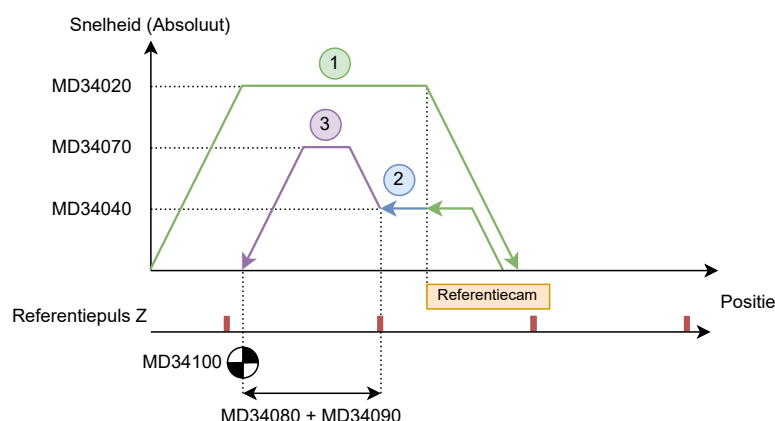
De referentiemodus wordt ingesteld via MD34200 (\$MA_ENC_REFP_MODE). In deze toepassing wordt **modus 1** gebruikt: een incrementele encoder met referentiepuls, eventueel in combinatie met een naderingssensor. Het gedrag van de referentieprocedure in modus 1 hangt af van de instelling van MD34000:

- MD34000 = 1: de as beweegt eerst naar de referentiecamlens, waarna de eerstvolgende referentiepuls wordt gebruikt. Dit is van toepassing op de X- en Z-as.
- MD34000 = 0: de as zoekt rechtstreeks naar de eerstvolgende referentiepuls. Dit is van toepassing op de C-as.

Modus 1 is de klassieke referentiemethode en biedt een hogere nauwkeurigheid dan modus 2, waarbij enkel naar de referentiecamlens wordt gezocht en niet naar de referentiepuls. In modus 2 speelt de herhaalbaarheid van de naderingssensor een belangrijke rol. Daarnaast kan een kleine verschuiving van de referentiecamlens of sensor leiden tot een foutieve referentiepositie. Bij gebruik van een combinatie van referentiecamlens en referentiepuls (modus 1) dient de referentiecamlens uitsluitend om ervoor te zorgen dat telkens naar dezelfde referentiepuls wordt gezocht. In dat geval hebben de herhaalbaarheid van de sensor en een kleine verplaatsing van de referentiecamlens geen invloed, aangezien de referentiepositie bepaald wordt door de referentiepuls en niet door de cam zelf.

De referentieprocedure voor een incrementeel meetsysteem bestaat uit drie opeenvolgende fases en is weergegeven op Figuur 6.13².

1. Beweging naar de referentiecamlens: De as beweegt tot de naderingssensor de referentiecamlens detecteert.
2. Synchronisatie met de referentiepuls: Zodra de cam is gedetecteerd, zoekt het systeem op de eerstvolgende referentiepuls van de encoder.
3. Beweging naar het referentiepunt: De as beweegt naar de gedefinieerde referentiepositie, waarna de besturing de positie synchroniseert.



Figuur 6.13: Drie fases van de referentieprocedure voor een incrementele encoder

²De snelheden in Figuur 6.13 zijn absoluut weergegeven. Bij negatieve verplaatsingen zouden normaal negatieve snelheden verwacht worden, maar ze zijn positief getekend om de snelheidsparameters MD34020, MD34040 en MD34070 duidelijker te tonen. In TIA Portal worden snelheden niet absoluut weergegeven en zijn negatieve snelheden ook negatief weergegeven.

Fase 1 – Beweging naar de referentiecaml

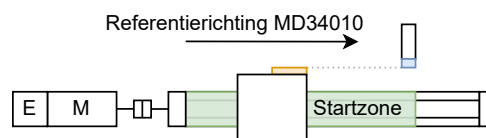
Fase 1 wordt gestart door in JOG-modus, in het REF-venster, op de plus- of minknop te drukken. De referentierichting en dus ook welke knop actief is, wordt ingesteld via machineparameter MD34010 (\$MA_REFP_CAM_DIR_IS_MINUS). Bij het indrukken van de verkeerde knop start de procedure niet.

- 0: referentiebeweging in positieve richting
- 1: referentiebeweging in negatieve richting

De as versnelt tot de snelheid ingesteld in MD34020 (\$MA_REFP_VELO_SEARCH_CAM) en beweegt in de richting bepaald door MD34010, tot de naderingssensor de referentiecaml detecteert. Zodra dit gebeurt: remt de as af en stopt, keert de as om en beweegt met de snelheid ingesteld in MD34040 (\$MA_REFP_VELO_SEARCH_MARKER) tot het cam-sigtaal wegvalt (dalende flank van de naderingssensor). Op dat moment eindigt fase 1.

Als de as zich bij de start van de referentieprocedure al op de cam bevindt (de naderingssensor is dan reeds actief), beweegt de as eerst in de tegengestelde richting van de ingestelde cam-benaderingsrichting (MD34010), om alsnog de juiste dalende flank te kunnen detecteren.

Belangrijk: de as moet zich vóór of op de referentiecaml bevinden bij het starten van de referentieprocedure.



Figuur 6.14: Startpositie van de as en referentierichting bepaald via MD34010

De parameter MD34030 (\$MA_REFP_MAX_CAM_DIST) bepaalt de maximale afstand waarbinnen de referentiecaml gedetecteerd moet worden tijdens fase 1. Als de cam binnen deze afstand niet gevonden wordt, stopt de referentieprocedure en geeft de besturing een foutmelding.

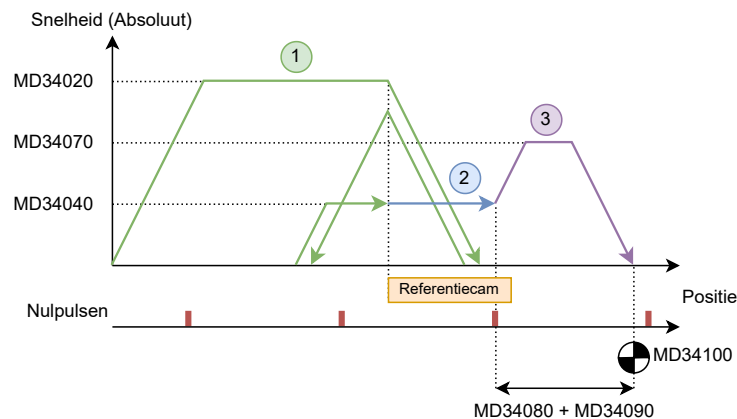
Fase 2 – Synchronisatie met de referentiepuuls

Na het verlaten van de referentiecaml moet de as synchroniseren op de eerstvolgende referentiepuuls van de encoder. De zoekrichting naar de referentiepuuls is afhankelijk van:

- MD34010 (\$MA_REFP_CAM_DIR_IS_MINUS) – De referentierichting gebruikt in fase 1.
 - 0: positief
 - 1: negatief
- MD34050 (\$MA_REFP_SEARCH_MARKER_REVERSE) – Bepaalt aan welke flank van het cam-sigtaal de referentiepuuls gezocht wordt.
 - 0: dalende flank
 - 1: stijgende flank

Afhankelijk van de ingestelde flank zijn er twee scenario's:

- MD34050 = 0 (dalende flank): De as verlaat de referentiecaml in de tegenovergestelde richting van fase 1, met de snelheid ingesteld in MD34040 (\$MA_REFP_VELO_SEARCH_MARKER). Zodra het cam-sigtaal wegvalt (dalende flank), start fase 2 en wordt de eerstvolgende referentiepuuls gezocht.
- MD34050 = 1 (stijgende flank): De as beweegt eerst van de cam weg met snelheid MD34020, stopt zodra het cam-sigtaal wegvalt, en keert dan terug met snelheid MD34040. Zodra de referentiecaml opnieuw gedetecteerd wordt (stijgende flank), start fase 2 en wordt de eerstvolgende referentiepuuls gezocht.



Figuur 6.15: Tijdsverloop van de homingprocedure – fase 1 t.e.m. 3. De synchronisatie met de referentiepuls (fase 2) vindt plaats na het verlaten van de referentiecarn.

De parameter MD34060 (\$MA_REFP_MAX_MARKER_DIST) bepaalt de maximale afstand waarbinnen de referentiepuls gevonden moet worden, gemeten vanaf het moment dat de ingestelde flank van het cam-sigitaal wordt gedetecteerd. Als binnen deze afstand geen referentiepuls wordt gevonden, stopt de referentieprocedure en geeft de besturing een foutmelding.

Fase 3 – Beweging naar referentiepositie

Fase 3 start automatisch zodra de referentiepuls in fase 2 is gedetecteerd. De as beweegt vanaf die positie naar het referentiepunt. De afstand die de as daarbij aflegt, is de som van twee parameters:

$$MD34080 (\$MA_REFP_MOVE_DIST) + MD34090 (\$MA_REFP_MOVE_DIST_CORR)$$

De snelheid van deze beweging is ingesteld in MD34070 (\$MA_REFP_VELO_POS). Zodra de doelpositie bereikt is, wordt de actuele positie gelijkgesteld aan de ingestelde referentiepointwaarde, ingesteld in MD34100 (\$MA_REFP_SET_POS).

Het nadeel van deze twee parameters is dat de as, na het vinden van de referentiepuls, eerst nog een extra beweging uitvoert richting een gedefinieerd punt. Standaard staat MD34080 ingesteld op -2 mm (Siemens AG, 2020b, p. 495). Tijdens de afregeling van de X- en Z-as in hoofdstuk 7 wordt geen gebruik gemaakt van deze twee parameters, enkel MD34100 wordt ingesteld.

De parameter MD34210 (\$MA_ENC_REFP_STATE) geeft de status van de referentie of kalibratie van de encoder weer. Voor incrementele encoders toont deze parameter de referentiestatus:

Tabel 6.6: Waarden van MD34210 bij incrementele encoders

Waarde	Betekenis
0	Geen automatische referentie actief
1	Automatische referentie geactiveerd, maar nog niet uitgevoerd
2	Referentie uitgevoerd, as wordt automatisch gepositioneerd bij opstart
3	Laatst gekende positie is hersteld zonder nieuwe referentie

Wanneer de as correct is gerefereerd, verschijnt in het REF-venster van de HMI een referentiesymbool naast de as (zie Figuur 6.16). Tegelijkertijd zal parameter MD34210 op waarde 2 staan.



Figuur 6.16: Referentiesymbool op de HMI na een geslaagde referentieprocedure

6.9.2 Configuratie van de referentieprocedure voor de drie assen

X- en Z-as

De X- en Z-as beschikken elk over één meetsysteem, namelijk een incrementeel meetsysteem. Dit wordt als volgt geconfigureerd:

$$30240[0] = 1$$

Aangezien er meerdere referentiepulsen voorkomen binnen het volledige bereik, is het noodzakelijk een referentiecamm te activeren:

$$MD34000[0] = 1$$

De referentieprocedure wordt uitgevoerd in modus 1:

$$MD34200[0] = 1$$

Doordat er geen rem aanwezig is op de X-as, zakt de as wanneer de aandrijving niet geactiveerd is. Daardoor start de X-as altijd op de negatieve limiet. De referentierichting moet dus altijd positief zijn. Voor de Z-as maakt de richting minder uit, maar voor de eenvoud wordt ook hier de referentierichting positief ingesteld:

$$MD34010[0] = 0$$

Het afstellen van MD34100 voor de X- en Z-as wordt besproken in hoofdstuk 7.

C-as

In subsectie 6.3 werd besproken dat het tweede meetsysteem, de directe encoder, actief gezet wordt. Deze encoder is 1:1 gekoppeld aan de C-as, wat betekent dat één volledige omwenteling van de C-as overeenkomt met één omwenteling van de encoder. Per omwenteling genereert de encoder één referentiepuls. Aangezien het bereik van de C-as beperkt is tot één volledige omwenteling (360 graden), treedt er slechts één referentiepuls op binnen dit bereik. Hierdoor is het gebruik van een referentiecamm niet nodig.

$$MD34000[1] = 0$$

Er wordt gezocht naar de referentiepuls, daarom wordt modus 1 ingesteld:

$$MD34200[1] = 1$$

De richting van referentiëren is in dit geval niet van groot belang, aangezien het om een roterende as gaat. Voor de eenvoud wordt een positieve richting gekozen:

$$MD34010[1] = 0$$

6.10 Limieten

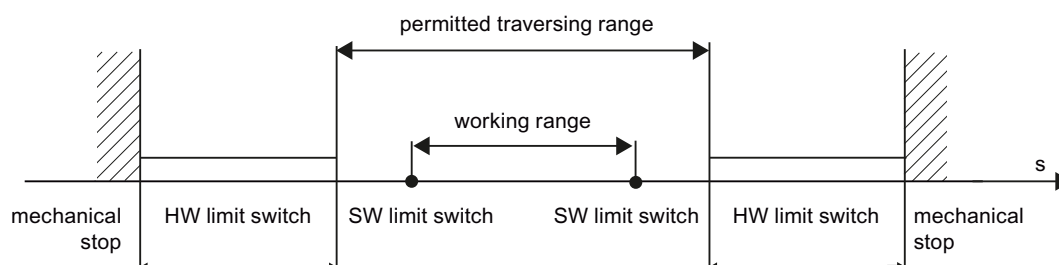
Na het refereren van de assen worden de softwarelimieten voor de X- en Z-as ingesteld met de volgende parameters (zie Figuur 6.17):

- MD36110 (\$MA_POS_LIMIT_MINUS) – limiet aan de minkant
- MD36100 (\$MA_POS_LIMIT_PLUS) – limiet aan de pluskant

Deze limieten worden pas actief nadat de as is gerefereerd. Hierdoor kan niet tegen de mechanische aanslag gereden worden zolang de softwarelimieten actief zijn.

Hardwarelimieten worden niet gebruikt in de testopstelling. Dit zijn fysieke sensoren die detecteren dat de as zich nabij de mechanische stop bevindt. Ze worden gekoppeld via de interface-DB van de betreffende as. In tegenstelling tot softwarelimieten zijn deze altijd actief, ook als de as nog niet is gerefereerd. Volgende bits kunnen hiervoor gebruikt worden:

- DBX12.0 (A_HWLlimitMinus) – minimumlimiet
- DBX12.1 (A_HWLlimitPlus) – maximumlimiet



Figuur 6.17: Overzicht van mechanische, hardwarematige en softwarematige limieten in het toegelaten verplaatsingsbereik van een as (Siemens AG, 2024c, p. 34)

6.11 Aansturen van PLC-uitgangen via het NC-programma

Het aansturen van PLC-uitgangen vanuit het PLC-programma gebeurt met behulp van *M-codes*. Deze codes worden gebruikt om machinefuncties aan te sturen, zoals het activeren van een persluchtfrees, het bedienen van koelvloeistofpompen, of het openen en sluiten van de klauwplaat.

De mapping van deze M-codes is als volgt: M00 tot en met M99 komt overeen met de bits in DB21.DBB194 tot en met DB21.DBB206. Deze mapping is bijgevoegd in Bijlage J. Elke bit in deze reeks vertegenwoordigt één M-code. Wanneer een M-code wordt aangeroepen in het NC-programma, is het bijbehorende bit gedurende één PLC-cyclus actief (hoog). Deze flank wordt vervolgens verwerkt in het PLC-gebruikersprogramma.

Een aantal M-codes heeft een vaste functie en is daarom niet vrij te gebruiken. Dit geldt onder andere voor M00 tot M05, M17, M30 en M40 tot en met M45.

Voor het aansturen van de persluchtfrees wordt M12 toegewezen aan de PLC-uitgang. Uitschakeling gebeurt via M13. Indien koelvloeistof toegepast wordt, kunnen M07 en M08 worden gebruikt voor het inschakelen van koelwater 1 en 2, en M09 voor het uitschakelen ervan.

De klauwplaat kan bijvoorbeeld worden geopend met M10 en gesloten met M11. Indien tijdens het sluiten van de klauwplaat geen asbewegingen zijn toegestaan, kan het NC-programma wachten op een bevestiging vanuit de PLC. Dit kan gerealiseerd worden via DB2 en FC10.

7. Kalibratie van de machine

In deze sectie worden de assen van de machine op elkaar afgestemd. Over dit onderwerp is relatief weinig informatie beschikbaar online of in de documentatie. De onderstaande informatie is grotendeels verkregen via Markoen Vanthuyne, productspecialist bij Siemens.

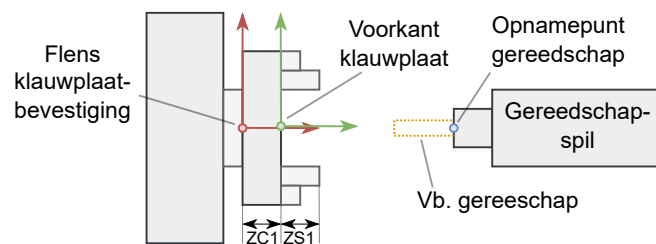
7.1 Keuze van het machinenulpunt

Voor het afstellen is een referentiepunt nodig dat als machinenulpunt dient. Dit punt geldt voor elke as als nulreferentie. Bij een draaibank zijn er twee gangbare opties. Deze hebben enkel invloed op de Z-as. De X-as ligt altijd in het draaicentrum van de hoofdspil.

1. Het nulpunt ligt op de flens van de klauwplaatbevestiging (zie Figuur 7.1). De Z-as is dan 0 wanneer het opnamepunt van het gereedschap deze flens raakt. ZC1 wordt ingesteld op de werkelijke dikte van de klauwplaat. Het voordeel hiervan is dat er flexibel gewerkt kan worden met verschillende klauwplaten, enkel door een parameter aan te passen.
2. Het nulpunt ligt op de voorkant van de klauwplaat (zie Figuur 7.1, tussen ZC1 en ZS1). In dit geval wordt ZC1 ingesteld op 0.

De afstand ZC1 kan worden ingesteld via de HMI.

Het voordeel van een van deze twee methodes is dat de lengte van het gereedschap gemeten kan worden door het opnamepunt van het gereedschap tegen de voorkant van de klauwplaat te zetten. In het eerste geval houdt de besturing rekening met de waarde van ZC1. In het tweede geval is dat niet nodig. Als daarna met het gereedschap het werkstuk wordt geraakt, komt de nulpuntverschuiving overeen met de lengte van het werkstuk. Voor deze toepassing is gekozen voor de tweede optie: het nulpunt ligt op de voorkant van de klauwplaat. Deze keuze is gemaakt omdat de klauwplaat van de testopstelling niet eenvoudig vervangen kan worden door een andere.

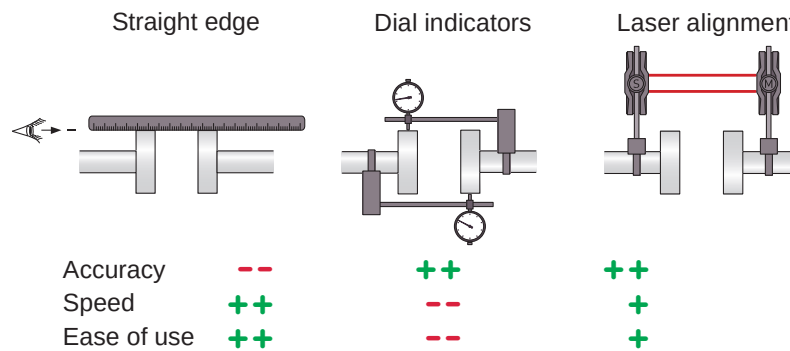


Figuur 7.1: Weergave van twee mogelijke machinenulpunten, de flens van de klauwplaatbevestiging, de voorkant van de klauwplaat en het opnamepunt van het gereedschap

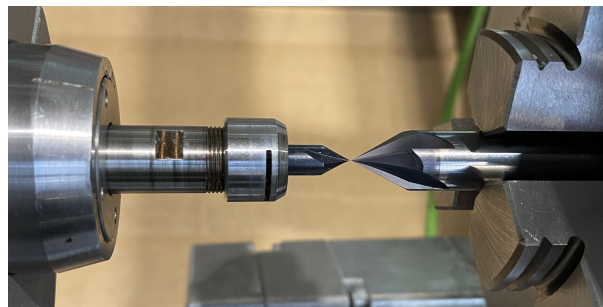
7.2 Z-as

Voor het afregelen van de Z-as wordt begonnen met MD34100 (\$MA_REFP_SET_POS) op 0. Vervolgens wordt een referentieprocedure uitgevoerd en stopt de as vlak bij de sensor. Daarna wordt de afstand gemeten tussen het opnamepunt van het gereedschap en het machinenulpunt (de voorkant van de klauwplaat). Dit kan eenvoudig door de Z-as te verplaatsen tot het opnamepunt van het gereedschap de voorkant van de klauwplaat raakt. De verplaatsing van de Z-as wordt afgelezen op de HMI en deze waarde wordt ingevoerd in MD34100 (\$MA_REFP_SET_POS). Bij het opnieuw refereren en vervolgens naar positie 0 gaan, zal het opnamepunt van het gereedschap exact tegen de voorkant van de klauwplaat staan.

In deze testopstelling is fysiek contact niet mogelijk. In dat geval wordt de Z-as zo dicht mogelijk naar de klauwplaat bewogen. De resterende afstand wordt manueel gemeten en opgeteld bij de afgelezen verplaatsing. De som van deze twee waarden wordt vervolgens ingevoerd in MD34100 (\$MA_REFP_SET_POS).



Figuur 7.2: Vergelijking van uitlijnmethoden op vlak van nauwkeurigheid, snelheid en gebruiksgemak (SKF Group, 2022, p. 3)



Figuur 7.3: Uitlijning van gereedschap en klauwplaat op het zicht

7.3 X-as

Bij het afregelen van de X-as wordt begonnen met MD34100 (\$MA_REFP_SET_POS) op 0. De as wordt vervolgens gerefereerd en stopt opnieuw vlak bij de sensor. Vanaf dat punt wordt de X-as verplaatst tot het gereedschap zich exact in het draaicentrum van de klauwplaat of het werkstuk bevindt. Eerst werd dit grof uitgelijnd via twee centerpunten in zijaanzicht, zoals te zien is in Figuur 7.3. Zodra dit visueel zo goed als perfect stond, werd met behulp van een meetklok fijn afgeregeld, zoals te zien is in Figuur 7.2. De positie die dan op de X-as wordt afgelezen, wordt ingevoerd in MD34100 (\$MA_REFP_SET_POS), maar met omgekeerd teken. Bij een volgende referentie en een verplaatsing naar $X = 0$ staat het gereedschap exact gecentreerd ten opzichte van de klauwplaat.

7.4 C-as

De derde vrijheidsgraad die afgeregeld moet worden, is de C-as. In deze testopstelling is de C-as gemonteerd op ITEM-profielen en kan de C-as horizontaal verschoven worden. Zo wordt ervoor gezorgd dat de X-as perfect snijdt door het centrum van de C-as. Dit is een mechanische afregeling, in tegenstelling tot de X- en Z-as, waarbij het nulpunt ingesteld kan worden door de as elektrisch te verplaatsen. Het afregelen van de C-as gebeurde tegelijk met dat van de X-as. Eerst werd visueel gecontroleerd (in bovenaanzicht) of het centerpunt van het gereedschap overeenkwam met het centerpunt van de klauwplaat. De afregeling gebeurde door de C-as horizontaal lichtjes te verschuiven met een rubberen hamer. Daarna werd fijn afgeregeld met behulp van een meetklok.

7.4.1 Voordeel van een Y-as bij het afregelen van X ten opzichte van C

Buiten de extra bewerkingsmogelijkheid van een Y-as, zoals besproken in Figuur 2.5 op pagina 7, is er nog een belangrijk voordeel bij het afregelen van de X-as in het centrum van de C-as. Wanneer een Y-as aanwezig is, kan de X-as afgeregeld worden in het center van de C-as door de Y-as elektrisch te verplaatsen in plaats van dit mechanisch in te stellen zoals hierboven beschreven. Dit maakt het afregelen veel fijner en eenvoudiger.

8. Testresultaten en bevindingen

Het materiaal waarin werd verspaand is POM-C (Ertacetal C), een copolymeer kunststof die geschikt is voor toepassingen in de voedingsindustrie. Dit materiaal bleek zeer eenvoudig te verspanen, ondanks de verhoogde snijsnelheid veroorzaakt door de constante rotatiesnelheid van de gereedschapspil van 40.000 omw/min (Bijlage E.6, p. 119).

Tijdens de bewerkingen werd geen gebruik gemaakt van actieve spaanafvoer. Hoewel dit in deze context geen directe problemen gaf, is het in productieomstandigheden wel aan te raden. Er zijn twee gebruikelijke methoden voor spaanafvoer:

- Perslucht gecombineerd met een olienevel
- Koelvloeistof

Beide methoden zorgen voor een betere spaanverwijdering en verlengen de standtijd van het gereedschap.

De gereedschapspil was uitgerust met een ER11-spantang. Er werden twee gereedschappen met een diameter van 6 mm gebruikt: een vierlippige vingerfrees geschikt voor aluminium, en een conische graveerfrees met een punthoek van 90°, gebruikt voor het afschuinen van randen en graveren.

Zoals eerder vermeld was de rotatiesnelheid van de gereedschapspil constant 40.000 omw/min, wat met een frees van 6 mm neerkomt op een snijsnelheid v_c van

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n = \pi \cdot 6 \text{ mm} \cdot 40.000 \text{ omw/min} \approx 754 \text{ m/min} \quad (8.1)$$

Dit ligt boven de aanbevolen snijsnelheid voor POM-C, die tussen 200 en 500 m/min ligt. Er werd geprobeerd de snelheid van de persluchtspil te regelen door de druk en het debiet aan te passen, maar dit had nadelige gevolgen voor het koppel. De frees stopte daarbij onmiddellijk bij contact met het werkstuk.

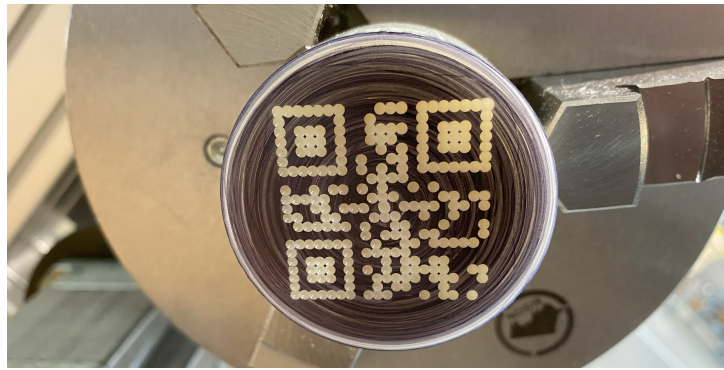
Met de axiale diepte a_p en radiale insnijding a_e werd geëxperimenteerd. Bij het sleuffrezen was de radiale insnijding gelijk aan de volledige freesdiameter, dus 6 mm, en werd $a_p = 1 \text{ mm}$ genomen. Bij niet-sleuffrezen werd $a_p = 2 \text{ mm}$ en $a_e = 1 \text{ mm}$ genomen, waarbij met een aanzienlijk hogere voeding kon gewerkt worden.

Hieronder zijn enkele werkstukken weergegeven die vervaardigd werden met de testopstelling. In Figuur 8.1 is het tweede gewenste werkstuk te zien, zoals besproken op pagina 3. De contour werd geëxporteerd als .dxf-bestand uit Autodesk Inventor en geïmporteerd in ShopTurn op de Sinumerik One. De groene kleur werd met een stift aangebracht om de contour beter zichtbaar te maken.

In Figuur 8.2 is een gegraveerde QR-code te zien, vervaardigd met een graveerfrees. De bewerking werd geprogrammeerd in ShopTurn met behulp van de *Sinumerik Machining Technology Extension (SMTE) "QR code"*. Ook de bewerkingen in Figuur 8.3 en Figuur 8.4 zijn geprogrammeerd via ShopTurn.



Figuur 8.1: Resultaat: Gewenste vorm 2



Figuur 8.2: Resultaat: QR-code



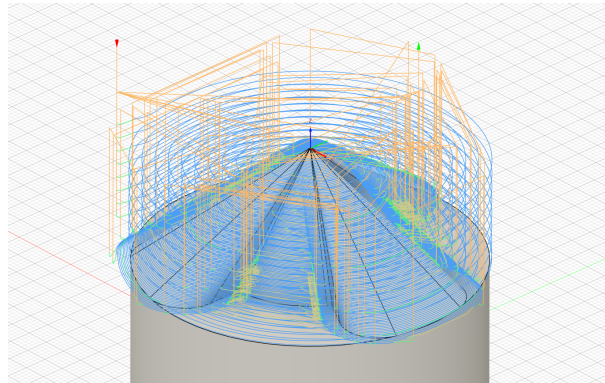
Figuur 8.3: Resultaat: Tekst graveren



Figuur 8.4: Resultaat: 2de gewenste werkstuk met een vierkant

Voor de bewerking weergegeven in Figuur 8.6 werd gebruikgemaakt van de software *Fusion 360*. Dit is een CAD/CAM-programma dat op basis van een 3D-tekening de bijhorende freespaden genereert, zoals te zien is in Figuur 8.5. Vanuit deze software wordt een bestand met G-code geëxporteerd, dat vervolgens ingeladen wordt in de Sinumerik One-besturing.

Het model in kwestie is een geëxtrudeerde variant van de tweede gewenste vorm, zoals eerder beschreven, waarbij de vorm oploopt tot een centrale punt in de Z-richting.



Figuur 8.5: CAM-weergave van de geëxtrudeerde tweede gewenste vorm in Fusion 360



Figuur 8.6: Resultaat: geëxtrudeerde tweede gewenste vorm

Ten slotte werd ook een concentrisch conisch gat vervaardigd, zoals mogelijk is met de huidige machineconfiguratie (zie pagina 3). Van deze bewerking is geen foto bijgevoegd, omdat het resultaat visueel moeilijk waarneembaar is. Waar in de bestaande machineopstelling een slijper wordt ingezet, werd hier gebruikgemaakt van een frees. Een concentrisch uitgevoerde bewerking maakt het mogelijk om de hoofdspil met het werkstuk aan een constant toerental (bijvoorbeeld 200 omw/min) te laten roteren, terwijl de X- en Z-as gelijktijdig bewegen. Op die manier ontstaat een conisch gat.

Een belangrijk voordeel van deze methode is de verbeterde oppervlaktekwaliteit ten opzichte van een niet-concentrisch uitgevoerde conische vorm, zoals te zien is in Figuur 8.5 en Figuur 8.6. Bij een niet-concentrische bewerking treedt onvermijdelijk laagvorming op, vergelijkbaar met het effect bij 3D-printing.

9. Algemeen besluit

De centrale onderzoeksvraag van deze bachelorproef was: wat moet er aan de bestaande CNC-draaibank aangepast worden om de complexe bewerkingen op het kopvlak van een as, weergegeven in Figuur 1.6, mogelijk te maken? Uit het onderzoek blijkt dat deze vraag positief beantwoord kan worden. Door een combinatie van voorstudie, simulatie en praktische evaluatie is een werkende methode ontwikkeld waarmee de machine kan worden uitgebreid.

In de eerste fase werd een uitgebreide voorstudie uitgevoerd. Daarbij werd de bestaande machine geanalyseerd en onderzocht welke wijzigingen nodig waren. Ook werd een vergelijking gemaakt tussen twee mogelijke besturingssystemen. Op basis van deze analyse bleek dat de Sinumerik One-besturing de meest geschikte keuze is voor dit type toepassing.

Tijdens de tweede fase werd de Create My Virtual Machine (CMVM)-software gebruikt om een virtuele versie van de bestaande machine op te bouwen. Hierop werd de uitbreiding gesimuleerd en het eerste deel van de inbedrijfname virtueel uitgevoerd.

In een derde fase werd een testopstelling ontworpen om het concept verder te evalueren. Bij het mechanisch ontwerp werden de noodzakelijke controleberekeningen uitgevoerd om de betrouwbaarheid van de opstelling te garanderen. In het elektrisch gedeelte werd de besturingskast bekabeld en werd het tweede deel van de inbedrijfname uitgevoerd met de Sinumerik One-besturing.

De Sinumerik One-besturing is krachtig en biedt uitgebreide functionaliteit. Deze veelzijdigheid gaat gepaard met een steile leercurve, vooral voor gebruikers zonder voorkennis. Zodra het inbedrijfnameproces gekend is, blijkt het systeem echter zeer gebruiksvriendelijk en efficiënt in vergelijking met een klassieke PLC-omgeving, waar veel handmatige configuratie vereist is.

Tijdens het afregelen werd duidelijk dat het bouwen van een precisiemachine zeer nauwkeurige afstelling vereist. Kleine mechanische afwijkingen kunnen merkbare effecten hebben op de prestaties. Hoewel dit niet de kern van het project was, vormt dit een belangrijk aandachtspunt voor verdere toepassing.

De testen uitgevoerd op de gerealiseerde testopstelling bevestigen dat de gekozen methode geschikt is om de gewenste functionaliteit toe te voegen aan de bestaande machine. Alle stappen van dit traject zijn nauwkeurig gedocumenteerd en kunnen dienen als basis voor toekomstige projecten waarbij een gelijkaardige uitbreiding vereist is.

Bibliografie

- ABB Drives. (2017). *Technical guide no. 6 – guide to harmonics with ac drives*. Verkregen van https://library.e.abb.com/public/bc35ffb4386c4c039e3a8ec20cef89c5/Technical_guide_No_6_3AFE64292714_RevF_EN.pdf (Geraadpleegd op 7 april 2025)
- Architect Naert. (2024). *Cadcamatic torhout - projectoverzicht*. Verkregen van <https://www.architectnaert.be/projects/cadcamatic-torhout/> (Geraadpleegd op 20 december 2024)
- Beckhoff. (z.d.). *Inertia ratio*. Verkregen van https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc_motion_designer/2765030667.html&id= (Geraadpleegd op 5 mei 2025)
- BobCAD/CAM. (2020). *Understanding polar vs longhand g-code for mill turn*. Verkregen van <https://www.youtube.com/watch?v=bQN6vORLdo4> (Geraadpleegd op 12 mei 2025)
- Cadcamatic. (2018). *Manual grinding machine*. (Geraadpleegd op 1 februari 2025)
- Cadcamatic. (2024). *Cadcamatic - specialist in mechatronica, matrijzenbouw en automatisering*. Verkregen van <https://www.cadcamatic.be> (Geraadpleegd op 20 december 2024)
- CADEM Technologies Pvt Ltd. (2024). *Positioning accuracy and repeatability in cnc turning – example*. Verkregen van <https://cadem.com/positioning-accuracy-and-repeatability-example> (Geraadpleegd op 15 juni 2025)
- CNC Cookbook. (2023). *How to calculate cutting force when machining*. Verkregen van <https://www.cnccookbook.com/how-to-calculate-cutting-force-when-machining/> (Geraadpleegd op 28 april 2025)
- EMC Directory. (2024). *What is an emi filter?* Verkregen van <https://www.emc-directory.com/community/what-is-an-emi-filter> (Geraadpleegd op 7 april 2025)
- ENCY. (2024). *Polar interpolation - ency user manual*. Verkregen van <https://docs.encycam.com/ENCY/1/en/10083.html> (Geraadpleegd op 25 februari 2025)
- Gürocak, H. (2016). *Industrial motion control: Motor selection, drives, controller tuning, applications*. John Wiley & Sons, Ltd. Verkregen van <https://www.wiley.com/en-us/Industrial+Motion+Control%3A+Motor+Selection%2C+Drives%2C+Controller+Tuning%2C+Applications-p-9781118350812> (Geraadpleegd op 6 mei 2025)
- K., H., B., C., P., H., S., A. H., D., W. & L., B. (2018). *Industriële productie (zesde druk)*. (Geraadpleegd op 19 februari)
- Lee, K.-H. (2017). *Speed estimation and sensorless control of alternating current motors*. Verkregen van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012812138200009X> (Geraadpleegd op 7 april 2025)
- Meriaho, J. (2020). *Sinumerik one - thinking motion control further*. Verkregen van <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a746842e-8613-460b-9602-95295da53079/Sinumerik-One-slides-EN.pdf> (Geraadpleegd op 1 februari 2025)
- MISUMI. (2014). *Single axis actuators catalog*. Verkregen van <https://uk.misumi-ec.com/files/images/products/docs/actuators.pdf> (Geraadpleegd op 14 mei 2025)
- MISUMI. (2019). *Couplings – high rigidity & high precision disc clamping*. Verkregen van https://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2019/2019_US_1094_001.pdf (Geraadpleegd op 24 april 2025)
- Mitsubishi Electric Corporation. (2008). *700/70 series programming manual (lathe system)*. Verkregen van <https://www.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/cnc/ib1500057/ib1500057f.pdf> (Geraadpleegd op 25 februari 2025)
- Newport Corporation. (2024). *Motion control theory terminology*. Verkregen van <https://www.newport.com/n/control-theory-terminology> (Geraadpleegd op 25 februari 2025)
- Nordin, M. & Gutman, P.-O. (2002). *Controlling mechanical systems with backlash – a survey*. Verkregen van https://www.researchgate.net/publication/222691222_Controlling_mechanical_systems_with_backlash_-_A_survey (Geraadpleegd op 13 mei 2025)

- OmniTurn. (2019). *OmniTurn operator and maintenance manual*. Verkregen van http://www.omniturn.com/bin/plane_switching_01.html (Geraadpleegd op 20 december 2024)
- Oriental Motor. (2009). *Ezs ii series - motorized linear slides, general catalog 2009/2010*. Verkregen van https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/2009-2010/D/usa_limo_ezs2.pdf (Geraadpleegd op 24 april 2025)
- PILZ GmbH & Co. KG. (2023). *Operating manual pnoz x3: Emergency-stop and safety-gate monitoring*. Verkregen van https://www.pilz.com/download/open/PNOZ_X3_Operating_Manual_20547-EN-14.pdf (Geraadpleegd op 8 juni 2025)
- RealPars. (2025). *Motion control systems: Essential components and their roles*. Verkregen van <https://www.realpars.com/blog/motion-control-components> (Geraadpleegd op 16 juni 2025)
- Regus, M., Patalas, A., Łabudzki, R., Sarbinowski, F. & Talar, R. (2018). *Studies of polygons accuracy shaped by various methods on universal cnc turning center*. Verkregen van <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012097> (Geraadpleegd op 13 mei 2025)
- Siemens AG. (2018). *Sinumerik live - turn-milling with c and y axes*. Verkregen van https://static.dc.siemens.com/cnc4you/tips-n-tricks/SINUMERIK-live/SINUMERIK_live_turn-milling_EN.pdf (Geraadpleegd op 5 maart 2025)
- Siemens AG. (2020a). *Sinamics - low voltage engineering manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/83180185/engineering-manual-sinamics-g130-g150-s120-chassis-s120-cabinet-modules-s150?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 24 februari 2025)
- Siemens AG. (2020b). *Sinamics s120 – machine data parameters*. Verkregen van <https://www.industry-mobile-support.siemens-info.com/en/article/detail/109925892> (Geraadpleegd op 13 juni 2025)
- Siemens AG. (2021a). *1fk7 g2 synchronous motors – operating instructions*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109743519/simotics-s-1fk7-g2-synchronous-motors?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 10 juni 2025)
- Siemens AG. (2021b). *Sinumerik: Intelligent solutions for machine tools*. Verkregen van <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/solutions-for-machine-tools/cnc4you/magazine.html> (Geraadpleegd op 18 december 2024)
- Siemens AG. (2022a). *Cnc4you magazine e-magazine, edition 2022-2*. Verkregen van https://static.dc.siemens.com/cnc4you/magazines/e-magazines/2022-2/EN/index.html?ste_sid=77c45549de3e7e7805e47c2314c9981c (Geraadpleegd op 2 november 2024)
- Siemens AG. (2022b). *Simatic s7-1500t kinematics language (lkinlang)*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109767009/simatic-s7-1500t-kinematics-language?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 14 mei 2025)
- Siemens AG. (2022c). *Sinumerik: Intelligent solutions for machine tools*. Verkregen van <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/solutions-for-machine-tools/cnc4you/magazine.html> (Geraadpleegd op 18 december 2024)
- Siemens AG. (2023a). *Ncu 1740 equipment manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109977460/sinumerik-one-ncu-1740?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 28 oktober 2024)
- Siemens AG. (2023b). *Ppu 1740 equipment manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109823074/sinumerik-one-ppu-1740?lc=en-be> (Geraadpleegd op 28 oktober 2024)
- Siemens AG. (2023c). *S7-1500t kinematics functions v8.0 as of step 7 v19*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109817886/simatic-s7-1500-s7-1500t-kinematics-functions-v8-0-as-of-step-7-v19?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 13 oktober 2024)

- Siemens AG. (2023d). *Sinamics s120 booksize power units - equipment manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109978082/sinamics-s120-booksize-power-units?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 3 april 2025)
- Siemens AG. (2023e). *Sinamics s120/s150: List manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109827046/sinamics-s120-s150> (Geraadpleegd op 14 juni 2025)
- Siemens AG. (2024a). *Siemens and fanum: game changers in 5-axis machining for the most demanding applications*. Verkregen van <https://industryinsider.eu/metalworking/machine-tools-digital-twin/> (Geraadpleegd op 26 mei 2025)
- Siemens AG. (2024b). *Simatic s7-1500t library kinematics language (lkinctrl)*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755891/simatic-s7-1500t-kinematics-control?dti=0&lc=en-C0> (Geraadpleegd op 14 mei 2025)
- Siemens AG. (2024c). *Simatic step 7 (s7-1200) motion control v6.0 to v8.0 in the tia portal (as of v17)*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109973965/simatic-step-7-s7-1200-motion-control-v6-0-to-v8-0-in-the-tia-portal-as-of-v17?dti=0&lc=en-BY> (Geraadpleegd op 14 juni 2025)
- Siemens AG. (2024d). *Sinumerik one - axes and spindles function manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com> (Geraadpleegd op 28 maart 2025)
- Siemens AG. (2024e). *Sinumerik one - final commissioning steps*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109973977/sinumerik-one-final-steps-for-commissioning?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 24 februari 2025)
- Siemens AG. (2024f). *Sinumerik one - monitoring and compensating, function manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109987312/sinumerik-one-monitoring-and-compensating?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 24 april 2025)
- Siemens AG. (2024g). *Sinumerik one - nc programming manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109974190/sinumerik-one-nc-programming?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 16 april 2025)
- Siemens AG. (2024h). *Sinumerik one ncu 1750 – equipment manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109977470/sinumerik-one-ncu-1750?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 3 april 2025)
- Siemens AG. (2024i). *Sinumerik one safety integrated - commissioning manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109987318/sinumerik-one-safety-integrated?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 8 juni 2025)
- Siemens AG. (2024j). *Sinumerik one - transformations function manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109973970/sinumerik-one-transformations?dti=0&lc=en-BE> (Geraadpleegd op 4 maart 2025)
- Siemens AG. (2024k). *Sinumerik one – commissioning from virtual to real*. (Geraadpleegd op 3 april 2025)
- Siemens AG. (2024l). *Sinumerik - sinuturn xzyc sub machine documentation turning*. (Geraadpleegd op 27 februari 2025)
- Siemens AG. (2024m). *Switching from sinumerik 840d sl to sinumerik one - training manual*. Verkregen van <https://support.industry.siemens.com> (Geraadpleegd op 6 maart 2025)
- Siemens AG. (2025). *Sinumerik one ncu 1750 with plc-1500f incl. twin fan module*. Verkregen van <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6FC5317-5AA00-0AA1> (Geraadpleegd op 3 april 2025)
- SKF Group. (2022). *Shaft alignment tools*. Verkregen van https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968044c54f-11443EN_ShaftAlignmentTools_tcm_12-263547.pdf (Geraadpleegd op 10 juni 2025)
- Smartlathe Machinery. (2023). *A summary of mill-turn technology*. Verkregen van <https://www.smartlathe.com/blogs/a-summary-of-mill-turn-technology> (Geraadpleegd op 7 juni 2025)

- Star Micronics. (2020). *Sv-20r swiss-type automatic lathe*. Verkregen van <https://lenima.se/wp-content/uploads/2020/05/SV-20R.pdf> (Geraadpleegd op 30 april 2025)
- THK. (2016). *Accuracy standards*. Verkregen van <https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/2015-2016/E/THK-Accuracy-Standards.pdf> (Geraadpleegd op 14 mei 2025)
- Van der Jeught, E. (2024). *Harmonics, emc, leakage currents & other effects around drives*. (Geraadpleegd op 17 april 2025)
- Winsmith. (z.d.). *Speed reducer backlash*. Verkregen van <http://dpk3n3gg92jwt.cloudfront.net/domains/winsmith3d/Backlash.pdf> (Geraadpleegd op 24 april 2025)
- Yates, J. (2023). *What are emi filters?* Verkregen van <https://blog.knowlescapacitors.com/blog/what-are-emi-filters> (Geraadpleegd op 7 april 2025)
- Zhang, D., Chen, X. & Du, R. (2013). *A cnc program module based on polar coordinate system*. Verkregen van https://www.researchgate.net/publication/257337791_A_CNC_program_module_based_on_polar_coordinate_system (Geraadpleegd op 30 april 2025)
- Ziegert, J. (2021). *Cutting forces in milling: The formula for successful workholding*. Verkregen van <https://www.ame.com/workholding-wisdom-posts/2021/03/01/cutting-forces-in-milling/> (Geraadpleegd op 28 april 2025)

A. Sinumerik-modellen

Hier volgt een kort overzicht van de verschillende modellen binnen de Sinumerik-reeks.

- **Sinumerik 808**

- Instapmodel voor eenvoudige draai- en freesmachines
- Maximaal 6 assen
- Simatic S7-200-gebaseerde PLC
- Sinamics V70-aandrijving, Simotics S-1FL6-motor



Sinumerik 808 met compatibele aandrijving (Siemens AG, 2022c, p. 6).

- **Sinumerik 828**

- Compacte en geavanceerde CNC voor standaardmachines
- Maximaal 10 assen en 2 hulpassen
- Simatic S7-200 PLC
- Sinamics S120 Booksize/Combi-aandrijvingen, Simotics-motoren



Sinumerik 828 met compatibele aandrijvingen (Siemens AG, 2022c, p. 6).

- **Sinumerik 840**

- Premium CNC voor complexe machines
- Maximaal 31 assen per NCU
- Simatic S7-300 PLC
- Sinamics S120/Combi/Chassis-aandrijvingen, Simotics-motoren



Sinumerik 840 met compatibele aandrijvingen (Siemens AG, 2022c, p. 7).

- **Sinumerik One**

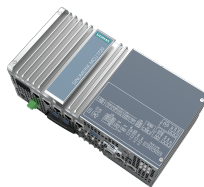
- Volledige integratie met TIA Portal
- Maximaal 12 assen (laagste versie: PPU en NCU 1740)
- Simatic S7-1500F PLC
- Sinamics S120 Booksize/Combi/Chassis-aandrijvingen, Simotics-motoren



Sinumerik One PPU en NCU met compatibele aandrijvingen (Siemens AG, 2022c, p. 7).

- **Sinumerik MC**

- Industriële PC-gebaseerde besturing
- Maximaal 8 assen
- Simatic S7-1500F PLC
- Sinamics S120 Booksize met CU320, Sinamics S210-aandrijvingen, Simotics-motoren



Sinumerik MC met compatibele componenten (Siemens AG, 2022c, p. 7).

With SINUMERIK, you can use all machining technologies	SINUMERIK 808	SINUMERIK 828	SINUMERIK 840	SINUMERIK ONE	SINUMERIK MC
Turning	✓	✓	✓	✓	–
Milling	✓	✓	✓	✓	–
Grinding	–	✓	✓	✓	✓
Multitasking	–	–	✓	✓	–
Additive Manufacturing	–	–	✓	✓	✓
Gear machining	–	✓ ¹⁾	✓	✓	–
Nibbling, laser, water jet and plasma machining	–	–	✓	✓	✓
Machining composites	–	–	✓	✓	–
Automated cell	–	✓	✓	✓	✓

1) Option: CP-Comfort

Overzicht van beschikbare bewerkingstechnologieën per Sinumerik-model (Siemens AG, 2021b, p. 21).

B. Berekeningen massatraagheidsmoment en -verhouding

Z-as

Gevraagd: Van aandrijflijn Z: Massatraagheidsmoment
Massatraagheidsmomentverhouding

Gegeven:

Motor:

$$J_{motor} := 0.28 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Koppeling:

$$J_{koppeling} := 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 0.11 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Z-slede: (Zonder cover C)

$$J_{slede} := 2723 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

$$p := 10 \text{ mm} \quad \text{Spoed (MD31030)}$$

Gereedschap:

$$m_{tool} := (2 \cdot 0.334 + 0.487 + 1.13) \text{ kg} = 2.3 \text{ kg} \quad \text{Uit datasheet en Inventor}$$

Totale massa van het gereedschap op de
wagen van de slede

Oplossing:

Omrekenen van de massa van het gereedschap naar een
massatraagheidsmoment op de spindel

$$J_{load} := m_{tool} \cdot \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 = 0.0579 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Het totale massatraagheidsmoment van de aandrijflijn:

$$J_{last} := J_{koppeling} + J_{slede} + J_{load} = 0.4402 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Massatraagheidsmomentverhouding:

$$\lambda := \frac{J_{last}}{J_{motor}} = 1.6$$

X-as

Gevraagd: Van aandrijflijn X: Massatraagheidsmoment
Massatraagheidsmomentverhouding

Gegeven:

Motor:

$$J_{motor} := 0.28 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Koppeling:

$$J_{koppeling} := 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 0.11 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Slede: (Zonder cover C)

$$J_{slede} := 3113 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

$$p := 10 \text{ mm} \quad \text{Spoed (MD31030)}$$

Z slede:

$$m_{sledeZ} := 7.23 \text{ kg} \quad \text{Uit datasheet}$$

$$m_{tool} := (2 \cdot 0.334 + 0.487 + 1.13) \text{ kg} = 2.3 \text{ kg} \quad \text{Uit Inventor}$$

$$m_{koppelplaat} := 0.349 \text{ kg} \quad \text{Uit Inventor}$$

$$m_{motorZ} := 1.8 \text{ kg} \quad \text{Uit datasheet}$$

$$m_{load} := m_{koppelplaat} + m_{sledeZ} + m_{tool} + m_{motorZ} = 11.7 \text{ kg}$$

Oplossing:

Omrekenen van de massa van het gereedschap naar een massatraagheidsmoment op de spindel

$$J_{load} := m_{load} \cdot \left(\frac{p}{2 \pi} \right)^2 = 0.295 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Het totale massatraagheidsmoment van de aandrijflijn:

$$J_{last} := J_{koppeling} + J_{slede} + J_{load} = 0.717 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Massatraagheidsmomentverhouding:

$$\lambda := \frac{J_{last}}{J_{motor}} = 2.6$$

C-as voor reductie

Gevraagd: Van aandrijflijn C: Massatraagheidsmoment
Massatraagheidsmomentverhouding

Gegeven:

Motor:

$$J_{motor} := 3.45 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Klembus 1:

$$J_{klembus1} := 16.431 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Poelie 1:

$$J_{poelie1} := 43.304 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 0.4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Overbrengingsverhouding:

$$i := \frac{40}{18} = 2.2$$

Klembus 2:

$$J_{klembus2} := 68.994 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 0.69 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Poelie 2:

$$J_{poelie2} := 1362.062 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 13.6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

As:

$$J_{as} := 167.769 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 1.68 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Flens:

$$J_{flens} := 19113.736 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 191 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Klauwplaat:

$$J_{klauwplaat} := 32637.893 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 326 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Werkstuk:

$$l := 50 \text{ mm} \quad d := 150 \text{ mm} \quad \rho_{AL} := 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{POM} := 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$J_{werkstuk} := \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\pi}{32} \cdot \rho_{AL} \cdot l \cdot d^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 67 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Encoder:

$$J_{encoder} := 0.00000145 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 0.0145 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

$$J_{koppeling;encoder} := 3.16 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 0.00316 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

-> te verwaarlozen

Oplossing:

De inertie voor de overbrenging:

$$J_{direct} := J_{klembus1} + J_{poelie1} = 0.597 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

De inertie na de overbrenging -> teruggerekend naar motor:

$$J_{teruggerekend} := \frac{(J_{poelie2} + J_{klembus2} + J_{as} + J_{flens} + J_{klauwplaat} + J_{werkstuk})}{i^2} = \begin{bmatrix} 108 \\ 121.6 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Totale last inertie aan motor:

$$J_{last} := J_{direct} + J_{teruggerekend} = \begin{bmatrix} 108.6 \\ 122.2 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Lambda: traagheidsverhouding tussen motor en last:

$$\lambda := \frac{J_{last}}{J_{motor}} = \begin{bmatrix} 31.5 \\ 35.4 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Bovenste: zonder werkstuk} \\ \text{Onderste: met werkstuk} \end{array}$$

C-as na reductie

Gevraagd: Van aandrijflijn C: Massatraagheidsmoment en massatraagheidsmomentverhouding

Gegeven:

Motor:

$$J_{motor} := 3.45 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Reductor:

$$J_{reductor} := 1.431 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

$$i_1 := 8$$

Klembus 1:

$$J_{klembus1} := 67.837 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 0.678 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Poelie 1:

$$J_{poelie1} := 152.011 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 1.52 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Riem:

$$i_2 := \frac{40}{24} \quad r_1 := \frac{76.39}{2} \text{ mm} \quad m_{riem} := 67.584 \text{ gm} \quad \text{Uit datasheet}$$

$$J_{riem} := m_{riem} \cdot r_1^2 = 0.986 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Klembus 2:

$$J_{klembus2} := 68.994 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 0.69 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Poelie 2:

$$J_{poelie2} := 1362.062 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 13.6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

As:

$$J_{as} := 167.769 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 1.68 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Flens:

$$J_{flens} := 19113.736 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 191 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit Inventor}$$

Klauwplaat:

$$J_{klauwplaat} := 32637.893 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 326 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

Encoder:

$$J_{encoder} := 0.00000145 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 0.0145 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

$$J_{koppeling;encoder} := 3.16 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 0.00316 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad \text{Uit datasheet}$$

-> te verwaarlozen

Werkstuk:

$$l := 50 \text{ mm} \quad d := 150 \text{ mm} \quad \rho_{AL} := 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{POM} := 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$J_{werkstuk} := \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\pi}{32} \cdot \rho_{AL} \cdot l \cdot d^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 67 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Oplossing:

Het massatraagheidsmoment direct op de motor as (A)

$$J_A := J_{reductor}$$

Het massatraagheidsmoment na reductor en voor riemoverbrenging (B)

$$J_B := J_{klembus1} + J_{poelie1} + J_{riem}$$

Het massatraagheidsmoment na riemoverbrenging (C)

$$J_C := J_{klembus2} + J_{poelie2} + J_{as} + J_{klauwplaat} + J_{flens} + J_{werkstuk} = \begin{bmatrix} 534 \\ 601 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Deze worden teruggerekend naar een equivalente inertie aan de motor (A):

$$J_B' := \frac{J_B}{i_1^2} = 0.05 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$J_C' := \frac{J_C}{(i_1 \cdot i_2)^2} = \begin{bmatrix} 3 \\ 3.38 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Totale last massatraagheid aan motor:

$$J_{last} := J_A + J_B' + J_C' = \begin{bmatrix} 4.48 \\ 4.86 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

Lambda: tussen massatraagheidsverhouding motor en last:

$$\lambda := \frac{J_{last}}{J_{motor}} = \begin{bmatrix} 1.3 \\ 1.4 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Bovenste: zonder werkstuk} \\ \text{Onderste: met werkstuk} \end{array}$$

C. Berekeningen maximale acceleratie

Maximale acceleratie X- en Z-as

Gevraagd: Maximum acceleratie X- en Z-as

Gegeven:

Motor/ omvormer:

$$I_{max;MM} := 6 \text{ A} \quad \text{p67: De maximale stroom van de motor module (MM)}$$

$$I_{max;motor} := 7.35 \text{ A} \quad \text{p232: De maximale stroom van de motor}$$

$$k_T := 0.46 \frac{(N \cdot m)}{A} \quad \text{p316: Koppel constante}$$

$$M_{max;el} := 0.8 \cdot I_{max;MM} \cdot k_T = 2.2 \text{ N} \cdot m \quad (0.8 = \text{veiligheidsfactor aandrijving voor toekomstige wrijving})$$

Koppeling:

$$M_{max;koppeling} := 4 \text{ N} \cdot m \quad \text{Max koppel van koppeling (uit datasheet)}$$

Slede:

$$F_{max;slede} := 4106 \text{ N} \quad \text{Uit datasheet}$$

$$p := 10 \text{ mm} \quad \text{MD31030: Spoed}$$

$$M_{max;slede} := F_{max;slede} \cdot \frac{p}{2 \pi} = 6.5 \text{ N} \cdot m$$

Oplossing:

Maximaal koppel in aandrijflijn:

$$M_{max} := \min(M_{max;el}, M_{max;koppeling}, M_{max;slede}) = 2.2 \text{ N} \cdot m$$

Het koppel dat over blijft om de as te versnellen:

$$M_{wh} := \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.091 \end{bmatrix} \text{ N} \cdot m \quad \text{Uit trace} \quad \begin{array}{l} \text{Bovenste: X-as} \\ \text{Onderste: Z-as} \end{array}$$

$$M_{acc} := M_{max} - M_{wh} = \begin{bmatrix} 1.96 \\ 2.12 \end{bmatrix} \text{ N} \cdot m$$

De maximale hoekversnelling die de motor kan halen met dit koppel:

$$J_{totaal} := \begin{bmatrix} 0.76 \\ 0.41 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$\alpha_{max;motor} := \frac{M_{acc}}{J_{totaal}} = \begin{bmatrix} 25763 \\ 51634 \end{bmatrix} \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Omgerekend naar de maximale versnelling van de slede:

$$a_{max;slede} := \alpha_{max;motor} \cdot \frac{p}{2 \pi} = \begin{bmatrix} 41 \\ 82.2 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \begin{array}{l} \text{Bovenste: X-as} \\ \text{Onderste: Z-as} \end{array}$$

Maximale acceleratie C-as

Gevraagd: Maximum acceleratie C

Gegeven:

Motor/ omvormer:

$$I_{max;motor} := 7.35 \text{ A} \quad \text{p67: De maximale stroom van de motor module (MM)}$$

$$I_{max;omvormer} := 5.3 \text{ A} \quad \text{p232: De maximale stroom van de motor}$$

$$k_T := 1.4 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}} \quad \text{p316: Koppel constante}$$

$$M_{max;el} := 0.8 \cdot I_{max;omvormer} \cdot k_T = 5.9 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (0.8 = \text{veiligheidsfactor aandrijving voor toekomstige wrijving})$$

Reductor:

$$M_{max;reduc;uit} := 192 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Uit datasheet}$$

$$i_1 := 8$$

$$M_{max;reduc} := \frac{M_{max;reduc;uit}}{i_1} = 24 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Klembus 1:

$$M_{max;klembus1} := 300 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Uit datasheet}$$

$$M_{max;klembus1} := \frac{M_{max;klembus1}}{i_1} = 37.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Riemoverbrenging:

$$i_2 := \frac{40}{24} = 1.667$$

Klembus 2:

$$M_{max;klembus2} := 290 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Uit datasheet}$$

$$M_{max;klembus2} := \frac{M_{max;klembus2}}{i_1 \cdot i_2} = 21.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Oplossing:

$$M_{max} := \min(M_{max;el}, M_{max;reduc}, M_{max;klembus1}, M_{max;klembus2}) = 5.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{wh} := 0.235 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Uit trace}$$

$$M_{ac} := M_{max} - M_{wh} = 5.701 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$J_{totaal} := 10 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{motor} + \text{last} + \text{werkstuk, ruim genomen})$$

$$\alpha_{max;motor} := \frac{M_{ac}}{J_{totaal}} = 5701 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\alpha_{max;motor} = 907 \frac{\text{rev}}{\text{s}^2}$$

$$\alpha_{max;last} := \frac{\alpha_{max;motor}}{i_1 \cdot i_2} = 428 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\alpha_{max;last} = 68 \frac{\text{rev}}{\text{s}^2}$$

D. Lijst gebruikte componenten

Component	Merk	Onderdeelnummer
Automaat (demo-rack)	Siemens	5SY5204-7
Automaat (EMAS-rack)	Vynckier	EPP33C32
Bedieningspaneel MCP 2200	Siemens	6FC5303-0AP03-0AA
Bedieningsscherm ITC V3 22"	Siemens	6AV6646-1BA22-1NA0
Encoder direct	Siemens	6FX2001-3CC50
Encodermodule (SME20)	Siemens	6SL3055-0AA00-5EA3
ET200SP digitale ingangskaart	Siemens	6ES7131-6BF01-0AA0
ET200SP digitale uitgangskaart	Siemens	6ES7132-6BD21-0BA0
ET200SP interface module	Siemens	6ES7155-6AR00-0AN0
Klembus grote poelie	Mädler	61542400
Klembus kleine poelie	Mädler	61542500
Klauwplaat	Bison	22385315
Koppeling encoder	Misumi	SCPS16-6-6
Koppeling XZ-as	Misumi	SCPW34-9-10
Lager diepgroef bij poelie	SKF	3206 A-2RS1
Lager dubbelrijig hoekcontact bij klauwplaat	SKF	61805-2RS1 (DIN 625)
Motor C-as	Siemens	1FK7042-5AF71-1FH0
Motor X/Z-as	Siemens	1FK7022-5AK71-1UG3-Z
NCU 1750	Siemens	6FC5317-5AA00-0AA0
Persluchtfrees	Air Turbine Tools	430HD
Poelie groot	Mädler	31 AT10/40-2
Poelie klein	Mädler	31 AT10/24-2
Reductor	Festo	EMGA-120-P-G8-SAS-100
Riem	Mulco	Synchroflex - Timing belt AT10-16-660.0
S120 line filter	Siemens	6SL3000-0HE21-0AA0
S120 smart line module	Siemens	6SL3130-6AE21-0AA0
S120 line reactor	Siemens	6SL3000-0CE21-0AA0
S120 motor module dubbel	Siemens	6SL3120-2TE13-0AA3
S120 motormodule enkel	Siemens	6SL3120-1TE15-0AA3
Slede X	Misumi	LX4510-B1-E4555-490
Slede Z	Misumi	LX4510-B1-E4555-390
Voeding 24VDC (EMAS-rack)	Siemens	6EP13361LB00
Voeding driefasig 24VDC (EMAS-rack)	Phoenix Contact	TRIO-PS-2G/3AC/24VDC/5

E. Specifications

E.1 Enkele motor module

© Siemens AG 2007

SINAMICS S120 drive system Booksize format for Line and Motor Modules

Single Motor Modules in booksize format

Technical specifications (continued)

DC link voltage 510 ... 720 V DC						
Order No.						
• Internal air cooling		6SL3120-1TE13-0AA3	6SL3120-1TE15-0AA3	6SL3120-1TE21-0AA3	6SL3120-1TE21-8AA3	6SL3120-1TE23-0AA3
• External air cooling		6SL3121-1TE13-0AA3	6SL3121-1TE15-0AA3	6SL3121-1TE21-0AA3	6SL3121-1TE21-8AA3	6SL3121-1TE23-0AA3
Product name						
Single Motor Modules in booksize format						
Output current						
• Rated current I_{rated}	A	3	5	9	18	30
• Base load current I_H	A	2.6	4.3	7.7	15.3	25.5
• for S6 duty (40%) I_{S6}	A	3.5	6	10	24	40
• I_{max} maximum	A	6	10	18	36	56
Power						
• with 600 V DC link voltage	kW (HP)	1.6 (1.5)	2.7 (3)	4.8 (5)	9.7 (10)	16.0 (20)
• based on I_H	kW (HP)	1.4 (1)	2.3 (2.5)	4.1 (5)	8.2 (10)	13.7 (18)
Rated pulse frequency						
	kHz	4	4	4	4	4
DC link current $I_d^{1)}$						
	A	3.6	6	11	22	36
Current capacity						
• 24 V DC busbars	A	20	20	20	20	20
If, due to a number of Line and Motor Modules being mounted side-by-side, the current carrying capacity exceeds 20 A, an additional 24 V DC connection using a 24 V terminal adapter is required (connection cross-section, max. 6 mm ² , fuse protection, max. 20 A).						
• DC link busbars	A	100	100	100	100	100
DC link capacitance						
	µF	110	110	110	220	710
Current requirement with 24 V DC, max.						
	A	0.85	0.85	0.85	0.85	0.9
Power loss						
• Internal air cooling	kW	0.035	0.055	0.080	0.165	0.290
• External air cooling int./ext. ²⁾	kW	0.015/0.015	0.023/0.03	0.035/0.045	0.075/0.09	0.08/0.210
Cooling air requirement						
	m ³ /s (ft ³ /s)	0.008 (0.283)	0.008 (0.283)	0.008 (0.283)	0.008 (0.283)	0.016 (0.565)
Sound pressure level						
	dB (A)	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60
Motor connection						
U2, V2, W2 Plug-in connector (X1) ³⁾ , max. 30 A						
Shield connection						
Integrated in connector (X1)						
PE connection						
On housing with M5 screw						
Motor brake connection						
Integrated into the plug-in motor connector (X1), 24 V DC, 2 A						
Motor cable length, max.						
• Shielded	m (ft)	50 (164)	50 (164)	50 (164)	70 (230)	70 (230)
• Unshielded	m (ft)	75 (246)	75 (246)	75 (246)	100 (328)	100 (328)
Degree of protection						
IP20						
Dimensions						
• Width	mm (in)	50 (1.97)	50 (1.97)	50 (1.97)	50 (1.97)	100 (3.94)
• Height	mm (in)	380 (14.98)	380 (14.98)	380 (14.98)	380 (14.98)	380 (14.98)
• Depth						
- with internal air cooling	mm (in)	270 (10.63)	270 (10.63)	270 (10.63)	270 (10.63)	270 (10.63)
- with external air cooling in front of/behind mounting surface	mm (in)	226/66.5 (8.9/2.6)	226/66.5 (8.9/2.6)	226/66.5 (8.9/2.6)	226/66.5 (8.9/2.6)	226/66.5 (8.9/2.6)
Weight, approx.						
• with internal air cooling	kg (lb)	5.0 (11)	5.0 (11)	5.0 (11)	5.0 (11)	6.9 (15)
• with external air cooling	kg (lb)	5.7 (13)	5.7 (13)	5.7 (13)	5.7 (13)	8.5 (19)

¹⁾ Rated DC link current for dimensioning an external DC connection. For DC link current calculation for dimensioning the Line Module, see system description "Power units/Line Modules" on the CD-ROM supplied with the catalog.

²⁾ Power loss of Motor Module at rated power without losses of 24 V DC electronics power supply.

³⁾ Not included in scope of supply, see Accessories.

E.2 Dubbele motor module

© Siemens AG 2010

SINAMICS S120 drive system Booksize format

Motor Modules
Double Motor Modules

Technical specifications (continued)

DC link voltage 510 ... 720 V DC					
• Internal air cooling		6SL3120-2TE13-0AA3	6SL3120-2TE15-0AA3	6SL3120-2TE21-0AA3	6SL3120-2TE21-8AA3
• External air cooling		6SL3121-2TE13-0AA3	6SL3121-2TE15-0AA3	6SL3121-2TE21-0AA3	6SL3121-2TE21-8AA3
• Cold plate cooling		6SL3126-2TE13-0AA3	6SL3126-2TE15-0AA3	6SL3126-2TE21-0AA3	6SL3126-2TE21-8AA3
Product name					
Double Motor Module in booksize format					
Output current					
• Rated current I_{rated}	A	2 × 3	2 × 5	2 × 9	2 × 18
• For S6 duty (40 %) I_{S6}	A	2 × 3.5	2 × 6	2 × 10	2 × 24
• Base-load current I_H	A	2 × 2.6	2 × 4.3	2 × 7.7	2 × 15.3
• I_{max}	A	2 × 6	2 × 10	2 × 18	2 × 36
Type rating¹⁾					
• Based on I_{rated}	kW (HP)	2 × 1.6 (1.5)	2 × 2.7 (3)	2 × 4.8 (5)	2 × 9.7 (10)
• Based on I_H	kW (HP)	2 × 1.4 (1)	2 × 2.3 (2.5)	2 × 4.1 (5)	2 × 8.2 (10)
DC link current $I_d^{(2)}$					
	A	7.2	12	22	43
Current carrying capacity					
• DC link busbars	A	100	100	100	100
• 24 V DC busbars	A	20	20	20	20
If, due to a number of Line and Motor Modules being mounted side-by-side, the current carrying capacity exceeds 20 A, an additional 24-V-DC connection using a 24-V terminal adapter is required (max. cross-section 6 mm ² , max. fuse protection 20 A).					
DC link capacitance					
	μF	110	220	220	705
Current requirement					
At 24 V DC, max.	A	1.0	1.0	1.0	1.0
Internal/external air cooling					
• Power loss ³⁾					
- With internal air cooling in control cabinet	kW	0.095	0.13	0.185	0.345
- With external air cooling, int./ext.	kW	0.06/0.035	0.07/0.06	0.09/0.095	0.105/0.24
• Cooling air requirement	m ³ /s (ft ³ /s)	0.008 (0.3)	0.008 (0.3)	0.008 (0.3)	0.016 (0.6)
• Sound press. level L_{pA} (1 m (3.28 ft))	dB	< 60	< 60	< 60	< 60
Cold plate cooling					
• Power loss, int./ext. ³⁾	kW	0.055/0.035	0.06/0.065	0.08/0.1	0.095/0.25
• Thermal resistance R_{th}	K/W	0.185	0.185	0.185	0.075
Motor connection					
U2, V2, W2		2 x connectors (X1, X2) ⁴⁾ , max. 30 A (not included in scope of supply, see Accessories)	2 x connectors (X1, X2) ⁴⁾ , max. 30 A (not included in scope of supply, see Accessories)	2 x connectors (X1, X2) ⁴⁾ , max. 30 A (not included in scope of supply, see Accessories)	2 x connectors (X1, X2) ⁴⁾ , max. 30 A (not included in scope of supply, see Accessories)
Shield connection					
		Integrated in connector (X1, X2)	Integrated in connector (X1, X2)	Integrated in connector (X1, X2)	Integrated in connector (X1, X2)
PE connection					
		M5 screw	M5 screw	M5 screw	M5 screw
Motor brake connection					
		Integr. into the plug-in motor connector (X1, X2), 24 V DC, 2 A	Integr. into the plug-in motor connector (X1, X2), 24 V DC, 2 A	Integr. into the plug-in motor connector (X1, X2), 24 V DC, 2 A	Integr. into the plug-in motor connector (X1, X2), 24 V DC, 2 A
Motor cable length, max.					
• Shielded	m (ft)	50 (164)	50 (164)	50 (164)	70 (230)
• Unshielded	m (ft)	75 (246)	75 (246)	75 (246)	100 (328)
Degree of protection					
		IP20	IP20	IP20	IP20
Dimensions					
• Width	mm (in)	50 (1.97)	50 (1.97)	50 (1.97)	100 (3.94)
• Height	mm (in)	380 (14.96)	380 (14.96)	380 (14.96)	380 (14.96)
• Depth					
- With internal air cooling	mm (in)	270 (10.63)	270 (10.63)	270 (10.63)	270 (10.63)
- With external air cooling, on/behind mounting surface	mm (in)	226/66.5 (8.90/2.63)	226/66.5 (8.90/2.63)	226/66.5 (8.90/2.63)	226/66.5 (8.90/2.63)
- With cold plate cooling	mm (in)	226 (8.90)	226 (8.90)	226 (8.90)	226 (8.90)
Weight, approx.					
• With internal air cooling	kg (lb)	5.3 (11.7)	5.3 (11.7)	5.3 (11.7)	6.8 (15)
• With external air cooling	kg (lb)	5.8 (12.8)	5.8 (12.8)	5.8 (12.8)	8.6 (19)
• With cold plate cooling	kg (lb)	4.5 (9.92)	4.5 (9.92)	4.5 (9.92)	5.9 (13)

¹⁾ Rated power of a standard asynchronous (induction) motor at 600 V DC link voltage.²⁾ Rated DC link current for dimensioning an external DC connection.
For instructions for calculating the DC link current when dimensioning the Line Module, see System description (on the CD-ROM supplied with the Catalog NC 61).³⁾ Power loss of Motor Module at rated power including losses of 24 V DC electronics power supply.⁴⁾ Connector not included in scope of supply, see Accessories.

E.3 Motor C

SIEMENS

Data sheet for SIMOTICS S-1FK7

Article No. : **1FK7042-5AF71-1FH0**

Engineering data	
Rated speed (100 K)	3,000 rpm
Number of poles	8
Rated torque (100 K)	2.6 Nm
Rated current	1.9 A
Static torque (60 K)	2.50 Nm
Static torque (100 K)	3.00 Nm
Stall current (60 K)	1.80 A
Stall current (100 K)	2.20 A
Moment of inertia	3.450 kgcm²
Efficiency	89.0 %

Physical constants	
Torque constant	1.40 Nm/A
Voltage constant at 20° C	89.0 V/1000*min ⁻¹
Winding resistance at 20° C	5.15 Ω
Rotating field inductance	29.0 mH
Electrical time constant	5.60 ms
Mechanical time constant	2.37 ms
Thermal time constant	30 min
Shaft torsional stiffness	16,000 Nm/rad
Net weight of the motor	5.4 kg

Mechanical data	
Motor type	Permanent-magnet synchronous motor
Motor type	Compact
Shaft height	48
Cooling	Natural cooling
Radial runout tolerance	0.040 mm
Concentricity tolerance	0.08 mm
Axial runout tolerance	0.08 mm
Vibration severity grade	Grade A
Connector size	1
Degree of protection	IP64
Design acc. to Code I	IM B5 (IM V1, IM V3)
Temperature monitoring	KTY84 temperature sensor in the stator winding
Electrical connectors	Connectors for signals and power rotatable
Color of the housing	without
Holding brake	with holding brake
Shaft end	Plain shaft
Encoder system	Encoder AM22DQ: absolute encoder 22 bits (resolution 4194304, encoder-internal 2048 S/R) + 12 bits multi-turn (traversing range 4096 revolutions)

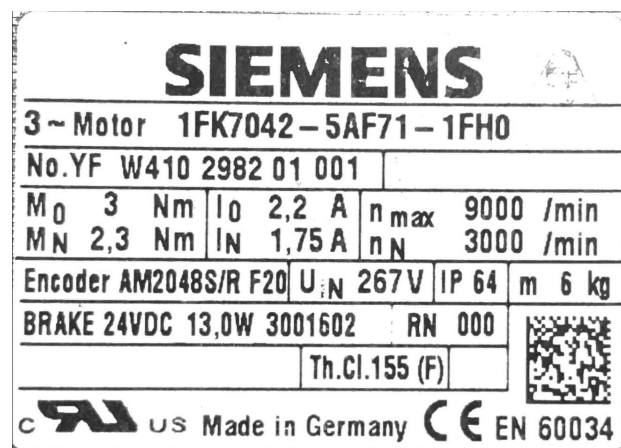
Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

Optimum operating point	
Optimum speed	3,000 rpm
Optimum power	0.8 kW

Limiting data	
Max. permissible speed (mech.)	9,000 rpm
Max. permissible speed (inverter)	6,500 rpm
Maximum torque	10.5 Nm (Indien omvormer max stroom kan leveren)
Maximum current	7.4 A (Op kenplaat staat 7A)

Holding brake	
Holding brake version	Permanent-magnet brake
Holding torque	4.0 Nm
Power supply voltage	DC 24 V ± 10 %
Coil current	0.5 A
Opening time	70 ms
Closing time	30 ms
Highest braking work	150 J

Recommended Motor Module	
Rated inverter current	3 A
Maximum inverter current	6 A
Maximum torque	8.40 Nm
= Maximale koppel dat de motor levert bij aansturing met een omvormer met een maximale stroom van 6 A.	



Generated Fri Mar 14 08:14:38 CET 2025

E.4 Motor X en Z



Data sheet for SIMOTICS S-1FK7

Article No. : 1FK7022-5AK71-1UG3

Engineering data	
Rated speed (100 K)	6,000 rpm
Number of poles	6
Rated torque (100 K)	0.6 Nm
Rated current	1.4 A
Static torque (60 K)	0.70 Nm
Static torque (100 K)	0.85 Nm
Stall current (60 K)	1.50 A
Stall current (100 K)	1.80 A
Moment of inertia	0.280 kgcm²
Efficiency	86.0 %

Physical constants	
Torque constant	0.46 Nm/A
Voltage constant at 20° C	29.0 V/1000*min ⁻¹
Winding resistance at 20° C	4.20 Ω
Rotating field inductance	9.1 mH
Electrical time constant	2.20 ms
Mechanical time constant	1.70 ms
Thermal time constant	18 min
Shaft torsional stiffness	3,000 Nm/rad
Net weight of the motor	1.8 kg

Mechanical data	
Motor type	Permanent-magnet synchronous motor
Motor type	Compact
Shaft height	28
Cooling	Natural cooling
Radial runout tolerance	0.035 mm
Concentricity tolerance	0.08 mm
Axial runout tolerance	0.08 mm
Vibration severity grade	Grade A
Connector size	1
Degree of protection	IP64
Design acc. to Code I	IM B5 (IM V1, IM V3)
Temperature monitoring	Pt1000 temperature sensor
Electrical connectors	Connectors for signals and power rotatable
Color of the housing	Standard (Anthracite RAL 7016)
Holding brake	without holding brake
Shaft end	Plain shaft
Encoder system	Resolver R15DQ: resolver 15 bits (resolution 32768, internal multi-pole)

Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

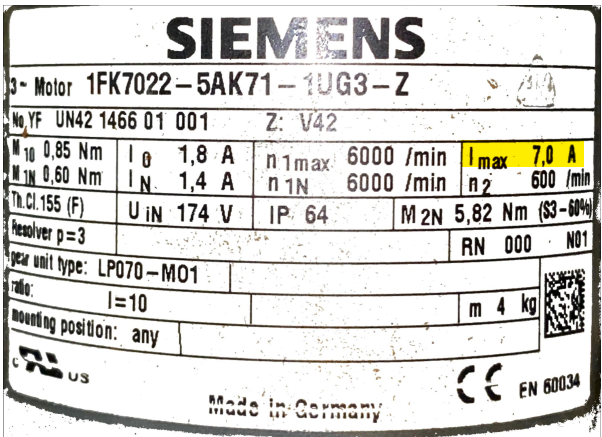
Optimum operating point	
Optimum speed	6,000 rpm
Optimum power	0.4 kW

Limiting data	
Max. permissible speed (mech.)	10,000 rpm
Max. permissible speed (inverter)	10,000 rpm

Maximum torque	3.4 Nm	(Indien omvormer max stroom kan leveren)
Maximum current	8.0 A	(Op kenplaat staat 7A)

Recommended Motor Module	
Rated inverter current	3 A
Maximum inverter current	6 A

Maximum torque 2.65 Nm
= Maximale koppel dat de motor levert bij aansturing met een omvormer met een maximale stroom van 6 A.



Generated Sat Apr 12 16:33:01 CET 2025

E.5 Lineaire slede X- en Z-as

Accuracy Standards

① Precision certificate is enclosed with precision grade products.

Accuracy Standards	High Grade	Precision Grade
Positioning Accuracy (mm)	0.1	0.025
Backlash (mm)	0.02	0.003
Positioning Repeatability (mm)	±0.005	±0.003
Running Parallelism (mm)	0.035	0.015
Starting Torque (N · cm)	10	

Effective Stroke · Moment of Inertia · Mass

Base Length (L)	Effective Stroke				Moment of Inertia (kg · cm ²)								Total Mass (kg)			
	LX45				LX4510				LX4520				LX45			
	B1	B2	S1	S2	B1	B2	S1	S2	B1	B2	S1	S2	B1	B2	S1	S2
340	210.4	88.8	247.9	163.8	0.2528	0.2762	0.2429	0.2565	0.3242	0.4179	0.2847	0.3389	5.77	6.69	5.37	5.91
390	260.4	138.8	297.9	213.8	0.2723	0.2957	0.2624	0.276	0.3437	0.4374	0.3042	0.3584	6.37	7.29	5.98	6.51
440	310.4	188.8	347.9	263.8	0.2918	0.3152	0.282	0.2955	0.3632	0.4569	0.3237	0.3779	6.97	7.9	6.58	7.11
490	360.4	238.8	397.9	313.8	0.3113	0.3347	0.3015	0.315	0.3827	0.4764	0.3432	0.3974	7.57	8.5	7.18	7.71
540	410.4	288.8	447.9	363.8	0.3308	0.3543	0.321	0.3345	0.4022	0.4959	0.3627	0.4169	8.18	9.1	7.78	8.31
590	460.4	338.8	497.9	413.8	0.3503	0.3738	0.3405	0.354	0.4217	0.5154	0.3823	0.4364	8.78	9.7	8.39	8.92

Load Rating

Type	Block	Rail			Ball Screw						Bearing (fixed side) Axial Direction	
		Basic Dynamic Load Rating C ₀ (N)	Basic Static Load Rating C ₀₀ (N)	Radial Clearance (μm)	Basic Dynamic Load Rating C ₀ (N)	Basic Static Load Rating C _{0a} (N)	Shaft Dia. (mm)	Lead (mm)	Root Dia. (mm)	Ball Center Dia. (mm)	Basic Dynamic Load Rating C ₀ (N)	Allowable Static Load P _{0a} (N)
LX1502	Long	2072	3701	-3~0	208	265	5	2	4.534	5.15	678	415
LX2001	Long	3277	6199	-3~0	482	642	6	1	5.3	6.15	730	461
LX2005	Long				822	1026	6	5	4.918	6.3		
LX2602	Long	6522	11871	-4~0	1712	2251	8	2	6.4	8.3	1637	1205
LX2605	Long				1600	2097	8	5	6.46	8.3		
LX2610	Long				782	961	8	10	6.46	8.3		
LX3005	Long	9732	17218	-4~0	1831	2389	10	5	8.2	10.3	2702	2197
LX3010	Long				1129	1386	10	10	8.2	10.3		
LX3005	Short	6305	9271	-4~0	1831	2389	10	5	8.2	10.3	2702	2197
LX3010	Short				1129	1386	10	10	8.2	10.3		
LX4510	Long	18450	32441	-6~0	4167	5945	15	10	11.7	15.5	4355	4106
LX4520	Long				2499	3381	15	20	11.7	15.75		
LX4510	Short	11826	17175	-6~0	4167	5945	15	10	11.7	15.5	4355	4106
LX4520	Short				2499	3381	15	20	11.7	15.75		

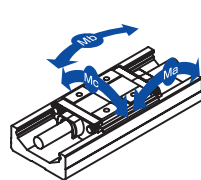
① Load ratings shown in Rail columns are for one block.

② For actual life calculations, please use our Technical Calculation Software.

Allowable Moment

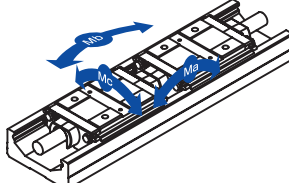
Moment loads can be applied in all three directions.

Single Block



Ma: Pitch Moment

Double Block



Mb: Yaw Moment

Mc: Roll Moment

Type	Block Qty.	Block Qty.	Allowable Static Moment (N · m)		
			Ma	Mb	Mc
LX15	1	Long	13	13	41
LX20	1	Long	27	27	93
LX20	2	Long	353	353	186
LX26	1	Long	70	70	225
LX26	2	Long	902	902	450
LX30	1	Long	126	126	387
LX30	2	Long	1515	1515	774
LX30	1	Short	63	63	208
LX30	2	Short	579	579	417
LX45	1	Long	291	291	972
LX45	2	Long	3945	3945	1944
LX45	1	Short	145	145	515
LX45	2	Short	1444	1444	1029

* Double Block Type values are those when two blocks contact with each other.

The table above lists reference values in static state.

For actual life calculations, please use our Technical Calculation Software.

E.6 Persluchtfrees

Why Air Turbine Motors™ are different:

- Patented governed constant high speed and torque under load for faster, cleaner production.
- Durable Direct Drive with no vanes, no gears, no oil and no maintenance. 24/7 Reliability.
- Turbine and Bearings only moving parts = lower friction and vibration = less repairs and greater precision.
- Faster cycle times. No oil misting or lubrication.
- Noise under 67DBA. Low vibration + heat.
- X = patented double turbine for higher power.
- Milling, polishing, drilling, routing, deburring, marking cleaner at higher speeds.



Air Turbine Motors™ are totally oil free and eliminate contamination from lubrication.
Dry, Clean 90PSI / 6.2 BAR compressed air required. Accessory 3 micron filter/extractor available: Part # 30008.

430HD



25,000 - **40,000 RPM**

0.88 hp [0.66 kW]

40oz [1.13kg]

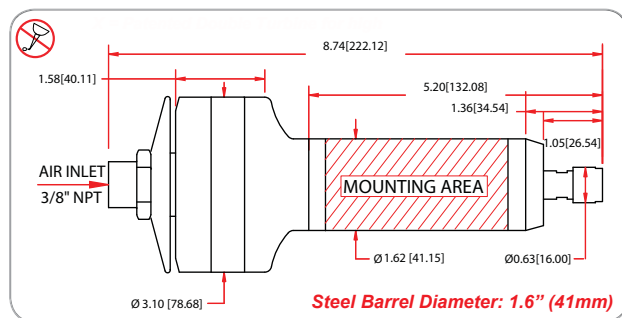


0.88 hp [0.66 kW] at governed 40,000 RPM.

• Double front Ceramic Bearings + ER11 collet.

• Use **minimum 3/8" / 9.5mm** in Internal Diameter hose. Powerful Workhorse.

• Low vibration < 0.9m/s², < 67 dBA.



Additional optional collet sizes available. Use accessory Filter Extractor (Part #30008). Select desired RPM and Collet Size Part Number in Price List.

General Specifications	430HD	430XHD
Governed Speed RPM	25,000 / 30,000 / 40,000	25,000 / 30,000 / 40,000
Power Rating HP [kW]	.76 [.57] / .83 [.62] / .88 [.66]	1.2 [.90] / 1.3 [.98] / 1.4 [1.04]
Inlet Air Pressure	90 PSI [6.2 Bar]	90 PSI [6.2 Bar]
Idle Air Consumption CFM [L/S]	13 [6.1] / 14 [6.6] / 14 [6.6]	16 [7.55] / 17 [8.02] / 18 [8.50]
Working Air Consumption CFM [L/S]	14 [6.61] - 35 [16.52]	19 [8.97] - 30 [14.2]
TIR Collet Held Shank	0.001" [0.03mm]	0.001" [0.03mm]
Sound Level (with exhaust hose fitted)	Less Than 67 dBA	Less Than 67 dBA
Max Shank Capacity	1/4" [6mm]	1/4" [6mm]



40 Air Turbine Spindles™ for CNC Milling



E.7 Directe encoder

SIEMENS

Data sheet for Incremental encoder

Article No. : **6FX2001-3CC50**

Electrical data	
Operating voltage Up	DC 5 V +/- 10%
Max. power consumption without load	150 mA
Signal level	Sinusoidal 1 Vpp
Resolution	2,500 S/R
Accuracy	26"
Phase relation signal A to B	90 ° ± 10 %

Limit frequency type at

-3 dB	>= 100 kHz
-6 dB	>= 200 kHz

Cable length

To the downstream electronics, max.	150 m
-------------------------------------	-------

Ambient temp in operation

Fixed installation of flange outlet or cable

- At Up = 10V ... 30V	-40 ... 100 °C
-----------------------	----------------

Flexible cable

- At Up = 10V ... 30V	-10 ... 100 °C
-----------------------	----------------

Standards

Compliance with standards	CE, cULus
EMC class filter	Tested according to the EMC guidelines 89/336/EEC and the rules of the EMC guidelines (generic standards)

Mechanical data

Shaft diameter	6 mm
Shaft length	10 mm
Angular acceleration, max.	100,000 rad/s ²
Rotor moment of inertia	0.00000145 kgm ²
Vibration (55...2000 Hz), max.	300 m/s ²
Friction torque (at 20°C)	0.01 Nm
Starting torque (at 20°C)	0.01 Nm
Net weight	0.3 kg

Max. admissible speed

Electrical	7,200 rpm
Mechanical	12,000 rpm

Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

Load capacity

n ≤ 6000 rpm	
- Axial	40 N
- Radial at shaft end	60 N
n > 6000 rpm	
- Axial	10 N
- Radial at shaft end	20 N

Shock, max.

2 ms	2,000 m/s ²
6 ms	1,000 m/s ²

Degree of protection

At housing	IP67
At shaft input	IP64

Generated Tue May 13 11:21:01 CET 2025

E.8 Encoder module

SIEMENS

Data sheet for Sensor Modules

Article No. : **6SL3055-0AA00-5EA3**

Electrical data

Encoders which can be evaluated

Encoder frequency, max.	500 kHz
Signal subdivision (interpolation), max.	16384 times 14 bit

Connections

Conductor cross-section

Line side	According to connector contacts
-----------	---------------------------------

Version

Onboard position encoder interface	incremental encoder sin/cos 1 Vpp
Measuring system	12-pin M23 circular connector
Output	IP67 DRIVE-CLiQ connector
PE conductor	M4 screw/1.8 Nm

Mechanical data

Degree of protection	IP67
Net weight	0.31 kg (0.68 lb)

Dimensions

Width	58.0 mm (2.28 in)
Height	44.0 mm (1.73 in)
Depth	112.0 mm (4.41 in)

³⁾ without considering encoder

⁵⁾ The maximum cable length for the encoder system interface depends on the current consumption of the encoder system and the cross-section of the wires in the cable. However, the maximum length is 30 m.

Technical data are subject to change! There may be discrepancies between calculated and rating plate values.

Generated Wed Mar 26 08:55:14 CET 2025

Rated data

Current drawn

Power requirement (DC 24 V) ³⁾	0.11 A
Power requirement for fuse protection	Via DRIVE-CLiQ power supply source
Sensor supply for the onboard position encoder interface, at 5 V DC	0.35 A

General technical specifications

Power loss, max.	4.0 W
------------------	-------

Line length, max.

for measuring system ⁵⁾	3 m (9.84 ft)
for drive control	100 m (328.08 ft)

Standards

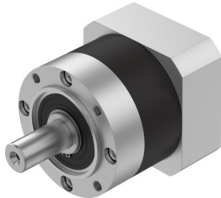
Compliance with standards	cULus
---------------------------	-------

E.9 Reductor

Gear unit EMGA-120-P-G8-SAS-100

Part number: 8141753

FESTO



Data sheet

Feature	Value
Gear unit flange size	120 mm
Motor flange size	100 mm
Torsional backlash	0.12 deg
Type of gear unit	Planetary gear
Gear unit ratio	8:1
Max. drive speed	6500 rpm
Operating temperature of gear unit	-25 °C ... 90 °C
LABS (PWIS) conformity	VDMA24364-B2-L
Degree of protection	IP54
Continuous output torque	120 Nm
Mass moment of inertia of gear unit	1.431 kgcm ²
Max. output torque	192 Nm
Max. efficiency	97 %
Torsional rigidity	18 Nm/arcmin
Product weight	6000 g
Gear unit interface, output shaft	120G
Gear unit interface, drive shaft	100A
Note on materials	RoHS-compliant

4/16/25 - Subject to change - Festo SE & Co. KG

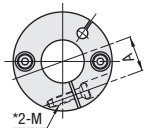
E.10 Koppeling X- en Z-as

Disc Couplings Zero Backlash, and Best Suited for High Torque Servo Motor Applications

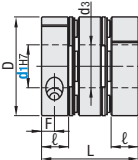
- Feature - Designed to absorb misalignments by disc flexures.
 - Zero backlash nature provides high angular accuracy, suitable for applications requiring high positioning accuracies.
 - High Rigidity Type have largely improved torsional rigidity over the Standard Types due to screw-coupled discs instead of the swage-coupled discs of the Standard Type.
- * Products in red frame are servo motor compatible couplings.

Page	P943		P946		P946, 948		P947-950		P944		P945		P945		P951, 952		P953, 954	
Type	SCXW SCPW	SCXWK SCPS	CPSWS_CPSW_ CPSHS_CPSH_		CPAWS CPAHS	CPAWN CPAHN	CPSW_CPSW_ CPSH_CPSH_		MCSLC_ MCSSC_	CPDW CPDT		CPDD CPDS		MCGL_MCGL_ MCGLC_MCGSC_		MCKL_MCKS_ MCKLC_MCKSC_		
Shaft Bore Dia. (mm)	3-25		10-16		10-35		15-45		4-24		4-25		6-25		2-25		2-25	
Torque (N · m)	1-25		8		6-40		60-250		0.9-16		0.7-9.0		2-10		0.15-7.0		0.25-11.0	
External Appearance	High Rigidity		High Rigidity		High Rigidity		High Rigidity											
	 For Servo Motors		 For Servo Motors		 For Servo Motors		 For Servo Motors		 For Servo Motors		 For Servo Motors							
Zero Backlash	○		○		○		○		○		○		○		○		○	
High Torsional Rigidity	○		○		○		○		○		○		○		○		○	
High Torque	○		○		○		○		○		○		○		○		○	
Allowable Angular Misalignment	Double	○	△		△		△		△		○		⊗		⊗		⊗	
	Single	○	△		△		△		△		△		△		⊗		⊗	
Allowable Lateral Misalignment	Double	○	△		△		△		△		△		△		△		△	
	Single	×	×		×		×		×		×		×		△		△	
Moment of Inertia	○	○	○		○		△		○		○		⊗		○		○	
Electrical Insulation	×		×		×		×		×		×		×		○		×	

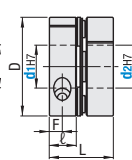
Couplings – High Rigidity Disc Clamping



SCPW (Double Disc Type)



SCPS (Single Disc Type)



- ① Tolerances for d_1 , d_2 are values before slit machining.
- ① The lateral, angular, and axial misalignment values shown are for each occurring individually. When more than one misalignments are occurring simultaneously, the allowable maximum value of each will be reduced by 1/2.
- ① For the selection criteria and alignment procedures, see P.1091, 1093.
- *Tapped hole for clamp screw might go through for some sizes.

Type	Material			Surface Treatment			Accessories
	Body	Disc	Screw	Body	Disc	Screw	
SCPW SCPS	Aluminum Alloy	Stainless Steel	4137 Alloy Steel	Clear Anodize	—	Black Oxide	Hex Socket Head Cap Screw

Part Number		No.	d_1, d_2 select (must be $d_1 \leq d_2$)	D	d_3	L		ℓ	F	A	Clamp Screw	
Type						SCPW	SCPS				M	Tightening Torque (N-m)
Double Disc Type	16	*3	4 5 6	16.6	6.5	23	16.6	7.2	3	5.3	M2.6	1.0
	21		4 5 6 8 9	21	9.5	24.5	16.7	7	3.5	7	M2.6	1.2
	28		5 6 8 9 10	28	12	32.2	21.5	9	4	9.5	M3	1.5
Single Disc Type	34		6 8 9 10 11 12 14	34	15	35	23.3	9.8	5	12	M3	1.5
	46		8 9 10 11 12 14 15 17 19	46	22	44	29.8	12.6	6	16.5	M4	3.5
	55		12 14 15 17 19 20 22 24 25	54.5	26	55	37.2	16	7	20.5	M5	6.0

① For * marked d_1 , d_2 , use with the load torque 60% or less than shown in the table to prevent slipping.

Double Discs Type (High Rigidity Type)

Part No.		Allowable Torque (N-m)	Angular Misalign. (°)	Lateral Misalign. (mm)	Static Torsional Spring Constant (N-m/rad)	Max Rot. Speed (r/min)	Moment of Inertia (Kg-m ²)	Allowable Axial Misalign. (mm)	Comp. Factor	Mass (g)
Type	No.									
SCPW	16	1.0	1.0	0.10	500	10000	4.22 x 10 ⁻⁷	±0.20	1.5	11
	21	1.2			800		1.11 x 10 ⁻⁶			17
	28	1.6			0.15		3000			4.68 x 10 ⁻⁶
	34	4.0	0.20	4800	1.10 x 10 ⁻⁵		65			
	46	10.0	0.25	11500	4.70 x 10 ⁻⁵		151			
	55	25.0		19000	1.19 x 10 ⁻⁴		260			

① Static torsional spring constant, inertia moment, and mass values are for cases of maximum shaft diameter.

F. Overzicht van alle toegangsniveaus

Niveau	Gebruiker	Beveiliging	Toegang
1	Fabrikant	Wachtwoord: SUNRISE	Volledige toegang, inclusief invoer van opties en systeemdata.
2	Installateur	Wachtwoord: EVENING	Aanpassen en configureren van machineparameters.
3	Eindgebruiker	Wachtwoord: CUSTOMER	Beperkte toegang tot toegewezen functies en programma's.
4	Programmeur	Sleutelpositie 3	Beperkte toegang ten opzichte van niveaus 0–3, zoals gedefinieerd door fabrikant of eindgebruiker.
5	Operator (Gekwalificeerd)	Sleutelpositie 2	Minder rechten dan niveaus 0–3, zoals bepaald door de eindgebruiker.
6	Operator (Getraind)	Sleutelpositie 1	Programmakeuze en invoer van gereedschapsslijtage en offsetwaarden.
7	Operator (Basis)	Sleutelpositie 0	Alleen basisfunctionaliteit, geen invoer van offset of slijtagegegevens.

G. Overzicht van machineparameters

Categorie	Softkey	Bereik	Voorvoegsel	Beschrijving
Machinegegevens (M)	General MD	10000–19999	\$MN_	Algemene machineparameters
	General MD	51000–51999	\$MNS_	Cycli - algemeen
	Channel MD	20000–29999	\$MC_	Kanaalspecifiek
	Channel MD	52000–52999	\$MCS_	Cycli - kanaalspecifiek
	Axis MD	30000–39999	\$MA_	Asspecifiek
	Axis MD	53000–53999	\$MAS_	Cycli - asspecifiek
Instellingsgegevens (S)	General SD	41000–41999	\$SN_	Algemene instellingen
	General SD	54000–54999	\$SNS_	Cycli - algemeen
	Channel SD	42000–42999	\$SC_	Kanaalspecifiek
	Channel SD	55000–55999	\$SCS_	Cycli - kanaalspecifiek
	Axis SD	43000–43999	\$SA_	Asspecifiek
	Axis SD	56000–56999	\$SAS_	Cycli - asspecifiek
Overig	Display MD	9000–9999	\$MM_	Weergaveparameters

H. Algemene machine- en instellingsgegevens

MD	Identificatie	Instellingen	Opmerking
10260	\$MN_CONVERT_SCALING_SYSTEM	1	Exact
10602	\$MN_FRAME_GEOAX_CHANGE_MODE	1	Exact
10610	\$MN_MIRROR_REF_AX	0	Exact
10714	\$MN_M_NO_FCT_EOP	32	Variable
10722	\$MN_AXCHANGE_MASK	Bit 2 = 1	Exact
11410	\$MN_SUPPRESS_ALARM_MASK	108003H: Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 15 = 1 Bit 20 = 1	Exact
11450	\$MN_SEARCH_RUN_MODE	47H: Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 2 = 1 Bit 6 = 1	Exact
11470	\$MN_REPOS_MODE_MASK	Bit 3 = 1	Exact
17530	\$MN_TOOL_DATA_CHANGE_COUNTER	1FH: Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 2 = 1 Bit 3 = 1 Bit 4 = 1	Exact
18080	\$MN_MM_TOOL_MANAGEMENT_MASK	0BH: Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 3 = 1	Exact
20110	\$MC_RESET_MODE_MASK	40C1H: Bit 0 = 1 Bit 6 = 1 Bit 14 = 1 Bit 16 = 1	Exact
20124	\$MC_TOOL_MANAGEMENT_TOOLHOLDER	1	Exact
20128	\$MC_COLLECT_TOOL_CHANGE	0	Exact
20130	\$MC_CUTTING_EDGE_RESET_VALUE	1	Exact
20150	\$MC_G_CODE_RESET_VALUE	[5] = 2 [15] = 3 [21] = 2 [28] = 2 [48] = 3	Exact Variable Variable Exact Variable
20152	\$MC_G_CODE_RESET_MODE	[5] = 0 [7] = 1 [12] = 0 [14] = 1 [15] = 0 [21] = 0	Exact Exact Exact Exact Exact Variable
20202	\$MC_WAB_MAXNUM_DUMMY_BLOCKS	10	Minimum
20240	\$MC_CUTCOM_MAXNUM_CHECK_BLOCKS	4	Minimum
20250	\$MC_CUTCOM_MAXNUM_DUMMY_BLOCKS	5	Minimum
20310	\$MC_TOOL_MANAGEMENT_MASK	1420BH: Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 3 = 1 Bit 14 = 1 Bit 16 = 1	Exact
20320	\$MC_TOOL_TIME_MONITOR_MASK	Bit 0 = 1	Variable
20360	\$MC_TOOL_PARAMETER_DEF_MASK	Bit 0 = 1	Variable

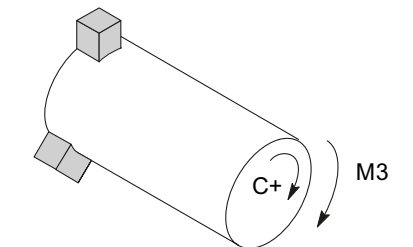
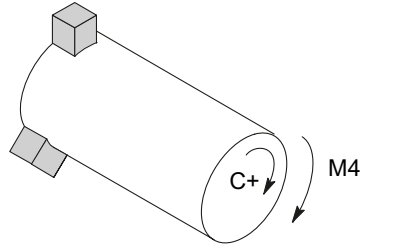
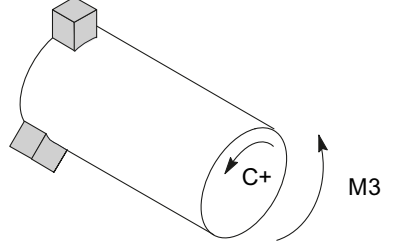
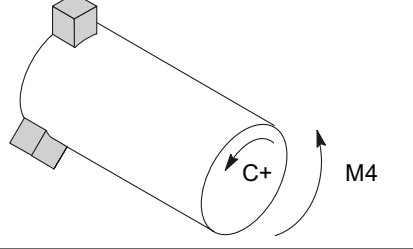
Vervolg op volgende pagina

MD	Identificatie	Instellingen	Opmerking
20734	\$MC_EXTERN_FUNCTION_MASK	Bit 3 = 1	Variable
22550	\$MC_TOOL_CHANGE_MODE	0	Exact
24006	\$MC_CHSFRAME_RESET_MASK	Bit 0 = 1 Bit 5 = 0	Exact
24007	\$MC_CHSFRAME_RESET_CLEAR_MASK	Bit 0 = 1 Bit 5 = 1	Exact
24008	\$MC_CHSFRAME_POWERON_MASK	Bit 0 = 1 Bit 5 = 0	Exact
24030	\$MC_FRAME_ACS_SET	1	Exact
24040	\$MC_FRAME_ADAPT_MODE	Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 5 = 1 Bit 6 = 1	Exact
27860	\$MC_PROCESSTIMER_MODE	Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 5 = 1 Bit 6 = 1 Bit 8 = 1	Variable
27880	\$MC_PART_COUNTER	Bit 0 = 1 Bit 8 = 1 Bit 11 = 1	
28000	\$MC_MM_REORG_LOG_FILE_MEM	75	Minimum
28010	\$MC_MM_NUM_REORG_LUD_MODULES	20	Minimum
28082	\$MC_MM_SYSTEM_FRAME_MASK	Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 6 = 1	Exact
28083	\$MC_MM_SYSTEM_DATAFRAME_MASK	Bit 0 = 1 Bit 5 = 0	Exact
28450	\$MC_MM_TOOL_DATA_CHG_BUFF_SIZE	400	Exact
35040	\$MA_SPIND_ACTIV_AFTER_RESET[AX3]	2	Exact
42440	\$SC_FRAME_OFFSET_INCR_PROG	0	Exact
42442	\$SC_TOOL_OFFSET_INCR_PROG	0	Exact
42528	\$SC_CUTCOM_DECEL_LIMIT	1	Variable
42940	\$SC_TOOL_LENGTH_CONST	18	Exact
42950	\$SC_TOOL_LENGTH_TYPE	2	Exact
51024	\$MNS_BLOCK_SEARCH_MODE_MASK_JS	Bit 0 = 1 Bit 1 = 1	
51028	\$MNS_BLOCK_SEARCH_MODE_MASK	Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 3 = 1 Bit 4 = 1	
51038	\$MNS_SET_ACT_VALUE	1	
51039	\$MNS_PROGRAM_CONTROL_MODE_MASK	Bit 0 = 1	
51040	\$MNS_SWITCH_TO_MACHINE_MASK	0H	
51226	\$MNS_FUNCTION_MASK_SIM	0H	
51228	\$MNS_FUNCTION_MASK_TECH	0H	
52210	\$MCS_FUNCTION_MASK_DISP	20BH: Bit 0 = 1 Bit 1 = 1 Bit 3 = 1 Bit 9 = 1	
52212	\$MCS_FUNCTION_MASK_TECH	Bit 3 = 1	Exact
52214	\$MCS_FUNCTION_MASK_MILL	0H	
52216	\$MCS_FUNCTION_MASK_DRILL	0H	
52218	\$MCS_FUNCTION_MASK_TURN	0H	
52224	\$MCS_FUNCTION_MASK_TECHNOLOGY_0	0H	
52229	\$MCS_ENABLE_QUICK_M_CODES	0H	
52230	\$MCS_M_CODE_ALL_COOLANTS_OFF	9	

Vervolg op volgende pagina

MD	Identificatie	Instellingen	Opmerking
52231	\$MCS_M_CODE_COOLANT_1_ON	8	
52232	\$MCS_M_CODE_COOLANT_2_ON	7	
52233	\$MCS_M_CODE_COOLANT_1_AND_2_ON	-1	
52250	\$MCS_M_CODE_CHUCK_OPEN	[0] = M131	
52251	\$MCS_M_CODE_CHUCK_OPEN_ROT	[0] = M132	
52252	\$MCS_M_CODE_CHUCK_CLOSE	[0] = M130	
52270	\$MCS_TM_FUNCTION_MASK		
54215	\$SNS_TM_FUNCTION_MASK_SET	Bit 0 = 1	
55200	\$SCS_MAX_INPUT_FEED_PER_REV	1	
55201	\$SCS_MAX_INPUT_FEED_PER_TIME	10000	
55202	\$SCS_MAX_INPUT_FEED_PER_TOOTH	1	
55212	\$SCS_FUNCTION_MASK_TECH_SET	Bit 1 = 1 Bit 2 = 1	
55214	\$SCS_FUNCTION_MASK_MILL_SET	Bit 0 = 1 Bit 2 = 1	
55216	\$SCS_FUNCTION_MASK_DRILL_SET	Bit 3 = 1 Bit 4 = 1	
55218	\$SCS_FUNCTION_MASK_TURN_SET	Bit 0 = 1	
55300	\$SCS_EASY_SAFETY_CLEARANCE	1	
55301	\$SCS_EASY_DWELL_TIME	0.6	
55305	\$SCS_EASY_DRILL_DEEP_FD1	90	
55306	\$SCS_EASY_DRILL_DEEP_DF	90	
55307	\$SCS_EASY_DRILL_DEEP_V1	1.2	
55308	\$SCS_EASY_DRILL_DEEP_V2	1.4	
55309	\$SCS_EASY_THREAD_RETURN_DIST	2	
55400	\$SCS_MILL_ENGRAVE_POINT_RAD	0	
55500	\$SCS_TURN_FIN_FEED_PERCENT	100	
55505	\$SCS_TURN_ROUGH_O_RELEASE_DIST	1	
55506	\$SCS_TURN_ROUGH_I_RELEASE_DIST	0,5	
55510	\$SCS_TURN_GROOVE_DWELL_TIME	-1	
55540	\$SCS_TURN_PART_OFF_CTRL_DIST	1	
55541	\$SCS_TURN_PART_OFF_CTRL_FEED	1	
55542	\$SCS_TURN_PART_OFF_CTRL_FORCE	10	
55580	\$SCS_TURN_CONT_RELEASE_ANGLE	45	
55581	\$SCS_TURN_CONT_RELEASE_DIST	1	
55582	\$SCS_TURN_CONT_TRACE_ANGLE	5	
55583	\$SCS_TURN_CONT_VARIABLE_DEPTH	20	
55584	\$SCS_TURN_CONT_BLANK_OFFSET	1	
55585	\$SCS_TURN_CONT_INTERRUPT_TIME	-1	
55586	\$SCS_TURN_CONT_INTER_RETRACTION	1	
55587	\$SCS_TURN_CONT_MIN_REST_MAT_AX1	50	
55588	\$SCS_TURN_CONT_MIN_REST_MAT_AX2	50	
55595	\$SCS_TURN_CONT_TOOL_BEND_RETR	0,1	
55596	\$SCS_TURN_CONT_TURN_RETRACTION	0,1	

I. Bit-instellingen voor de draairichting van een spil

Main spindle direction of rotation	52207[n] bit 3 =	52207[n] bit 4 = *)	52207[n] bit 5 =	<Axis>. spindle.out. invertM3M4
	0	0	0	0
	0	1	1	1
	1	1	0	0
	1	0	1	1

J. M-code *mapping*

Decoded M signals (M0–M99)

DB21 – DB30	Signals from NC channel (NC→PLC)							
Byte	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
DBB194	Dynamic M functions							
	M07	M06	M05 *	M04 *	M03 *	M02	M01	M00
DBB195	Dynamic M functions							
	M15	M14	M13	M12	M11	M10	M09	M08
DBB196	Dynamic M functions							
	M23	M22	M21	M20	M19	M18	M17	M16
DBB197	Dynamic M functions							
	M31	M30	M29	M28	M27	M26	M25	M24
DBB198	Dynamic M functions							
	M39	M38	M37	M36	M35	M34	M33	M32
DBB199	Dynamic M functions							
	M47	M46	M45	M44	M43	M42	M41	M40
DBB200	Dynamic M functions							
	M55	M54	M53	M52	M51	M50	M49	M48
DBB201	Dynamic M functions							
	M63	M62	M61	M60	M59	M58	M57	M56
DBB202	Dynamic M functions							
	M71	M70 *	M69	M68	M67	M66	M65	M64
DBB203	Dynamic M functions							
	M79	M78	M77	M76	M75	M74	M73	M72
DBB204	Dynamic M functions							
	M87	M86	M85	M84	M83	M82	M81	M80
DBB205	Dynamic M functions							
	M95	M94	M93	M92	M91	M90	M89	M88
DBB206	Dynamic M functions							
					M99	M98	M97	M96
DBB207								

K. Elektrisch schema (EPLAN)

