



PRECISION MANUFACTURING

EVALUATIE
MACHINENAUWKEURIGHEID:
'STATE OF THE ART'

Auteur: Krist Mielnik
Versie: 21/03/2014

INHOUD

1	INLEIDING	3
2	EVALUATIE MACHINENAUWKEURIGHEID: 'STATE OF THE ART'	4
2.1	DIRECTE MEETSYSTEMEN	4
2.1.1	Lasertracer	4
2.1.2	KGM	4
2.1.3	Ballbar	5
2.1.4	R-test	5
2.1.5	Overzicht	6
2.2	INDIRECTE MEETMIDDELEN	8
2.2.1	Conus NAS979	8
2.2.2	Afnamestuk NC Gesellshaft	9
2.2.3	Afnamestuk kinematische fouten rotatieassen	10

1 INLEIDING

Een algemene trend binnen de industrie is het streven naar producten met hogere precisie en engere toleranties. Als gevolg hiervan moeten productiemachines efficiënter en energiezuiniger worden, meer functionaliteiten bevatten, enzovoort. Om dit te realiseren zullen ook de componenten, waaruit hoger genoemde machines zijn opgebouwd, met steeds hogere nauwkeurigheidseisen uitgevoerd moeten worden. Afnemende of verspanende technieken zoals frezen blijven een prominente rol spelen in de totstandkoming van veel producten. Het samenspel van procesparameters, machinenauwkeurigheid, opspanning, snijgereedschappen en omgeving bepalen bij dit proces de finale nauwkeurigheid van een onderdeel.

De nauwkeurigheid van een machine wordt reeds van bij haar ontstaan - dus als de machine nog bij de producent staat - onder de loep genomen. Immers, de producent wil weten of hij een machine zal leveren die voldoet aan de nauwkeurigheidsspecificaties. De eindgebruikers willen dan weer zeker zijn dat ze stukken zullen kunnen produceren die de verkopers hen hebben beloofd. Na receptie en installatie van de machine bij de klant ter plaatse, volgt een tweede afnamecontrole, al dan niet in de afgesproken prijs begrepen. Tijdens het transport wordt de machine immers blootgesteld aan zaken die nadelig zijn voor de machinenauwkeurigheid. Ten slotte wil de eindgebruiker er ook over waken dat de kwaliteit van zijn productiemachine gehandhaafd blijft tijdens de producerende fase en ook na een collisie op de machine.

Een bewerkingsmachine is opgebouwd uit verschillende mechanische componenten, waarbij de geometrische nauwkeurigheid wordt beïnvloed door de nauwkeurigheid van de afzonderlijke componenten (bijv. de vlakheid) en door de nauwkeurigheid van de onderlinge samenbouw (bijv. haaksheid). Verder stellen we ook vast dat meer en meer vijfassige freesmachines een vaste waarde vormen in productiehallen en mechanische ateliers. Ondanks de toegenomen flexibiliteit van een vijfassige freesmachine en de reductie in manuele tussenkomsten, zorgt de aanwezigheid van twee additionele rotatieassen bovenop de lineaire assen voor extra potentiële geometriefouten, wat de haalbare productnauwkeurigheid negatief in de hand zal werken. Volgens ISO230-1 en ISO230-7 kan elke lineaire as negen fouten en elke rotatieas elf fouten bevatten, wat resulteert in ongeveer vijftig geometriefouten. Typisch bij een lineaire as stoot men op positioneerfouten, rechtheidsfouten en haaksheidsfouten en verder ook effecten zoals stampen, gieren en rollen. Bij een rotatieas gaat het over hoekpositioneerfouten, radiale en axiale asverschuivingen en ook haaksheidsfouten. Men spreekt ook wel van kinematische fouten. Kinematische fouten worden daarom, naast de invloed van temperatuur, beschouwd als de belangrijkste oorzaken van machine(on)nauwkeurigheid en dus ook product(on)nauwkeurigheid. De identificatie ervan is dus een belangrijk onderdeel in het streven naar precieze producten.

De identificatie van machinefouten kan grosso modo op twee manieren gebeuren: direct en indirect. Bij directe meetprincipes wordt gebruikt gemaakt van aparte meetapparatuur, en worden vanwege de eerder hoge investeringskost vaak uitgevoerd door gespecialiseerde firma's. Voorbeelden zijn hiervan zijn laserinterferometrie, R-test, DBB, lasertracer, ... Bij indirecte meetprincipes wordt de machinefout afgeleid uit de geometrie van een gefreesd onderdeel, ook wel afnamestuk of teststuk genoemd. Verschillende afnamestukken zijn de voorbije jaren uitgewerkt, maar feit is dat er geen enkel afnamestuk bestaat, waarmee elke mogelijke kinematische machinefout kan worden geïdentificeerd.

In voorliggend rapport wordt een overzicht geschetst van een aantal directe en indirecte meetprincipes die momenteel op de markt beschikbaar zijn. De belangrijkste mogelijkheden en toepassingen worden toegelicht, evenals de voor- en nadelen van elk systeem.

2 EVALUATIE MACHINENAUWKEURIGHEID: 'STATE OF THE ART'

2.1 DIRECTE MEETSYSTEMEN

Hieronder worden een viertal directe meetsystemen eerst kort toegelicht. Tenslotte worden in een meer gedetailleerde overzichtstabel de verschillende systemen naast elkaar gezet.

2.1.1 LASERTRACER

Dit systeem maakt gebruik van een 'self tracking laserinterferometer' en een reflector. De laserstraal van de laserinterferometer volgt de reflector tijdens de meting. Er bestaat zowel een opstelling voor grotere machines (figuur links), als voor kleine en middelgrote machines (assen tot 1,5 m) (figuur rechts). Zowel de NC-assen van drieassige als van vijfassige machines kunnen worden gecontroleerd.

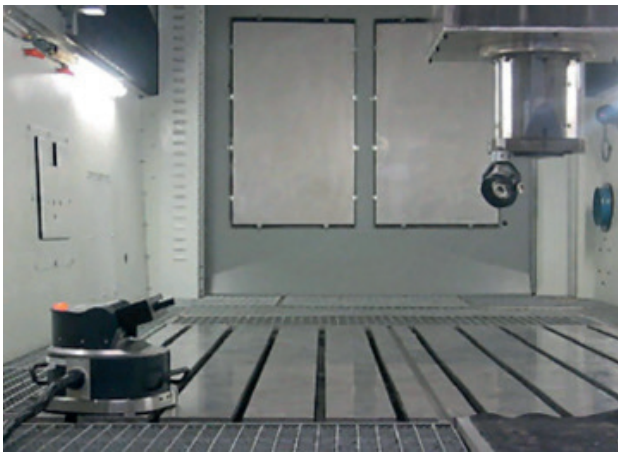


Fig. 1a: Lasertracer (Etalon)

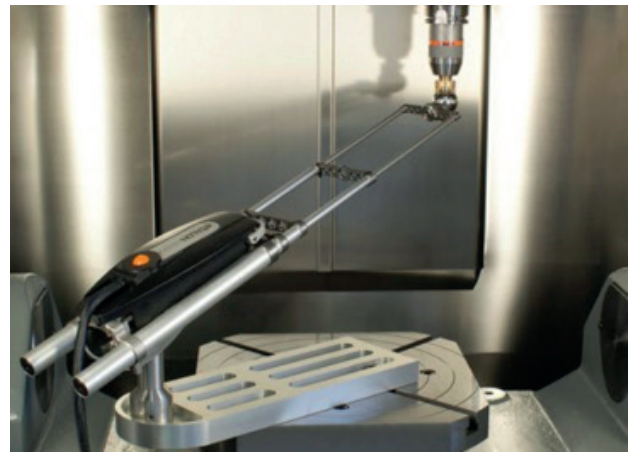


Fig. 1b: Lasertracer-MT (Etalon)

2.1.2 KGM

Deze contactloze meetmethode maakt gebruik van een glazen plaat met een nauwkeurige grid en een scannende opnemer. De plaat wordt op de opspantafel opgespannen, de opnemer in de gereedschapsspil. Er bestaan twee uitvoeringen: de KGM 181 en de KGM 182. De enige verschil is de diameter van de gridplaat (type 181: $D = 140$ mm / type 182: $D = 230$ mm). Met de KGM-device controleert men de lineaire NC-assen van zowel drieassige als vijfassige machines.

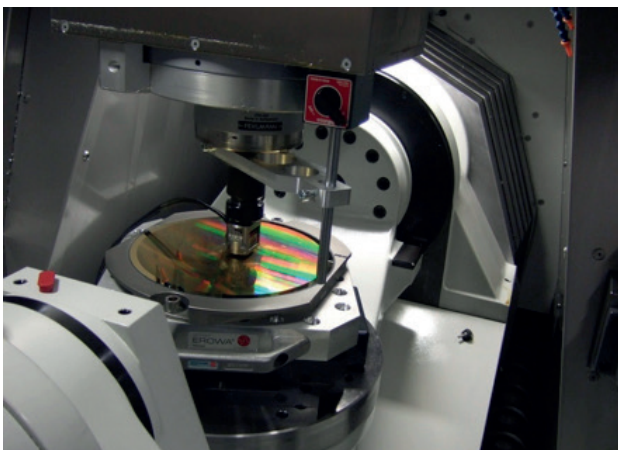


Fig. 2: KGM (Heidenhain)

2.1.3 BALLBAR

Het ballbar-systeem maakt gebruik van een magnetisch statief op de machinetafel en een magnetische houder in de gereedschapsspil. De opnemer, die aan weerszijden is uitgerust met een kogel, wordt tussen beide houdergedeeltes gemonteerd. De opnemer verlengt of verkort tijdens uitvoering van de cirkelvormige gereedschapsbaan. Dit systeem is bruikbaar voor de controle van de lineaire assen van zowel drieassige als vijfassige machines.



Fig. 3: Ballbar (Renishaw)



2.1.4 R-TEST

De R-test wordt ingezet voor de controle van vijfassige machines. Het systeem bestaat uit een keramische kogel, gemonteerd op het machine-element met de rotatieassen en een probe of opnemer op de machine-component zonder rotatieassen.

Tijdens de meting bewegen de vijf NC-assen simultaan, en dit zowel continu als intermitterend.

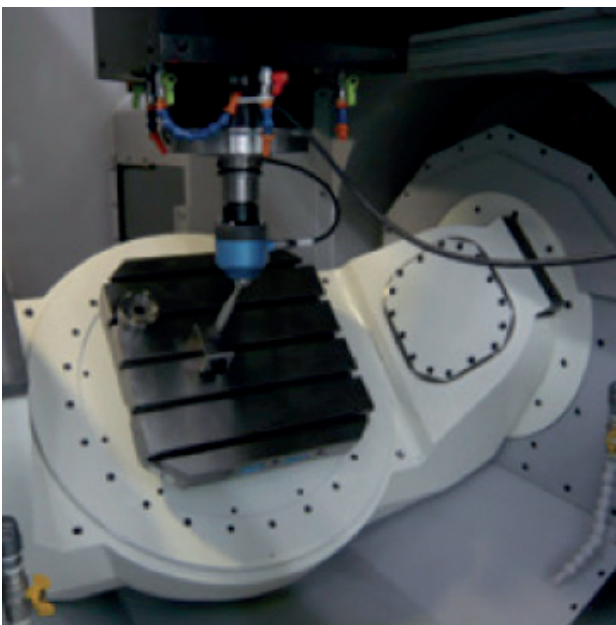
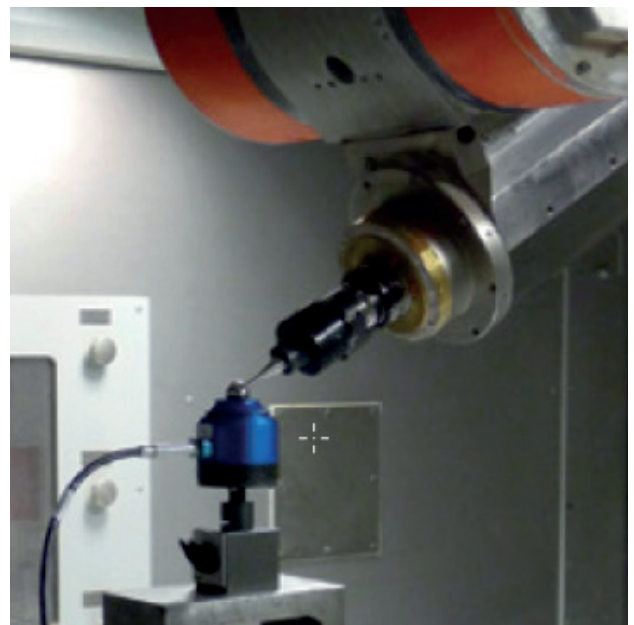


Fig. 4: R-test (IBS)



2.1.5 OVERZICHT

	LASER TRACER	KGM	BALLBAR	R-TEST
Commerciële aanbieder (voorbeeld)	Etalon www.etalon-ag.com	Heidenhain www.heidenhain.de	Renishaw www.renishaw.com	IBS Precision www.ibspe.com
Op te meten assen	Lineaire assen Rotatieassen (zowel in tafel als in freeskop)	Lineaire assen	Lineaire assen ¹	Rotatieassen ²
Meettraject	Willekeurig 3D-traject in de ruimte; traject gegenereerd door bijhorende software	Willekeurig 2D-traject in een vlak (meetzone beperkt door afmetingen KGM gridplaat)	1) Circulair traject, waarbij radius beperkt wordt door lengte van ballbar (max. radius = 600 mm (300 mm met maatbepaling)) 2) Circulair traject waarbij lineaire assen bewegen 3) 3 vlakken (volumetrische test)	Circulair traject waarbij lineaire en rotatieassen synchroon bewegen (5-assig)
Voordelen	1) Hoge nauwkeurigheid (principe van multilateratie) 2) Geen manuele uitlijning vereist 3) Korte meettijd (1 tot 4 uur) 4) Ook geschikt voor grote machines	1) Mogelijk om een willekeurig traject in het 2D-vlak te meten 2) Contactloze meting 3) Zeer geschikt om dynamische fouten op niet circulaire trajecten (bijv. vierkant) te bepalen, om nadien servoparameters te finetunen	1) Eenvoudige en snelle test; bovendien gekend door veel machinebouwers 2) Alle meetparameters worden in dezelfde meting opgenomen	1) 3D-traject van een sfeer kan worden gemeten; in vergelijking met ball bar-metingen voor rotatieassen, kan met de R-test meer informatie op kortere tijd worden vergaard 2) Niet enkel locatiefouten kunnen worden gemeten (zie 3)) 3) Geautomatiseerde metingen verlopen sneller dan bij de ballbar-test
Nadelen	1) Minstens drie metingen zijn nodig (met verschillende posities van de tracer) 2) Meetonzekerheid kan sterk afhankelijk zijn van waar de tracer wordt gepositioneerd (wel ondersteunende software beschikbaar) 3) Niet het goedkoopste systeem	1) Gridplaat is delicaat 2) Ervaring is vereist voor de foutendiagnose 3) Geen enkele standaard specificeert een test die niet kan worden uitgevoerd zonder de KGM 4) Duurder dan het ballbar-systeem	1) Foutendiagnose vereist kennis en ervaring Ballbar geeft geen info over hoekpositiefout, waardoor soms moeilijk te zeggen is of fout van X-as of Y-as komt (bij cirkel in XY-vlak) 2) Het is niet mogelijk om de metingen te automatiseren 3) Vereist een ervaren operator	1) Delicater dan het ballbar-systeem 2) Niet mogelijk om fouten van lineaire assen en rotatieassen van elkaar te scheiden; voor de foutendiagnose van de rotatieassen dienen die van de lineaire assen voldoende klein te zijn 3) Duurder dan het ballbar-systeem

1) ISO 230-4: 2005

2) ISO/FDIS 10791-6:2013

	LASER TRACER	KGM	BALLBAR	R-TEST
Machinefouten die gemeten kunnen worden	1) Alle statische fouten van de lineaire en rotatieassen. De software van Etalon geeft van elke as de geometrische fouten (positioneerfout, rechtheidsfout, haaksheidfouten, stampen, gieren, rollen, voor rotatieassen: hoekpositioneerfout, axiale en radiale slag, asoriëntatie) 2) Dynamische fouten (1D)	1) Is afhankelijk van het gevolgde traject; software laat niet toe om geometrische fouten numerisch te evalueren 2) Theoretisch gezien kunnen alle statische fouten van 2 lineaire assen worden geëvalueerd (lineaire positioneerfout, rechtheidsfout, hoekfouten, haaksheidfouten) 3) Dynamische contourfouten kunnen worden geëvalueerd	1) Statische fouten van lineaire assen, waarvan haaksheidfout; soms kunnen lineaire positioneerfout, rechtheidsfout en hoekfouten worden ingeschat 2) Dynamische fouten (kwadrant glitch, backlash, stick slip) zie ISO 230-4. Ondersteunende software is beschikbaar (met help-functies) 3) Volumetrische testen (3 vlakken) in één scherm te bekijken 4) Lineaire assen zijn afzonderlijk te scheiden (lineaire positioneerfout, rechtheidsfout, hoekfouten) 5) Maatbepaling (diameter) van de uitgevoerde test	1) Positie- en oriëntatiefouten van rotatieassen 2) Bewegingsfouten van rotatieassen
Machinefouten die niet gemeten kunnen worden	1) Dynamische fouten in 3D, tenzij vier tracers beschikbaar zijn	1) Kan niet worden ingezet voor 3D-meting van volumetrische nauwkeurigheid 2) Kan niet voor rotatieassen worden ingezet	1) Meetgebied is beperkt door de lengte van het system, waardoor voornamelijk locale fouten gedetecteerd kunnen worden; de ballbar zelf is 100 mm lang, maar kan worden verlengd tot 600 mm 2) Maatbepalingen (met uitzondering van de diameter van de uitgevoerde test)	Fouten van lineaire assen

2.2 INDIRECTE MEETMIDDELEN

Met behulp van afnamestukken kan de nauwkeurigheid van bewerkingsmachines op indirecte wijze worden geverifieerd. Indirect, omdat eerst een product verspaand wordt op de machine in kwestie en hiervan vervolgens de relevante maten dimensioneel worden opgemeten. Visuele inspectie geeft vaak ook al een indicatie van de kwaliteit van het afnamestuk.

Een afnamestuk zou aan een aantal eisen moeten voldoen:

- eenvoudig en snel te frezen
- eenvoudig en snel op te meten
- eenvoudig om de meetresultaten te interpreteren
- de invloed van de machine tonen, en niet die van het gebruikte snijgereedschap en/of de opspanmethode

In het hiernavolgend overzicht worden een drietal afnamestukken voor vijfassige freesmachines toegelicht. Het is bovendien verkeerd te denken dat met één afnamestuk alle mogelijke machinefouten gedetecteerd kunnen worden, laat staan dat het bruikbaar is voor alle mogelijke vijfassige machineconfiguraties (zie fig. 5a, 5b en 5c). Vijfassige freesmachine bestaan grosso modo in drie verschillende configuraties. Bij de kleinere machines zitten beide rotatieassen meestal vervat in de tafel en spreekt men ook wel van het type 2x RAT (Rotation Axes Table). Bij de grote vijfassige freesmachines, die men vaak aantreft in de luchtvaart en prototypebouw, zitten beide rotatieassen vaak in de freesspil. Deze machines zijn van het type 2x RAH (Rotation Axes Head). De combinatie van beide types heet 1x RAH + 1x RAT.



Fig. 5a: 2x RAT



Fig. 5b: 2x RAH



Fig. 5c: 1x RAT+1x RAH

2.2.1 CONUS NAS979

In de jaren zestig heeft de AIAA (Aerospace Industries Association of America) een nieuwe standaard gepubliceerd, genaamd NAS (National Aerospace Standard). Eén van de afnamestukken hierin was een conus om de nauwkeurigheid van vijf simultane (drie lineaire en twee rotatieve) bewegingsassen te evalueren: de conus volgens NAS979 (fig. 6).

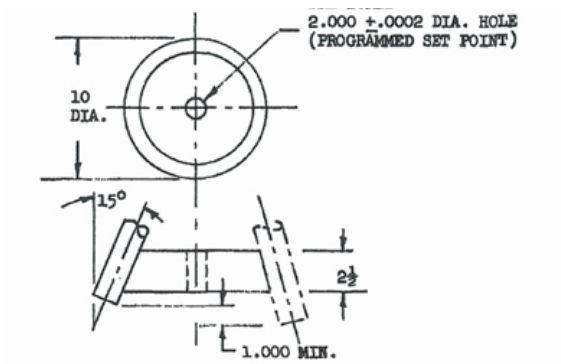


Fig. 6: Conus volgens NAS979

De initiële beschrijving van dit afnamestuk in NAS979 was eerder beperkt: centrale opspanning van de conus en vijf assen die gelijktijdig moeten bewegen tijdens het contourfrezen van de conusmantel (fig. 6). Voor typische machines uit de luchtvaartindustrie uit die tijd was deze beschrijving voldoende. Voor andere vijfassige machineconfiguraties was een meer gedetailleerde en modernere beschrijving van de setup vereist. In dat kader is recent in Zwitserland onderzoek gevoerd voor de drie hogervermelde vijfassige machineconfiguraties. Er zijn theoretische verbanden gelegd tussen de conushoek en de inclinatiehoek waaronder de conus wordt opgespannen en de rotatiehoeken van de vijfassige freesmachine. Er zijn verbanden gelegd tussen de rotatiesnelheden van de rotatieassen en de conushoek/inclinatiehoek bij een constante voedingssnelheid van het snijgereedschap. Om het dynamische gedrag van rotatieassen correct te evalueren, dient het verschil tussen conushoek en inclinatiehoek zodanig gekozen te worden, dat een maximale rotatiesnelheid is vereist bij een gegeven voedingssnelheid. Ook worden er aanbevelingen gedaan met betrekking tot de positionering van de conus op de opspantafel en worden effecten van geometrische machinefouten op de gefreesde conusvorm geëvalueerd.

Experimenten en simulaties hebben tot volgende besluiten geleid:

- De conusvorm geeft een goed beeld van de globale vijfassige contourperformantie.
- Individuele geometrische fouten kunnen niet worden gedetecteerd uit de opgemeten conus.
- Als de conusvorm typische fouten vertoont, dan kan het aantal geometrische fouten wel worden gereduceerd tot een beperkt aantal machinefouten.
- Er kunnen combinaties van fouten voorkomen die elkaar opheffen en die dus niet zichtbaar zijn op de conus.

2.2.2 AFNAMESTUK NC GESELLSHAFT

In juli van 2005 presenteerde het Duitse NC Gesellschaft (ook gekend van het drieassige afnamestuk voor hogesnelheidsfrezen) een vijfassig afnamestuk aan het publiek. De bedoeling van het afnamestuk is om binnen een zeer korte tijdspanne te onderzoeken welke de kwaliteit is van de combinatie vijfassige freesmachine, postprocessor en sturing. Op die manier moeten gebruikers in één oogopslag een idee krijgen van de kwaliteit (statische en dynamische nauwkeurigheid en bewerkingsnelheid) van het voornoemde systeem.



Afmetingen : 105 x 75 x 40mm

Materiaal : Polyurethaan (later eventueel ook aluminium)

Gereedschap : Spiebaanfrees diam. 6mm /
 $a_p > 10\text{mm}$ / centrumsnijdend /
 uitsteeklengte $> 25\text{mm}$

Bewerkingstijd : 6 à 10min. (afhankelijk van de snelheid van de machinesturing)

Fig. 7: Vijfassig afnamestuk NCG

Interpretatie van het afnamestuk gebeurt hoofdzakelijk visueel en kan direct na het frezen gebeuren. De beoordeling dient wel door een expert te gebeuren. Verder betreft het ook geen kwantitatieve benadering. Dit afnamestuk dient eerder als een hulpmiddel en een snelle test gezien te worden. Het is niet de bedoeling om andere en meer nauwkeurige meetprincipes te vervangen.

Het afnamestuk is opgebouwd uit 47 verschillende maar weldoordachte vormelementen, ingedeeld in vijf groepen. Per groep kan een specifieke foutenbron worden geanalyseerd, maar een echte diagnose van de foutenbron wordt niet voorgesteld.

2.2.3 AFNAMESTUK KINEMATISCHE FOUTEN ROTATIEASSEN

Voorliggend afnamestuk wil door middel van een aantal eenvoudige verspaningstesten met een cilindrische of rechte frees de kinematische fouten van de rotatieassen van een vijfassige freesmachine bepalen.

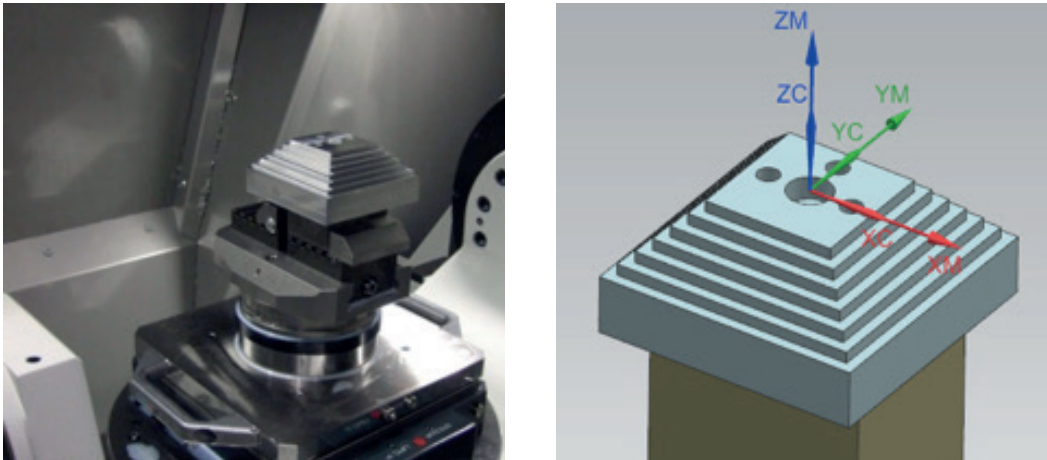


Fig. 8: Vijfassig afnamestuk kinematische fouten rotatieassen

Het afnamestuk is opgebouwd uit een aantal trapjes die volgens welbepaalde bewerkingspatronen worden gefreesd (fig. 9). De kinematische parameters (fouten) van de rotatieassen zijn wiskundig gelinkt met de dimensies van de gefreesde geometrie. Door de relevante geometriedelen op te meten, kunnen de kinematische fouten worden berekend. In totaal betreft het acht kinematische fouten met betrekking tot de rotatieassen: vier hoekfouten en vier translatiefouten.

AlphaAY	Hoekverdraaiing van de A-as rond de X-as
BetaAY	Hoekverdraaiing van de A-as rond de Y-as
GammaAY	Hoekverdraaiing van de A-as rond de Z-as
BetaCA	Hoekverdraaiing van de C-as rond de Y-as
DeltaXAY	Lineaire verschuiving van de A-as volgens de richting van de X-as
DeltaYAY	Lineaire verschuiving van de A-as volgens de richting van de Y-as
DeltaZAY	Lineaire verschuiving van de A-as volgens de richting van de Z-as
DeltaYCA	Lineaire verschuiving van de C-as volgens de richting van de Y-as

Opmerking: De geometrische opbouw en bewerkingsmethodiek van het huidige afnamestuk is in eerste instantie gericht op vijfassige freesmachines met beide rotatieassen in de tafel, waarbij de rotatieassen bovendien loodrecht op elkaar staan (2x RAT = Rotation Axis Table) (fig. 5a), en waarbij de A- of B-as minstens tussen -90° en $+90^\circ$ kan roteren. Bovenstaande tabel is van toepassing voor een vijfassige freesmachine met A- en C-as.

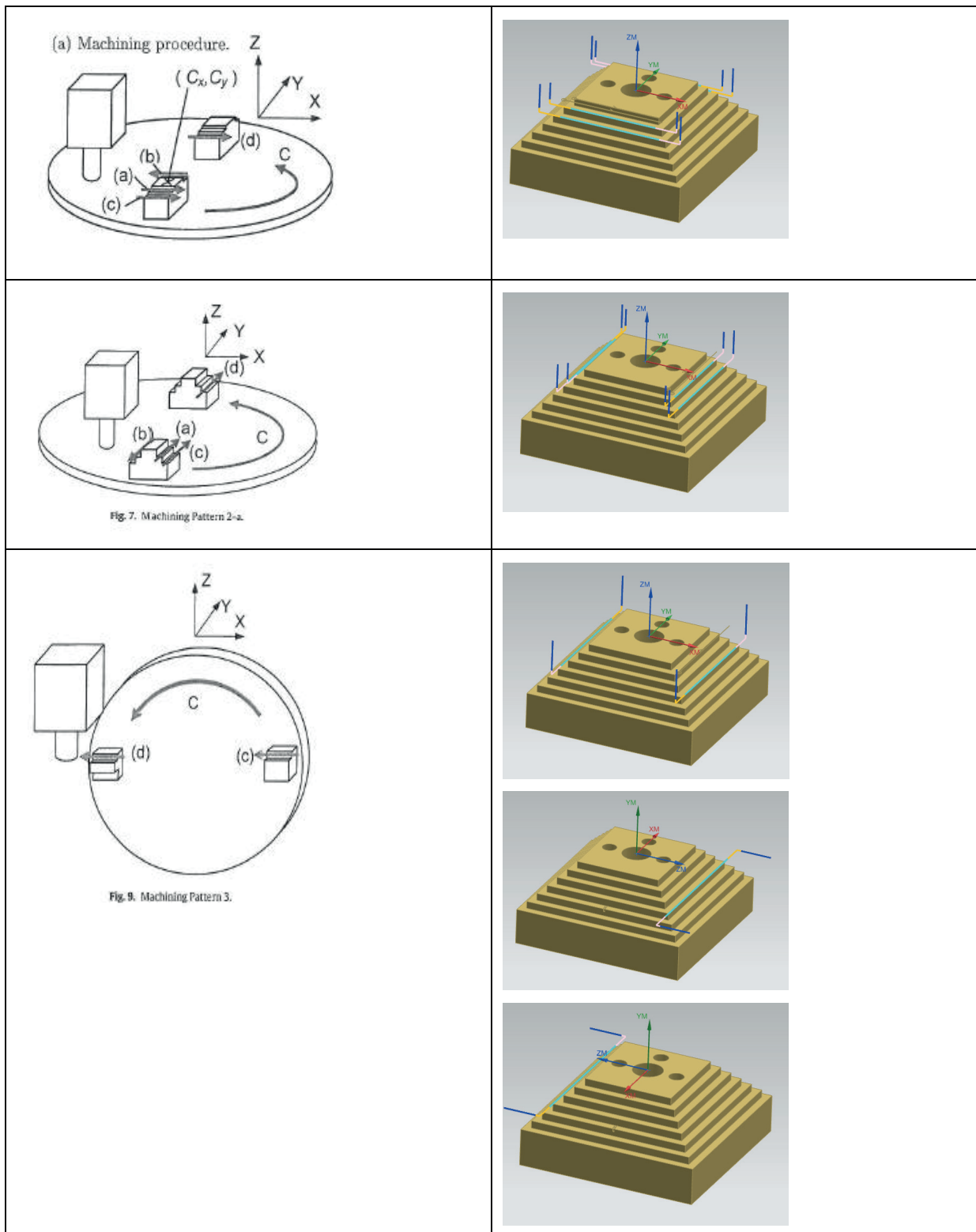


Fig. 9: Bewerkingspatronen afnamestuk kinematische fouten rotatieassen
Een meer gedetailleerde beschrijving en afwerkingsprocedure is bij Sirris beschikbaar.

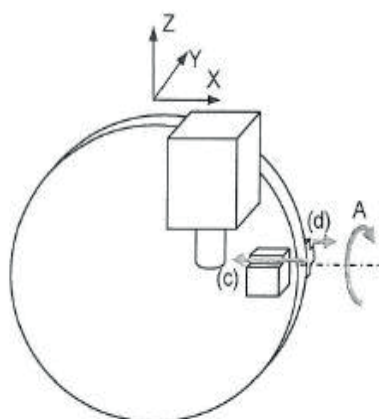


Fig. 10. Machining Pattern 4.

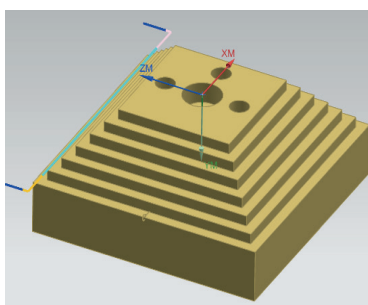
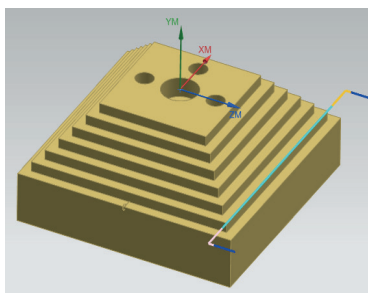
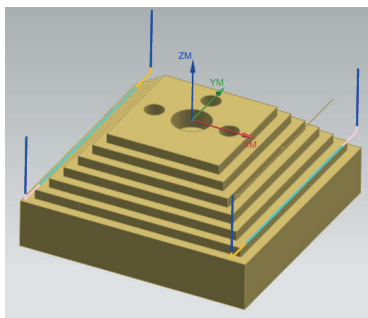


Fig. 9: Bewerkingspatronen afnamestuk kinematische fouten rotatieassen
Een meer gedetailleerde beschrijving en afwerkingsprocedure is bij Sirris beschikbaar.

CONTACT

Krist Mielnik
Advanced Manufacturing, Precision
Tel: +32 498 91 93 33
krist.mielnik@sirris.be
Wetenschapspark 9
3590 Diepenbeek