De flexibele productiefaciliteit van de toekomst

AutoFlex-QRM: geautomatiseerde flexibele 'single-piece-flow' productie

Veel bedrijven in Nederland moeten het niet zozeer hebben van massaproductie, maar zijn vooral sterk in flexibiliteit en kleine series. Het kan in dit geval een uitdaging zijn om het productieproces te automatiseren, omdat klassieke automatisering gericht is op het produceren van grote aantallen identieke producten. Quick Response Manufacturing (QRM) kan hierin een uitkomst bieden, omdat het procesgeoriënteerd is en daarnaast geschikt is voor de high-mix/low-volume productie.

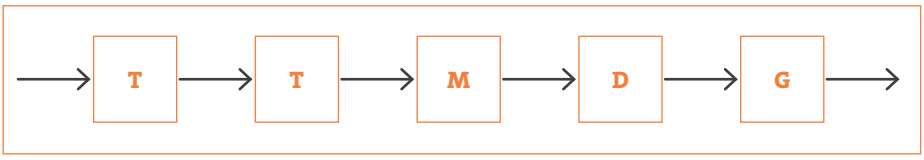
In het project AutoFlex-QRM, dat staat voor *Automatisering van Flexibele Quick Response Manufacturing* is kennis ontwikkeld om te komen tot een geautomatiseerde flexibele 'single-piece-flow' productiefaciliteit. Leidraad hierbij is de Quick Response Manufacturing-methode[1], waarbij doorlooptijdverkorting een belangrijke rol speelt. Dit project is samen met machinebouwer en systeemintegrator AWL-Techniek uitgevoerd en is ondersteund door TechForFuture. Het project is medio 2020 gestart en medio 2022 afgerond.

De ontwikkelde generieke methoden om te komen tot zo'n productiefaciliteit, zijn fysiek en virtueel getoetst. Fysiek door middel van een demonstrator bestaande uit één AMR en één productiecel met een robot/cobot. Virtueel door middel van een simulatie van meerdere bij elkaar horende stappen in een productieproces. De demonstrators zijn gerealiseerd op de locatie van het open innovatiecentrum Perron038 in Zwolle.

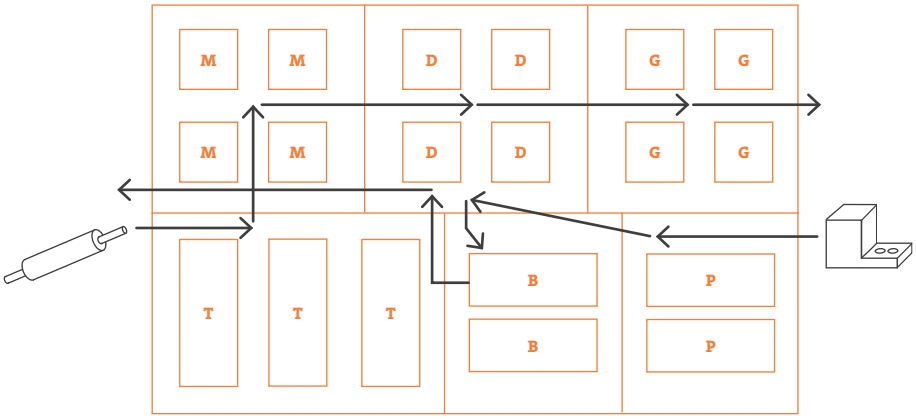
Door Wilbert van de Ridder, Richard Rosing, Peter Schuurhuis, Paul Klop en Aart Schoonderbeek

Waarin moet u investeren als u voor een grote en dure aanschaf staat voor nieuwe productiemiddelen? Stel dat de afschrijftermijn acht jaar is en u nu nog amper weet welke producten uw klanten over drie jaar vragen? Ook weet u niet hoeveel producten uw klanten over drie jaar vragen. Dan ligt het voor de hand om te investeren in een zo flexibel mogelijke oplossing. Daarnaast blijkt dat vakmensen steeds schaarser worden. Beide uitdagingen zijn goed te adresseren door te investeren in een geautomatiseerde oplossing die flexibel is: flexibel wat diversiteit in producten betreft, maar ook wat de capaciteit betreft. Zover is het duidelijk. Maar dan de vraag *waarin* u moet investeren: mogelijk ligt u daar wakker van. En helaas, een kant-en-klare oplossing bestaat niet.

Gelukkig bent u niet de enige die tegen dit soort vragen aanloopt. Er is de nodige kennis en ervaring beschikbaar, maar u zult ook zelf aan de slag moeten om een en ander voor uw specifieke productieproces succesvol in te kunnen zetten. Vanuit de praktijkgerichte onderzoeksgroep *Industriële Automatisering & Robotica* van de Hogeschool Windesheim zijn dit soort vraagstellingen bij bedrijven onderkend. Daarom is een eerste aanzet gedaan om hiervoor kennis te ontwikkelen, zoals concepten en handreikingen voor het flexibel inrichten en het digitaal aansturen van een productiefaciliteit. Deze kennis is getoetst en toegepast in een praktische implementatie in een demonstrator, waarop verder gebouwd wordt. De resultaten worden gedeeld met bedrijven. Verder wordt met deze kennis het onderwijs verrijkt, om zo de toekomstige medewerkers van de bedrijven voor te bereiden om met deze vraagstelling om te kunnen gaan.



Figuur 1: Product lay-out[2], de letters representeren een productiestap of een bewerking.



Figuur 2: Proces lay-out[2], met voor elke product een unieke weg. De letters representeren een productiestap of een bewerking.

Flexibiliteit in de productie is geen keuze maar noodzaak, om snel en met de vereiste kwaliteit te kunnen aansluiten op de klantvraag. Denk bij flexibiliteit aan verandering in type producten, het productievolume en de productmix. Het is nodig hierop in te spelen om de kosten beheersbaar te houden maar ook de doorlooptijd te beheersen, zodat aan de klantvraag kan worden voldaan. Met flexibele productie kan een breder productportfolio worden aangeboden zonder (grote) voorraden aan te moeten houden. Door de productie flexibel in te richten, kan ook sneller worden ingesprongen op veranderende toeleveranciers, toegeleverde onderdelen en materialen. Deze veranderingen kunnen nodig zijn om te kunnen blijven leveren bij calamiteiten die optreden in de productie en/of distributie vanuit toeleveranciers, zoals recent bij de Corona-lockdownmaatregelen, een schip dat het Suezkanaal blokkeert, brand in de fabriek van een toeleverancier of oorlog in toeleverende landen.

Flow en one piece flow

Een productiefaciliteit kan op verschillende manieren georganiseerd zijn. Bij 'flow' productie is de lay-out van de productiefaciliteit geoptimaliseerd voor een bepaald product en niet eenvoudig aan te passen voor andere producten. Dit wordt product lay-out genoemd (zie figuur 1). Bij 'batch' productie wordt gebruik gemaakt van een proces lay-out (figuur 2). Hierbij worden series van een bepaald aantal producten gelijktijdig geproduceerd die een productafhankelijke weg door de productiefaciliteit volgen. Een nadeel bij product lay-out zijn de tussenvoorraden. Bij plaatwerkproducten worden bijvoorbeeld eerst alle producten geknipt, waarna de hele serie tegelijk naar de volgende bewerkingsmachine gaat. Hierbij is dus hooguit één product uit de serie in bewerking en ligt de rest te wachten.

Bij proces lay-out daarentegen, in zijn meest pure vorm, is voor ieder product een unieke weg door de productiefaciliteit mogelijk: we noemen dat one piece flow. Hierbij is het product dat gemaakt wordt continu in bewerking of beweging, van begin tot eind van het productieproces. In de praktijk gebeurt dit niet en worden bepaalde seriegroottes aangehouden, omdat anders de logistiek van producten door de fabriek en de planning te complex wordt. Maar wanneer de proces lay-out gecombineerd wordt met automatisering van de logistiek door Autonome Mobiele Robots (AMR's) en planning door geavanceerde software, kan een efficiënte productiefaciliteit gerealiseerd worden voor high-mix/low-volume productie. Hierbij gaat het dan niet om compleet verschillende producten, maar bijvoorbeeld om plaatwerkproducten in kleine aantallen met een grote variatie in bijvoorbeeld materiaal, afmetingen en bewerkingen.

Productieproces is leidend

De resulterende productiefaciliteit lijkt hierbij op de werkwijze van een ambachtelijke werkplaats. De vakman gaat met zijn werkstuk van machine naar machine, stelt deze in zoals nodig en voert bewerking na bewerking uit. Het productieproces is leidend. Zoals de ambachtsman zijn werk organiseert, is bij QRM ook de productiefaciliteit georganiseerd. Door automatisering is hierbij ook een hoge productiviteit bij een flexibele productie mogelijk.

In dit project wordt gewerkt aan een productiefaciliteit waarin de voordelen van de flexibiliteit van de ambachtsman en een verregaande mate van automatisering gecombineerd worden. Met name de flexibiliteit is een uitdaging waar veel belangstelling voor is en waarbij wereldwijd de nodige ontwikkelingen gaande zijn. Zowel hardware als software moeten geschikt zijn om die flexibiliteit te realiseren. Wat de software betreft geldt die flexibiliteit zowel voor het bewerkingsstation (bijvoorbeeld: wat moet de robot doen) als ook voor de aansturing van de productiefaciliteit (bijvoorbeeld communicatie naar de robot over welk product er aan komt). Bovendien moeten de mechanische hardware, de elektrische hardware en de software naadloos op elkaar aansluiten. Dat vraagt complexe systemen, die dan ook tijdrovend (en duur) zijn om te ontwikkelen. Belangrijk is daarbij tot een modulaire opbouw te komen om de tijds- en geldinvestering acceptabel te houden.

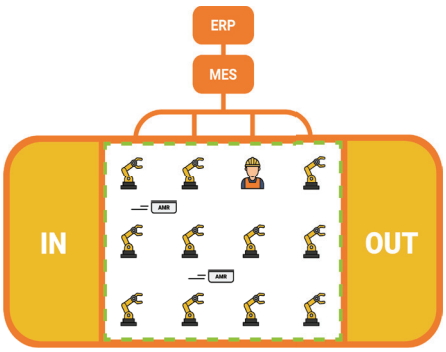
In het project wordt uitgegaan van een productiefaciliteit waarin diverse bewerkingsstations staan – zie figuur 3. Deze kunnen gebaseerd zijn op gerobotiseerde bewerkingen, maar uiteraard is het ook mogelijk bepaalde bewerkingen door vakmensen uit te laten voeren. Een AMR rijdt van het magazijn met benodigde gereedschappen, mallen en onderdelen alleen langs de bewerkingsstations die nodig zijn voor dat product. Bewerkingsstations kunnen daarbij ook hardwarematig zo zijn uitgerust

dat meerdere bewerkingen uitgevoerd kunnen worden, bijvoorbeeld door het automatisch wisselen van robottools. Op deze manier kan elk product een unieke weg en een uniek bewerkingsproces door de productiefaciliteit volgen.

De demonstrator

Enerzijds is in dit project gewerkt aan generieke methoden, anderzijds zijn deze toegepast voor een concrete casus. Dit om te kunnen testen en valideren, maar ook om aan de hand van voorbeelden te kunnen laten zien hoe het een en ander te implementeren en te realiseren is. Als casus is gekozen voor de assemblage van een autostoelframe. AWL levert veel machines voor het lassen van dergelijke frames. Daarna moet het nodige toegevoegd worden, zoals een scharnieras, clipjes en andere bevestigingscomponenten. Van dit product bestaan veel variaties, onder andere door allerlei mogelijke opties voor de eindklant: wel of geen elektrische verstelling, wel of geen stoelverwarming, enzovoorts. De benaming van de rugleuning van een auto voorstoel is Front Seat Back, oftewel FSB. Voor dit project is gebruik gemaakt van een 3D-geprinte dummy-FSB, zoals weergegeven in figuur 4. In figuur 4 zijn ook de assemblagestappen verduidelijkt.

Om een handeling/bewerking uit te kunnen voeren is hardware en software nodig. Deze worden achtereenvolgens beschreven. In dit artikel is met name geconcentreerd op het assemblageproces tot en met het plaatsen van de as in de FSB. Deze kan verschillende vormen hebben (vierkant, zeskant, enzvoort) en het



Figuur 3: Lay-out zoals in het project onderzocht. Verschillende bewerkingsstations zijn opgesteld, waarbij ook bewerkingen door vakmensen mogelijk zijn. Gereedschappen, mallen en onderdelen worden door AMR's aangevoerd vanuit het magazijn (aangegeven met 'IN') en zodra het product gereed is worden deze door de AMR naar de expeditie gebracht (aangegeven met 'OUT'). De productie wordt aangestuurd vanuit ERP (Enterprise Resource Planning) en MES (Manufacturing Execution System).

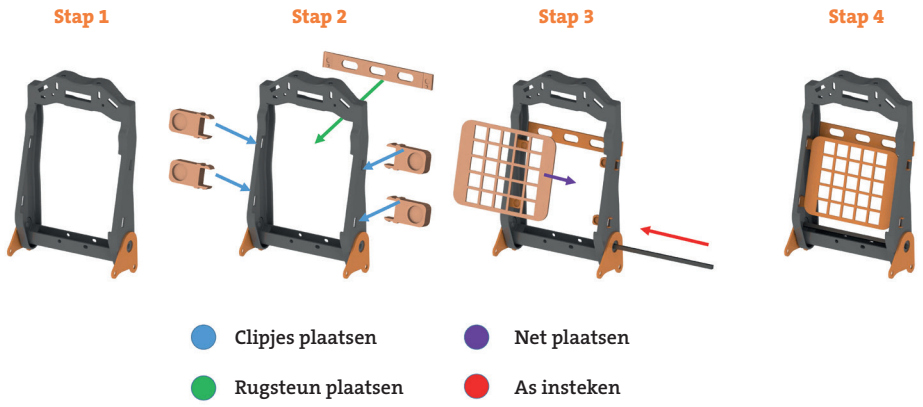
plaatsen is een complexe handeling. Een AMR, in dit geval een MiR100, is gebruikt voor de aanvoer van onderdelen naar het bewerkingsstation met een cobot.

Wat betreft gereedschappen en tooling voor de bewerkingsstations is eerst gewerkt aan het ontwikkelen van multifunctionele robot-tools en grippers. Maar van die aanpak is snel afgestapt. Wanneer verschillende varianten van een product gemaakt worden, kan met veel moeite een gripper ontwikkeld worden, die met meerdere varianten van een product om kan gaan. Problematisch wordt het zodra een klant met een nieuwe variant komt, waar de complexe gripper niet geschikt voor is. Daarom is gekozen voor een gripperwisselsysteem, zodat bij een nieuwe variant van een product hiervoor een nieuwe gripper snel gerealiseerd kan worden.

De eerste twee stappen in het assemblageproces zijn in de demonstrator als volgt uitgevoerd. Een snelwisselsysteem voor de cobot maakt gebruik van verschillende grippers mogelijk. Grippers zijn 3D-geprint, zodat op basis van de geometrische eigenschappen van het product snel een specifieke gripper te realiseren is. Voor de gripper is topologieoptimalisatie gebruikt voor een zo licht mogelijk ontwerp. Het resultaat is weergegeven in figuur 5. De AMR komt met een mal naar een operator rijden, die hier vervolgens de onderdelen voor de FSB in legt (figuur 4 – stap 1). De AMR rijdt vervolgens naar het bewerkingsstation, waar de onderdelen samengevoegd worden. Hierbij is er voor gekozen om de FSB op de AMR te laten liggen. Aangezien de bewerkingstijd kort is, wordt daarmee tijd voor het positioneren in het bewerkingsstation vermeden.

Vervolgens wordt de as in de FSB geplaatst. Daarvoor blijkt echter de positionering van de AMR niet nauwkeurig genoeg. Een keuze is dan om de FSB op te pakken van de AMR en bijvoorbeeld in een mal op het bewerkingsstation nauwkeurig te positioneren, te bewerken en daarna weer terug te plaatsen op de AMR. Echter: de benodigde tijd daarvoor is relatief lang in vergelijking met de bewerkingstijd. In dit geval is gekozen om door middel van camera's te bepalen waar de AMR staat, de FSB op de mal op de AMR te laten en de beweging van de robot te corrigeren voor de positie van de AMR. Dit is weergegeven in figuur 6. Daarin is de mal op de AMR, de FSB en de calibratieplaat zichtbaar. De camera's (3D) vallen buiten beeld, maar hangen boven de AMR. Ook zijn de ronde positioneringsmarkers zichtbaar, op basis waarvan met camera's de positie van de mal op de AMR wordt bepaald.

Zodra de AMR-positie is bepaald, plaatst de cobot de as. Hiervoor is een actief aangedreven gripper ontwikkeld, die de as oppakt en door middel van een stappenmotor in de FSB



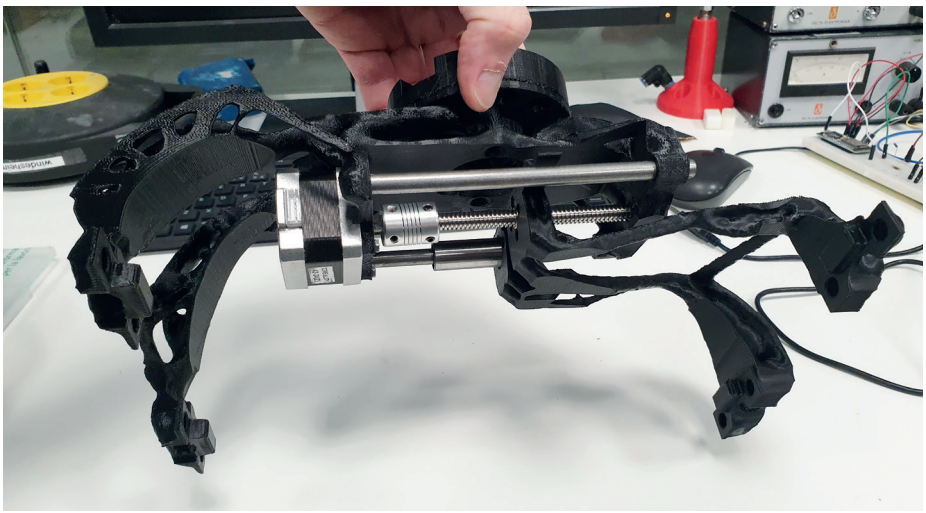
Figuur 4: Assemblagestappen Front Seat Back.

schuift. Een mens hoeft amper na te denken bij deze handeling, maar voor een cobot is het een complexe taak. De ontwikkeling van deze gripper is volgens een iteratief proces uitgevoerd. Eerste ideeën zijn in een eerste ontwerp vastgelegd, die vervolgens uit 3D-geprinte onderdelen is gebouwd. Deze is getest en daarbij is het nodige geleerd, wat vervolgens een verbeterd ontwerp heeft opgeleverd. Uiteindelijk zijn vijf grippers ontworpen, die telkens beter functioneerden op basis van de ervaringen met de vorige. De vijfde gripper voert de taak naar wens uit: een mooi voorbeeld van het komen tot een functionerend ontwerp op basis van prototypes en experimenten. Voor de te automatiseren taken zijn juist deze experimenten noodzakelijk en is de 3D-printer een waardevol gereedschap om snel en tegen acceptabele kosten verbeterstappen te zetten. In figuur 7 is zichtbaar hoe de as in de FSB geschoven wordt.

Software

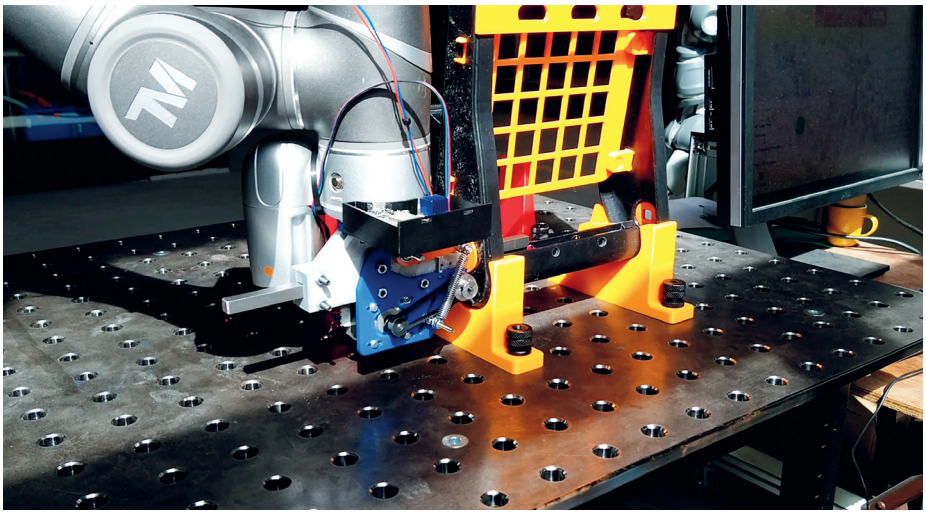
Naast wat tot dusver werd beschreven is software ontwikkeld en geïmplementeerd om het bewerkingsproces aan te sturen. De gebruikte software bestaat uit een aantal softwarepakketten van de fabrikanten behorende bij de gebruikte hardware en uit softwarepakketten op diverse niveaus om de productiefaciliteit aan te sturen. De verschillende niveaus zijn weergegeven in figuur 8.

- De productiefaciliteit wordt aangestuurd vanuit een ERP-pakket (Enterprise Resource lanning). Hierin is onder andere vastgelegd wat geproduceerd moet worden, bijvoorbeeld 10 producten variant A, 5 producten variant B en 3 producten van variant C. In dit project is gebruik gemaakt van het ERP-pakket Ridder IQ van ECI Solutions[3].
- Het MES-niveau (Manufacturing Execution System) is zelf geprogrammeerd. Hierin is de data beschikbaar om de in ERP-niveau genoemde producten te kunnen maken. Op het MES niveau wordt de planning gemaakt. Welke onderdelen en bewerkingen nodig zijn, wordt uit het ERP niveau opgevraagd.
- Op het niveau DDS (Data Distribution Service) bevindt zich een knooppunt van informatiestromen. In dit project is gebruik gemaakt van RTI Connext[4]. De werking van DDS wordt later in de tekst beschreven.



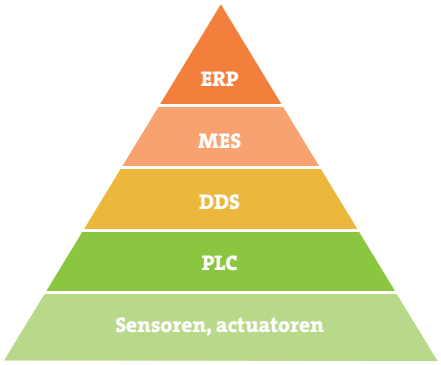
Figuur 5: Topologie geoptimaliseerde en 3D-geprinte gripper.

Figuur 6: De mal met FSB en markers.



Figuur 7: De gripper om met de cobot de as in de FSB te schuiven.

- De onderliggende lagen PLC en sensoren & actuatoren communiceren via het DDS-niveau met elkaar. In plaats van de PLC in combinatie met sensoren & actuatoren in een machine, kan dit bijvoorbeeld ook een robotcontroller met robot zijn. Voor het niveau van de PLC's en robotcontrollers is de aanwezigheid van open softwarestandaarden noodzakelijk, om te kunnen communiceren met de andere systemen.



Figuur 8: Automatiseringsniveaus.

Een ERP softwarepakket is 'gewoon' te koop, evenals een robot met bijbehorende besturing. Complexer wordt het om de verschillende automatiseringsniveaus én de verschillende machines met elkaar te verbinden. Elke leverancier van machines (hardware) heeft eigen specifieke software. Deze software is van belang om de functionaliteit van de machines te kunnen benutten. Dit geldt bijvoorbeeld voor de fleetmanager software van de AMR. Deze software regelt verschillende zaken, zoals het zo efficiënt mogelijk opladen van de verschillende AMR's. Ook de robotsoftware bevat diverse noodzakelijke functionaliteiten, zoals nauwkeurige aansturing van de assen, maar ook de aansturing van veiligheidssystemen. Alle benodigde software voor een productiefaciliteit als één geïntegreerd pakket ontwikkelen is dan ook geen optie: te complex en te veelomvattend.

De informatie in de diverse softwarepakketten moet echter wel beschikbaar zijn op hogere automatiseringsniveaus en voor andere machines om het geheel van de productiefaciliteit te laten functioneren. De robot moet bijvoorbeeld starten met een actie, zodra de AMR de juiste positie bereikt heeft. Hiervoor is de open DDS-standaard gebruikt, geïmplementeerd door middel van de RTI Connext software. Het werkingsprincipe is weergegeven in figuur 9. De diverse machines in de productiefaciliteit genereren data. De gezamenlijk benodigde data wordt door DDS beheerd in een virtuele gezamenlijke database. In dit artikel 'cloud' genoemd. De data blijft binnen de productiefaciliteit en komt niet op het internet terecht, zoals vaak het geval bij het begrip 'cloud'. Denk bij de data onder andere aan de positie van de AMR's, of deze beschikbaar of aan het opladen zijn, maar ook de positie van een robot of cobot, of deze 'stand-by' is of een product aan het bewerken is, enzovoort.

Vanuit het MES-niveau wordt op basis van deze informatie de productiefaciliteit aangestuurd. Als een product een bewerking heeft ondergaan, wordt nagegaan of een station voor de volgende bewerking beschikbaar is en mocht dat niet het geval zijn, wanneer dan wel. Op deze manier hebben de softwarepakketten op de verschillende niveaus de informatie over de machines beschikbaar, maar wordt de informatie zelf op maar één plaats beheerd.

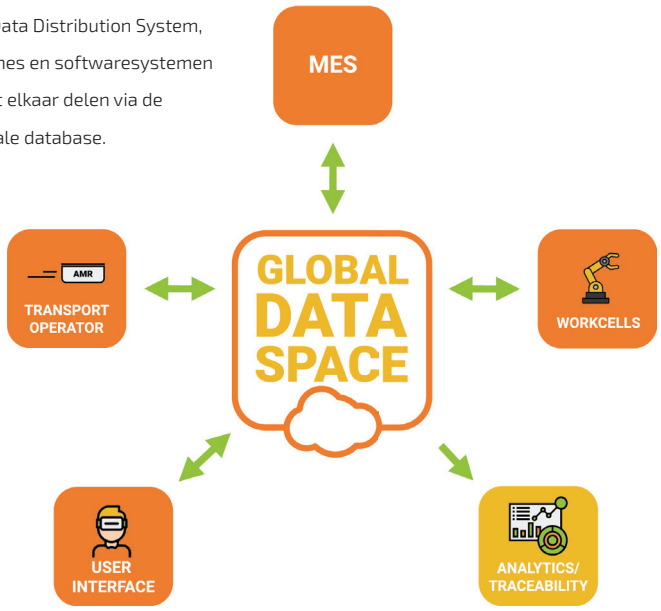
Het programmeren en implementeren van MES en DDS is het belangrijkste stuk softwareontwikkeling in het project. De software van de diverse leveranciers van de machine heeft diverse communicatiemogelijkheden. Echter, om een beeld te gebruiken: dit is te vergelijken met e-mailsoftware. Wanneer alle collega's dezelfde e-mailsoftware installeren, gebeurt er nog niets. De communicatiestructuur is er, maar er gaan nog geen berichten heen en weer. Zo is het ook bij de communicatie tussen industriële systemen. Wat, hoe, wanneer gecommuniceerd gaat worden moet vastgelegd worden en de berichten moeten ook daadwerkelijk verzonden worden. Ook de betekenis van de berichten en eventuele controlemechanismen (ontvangst- en verzendbevestigingen) moeten 'ontworpen' en geïmplementeerd worden. In dit project is daarvoor een eerste versie ontwikkeld en geïmplementeerd.

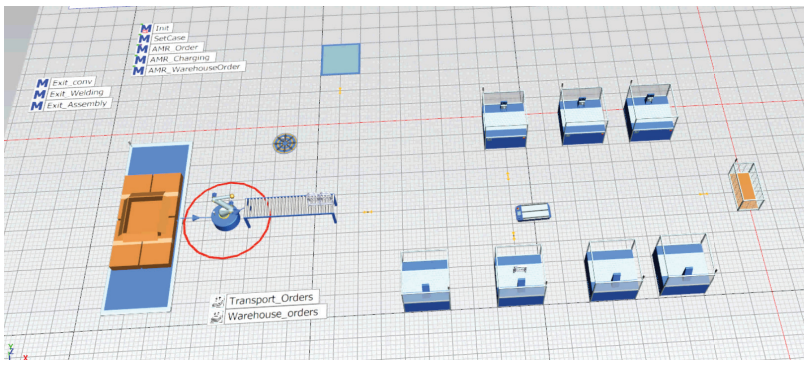
Simulatie

Tot dusver is de realisering van de fysieke demonstrator op verschillende niveaus beschreven, evenals de daarvoor benodigde software. De fysieke demonstrator betreft echter één cobot en één AMR. Om de relevantie van de ontwikkelde concepten en software aan te tonen, is een virtuele productiefaciliteit met meerdere bewerkingsstations en AMR's gerealiseerd. De virtualisatie en simulatie is in twee stappen uitgevoerd. Als eerste is met Siemens Plant Simulation[5] een oplossing getest om te komen tot een optimum voor routing en bezettingsgraad met de beschikbare machines. Een impressie hiervan is weergegeven in figuur 10.

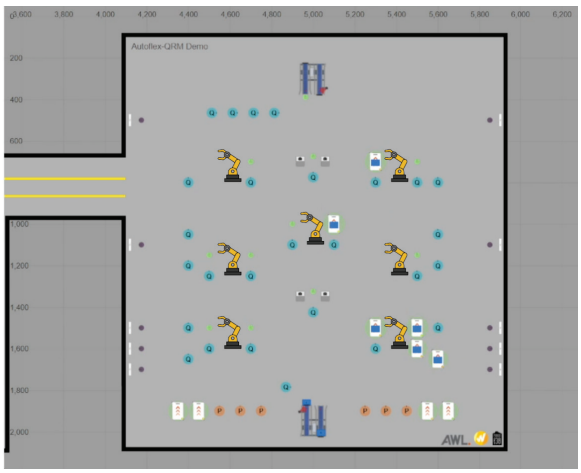
Om ook de werking van de MES- en DDS-software te testen is een tweede simulatie uitgevoerd. Een impressie hiervan, waarbij de productie al enige tijd gaande is, is getoond in

Figuur 9: Een Data Distribution System, waarbij machines en softwaresystemen informatie met elkaar delen via de (virtuele) globale database.





Figuur 10: Simulatie met Siemens Plant Simulation.



Figuur 11: Simulatie van de productiefaciliteit, waarbij te zien is dat na enige tijd een opstopping van AMR's ontstaat bij het robot-bewerkingsstation rechtsonder.

figuur 11. Hierin is zichtbaar dat na verloop van tijd een opstopping ontstaat bij het robot-bewerkingsstation rechtsonder in figuur 11. De simulatie toont aan dat MES en DDS naar behoren functioneren. Bovendien is het mogelijk om door middel van de simulatie 'bottlenecks' in de productie op te sporen. De capaciteit van het bewerkingsstation dat de belemmering vormt, kan vervolgens uitgebreid worden. Dit kan door een weinig gebruikt bewerkingsstation te voorzien van andere gereedschappen of door een extra bewerkingsstation in de productiefaciliteit toe te voegen. Daarbij komt dan het grote voordeel van DDS naar voren. Een bewerkingsstation kan softwarematig eenvoudig worden toegevoegd of afgekoppeld. Dit bewerkingsstation zal zichzelf aanmelden en vervolgens beschikbaar zijn vanuit de MES-software en ingezet kunnen worden. Daarbij maakt het ook niet uit of bewerkingsstations fysiek of virtueel zijn, zodat ook gesimuleerd kan worden wat het effect is van het toevoegen van een extra bewerkingsstation op een reeds aanwezige fysieke productiecapaciteit, bezettingsgraad, doorlooptijd, enzovoort. Simulatie leert ook of het zinvol is om ergens tussen batch en single flow in te gaan zitten. Bijvoorbeeld bij productie van varianten A-B-A-B-A-B in deze volgorde, betekent dit mogelijk telkens een gereedschapswissel. Vooruitkijken in de planning kan leren dat B-B-B-A-A-A beter is, omdat gereedschap B al op het bewerkingsstation zit en de gereedschapswissel in vergelijking met de bewerkingstijd relatief lang is.

Conclusie en vervolgstappen

In het in dit artikel beschreven project is een concept neergezet en geverifieerd om volgens de QRM-methode een flexibele productiefaciliteit voor kleine series en enkelstuks te realiseren. Daarbij zijn simulaties een gereedschap om diverse mogelijkheden voor optimalisaties te evalueren, voordat de bewerkingsstations omgebouwd worden. Zoals de simulaties nu zijn, maakt de mens keuzes en evalueert ze deze. Een volgende stap zou kunnen zijn de software zelf een optimum te laten bepalen op basis van de te maken producten voor bijvoorbeeld de komende week. De daaruit bepaalde lay-out, het aantal stations voor een bepaalde bewerking en andere resultaten kunnen dan fysiek ingericht worden, waarna de productie kan starten.

Door de vooruitgang in de techniek wordt er steeds meer mogelijk. Daarom is het belangrijk om onderzoek en ontwikkeling te blijven uitvoeren om inzicht te krijgen welke elementen in een productieproces verder verbeterd kunnen worden om de flexibiliteit te vergroten. Dit helpt bedrijven na te denken over toekomstige scenario's voor hun productiefaciliteiten. Dit om richting de toekomst gestructureerd en stapsgewijs vanuit een bestaande productiefaciliteit, waarin grote investeringen zijn gedaan, toe te werken naar een toekomstscenario voor een fabriek met een hoge mate van automatisering en digitalisering. Deze productiefaciliteit dient de benodigde mate van flexibiliteit voor variaties in productieaantallen en veranderende producten te bezitten. Daarbij zijn open software standaarden van groot belang. Stappen moeten gezet worden, die nodig zijn om als industrie toekomstbestendig te zijn en te blijven.

De samenwerking tussen kennisinstellingen en bedrijven is noodzakelijk voor innovaties. Als kennisinstelling willen we graag weten waar de vragen en uitdagingen van de bedrijven voornamelijk liggen om te komen tot implementatie van innovaties. Veel nieuwe ontwikkelingen zijn beschikbaar, maar deze implementeren in de eigen specifieke productiefaciliteiten in bedrijven is vaak nog een uitdaging. Schroom niet om contact op te nemen, zodat we samen aan uw toekomst kunnen werken. Q

De auteurs van dit artikel zijn verbonden aan het Lectoraat Digital Business & Society – Industriële Automatisering & Robotica van hogeschool Windesheim in samenwerking met AWL-Techniek.
Dit project is gefinancierd door TechForFuture (www.techforfuture.nl), een samenwerking van Saxion en Windesheim en mede mogelijk gemaakt door de provincie Overijssel.

1 *Suri, R. (2010). It's About Time – The Competitive Advantage of Quick Response Manufacturing. Abingdon: Taylor & Francis Inc.*
2 *Askin, R. G. (1993). Modeling and Analysis of Manufacturing Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc.*
3 *ECI Software Solutions Inc. Ridder iQ – Innovatieve ERP-software voor Smart Manufacturing bij klantordergestuurde productie. Geraadpleegd op 25 mei 2022, van: www.ecisolutions.com/nl/erp/ridder-iq*
4 *RTI. The Connext Product Suite. Geraadpleegd op 25 mei 2022, van: www.rti.com/products*
5 *Siemens. Plant Simulation & Throughput Optimization. Geraadpleegd op 25 mei 2022, van: www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html*