



Verbetering van het productieproces van de staalproductie bij Koninklijke Auping B.V.



Thomas Kolner

Oktober 2016

Koninklijke Auping B.V.

-

Maagdenburgstraat 26

7421 DC

Deventer

Tel: +31(0)570-681911

www.auping.com

Document Title	Verbetering van het productieproces van de staalproductie bij Auping <i>Hoe kan de productielijn van de staalfabriek bij Auping gebalanceerd worden met betrekking tot de productieaantallen?</i> Bachelor thesis for the bachelor program Industrial Engineering and Management at the University of Twente
Status Public	Report Bachelor Assignment
Date	26-08-2016
Author	Thomas Kolner S1505432
Bachelor Program	Industrial Engineering and Management
Graduation Committee University of Twente	Dr. ir. J.M.J. Schutten <i>Faculty of Behavioral Management and Social Sciences</i> Dr. ir. M.R.K Mes <i>Faculty of Behavioral Management and Social Sciences</i>
Koninklijke Auping	Martijn van Haaf <i>Productiemanager</i>

Voorwoord

Voor u ligt mijn bacheloropdracht voor de opleiding Technische Bedrijfskunde aan de Universiteit Twente te Enschede. Met een goed gevoel kijk ik naar het onderzoek dat ik heb uitgevoerd. Erna kan ik stellen dat ik er veel van geleerd heb. Vooral de ervaringen die ik opgedaan heb door bij Auping te mogen meelopen en een kijkje te nemen achter de schermen zijn mij erg waardevol.

Graag wil ik daarom Auping hiervoor danken. Speciale dank gaat uit naar Martijn van Haaf voor de begeleiding met betrekking tot dit onderzoek. Verder wil ik alle medewerkers van Auping bedanken die mij tijdens dit onderzoek geholpen hebben. Als ik vragen had, kon ik overal gemakkelijk binnenlopen en werd ik goed geholpen. Ook mijn begeleider van Universiteit Twente Marco Schutten wil ik graag bedanken voor de adviezen en feedback die ik gehad heb bij het uitvoeren van mijn onderzoek en het schrijven van dit eindrapport. Als laatste wil ik mijn vriendin, mijn ouders en mijn broer bedanken. Zij gaven mij de benodigde steun voor het uitvoeren van dit onderzoek.

Thomas Kolner
Enschede, augustus 2016

Managementsamenvatting

Bij Koninklijke Auping bv voldoet de output van de staalfabriek niet aan de eisen en wensen van de productiemanager. Waarom de output niet voldoet en wat de beste productievolgorde is voor de staalfabriek van Auping is het onderwerp van dit onderzoek. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt:

‘Hoe kan de productielijn van de staalfabriek bij Auping gebalanceerd worden met betrekking tot de productieaantallen?’

De eerste stap van het onderzoek is een analyse van de huidige situatie van het productieproces en de flow van de producten door het productieproces. Het productieproces bestaat uit drie verschillende fases, namelijk de laslijnen, de lakkerij en de montage. Er zijn twee laslijnen, één lijn voor de vlakke spiraalbodems en één lijn voor de verstelbare spiraalbodems. De volgende stap in het productieproces is de lakkerij. In de lakkerij worden niet alleen de spiraalbodems, maar ook alle stalen onderdelen gelakt. Het laatste gedeelte van de staalfabriek is de montage. In het montageproces worden de laatste montagewerkzaamheden uitgevoerd. Uiteindelijk wordt de spiraalbodem verpakt in het montageproces. Het montageproces is afhankelijk van de output vanuit de lakkerij.

Om de prestaties van het productieproces te evalueren en verbeteringen te testen en te analyseren is een simulatiemodel gebruikt. Het simulatiemodel is geverifieerd door het gedrag van individuele stations in het simulatiemodel te testen. De validatie is uitgevoerd met behulp van ‘white-box’ validatie (Robinson, 2004). Het simulatiemodel is gebruikt voor het uitvoeren van experimenten. Het doel van de eerste experimenten was het analyseren van de huidige situatie. De resultaten van de eerste experimenten laten zien dat in de huidige situatie de afwijking in de output met 19% kan afnemen.

Deze afname wordt bereikt door een andere bepaling van de productievolgorde te kiezen in combinatie met het aanpassen van de indeling van de bufferbanen aan het einde van de lakkerij. Dit onderzoek bekijkt drie alternatieven voor de indeling van de bufferbaan, namelijk de huidige indeling, een nieuwe indeling en het toevoegen van een bufferbaan. De productievolgorde wordt gemixt bij het samenkomen van de vlakke en verstelbare spiraalbodems aan het eind van de laslijnen. Het toepassen van het Heijunka principe bij de laslijnen leidt tot een betere balans in het productieproces. In de literatuur is Heijunka als volgt gedefinieerd: ‘het gelijkmatig verdelen van het productievolume en de mix van diverse producten over een bepaalde tijd’ (Dennis, 2007). Voor Auping betekent de toepassing van het Heijunka het de gelijkmatig verdelen van de spiraalbodems in de productievolgorde om zo verschillen in procestijden gelijkmatig te verdelen. Bij de lakkerij in het productieproces worden de spiraalbodems en de onderdelen gemixt. De input van de lakkerij bestaat uit de spiraalbodems, die worden aangeleverd vanuit de laslijnen, en losse onderdelen. Om de output te balanceren blijkt uit de resultaten dat de productievolgorde voor de lakkerij een verdeling dient te hebben van 2 spiraalbodems en 1 onderdeel. Dit houdt in dat per drie ingaande ladingdragers, twee ladingdragers een spiraalbodem dienen te bevatten en één ladingdrager een onderdeel. Vanuit de lakkerij komen de ladingdragers in één van de twee bufferbanen terecht. Uit de resultaten blijkt dat een nieuwe indeling van de bufferbanen leidt tot laagste afwijking in de output. In de nieuwe indeling is de eerste bufferbaan voor de alle spiraalbodems en is de tweede bufferbaan voor de onderdelen. Echter geldt er wanneer een bufferbaan vol is, de producten in de andere bufferbaan terecht komen.

Naast het uitvoeren van experimenten in de huidige situatie zijn er experimenten uitgevoerd om te bepalen of het toevoegen van bufferbaan leidt tot een betere balans voor de toekomstige scenario's. Het eerste scenario is een stijging van het aantal onderdelen. De productieaantallen van de onderdelen en de spiraalbodems zijn gelijk. In de huidige situatie is de verhouding van de productieaantallen van de onderdelen en de spiraalbodems 3/5. Het tweede scenario is een stijging van 50% in de klantvraag

naar spiraalbodems. Uit de resultaten van de experimenten van de twee scenario's blijkt dat een nieuwe indeling van de bufferbaan leidt tot de laagste afwijking in de output. Het toevoegen van een bufferbaan is onnodig. Verder laten de resultaten van het tweede scenario zien dat een lagere procestijd van de opspanlijn zorgt voor een toename in geproduceerde aantallen. Het verlagen van de procestijd van de opspanlijn van 100 seconden naar 65 seconden leidt tot een toename van 275 in de geproduceerde aantallen. De doorvoer per dag van de staalfabriek stijgt met 97%. Dit leidt tot een verkorting van de levertijd van 13 dagen naar 9 dagen.

Naast de aanbeveling van het niet aanleggen van een extra bufferbaan kent dit onderzoek meer aanbevelingen. Binnen Auping is te weinig bekend over uitval, onderhoud en procestijden van verschillende machines en producten. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is het implementeren van een manufacturing execution system (MES) systeem.

Een volgende aanbeveling is veranderen van het montageproces. De focus van dit onderzoek ligt op verminderen van de afwijking in de output van lakkerij. De output van de lakkerij is de input voor het montageproces. Is de afwijking in de output van de lakkerij hoog, ontstaan er verstoringen in het montageproces. Door het montageproces aan te passen, zodat het proces in de montage niet meer afhankelijk is van de balans in aanvoer, kan de focus in de rest van het productieproces verschuiven naar een efficiënter productieproces.

Samenvattend beveelt dit onderzoek Auping het volgende aan:

- Het niet toevoegen van een extra bufferbaan. Het toevoegen van een extra bufferbaan leidt niet tot betere resultaten.
- Het bijhouden van data over het productiesysteem doormiddel van een manufacturing execution systeem (MES).
- Het montageproces aanpassen om onafhankelijk te zijn van de balans in output van de lakkerij. Door onafhankelijk te worden van de balans kan de focus gelegd worden op een maximale productiecapaciteit.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	III
MANAGEMENTSAMENVATTING.....	IV
1. INLEIDING	1
1.1 BEDRIJFSACHTERGROND	1
1.2 AANLEIDING.....	1
1.3 PROBLEEMHEBBERS.....	2
1.4 PROBLEEMIDENTIFICATIE	3
1.6 ONDERZOEKSOPZET	5
1.6.1 Doelstelling	5
1.6.2 Onderzoeksvragen	5
1.6.3 Afbakening	7
1.6.4 Onderzoekbeperkingen.....	7
2. THEORETISCH KADER.....	8
2.1 PRODUCTIEWIJZE	8
2.2 LEAN MANUFACTURING	9
2.2.1 Taktijd	12
2.2.2 Heijunka.....	12
2.2.3 Single Piece flow	12
2.3 PRODUCTIEPLANNING	13
2.4 SIMULATIEMODELLEN	14
2.5 KRITIEKE PRESTATIE-INDICATOREN	16
2.6 CONCLUSIE HOOFDSTUK 2	17
3. HUIDIGE SITUATIE	18
3.1 PRODUCTEN.....	18
3.2 PRODUCTIEWIJZE	20
3.3 PRODUCTIEPROCES.....	20
3.3.1 Laslijnen.....	21
3.3.2 Lakkerij	22
3.3.3 Montage	23
3.5 CONCLUSIE HOOFDSTUK 3	24
4. SIMULATIEMODEL OP BASIS VAN DE EISEN EN RANDVOORWAARDEN	25
4.1 PRODUCTIECAPACITEIT	25
4.2 PRODUCTIEPLANNING	25
4.3 SIMULATIEMODEL	26
4.3.1 Aannames.....	26
4.3.2 Model van de staalfabriek	26
4.3.3 Inputdata	28
4.3.4 Verificatie en Validatie	30
4.4 CONCLUSIE HOOFDSTUK 4	32
5. ONDERZOEKSRESULTATEN	33
5.1 EXPERIMENTELE RESULTATEN	33
5.2 TOEKOMSTIGE SITUATIES	38
5.3 CONCLUSIE HOOFDSTUK 5	39

6. CONCLUSIES, BEPERKINGEN EN AANBEVELING	40
6.1 CONCLUSIES.....	40
6.1.1 Antwoorden op de deelvragen	40
6.1.2 Antwoord op de hoofdvraag	41
6.2 BEPERKINGEN.....	42
6.3 AANBEVELING	42
6.4 VERDER ONDERZOEK.....	43
7. BIBLIOGRAFIE	45
BIJLAGEN.....	47
BIJLAGE A: LASLIJNEN	47
BIJLAGE B: LAKKERIJ	48
BIJLAGE C: GREEPLIJSTEN	49
BIJLAGE D: VERWACHTE VERDELING	50
BIJLAGE E: OVERZICHT PROCESTIJDEN	51
BIJLAGE F: WARM-UP	52
BIJLAGE G: REPLICATIES	53
BIJLAGE H: RUNLENGTE	54
BIJLAGE I: REFLECTIEVERSLAG.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Afkortingen

ATO	Assemble-to-Order
ERP	Enterprise resource planning
ETO	Engineer-to-Order
FIFO	First in, first out
MES	Manufacturing execution system
MSER	Marginal Standard Error Rule
KOOP	Klantenorderontkoppelpunt
KPI's	Kritieke prestatie-indicatoren
MTO	Make-to-Order
MTS	Make-to-Stock

1. Inleiding

In het kader van het afronden van Bachelor Technische Bedrijfskunde dient er een onderzoeksopdracht bij een bedrijf voltooid te worden. Dit verslag beschrijft de uitgevoerde bacheloropdracht bij Koninklijke Auping te Deventer.

Dit hoofdstuk geeft een inleiding van dit onderzoek. Paragraaf 1.1 geeft een korte bedrijfsbeschrijving. Paragraaf 1.2 bevat de aanleiding van dit onderzoek. Voorts identificeert paragraaf 1.3 de probleemhebbers van dit onderzoek. De volgende paragraaf, 1.4, beschrijft de probleemidentificatie. Ten slotte bespreekt paragraaf 1.5 de onderzoeksopzet.

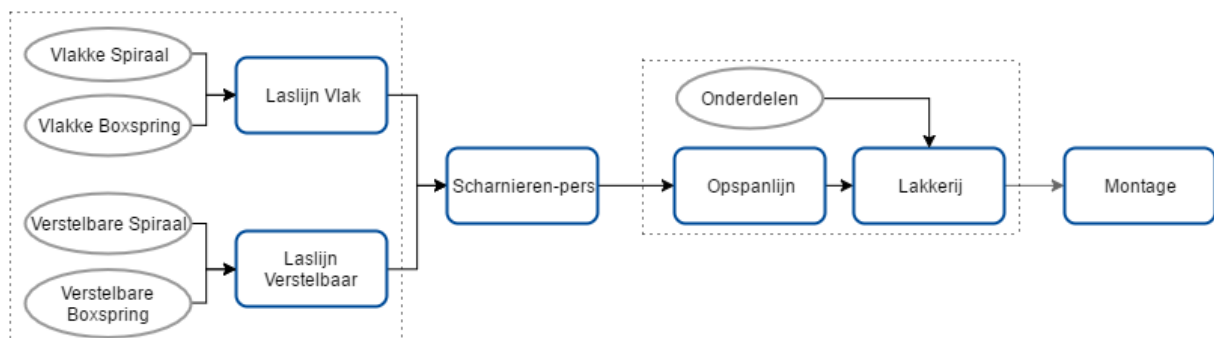
1.1 Bedrijfsachtergrond

Auping is de grootste zelfstandige beddenproducent van Nederland met circa 350 medewerkers. Het begon 128 jaar geleden in de smederij van Johannes Auping in Deventer met de ontwikkeling van de spiraalbodem. Later kwamen daar bedmeubelen, matrassen en boxsprings bij, gevolgd door bedtextiel, kasten en accessoires. Al deze producten worden sinds 2014 op één productielocatie in Deventer geproduceerd. Naast het hoofdkantoor in Deventer heeft Auping vestigingen in Antwerpen en Kopenhagen. In andere landen zijn de bedden en matrassen te koop via distributeurs en showrooms. Auping heeft zich in de loop der jaren ontwikkeld tot de slaapspecialist en marktleider in Nederland.

1.2 Aanleiding

Sinds het eind van 2014 heeft Auping al haar kantoor- en productieactiviteiten gecentreerd op een locatie langs de A1 in Deventer. Door het samenvoegen van alle productieactiviteiten is het voor Auping mogelijk om de levertijd van haar producten te verkorten. Het streven van Auping is om een klantorder te leveren binnen twee weken.

De ambitie van Auping is om in 2020 alle bedrijfsprocessen, producten en diensten duurzaam te hebben ingericht. Om dit doel te bereiken heeft Auping al haar activiteiten gecentraliseerd. Verder wil Auping investeren in een optimale productielocatie volgens het Lean proces (Hartini & Ciptomulyono, 2015). Sinds de nieuwe locatie is Auping dus druk bezig met het implementeren van Lean Manufacturing. Een belangrijk principe van Lean Manufacturing is het elimineren van verspilling. Een vorm van verspilling is het aanleggen van voorraden in het productieproces. Op dit moment heeft Auping beperkte voorraden in haar productieproces. Klantorders worden geproduceerd op basis van klantvraag. De combinatie van de korte levertijd van twee weken en het produceren op basis van klantvraag leidt tot dagelijkse variatie in het productieproces.



Figuur 1.1: Productieproces

Dit onderzoek richt zich op het productieproces in de staalfabriek van Auping (Figuur 1.1). De staalfabriek produceert en lakt de spiraalbodems voor de bedden. Er zijn vier verschillende soorten spiralen: vlakke spiraalbodems, verstelbare spiralenbodems, vlakke boxspring spiraalbodems en verstelbare boxspring spiralenbodems. Daarnaast lakt de staalfabriek verschillende onderdelen. Figuur 1.1 geeft een schematisch overzicht van het productieproces met de inputvariabelen van het productieproces. De inputvariabelen zijn het aantal spiraalbodems (Vlak of Verstelbaar en Standaard of Boxspring) en het aantal onderdelen. De inputvariabelen leiden tot een mix in de productievolgorde. De mix in de productievolgorde ontstaat waarbij de verschillende producten bij elkaar komen.

In de huidige situatie neemt een operationele medewerker in de staalfabriek gedurende de dag beslissingen om de mix in de productievolgorde op te vangen. Binnen Auping is er weinig kennis beschikbaar over de invloed van de verschillende inputvariabelen op het productieproces. De productiemanager verwacht dat de variatie in de inputvariabelen in de toekomst gaat veranderen. De oorzaak van de verandering in de variatie is het verkorten van de levertijd. Het aantal te produceren orders per dag gaat meer variëren. Binnen Auping is er geen kennis over deze scenario's. Het is voor Auping van belang om de inputvariabelen in kaart te brengen om vervolgens de invloed van deze inputvariabelen op het productieproces van de staalfabriek te onderzoeken. Op basis van de vergaarde kennis over het gehele productieproces in de staalfabriek kan uiteindelijk een oplossing gezocht worden om de werklast van de werknemers in de staalfabriek te balanceren.

Naar aanleiding van de beschreven situatie bij Auping wordt dit onderzoek uitgevoerd om de bovengenoemde problemen op te lossen.

1.3 Probleemhebbers

Dit onderzoek kent verschillende stakeholders. Het is belangrijk om voorafgaande aan het onderzoek deze stakeholders te identificeren. Hierdoor is het uiteindelijk makkelijker om een oplossing te vinden die voor alle stakeholders het meest geschikt is. De eerste stakeholder is de productiemanager van Auping samen met het management van Auping. Doordat er weinig kennis is bij Auping om de optimale productievolgorde te bepalen verloopt het productieproces in de staalproductie niet optimaal. Het gevolg van de huidige productievolgorde is dat de verdeling in de output in de huidige situatie niet constant genoeg, met als gevolg dat medewerkers inefficiënt werken. De werklast van de medewerkers fluctueert gedurende een werkdag op dit moment. Het effect hiervan is dat er waardevolle arbeidstijd verloren gaat. Dit kost Auping uiteindelijk onnodig veel geld. De tweede stakeholders zijn de medewerkers van de staalfabriek. De wens van de medewerkers is het verbeteren van de werkkwaliteit. Het grootste probleem waar zij last van hebben, is de fluctuaties in de werkdruk. Op het ene moment is het werk (te) rustig, terwijl het op een ander moment te druk is. Dit zorgt voor de nodige stress bij de medewerkers.

1.4 Probleemidentificatie

Het doel van de probleemidentificatie is om alle problemen in kaart te brengen met behulp van een probleemkluwen: In een probleemkluwen worden alle problemen overzichtelijk weergegeven, evenals de causale verbanden tussen de problemen. Aan de hand van de probleemkluwen wordt het kernprobleem bepaald. Door het afnemen van interviews tijdens het onderzoek met het management en verschillende medewerkers wordt er een duidelijk overzicht gegeven van de problemen binnen Auping. Al deze problemen zijn in kaart gebracht in een probleemkluwen (Zie figuur 1.2).

PROCESFASE 1

Auping heeft bepaald dat er beperkte voorraden worden aangelegd tijdens het productieproces. Een klantorder wordt kort voor het moment dat deze geleverd moet worden geproduceerd. Hierdoor fluctueren de productieaantallen per dag. De dagelijkse productieaantallen zijn afhankelijk van de vraag naar spiralen en het aflevermoment hiervan. Auping levert spiraalbodems aan haar klanten op maandag tot en met vrijdag. De afleverdag is afhankelijk van het gebied waar de order geleverd dient te worden. De routes voor de leveringen hebben een vaste dag in de week.

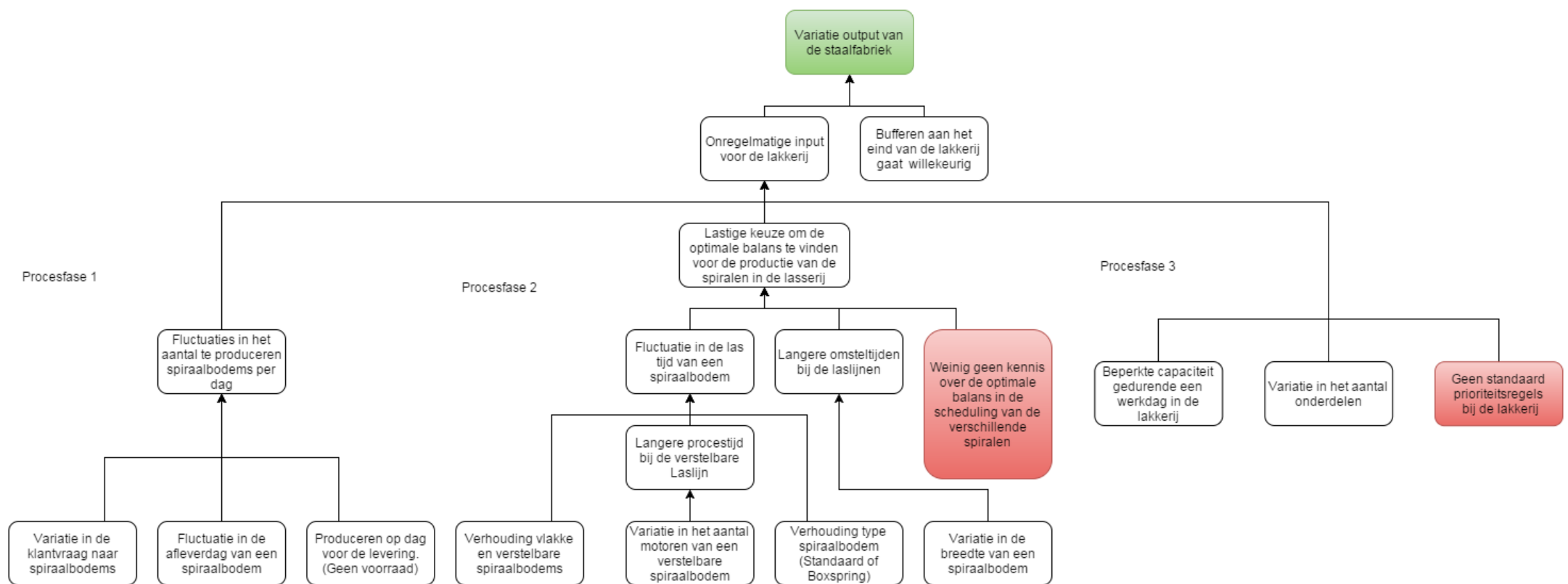
PROCESFASE 2

In het lasgedeelte van de staalfabriek staan twee verschillende laslijnen met lasrobots. Een laslijn een productielijn bestaande uit meerdere lasrobots. De laslijnen lassen de frames van een spiraalbodem. Er is één laslijn voor vlakke spiraalbodems en er is één laslijn voor verstelbare spiraalbodems. Op basis van de productiesnelheid in de gehele fabriek moeten de laslijnen gebalanceerd worden om een constante flow in de staalfabriek te creëren. Dit is momenteel nog een uitdaging voor Auping. Om de optimale productievolgorde te bepalen voor de spiraalbodems zijn namelijk verschillende eigenschappen belangrijk: het type spiraal, de breedte van een spiraal en het aantal motoren van een verstelbare spiraal. Elke variabele heeft invloed op de procestijden van de verschillende processen in het lasgedeelte van de staalfabriek. Zo varieert de tijd van het lassen per type spiraal, heeft de breedte van een spiraal invloed op de omsteltijden en is de procestijd van de verstelbare spiraalbodems afhankelijk van het aantal motoren van een spiraal. Door het gebrek aan kennis binnen Auping om een optimale productievolgorde te bepalen, is het een uitdaging om het lasproces te balanceren.

PROCESFASE 3

Naast het lasgedeelte bestaat de staalfabriek uit een lakkerij. Hier worden zowel spiraalbodems als onderdelen gelakt. De inputvariabelen van de lakkerij zijn spiraalbodems en onderdelen. De spiralen worden aangeleverd vanuit het lasgedeelte, vandaar dat het van belang is om deze aanvoer te balanceren. Het probleem van de lakkerij is het bepalen van een goede prioriteitsregel. Een goede prioriteitsregel houdt rekening met de capaciteit van de lakkerij, het aantal spiraalbodems en onderdelen en de vooraf bepaalde productiesnelheid. Om de productie zo veel mogelijk te balanceren is er tot nu toe te weinig kennis voor het bepalen van de juiste prioriteitsregel.

In de huidige situatie is de verdeling in de output van de lakkerij niet constant genoeg is. Dit wordt veroorzaakt door de onregelmatige input. Om het probleem op te lossen is het van belang terug te gaan in de probleemkluwen en op zoek te gaan naar de oorzaken. Uit het interview met een procesengineer blijkt dat er te weinig bekend is over de optimale prioriteitsregels voor de staalfabriek om het gehele proces te balanceren. Bij dit onderzoek ligt de nadruk op het balanceren van de staalfabriek met behulp van betere prioriteitsregels dan in de huidige situatie.



Figuur 1.2: Probleemkluwen

1.6 Onderzoeksopzet

Paragraaf 1.6.1 beschrijft eerst de doelstelling van het onderzoek. Door middel van opgestelde onderzoeksvragen kan het doel van het onderzoek eenvoudiger worden bereikt. Paragraaf 1.6.2 geeft de onderzoeksvragen weer met een korte hoofdstukbeschrijving. Voorts bespreekt paragraaf 1.6.3 de afbakening van dit onderzoek. Ten slotte geeft paragraaf 1.6.4 de beperkingen van dit onderzoek.

1.6.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om kennis te vergaren over de verschillende inputvariabelen die invloed hebben op de balans in de staalfabriek. Dit zijn het aantal spiraalbodems met de bijbehorende karakteristieken en het aantal onderdelen. Dit onderzoek brengt de inputvariabelen in kaart, net als de invloed van deze variabelen op het productieproces. Daarnaast wordt er naar mogelijke scenario's gekeken. Wat is bijvoorbeeld het gevolg van een fluctuatie op het gehele productieproces? Door verschillende scenario's te testen met behulp van een simulatiemodel kan er naar oplossingen worden gekeken zonder dat deze ook daadwerkelijk toegepast worden. Daarnaast biedt het nabootsen de mogelijkheid om extreme situaties te testen waarbij belangrijke informatie over de effecten vergaard kan worden. Dit biedt inzicht in mogelijke toekomstige situaties.

1.6.2 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

Vanuit de probleemkluwen is duidelijk geworden dat de balans in de output van de lakkerij niet constant is. De output van de lakkerij bestaat uit vlakke en verstelbare spiraalbodems en onderdelen. In de gewenste situatie is de output van de staalfabriek in balans. De drie producten (vlakke en verstelbare spiraalbodems en onderdelen) dienen gelijkmatig verdeeld te zijn in de output van de staalfabriek. Het doel van het onderzoek is zorgen dat de balans in de output de staalfabriek constanter wordt. Hierbij is het van belang om de mix in de productievolgorde te balanceren met prioriteitsregels. Om het hoofdprobleem op te lossen is de volgende hoofdvraag opgesteld:

'Hoe kan de productielijn van de staalfabriek bij Auping gebalanceerd worden met betrekking tot de productieaantallen?'

Deelvraag 1

Welke kennis is er vanuit de literatuur aan te dragen voor de situatie bij Auping?

Hoofdstuk 2 beschrijft met behulp van een literatuurstudie belangrijke kennis op het gebied van operations management om de huidige situatie bij Auping beter te begrijpen. Op basis van de literatuur wordt er bepaald op welke wijze het probleem bij Auping kan worden opgelost.

Deelvraag 2

Hoe ziet de huidige situatie van de staalfabriek bij Auping eruit?

Hoofdstuk 3 beschrijft de huidige situatie bij Auping. In dit hoofdstuk worden de producten, het huidige planningssysteem, het huidige productieproces en de huidige werkwijze met betrekking tot het balanceren van de productielijn beschreven. Vervolgens benoemen we de voordelen hiervan en tevens de bijkomende problemen. De gebruikte informatie komt voort uit interviews en uit interne documentatie.

Deelvraag 3

Wat zijn de eisen en randvoorwaarden voor het balanceren van het productieproces van de staalfabriek bij Auping?

Hoofdstuk 4 beschrijft de eisen en randvoorwaarden waaraan een oplossing moet voldoen. Het geeft inzicht in welke oplossingen mogelijk geschikt of ongeschikt zijn. De informatie over de eisen en randvoorwaarden komt voor uit een interview met de productiemanager. Verder beschrijft hoofdstuk 4 het simulatiemodel op basis van de eisen en randvoorwaarden.

Deelvraag 4

Welke oplossingen zijn er voor de hoofdonderzoeksvraag met betrekking tot de problemen, eisen en randvoorwaarden?

Hoofdstuk 5 bespreekt op basis van de eisen en randvoorwaarden mogelijke oplossingen. Een simulatiemodel test de mogelijke oplossingen. Het simulatiemodel is in dit onderzoek een computermodel, om de werkelijkheid na te bootsen. Door gebruik te maken van een simulatiemodel zijn de effecten van mogelijke oplossingen direct te testen in een veilige omgeving. Een oplossing hoeft niet direct getest te worden in de werkelijkheid. Hoofdstuk 6 toont de conclusies van het onderzoek. Tevens beantwoordt hoofdstuk 6 de hoofdvraag van het onderzoek. Als laatste worden er in hoofdstuk 6 verschillende aanbevelingen gedaan voor Auping.

Gedurende het onderzoek is er gebruik gemaakt van kwalitatieve en kwantitatieve data. Bij kwalitatief onderzoek gaat het niet om het in kaart brengen van cijfers, maar om het verkennen en inzichtelijk maken van een onderzoeksvraag (Reilink & Lindeman, 2005). Er zijn veel verschillende manieren om kwalitatieve data te verzamelen. Dit onderzoek maakt gebruik van de volgende methodes: participerende observaties, interviews en literatuuronderzoek. Participerende observatie is een methode om gegevens te verzamelen in kwalitatief onderzoek. De onderzoeker observeert in het veld en verzamelt daarmee informatie (Reilink & Lindeman, 2005). Een andere vorm van kwalitatief onderzoek is interviewen. Het doel van een interview is het verzamelen van informatie uit mededelingen van ondervraagde personen, om daarmee een vooraf geformuleerde probleemstelling te kunnen beantwoorden (Reilink & Lindeman, 2005). De laatste vorm van kwalitatief onderzoek die gebruikt wordt is literatuuronderzoek. Kwantitatief onderzoek is gericht op cijfers, oftewel numerieke gegevens, en is objectief. Naast de kwalitatieve data in dit onderzoek wordt er ook veelvuldig gebruikt gemaakt van kwantitatieve data.

1.6.3 Afbakening

Door de korte tijd van de bacheloropdracht (10 weken) is het onderzoek afgebakend tot een gedeelte van het probleem binnen Auping. De focus van het onderzoek ligt op het balanceren van de werkdruk in de staalfabriek door de gehele productielijn te balanceren. Het doel is een oplossing te vinden voor het verlagen van de dagelijkse fluctuaties in de staalfabriek met betrekking tot de randvoorwaarden en eisen van Auping. Hopp & Spearman (2011) beschrijven een productielijn als een natuurkundig probleem. Op basis van hun bevindingen zijn er drie type buffers in een productielijn om de negatieve invloed van variabiliteit op het productieproces te beperken. De type buffers zijn: voorraden, productiecapaciteit en tijd.

Dit onderzoek wordt afgebakend tot het zoeken van een oplossing in het uitbreiden van de buffervoorraden of het slimmer omgaan met de huidige buffers in het productieproces, en het maximaliseren van de productiecapaciteit met de huidige resources. Er wordt geen oplossing gezocht in het aanleggen van veiligheidsvoorraad van eindproducten om fluctuaties op te vangen in klantvraag. Vanuit de 'Lean Manufacturing' principes, die zijn toegepast bij Auping, worden voorraden gezien als verspillingen. Verspilling dient geëlimineerd te worden volgens de principes van 'Lean Manufacturing' aangezien de klant hier niet voor wenst te betalen.

1.6.4 Onderzoekbeperkingen

Dit onderzoek kent meerdere beperkingen. Deze beperkingen zijn de keuze voor het vakgebied, implementatie en de evaluatie. De eerste beperking is de keuze van het vakgebied. Tijdens deze studie is er alleen vanuit het operations management perspectief gekeken worden naar het probleem. In het onderzoek wordt er geen oplossing gezocht op het gebied van Human Resource, om de arbeidsefficiëntie van de medewerkers te verhogen. De tweede beperking van de studie is de implementatie en evaluatie van de oplossing. Door de beperkte duur van de bacheloropdracht is er geen tijd om de oplossing in de werkelijkheid te implementeren en te evalueren. De enige mogelijkheid om de oplossing te implementeren is door gebruik te maken van een simulatiemodel dat de werkelijkheid representeert.

2. Theoretisch Kader

In dit hoofdstuk is de literatuur toegelicht die nodig is bij dit onderzoek. Tevens geeft het antwoord op de eerste onderzoeksvraag:

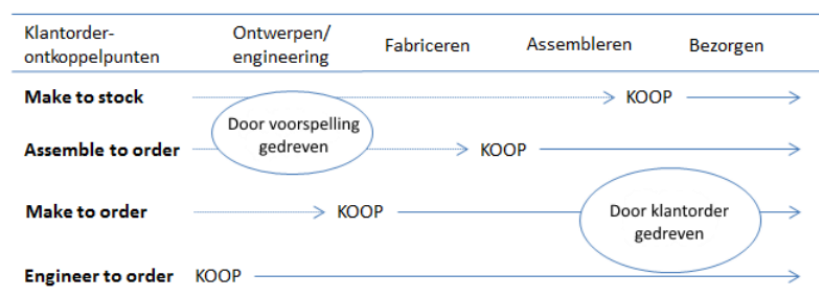
Welke kennis is er vanuit de literatuur aan te dragen voor de situatie bij Auping?

De theorieën en begrippen uit de literatuur helpen de huidige situatie te begrijpen en te verklaren. Allereerst bespreekt paragraaf 2.1 verschillende wijzen van produceren met behulp van de beschikbare literatuur. Dit wordt gebruikt om de huidige situatie te beschrijven. Vervolgens introduceert en analyseert paragraaf 2.2 'Lean Manufacturing'. Voorts is de theorie over drie verschillende Lean methodieken besproken die van belang zijn om het huidige productieproces te verbeteren. Vervolgens bespreekt paragraaf 2.3 beschikbare literatuur over productieplanning. Het doel hiervan is om relevante planningstechnieken te identificeren. Vervolgens geeft paragraaf 2.4 een overzicht geven van verschillende simulatiemodellen om mogelijke oplossingen te testen in een veilige omgeving. Paragraaf 2.5 bespreekt de literatuur over kritieke prestatie-indicatoren. Het doel hiervan is om de resultaten van de verschillende oplossingen kunnen te vergelijken. Ten slotte geeft paragraaf 2.6 een terugblik op dit hoofdstuk.

De gebruikte literatuur is onttrokken met behulp van Google Scholar, Scopus, Sciencedirect en studieboeken. Veel van de gebruikte literatuur was al eerder vereist tijdens het bachelorprogramma van de studie Technische Bedrijfskunde. De gebruikte zoektermen zijn voortgekomen uit de opgedane kennis uit het bachelorprogramma van Technische Bedrijfskunde en aan de hand van brainstormsessie met de externe en interne begeleiders.

2.1 Productiewijze

Vanuit de theorie zijn er vier verschillende productiewijzen. Het klantenorderontkoppelpunt (KOOP) wordt bepaald door de productiewijze. De KOOP wordt gedefinieerd als het punt in de waardeketen voor een product, vanaf waar het product wordt gekoppeld aan een bepaalde klantorder (Olhager, 2012). Op basis van het CODP is er onderscheid te maken tussen vier verschillende productiewijzen. Deze verschillende productiewijzen zijn: 'Make-to-Stock' (MTS), 'Assemble-to-Order' (ATO), 'Make-to-Order' (MTO) en 'Engineer-to-Order' (ETO) (Sharman, 1984). Figuur 2.1 laat het punt zien in de waardeketen wanneer een klantenorder aan een product wordt gekoppeld.



Figuur 2.1: Klantenorderontkoppelpunt gebaseerd op Sharman (1984).

Om inzicht te krijgen in de verschillende productiewijzen, worden deze kort toegelicht. 'Make-to-Stock' ondernemingen produceren eindproducten op basis van de verwachte klantvraag. Eindproducten liggen na productie vaak nog enige tijd op voorraad voordat een klant de eindproducten koopt. Een klantorder wordt direct uit voorraad geleverd. Een probleem van 'Make-to-Stock' is het bepalen van de benodigde voorraad om aan de klantvraag te voldoen. De volgende productiewijze is 'Assemble-to-Order'. Deze productiewijze laat een klant een product meer naar wens samenstellen. Het product bestaat uit een bepaalde basis, en de klant kan dan verder nog kiezen uit verschillende opties. Bij 'Assemble-to-Order' liggen vaak onderdelen of halffabricaten op voorraad. Een klantenorder dient eerst te worden gemonteerd, voordat het geleverd kan worden. 'Make-to-Order' houdt in dat een bedrijf vanuit de grondstoffen en basisonderdelen een product voor een klant produceert. Belangrijk voor deze wijze van produceren is het bepalen van klanteneisen. Op het moment dat een klant een order plaatst, kan er pas gestart worden met de productie. Het moment van de CODP ligt dan ook direct na de engineerfase. De laatste productiewijze is 'Engineer-to-Order'. Deze bedrijven werken nauw samen met de klant. De productie is gestart vanaf het punt dat de klant en de onderneming in gesprek gaan over het ontwerp van het eindproduct. Over het algemeen heeft een bedrijf niet één specifieke productiewijze. Vaak is er een combinatie van twee of meer (Jacobs, Berry, Whybark, & Vollman, 2011).

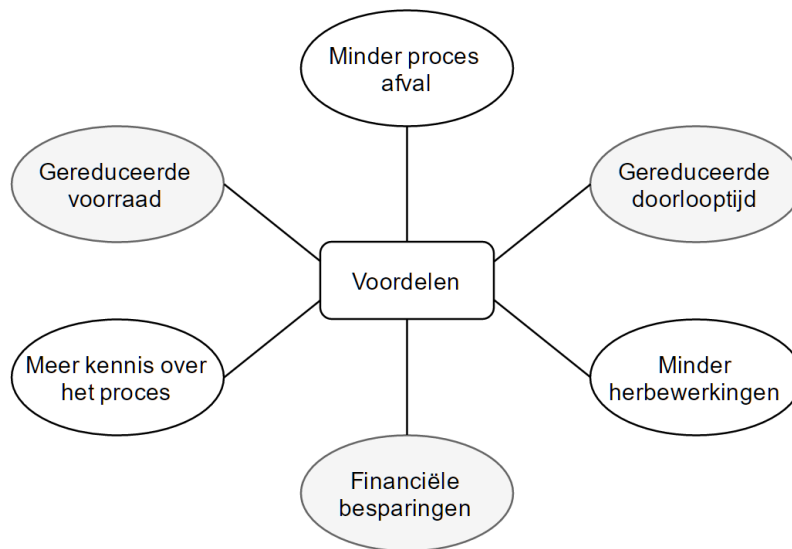
2.2 Lean Manufacturing

De grondlegger van 'Lean Manufacturing' is het Japanse autobedrijf Toyota. In 1940 was het bedrijf van mening dat alleen een fractie van de totale tijd en de moeite om een product te maken van belang is voor de klant. Om deze gedachte te realiseren heeft Toyota verschillende belangrijke tools en technieken ontwikkeld (Melton, 2005). Deze zijn:

- *Kanban*
Kanban onderscheidt zich in verschillende typen, maar het basisprincipe blijft steeds hetzelfde, namelijk het ontvangen van een Kanbansignaal zet altijd aan tot het uitvoeren, produceren of bevoorraden van een entiteit. Doel van het Kanban-systeem is het reduceren van de voorraden in de productieketen.
- *5S*
5S is een middel om betrokkenen in een proces bewust te laten zijn van hun werkomgeving. Als een medewerker in staat is om zijn eigen werkplek opgeruimd te houden, dan leidt dit tot overzicht, rust en focus. Op de lange duur (en voor de organisatie in geheel) betekent dit een verhoging van de productiviteit.
- *Visual control*
Het meten van de prestaties op werkvloer. De metingen worden direct visueel weergegeven voor het operationele team.
- *Poke yoke*
Een techniek voor het elimineren van fouten in producten of productieprocessen.
- *SMED (single minute exchange of dies)*
Het reduceren van de omsteltijden van machines.

De voordelen van het toepassen van 'Lean Manufacturing' zijn welbekend (zie figuur 2.2) en goed gedocumenteerd (Melton, 2005). Deze gedocumenteerde voordelen zijn:

- Het verkorten van de levertijd aan de klant.
- Het verminderen van de voorraden.
- Het vergroten van de managementinformatie.
- Het robuuster maken van het productieproces.



Figuur 2.2: Voordelen van Lean Manufacturing (Melton, 2005).

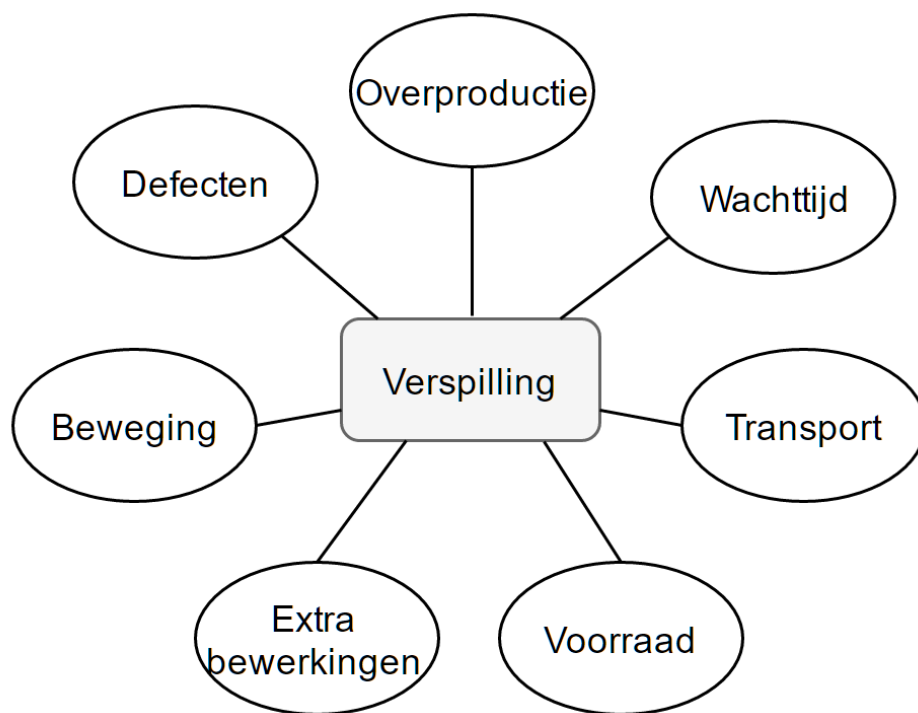
Om Lean manufacturing toe te passen is het voor een bedrijf belangrijk om in termen van Lean te gaan denken, dit wordt 'Lean Thinking' genoemd. 'Lean Thinking' is gebaseerd op vijf concepten (Melton, 2005). Deze 5 concepten zijn:

- *Toevoegen van waarde*
Het is voor een bedrijf belangrijk om waarde te creëren voor specifieke klanten. Om dit mogelijk te maken, moet het bedrijf de waarden identificeren.
- *Elimineren van verspilling*
Elke activiteit tijdens een proces die geen waarde toevoegt aan een product is verspilling. Toyota heeft zeven verschillende vormen van verspilling geïdentificeerd (Slack, 2010).
- *Flow*
Het lastigste concept van 'Lean Thinking' is flow. De flow heeft betrekking op alle stappen die waarde toevoegen aan een product. Deze stappen dienen in een flow geplaatst te worden.
- *Kennismanagement*
De kennis over het systeem is essentieel in het implementeren van Lean.
- *Continue verbetering*
Het streven naar perfectie is het doel van Lean.

Uit de bovenste concepten van 'Lean Thinking' is verspilling de belangrijkste. In 1940 stond het elimineren van verspilling al centraal voor Toyota. De zeven vormen van verspilling zijn (Slack, 2010):

- Overproductie. Meer produceren dan nodig is één van de grootste vormen van verspilling.
- Wachttijden. De efficiëntie van de werknemers en van de machines tijdens het productierapport zijn beide populaire meetinstrumenten voor het bepalen van de wachttijden in een productieproces. Wachttijden treden op wanneer er perioden van inactiviteit zijn in het productieproces omdat de voorgaande activiteit het product niet op tijd geleverd heeft. Bij inactiviteit wordt gekeken of activiteiten aanwezig zijn die geen waarde toevoegen of leiden tot overproductie, want activiteiten die geen waarde toevoegen of leiden tot overproductie zijn gedefinieerd als verspilling.

- Transport. Het onnodig verplaatsen of bewegen van materialen wordt gezien als verspilling. Het verplaatsen van materialen in een productieproces moet worden geminimaliseerd, omdat het tijd toevoegt aan het proces, waarbij geen waarde wordt toegevoegd.
- Voorraad. Alle materialen die niet direct nodig zijn om de huidige bestellingen van klanten te voldoen leiden tot hoge kosten, voegen geen waarde toe en dient dus te worden geëlimineerd. Deze materialen zijn de grondstoffen, producten die in behandeling zijn, en de eindproducten die gereed zijn.
- Extra bewerkingen. Extra handelingen, zoals nabewerking, herverwerking, behandeling of opslag, die optreden als gevolg van overproductie of defecten, voegen geen waarde toe. Deze extra handelingen zijn verspillingen, die geëlimineerd moeten worden.
- Beweging. Hiermee worden de extra stappen bedoeld die medewerkers of apparatuur moeten ondergaan. Onnodige beweging kost tijd, voegt geen waarde toe en moet dus geëlimineerd worden.
- Defecten. Door defecten in de producten ontstaat verspilling van materiaal, wat uiteindelijk leidt tot hoge kosten. Daarnaast kan het leiden tot extra onnodig werk. Defecten voegen geen waarde toe.



Figuur 2.3: Zeven vormen van verspilling (Melton, 2005)

2.2.1 Taktijd

Takt is het Duitse woord voor muzikale meter. De taktijd is een hulpmiddel om de productiesnelheid aan de actuele klantenvraag te binden, door het tempo van produceren aan het tempo van daadwerkelijke definitieve verkoop aan te passen. Bijvoorbeeld, als de klantenvraag 240 stuks per dag betreft en de werktijd van de fabriek 480 minuten is, dan is de taktijd twee minuten. Elke twee minuten moet de productie één product afleveren (Accent Organisatie Advies B.V., 2006). In de meeste situaties bestaat een productieproces uit meerdere deelprocessen. Eenvoudig gesteld, is de taktijd de tijd tussen twee eindproducten in een productieproces. De taktijd bepaalt de tijd tussen een gereed product om aan de actuele klantenvraag te voldoen. Doordat de taktijd het tempo van de productie bepaalt, wordt de taktijd gedefinieerd als de hartslag van een Lean productiesysteem (Accent Organisatie Advies B.V., 2006).

$$\text{Taktijd} = \frac{\text{Beschikbare werktijd}}{\text{Klantvraag}}$$

2.2.2 Heijunka

Heijunka betekent in het Japans: ‘het gladstrijken en op niveau brengen’. In de literatuur is Heijunka als volgt gedefinieerd: ‘het gelijkmatig verdelen van het productievolume en de mix van diverse producten over een bepaalde tijd’ (Dennis, 2007). Het clusteren van productieorders kan leiden tot reductie in de setup en afwerkingstijden, maar het leidt in de meeste gevallen tot langere levertijden en onnodige wachttijden. Tevens veroorzaakt het onnodige buffervoorraden. Het doel van Heijunka is het balanceren van de productieaantallen en het balanceren van de productiemix (Dennis, 2007). Dit zal de variatie in vorm van pieken en dalen reduceren in de productieplanning (Hüttmeir, 2009). Dit maakt het voor bedrijven mogelijk om efficiënter te werken door het reduceren van verspilling en de overbelasting van zowel machine als werknemers (Bohnen et al., 2013). Heijunka wordt voornamelijk toegepast door producenten die grootschalig produceren. Voor producenten met een laag volume en een hoge variatie is het lastig om Heijunka toe te passen. Het is voor een producent met een laag volume en hoge variatie alleen mogelijk om de productie te balanceren wanneer productfamilies gecreëerd kunnen worden gebaseerd op overeenkomsten in het productieproces (Bohnen et al., 2013).

Hüttmeir et al. (2009) hebben de trade-off tussen Heijunka en Just In Time (JIT) geanalyseerd. De studie had betrekking op het feit of het beter is voor een producent om Heijunka toe te passen om Lean manufacturing’ te maximaliseren, of het gebruik van JIT beter is om responsief te zijn. De uitkomst van de studie geeft aan dat het antwoord ergens in het midden ligt. Het is wel van belang om de trade-off te begrijpen en het geeft essentiële inzichten in keuze van een bedrijf om te kiezen voor Heijunka of JIT.

2.2.3 Single Piece flow

‘Single-piece flow’ is een mogelijkheid om de Lean methodiek Heijunka toe te passen bij organisaties waarbij het productieproces bestaat uit meerdere deelprocessen. ‘Single-piece’ refereert naar één enkel product of naar een kleine batch, dit is afhankelijk van het product (Roser, 2015). Een nadeel van het toepassen van ‘single-piece flow’ is dat het leidt tot meer omsteltijd. Een belangrijk aspect van ‘single-piece flow’ is een continue flow. Een continue flow betekent dat onderdelen, stukken of batches met zo min mogelijke stagnatie door het productieproces bewegen. Het doel van ‘single-piece flow’ is het reduceren van verspillingen tijdens het productieproces, veroorzaakt door wachttijden, transport, overproductie, voorraad en defecten (Accent Organisatie Advies B.V., 2006). Door het toepassen van ‘single-piece flow’ worden de taken verminderd tot de eenvoudigste componenten. Het

opdelen van productieorders heeft als voordeel dat het leidt tot minder machinefouten, met als gevolg minder verspilling. Een derde voordeel is het verlagen van de cyclustijd. De cyclustijd neemt af doordat onderdelen worden bewerkt bij een proces, vervolgens direct naar het volgende proces gaan om daar bewerkt te worden. De wachttijd wordt geminimaliseerd. Een ander voordeel is het flexibeliteit van het productieproces. Dit komt door het feit dat machines minder lang bezet zijn, doordat de totale procestijd van een order wordt verminderd. Al met al is het een generieke methode om output continu te verhogen, de kwaliteit te verbeteren, en omzet en winst te verhogen, zonder het maken van extra kosten op het gebied van overhead en personeelskosten. Het beste resultaat van het toepassen van 'single-piece flow' produceren is in combinatie met andere technieken vanuit de Lean filosofie (Accent Organisatie Advies B.V., 2006).

2.3 Productieplanning

Baker (1974) definieert productieplanning als volgt: 'De toewijzing van middelen in de tijd om een verzameling van taken uit te voeren'. Wanneer het aantal te produceren producten bekend is, dan is het van belang om te bepalen wanneer welk product geproduceerd dient te worden. Het probleem van productieplanning is veel besproken in de literatuur. Er zijn vele oplossingen beschreven in de literatuur. Deze oplossingen zijn onder te verdelen in drie categorieën (Hendry & Kingsman, 1989). Deze categorieën zijn:

- Zoeken naar de optimale oplossing
- Toepassen van heuristieken
- Toepassen van kunstmatige intelligentie

Veelal is het onderzoek naar de optimale oplossing voor het productieplanning probleem van theoretische aard. Daarnaast wordt het toegepast op het relatief eenvoudige probleem van een enkele machine met taken. Zelfs voor dit eenvoudig geval, is het vaak noodzakelijk om diverse vereenvoudigende veronderstellingen aan te nemen. Drie van de meeste toegepaste vereenvoudigingen zijn (King & Spachis, 1980):

- Machines vallen niet uit en hebben geen services nodig.
- Productietaken overlappen elkaar nooit.
- Een productietaak wordt nooit onderbroken nadat het is begonnen.

Algoritmen die gebruikt worden om het planningsprobleem op te lossen aan de hand van de optimale benadering zijn: 'branch and bound tree searches', dynamisch programmeren en integer programmering (Gascon en Leachman, 1988). Over het algemeen kan in de praktijk zelden gebruik gemaakt worden van een optimale aanpak. Zelfs wanneer een formule die leidt tot de optimale oplossing kan worden opgesteld, is het vaak onmogelijk om deze formule op te lossen. Het kost simpelweg te veel rekenkracht (Hendry & Kingsman, 1989). Heuristische methodes zorgen voor de enige praktische oplossingen voor dit probleem. Om een oplossing te vinden voor de optimale formule worden randvoorwaarden en beperkingen aangepast of helemaal buiten beschouwing gelaten. Bestwick en Lockyer (1979) ontwikkelden een 'branch and bound tree searches' algoritme met een beperkt oplossingsgebied. De uitkomst gaf in meeste gevallen de optimale resultaten bij een flinke reductie van de rekentijd. Naast deze vorm van het toepassen van een heuristiek, zijn er ook de populaire heuristieken die gebruiken van prioriteitsregels. Deze voorrangsregels bepalen niet de gehele productieplanning, zij bepalen alleen welke taak als eerstvolgende dient te worden uitgevoerd. Voordeel van deze toepassing is het vergemakkelijken om op korte termijn goede beslissingen te nemen (Hendry & Kingsman, 1989). De voorrangsregels zijn onderverdeeld in vier verschillende types (Blackstone, 1982):

- Regels met betrekking op de procestijden.
- Regels met betrekking op de deadline van het product, het moment dat een product uiterlijk klaar moet zijn.
- Regels met betrekking op eigenschappen van taak of proces. Bijvoorbeeld het FIFO-principe. Het eerst aankomende product, is als eerste aan de beurt.
- Een combinatie van twee of meer regels uit de bovenstaande categorieën.

De regels zijn getest en vergeleken met behulp van verschillende criteria. Blackstone (1982) bespreekt de regels die het best presteren op basis van verschillende criteria en verschillende productieomgevingen. De focus van het onderzoek lag op de impact van de afleverdag van een product. In een MTO-bedrijf wordt de afleverdag bepaald door een klantenorder. Uit het onderzoek van Blackstone (1982) blijkt dat bij een MTO-bedrijf regels met betrekking op de procestijden het best presteren.

2.4 Simulatiemodellen

Een simulatie is een nabootsing van de werkelijkheid, in veel gevallen met behulp van een model van die werkelijkheid. Een simulatie is een dynamisch proces. Vanuit een gegeven uitgangssituatie, laat een simulatie zien hoe deze situatie verandert en zich ontwikkelt in de loop van de tijd. Robinson (2004) beschrijft vier aspecten van een simulatie. Deze vier aspecten zijn: het werkelijke systeem, doel, simplificatie en experimenten. Het werkelijk systeem is de basis van de simulatie. Dit kunnen verschillende systemen zijn, bijvoorbeeld een productieproces, een callcenter of een supermarkt. Het tweede aspect is het doel van een simulatie. Het derde aspect is simplificatie. Het is hoogst onwaarschijnlijk dat elke detail van het werkelijke systeem wordt gemodelleerd. Het laatste aspect is het uitvoeren van experimenten. Een simulatie voorspelt de prestaties van een systeem onder bepaalde input waardes. Robinson (2004) definieert een simulatie aan de hand van de aspecten als volgt:

‘Experimenteren met een vereenvoudigde nabootsing (op een computer) van een systeem, om de verandering over de tijd waar te nemen, met als doel het beter begrijpen of verbeteren van het echte systeem.’

Veel systemen zijn met elkaar verbonden en onderworpen aan zowel variatie en complexiteit. De prestaties van systemen die onderworpen zijn aan variabiliteit, onderlinge verbondenheid en complexiteit, zijn zeer moeilijk, zo niet onmogelijk, te voorspellen. Simulatiemodellen hebben de mogelijkheid om de prestaties van systemen met variabiliteit, onderlinge verbondenheid en complexiteit te representeren. Daardoor is het mogelijk met een simulatie prestaties te voorspellen.

In plaats van het uitvoeren van een simulatiestudie is het mogelijk om experimenten uit te voeren in de werkelijkheid. Er zijn enkele redenen voordelen om te kiezen voor een simulatie in plaats van een experimenteren in de werkelijkheid (Robinson, 2004):

- Kosten. Het uitvoeren van een simulatie zorgt niet voor complicaties in het echte systeem. Bij het uitvoeren van experimenten in het echte systeem, worden alle normale taken stopgezet.
- Tijd. Het kost veel tijd om te experimenteren in echte systeem. Het kan weken of maanden duren voordat de resultaten van experimenten zichtbaar zijn. Een simulatie kan in enkele uren resultaten tonen over enkelen jaren van het systeem. Een simulatie kan in veel minder tijd veel meer resultaten tonen.
- Controle van de experimentele condities. In een simulatie is het makkelijker om de experimentele condities te controleren.

- Het werkelijk systeem bestaat niet. Een voor de hand liggende moeilijkheid met echte experimenten is dat het echte systeem nog niet bestaat. Het enige alternatief is om een model te ontwikkelen.

Deze paragraaf besprak eerst de situaties voor het toepassen van een simulatie en de voordelen van een simulatie. Verder bespreekt deze paragraaf de verschillende simulatiemodellen. Robinson (2004) classificeert simulatiemodellen op basis van drie verschillende dimensies:

- *Statisch of dynamisch*
In een statisch model wordt het systeem gepresenteerd op een bepaald tijdstip of tijd heeft geen invloed op het systeem. Een dynamisch model representeert een systeem dat continu verandert.
- *Deterministisch of stochastisch*
Een deterministisch model heeft geen enkele vorm van onzekerheid. Een stochastisch model representeert een systeem met probabilistische componenten.
- *Continu of discreet*
In een continu systeem verandert de staat van het systeem continu. In een discreet systeem verandert de staat van het systeem op specifieke tijdstippen. Deze tijdstippen zijn 'Events'.

Op basis van bovenstaande karakteristieken kan er een vorm van simulatie gekozen worden. Robinson (2004) heeft vijf verschillende vormen van simulatie gedefinieerd. Deze vijf vormen zijn:

- *Discrete-event simulation*
De toestand van het systeem verandert door 'events'. 'Events' zijn tijdstippen. De toestand van het systeem verandert niet tussen de 'events'. De tijd tussen de 'events' kan zowel deterministisch als stochastisch zijn.
- *Continuous simulation*
Voor deze vorm van simulatie geldt dat de toestand van het systeem continu verandert.
- *Combined discrete-continuous simulation*
Dit is een variatie waarbij de staat van het systeem continu verandert over de tijd. Echter kan door het voorkomen van 'events' de staat van het systeem ook veranderen. Het is een combinatie van de eerste twee vormen.
- *Monte Carlo simulation*
Door gebruik te maken van random input variabelen voor het uitvoeren van experimenten, wordt de uitkomst van deze experimenten geanalyseerd.
- *Spreadsheet simulation*
Op basis van het genereren van random getallen uit verschillende kansverdelingen, kan er bijvoorbeeld in Excel, relatief simpele systemen gesimuleerd worden.

Naast de keuze voor een simulatiemodel is er nog een onderscheid te maken tussen simulatiemodellen. Robinson (2004) geeft aan dat een simulatie 'terminating' of 'non-terminating' is:

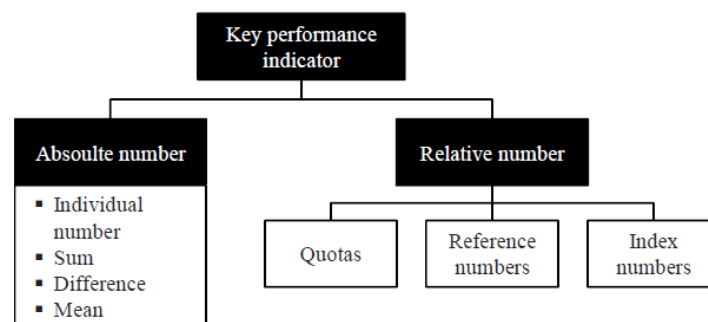
- *Terminating*
In het geval dat een simulatie eindigend is, houdt dat in dat de simulatie termineert door een natuurlijk gebeurtenis. Een voorbeeld van een natuurlijk gebeurtenis, waardoor de simulatie termineert is het einde van een productiedag. Aan het einde van een dag zijn alle orders geproduceerd en heeft de huidige staat van het systeem geen invloed op de toekomst. Dit houdt in dat elke individuele run van een simulatie tussen een natuurlijke gebeurtenis onafhankelijk van elkaar zijn.

- *Non-terminating*

Een niet terminerende simulatie is een simulatie waarbij er geen 'events' voorkomen die zorgen voor een einde van de simulatie. Ten eerste is er geen duidelijk punt in de tijd wanneer de simulatie is afgelopen. Ten tweede heeft de output van een niet terminerende simulatie vaak invloed op de prestaties van de rest van het systeem. Dit leidt in een normale situatie tot een stabiele staat van het systeem. Het systeem is dan in evenwicht. Winston & Goldberg (2004) geven daarom ook aan dat een 'non-terminating' eigenlijk een steady-state simulatie is. Het probleem dat er wel bij aangegeven wordt, is dat er eigenlijk geen evenwicht bestaat in reële productieomgeving, omdat het systeem van een productieproces verandert in de tijd.

2.5 Kritieke prestatie-indicatoren

In deze paragraaf wordt de theorie over kritieke prestatie-indicatoren (KPI's) besproken met betrekking tot productieplanning. Prestatie-indicatoren kunnen als volgt gedefinieerd worden: 'Verzamelde informatie in reguliere intervallen over de prestatie van een systeem, vormt de basis voor het evalueren en meten van de prestaties van de gehele organisatie of een proces in de organisatie' (Fitz-Gibbon, 1990). KPI's in de professionele werkomgeving zijn over het algemeen kwantitatief. Deze kwantitatieve KPI's geven de structuur en de processen weer van een bedrijf (Ewert, 2008). KPI's zijn voor een bedrijf essentieel om correct te plannen, het creëren van transparantie en het ondersteunen bij het nemen van managementbeslissingen (Meier, 2013). KPI's kunnen worden verdeeld in twee verschillende categorieën, namelijk absolute en relatieve getallen. De verdeling van indicatoren is weergegeven in figuur 2.4. Absolute nummers zijn onafhankelijk van andere indicatoren, aangezien zij individueel een bepaald gemiddelde, som, verschil of nummer indiceren (Meier, 2013). Relatieve KPI's kunnen onderverdeeld worden in quota's, referentienummers en indexnummers. Quota's geven een ratio weer van de relatie van de indicator met het geheel. Referentienummers geven een ratio weer van dezelfde indicatoren met een verschillende inhoud. De laatste categorie van de relatieve KPI's zijn de indexnummers. Indexnummers vergelijken tijdseries met elkaar (Meier, 2013). De literatuur focust meer op financiële KPI's dan op niet-financiële KPI's (Neely, 1995). Echter is het voor een organisatie alleen mogelijk om informatie te vergaren over haar bedrijfsproblemen met financiële en niet-financiële KPI's. Daarbij hebben goede KPI's de volgende eigenschappen: meetbaar, ondubbelzinnig, begrijpelijk en vergelijkbaar (Meier, 2013).



Figuur 2.4: KPI (Meier, 2013)

Hoogeveen (2005) heeft verschillende kritieke prestatie-indicatoren opgesteld voor een productieomgeving die bestaat uit verschillende producten, machines en routes. De eerste KPI is de tijd dat alle producten klaar zijn. Andere indicatoren zijn of een product op tijd is of in hoeverre een product te laat is. Deze indicatoren van de prestaties van het systeem geven weer in hoeverre een product voor of achter loopt ten opzichte van de planning. Een andere prestatie indicator geeft weer

of het benodigde aantal producten wordt gehaald om aan de klantenwens te voldoen. Wanneer dit niet het geval is ontstaan er backorders. Hill (2003) beschrijft een andere indicator die van belang is voor een productieomgeving. Deze indicator is de doorlooptijd van de productie. De doorlooptijd is afhankelijk van procestijden, omschakelingen, transport en wachttijden bij een machine. Verder zijn het aantal omsteltijden en de schommelingen in de capaciteit factoren die invloed uitoefenen op de productiecapaciteit. De productiecapaciteit heeft dan weer invloed op de doorlooptijd.

Een laatste belangrijke kritieke prestatie indicator in zo goed als elke productieomgeving is de productiekosten. De productiekosten zijn onder te verdelen in twee verschillende categorieën op basis van de afhankelijkheid van de productieomvang. Op deze manier worden de productiekosten gescheiden op basis van vaste en variabele kosten. De vaste kosten zijn de productiekosten die op korte termijn niet veranderen. De kosten voor de machines, gebouwen en materialen zijn niet variabel. De variabele kosten zijn de kosten die variëren. Kosten voor de setuptijden, overwerk en een onnodig hoge doorlooptijd zijn kosten die beïnvloedbaar zijn.

2.6 Conclusie hoofdstuk 2

Deze paragraaf geeft een samenvatting van het gedane literatuuronderzoek. Tijdens het literatuuronderzoek zijn productiewijzen, Lean manufacturing, productieplanning, simulatiemodellen en KPI's aan bod gekomen.

Er zijn vier verschillende productiewijze, namelijk MTS, ATO, MTO en ETO. MTS produceert artikelen om deze vervolgens op voorraad te leggen. ATO is het assembleren van een product wanneer er een order is geplaatst. MTO beschrijft het produceren van product op basis van een orderplaatsing door een klant. Ten slotte is ETO het ontwerpen en vervolgens produceren van het product gedreven door een orderplaatsing. De keuze van een bedrijf waar zij het klantenorderontkoppelpunt (KOOP) geeft aan wanneer een order klant specifiek wordt, in plaats van een standaardproduct. Het KOOP bepaalt dus de productiewijze van een bedrijf.

Paragraaf 2.2 van dit hoofdstuk heeft 'Lean Manufacturing' besproken. Als eerste is een stuk algemene introductie gegeven van de Lean filosofie om vervolgens de voordelen van Lean manufacturing te bespreken. Deze voordelen zijn: het verkorten van de levertijd, het verminderen van voorraden, het vergroten van de managementinformatie en het robuuster maken van het productieproces. Vervolgens wordt het 'Lean thinking' geïntroduceerd. Het belangrijkste concept van 'Lean thinking', het elimineren van verspilling, wordt vervolgens breed uitgelicht en besproken. Taktijd is geïntroduceerd als methodiek van 'Lean manufacturing'. Taktijd is het ritme waarin geproduceerd wordt om aan de klantvraag te voldoen gedurende een dag. Het geeft de frequentie weer waarin één gereed product geproduceerd dient te worden. 'Single-piece flow' produceren houdt in dat elk onderdeel van bewerkingsstation naar bewerkingsstation wordt verplaatst met zo min mogelijk arbeidstijd tussen de verschillende bewerkingsstations. Een belangrijk aspect van 'single-piece flow' is een continue flow. Heijunka is geïntroduceerd als tool om de orders gelijkmatig in te plannen bij een variatie in de product mix.

Paragraaf 2.3 heeft kort de algemene theorie over productieplanning toegelicht. Vanuit de literatuur zijn drie algemene manieren op problemen met betrekking tot de productieplanning op te lossen, namelijk het berekenen van de optimale planning, het toepassen van heuristieken of het toepassen van kunstmatige intelligentie. Paragraaf 2.4 bevat een beschrijving over verschillende simulatiemodellen die vanuit de literatuur toepasbaar zijn. Op basis van de karakteristieken van de verschillende modellen kan het juiste model gekozen worden om de situatie bij Auping te beschrijven in een computermodel. Ten slotte licht paragraaf 2.5 KPI's toe, om de prestaties te meten van een het productieproces.

3. Huidige Situatie

Om de huidige problemen bij Auping te onderzoeken en voor deze problemen oplossingen aan te dragen wordt eerst de tweede onderzoeksvraag beantwoord. De tweede onderzoeksvraag luidt:

Hoe ziet de huidige situatie van de staalfabriek bij Auping eruit?

Paragraaf 3.1 geeft een overzicht van de huidige producten van Auping. Voorts bespreekt paragraaf 3.2 de huidige productiewijze. Paragraaf 3.3 beschrijft het huidige productieproces. Er wordt gekeken hoe er in de staalfabriek wordt gehandeld met betrekking tot het bestel-, productie- en montageproces. Uiteindelijk geeft paragraaf 3.4 een terugblik op de huidige situatie.

3.1 Producten

Auping is een beddenfabrikant. Het belangrijkste product waar Auping om bekend staat is een bed. Auping verkoopt echter meer dan alleen bedden. Het gehele assortiment bestaat uit:

- *Bedden*
Een bed is een complete set van een bedbodem, een matras, een achterwand en andere accessoires. In totaal heeft Auping vijf verschillende modellen.
- *Boxsprings*
Een boxspring is een complete set van een boxspring onderstel, boxspring matrassen en overige accessoires. In totaal heeft Auping drie verschillende modellen.
- *Matrassen*
Naast een compleet bed kan een klant ook alleen een matras bestellen. Bij de matrassen horen ook de toppers. Er zijn acht verschillende matrassen en zeven toppers.
- *Spiraalbodems*
Net als een matras is het mogelijk voor een klant om alleen een spiraalbodem te bestellen. Een spiraalbodem is de bodem van het bed. Er zijn vijf verschillende varianten spiraalbodems. Deze variatie wordt veroorzaakt door de mogelijkheden tot verstellen. Een spiraalbodem kan vlak of verstelbaar zijn. Een verstelbare spiraal kan hand verstelbaar zijn of één, twee of drie motoren bevatten.
- *Hoofdkussen en dekbedden*
Buiten de bedden, matrassen en spiraalbodems biedt Auping verschillende accessoires aan. De eerste categorie van de accessoires zijn de hoofdkussen en dekbedden.
- *Bedtextiel*
Het bedtextiel dat Auping aanbiedt zijn dekbedovertrekken, hoeslakens en spreien. In totaal heeft Auping 31 dekbedovertrekken en vier hoeslakens.
- *Bedmeubilair*
De laatste categorie is het bedmeubilair. Deze categorie bestaat uit nachtkastjes, nachtlampjes en poefen.

Dit onderzoek is gericht op het optimaliseren van de productieprocessen in de staalfabriek van Auping. Het is daarom belangrijk om inzicht te krijgen in welke producten er geproduceerd worden in de staalfabriek. Het onderstel van een bed, bestaande uit een spiraalbodem en een onderstel, wordt geproduceerd in de staalfabriek. Figuren 3.1 en 3.2 geven de spiraalbodems weer. Deze spiraalbodems worden de K5 spiralen genoemd.



Figuur 3.1: Vlakke K5 spiraalbodem



Figuur 3.2: Verstelbare K5 spiraalbodem



Figuur 3.3: Vlakke Boxspring spiraalbodem



Figuur 3.4: Verstelbare Boxspring spiraalbodem

Figuren 3.3 en 3.4 laten de boxspring spiraalbodems zien. De staalfabriek produceert deze vier spiraalbodems. Tabel 3.1 geeft een overzicht van alle spiraalbodems. Naast het aantal motoren is er nog één variabele om het aantal varianten spiraalbodems te definiëren. Deze variabele is de afmeting van de spiraalbodem. De lengte kan variëren van 190 centimeter tot en met 220 centimeter met intervallen van tien centimeter. De breedte van een spiraalbodem varieert van 70 centimeter tot en met 140 centimeter. In dit onderzoek is de variatie in lengte niet meegenomen. Uit een discussie met de begeleider vanuit Auping is gebleken dat de lengte van een spiraalbodem geen invloed heeft op de lastijd. De breedte van een spiraalbodem zorgt voor omsteltijden. De breedte van een spiraalbodem is daarom van belang voor dit onderzoek.

Tabel 3.1: Overzicht Spiraalbodems

Type	Variant	Wijze verstelbaar
K5	Vlak	-
K5	Verstelbaar	Hand verstelbaar
K5	Verstelbaar	1 motor
K5	Verstelbaar	2 motoren
K5	Verstelbaar	3 motoren
Box	Vlak	-
Box	Verstelbaar	1 motor
Box	Verstelbaar	2 motoren
Box	Verstelbaar	3 motoren

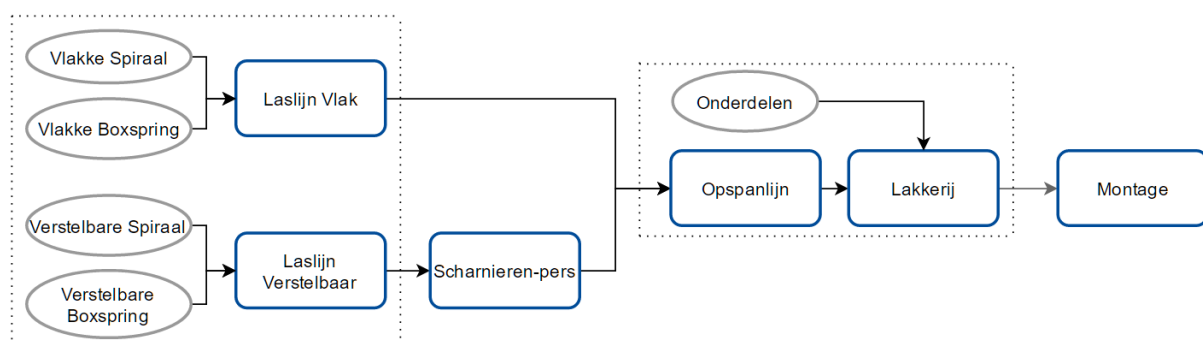
De spiraalbodems worden geproduceerd door lasrobots. Dit is de eerste fase van de staalfabriek. In de tweede fase van de staalfabriek worden de spiraalbodems gelakt. In de lakkerij worden behalve spiralen ook nog allerlei andere onderdelen gelakt. De producten van de staalfabriek zijn dus de verschillende soorten spiraalbodems en de onderdelen. De kleur van elke spiraal is zwart. De onderdelen hebben tien verschillende kleuren, waaronder zwart.

3.2 Productiewijze

In het theoretisch kader zijn de vier verschillende productiewijzen besproken. Het productieproces bij Auping is gebaseerd op 'Make-to-Order' (MTO). Alleen standaardonderdelen en grondstoffen liggen op voorraad bij Auping. Op het moment dat een klant een order plaatst, begint de productie van het product. Het produceren van de benodigde staalproducten kan binnen een halve dag. Het is echter niet zo dat een order direct wordt geproduceerd op het moment van bestellen. De planningsmodule van het ERP-systeem van Auping gaat de productiedag bepalen voor de order. Deze productiedag kan zijn van maandag tot en met vrijdag. De productiedag is afhankelijk van twee variabelen: De eerste variabele is de capaciteit van de staalfabriek. Zolang het aantal orders op een productiedag niet meer is dan de maximale beschikbare capaciteit kan de klantenorder op de productiedag gepland worden. De tweede variabele is de afleverdag van de klantenorder. De afleverdagen zijn maandag tot en met vrijdag. Op basis van de locatie waar de klantenorder geleverd dient te worden, zijn er vaste leverdagen. Op het moment dat een klant een order plaatst, is de afleverdag al direct bepaald. De afleverdag heeft een directe invloed op de productiedag van een order. Het streven van Auping is om een order zo snel mogelijk te leveren. Het ERP bepaalt eerste mogelijke productiedag rekening houdend met de maximale beschikbare capaciteit en de afleverdag van een klantorder.

3.3 Productieproces

Deze paragraaf beschrijft het productieproces van de staalfabriek. Figuur 3.5 geeft een schematisch overzicht van het productieproces. Het productieproces bestaat uit drie verschillende fases, namelijk de laslijnen, de lakkerij en de montage. Bijlage A geeft een overzicht van de laslijnen weer. Bijlage B geeft een overzicht van de lakkerij. De route van het productieproces is bijna identiek voor elke spiraalbodem. Het verschil wordt veroorzaakt door de lijnlijnen (Zie figuur 3.5). Er zijn twee laslijnen, één lijn voor de vlakke spiraalbodems en één lijn voor de verstelbare spiraalbodems. De volgende stap in het productieproces is de lakkerij. In de lakkerij worden niet alleen de spiraalbodems, maar ook alle stalen onderdelen gelakt. Het laatste gedeelte van de staalfabriek is de montage. In het montageproces worden de laatste montagewerkzaamheden uitgevoerd. Uiteindelijk wordt de spiraalbodem verpakt in het montageproces. Het montageproces is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

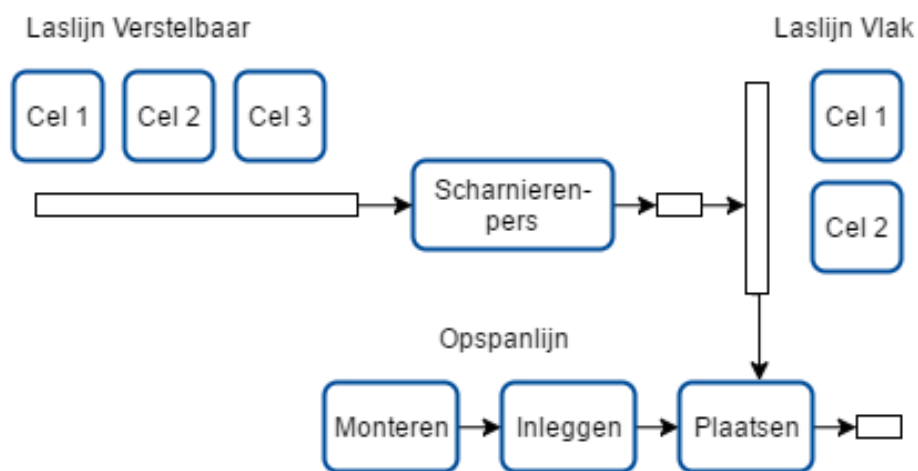


Figuur 3.5: Productieproces

3.3.1 Laslijnen

De productie van de spiraalbodems begint bij de laslijnen. Figuur 3.6 geeft een overzicht van de laslijnen. Linksboven is de laslijn voor de verstelbare spiralen weergegeven. Het frame van een van een verstelbare spiraalbodem bestaat uit drie losse gedeeltes, namelijk het hoofdgedeelte, het zitgedeelte en het beengedeelte. Elk van deze drie gedeeltes worden los van elkaar gelast in een aparte cel. In elke cel staan twee lasrobots. Dit heeft als voordeel dat wanneer één van de twee robots aan het lassen is, kan in de andere lasrobot het staal voor het frame worden ingelegd. Door deze manier van werken worden de wachttijden bij de lasrobots geminimaliseerd. Om de omsteltijd te minimaliseren is het van belang om rekening te houden met de breedte van de spiralen. Wanneer de drie losse gedeeltes klaar zijn komen deze op een bufferbaan te liggen met een capaciteit voor zes gedeeltes. De volgende stap in het productieproces is de scharnierenpers. De scharnierenpers verbindt de drie losse gedeeltes samen tot één frame voor een verstelbare spiraalbodem. De snelheid van de scharnierenpers is afhankelijk van het aantal scharnieren op de spiraalbodem. Het aantal scharnieren wordt bepaald door het aantal motoren. De snelheid van de scharnierenpers is afhankelijk van het aantal motoren van een spiraalbodem.

Rechtsboven in figuur 3.6 is de laslijn voor de vlakke spiralen te zien. In totaal heeft de vlakke laslijn twee lasrobots. Net als bij de lasrobots voor de verstelbare spiraalbodems is één van de lasrobots aan het lassen en worden de materialen in de andere lasrobot ingelegd. Op de laslijn voor vlakke spiralen worden de frames van de K5 en vlakke spiraalbodems gelast. Om de omsteltijd te minimaliseren is het net als bij de verstelbare spiralen van belang om rekening te houden met de breedte van de spiralen. De gelaste frames voor zowel de vlakke als de verstelbare spiralen komen samen op een bufferbaan met een capaciteit voor vijf frames. De samenkomst van de vlakke en de verstelbare spiralen zorgt voor een verhouding die invloed heeft op de output. De verhouding tussen de vlakke en verstelbare spiralen fluctueert dagelijks.



Figuur 3.6: Laslijnen

De volgende stap in het productieproces is de opspanlijn. Het onderste gedeelte van figuur 3.6 geeft de opspanlijn weer. Tijdens het opspannen worden drie handelingen uitgevoerd. De eerste stap is het monteren van greeplijsten¹. De tweede stap is het inleggen en dichtrollen van het netwerk in de greeplijsten. De laatste stap van de opspanlijn is het plaatsen van het opgespannen netwerk op een frame van een spiraalbodem. In hoofdstuk 2 is de term taktijd besproken. De taktijd van de staalfabriek is afhankelijk van de opspanlijn. De opspanlijn kan op verschillende productiesnelheden werken. De keuze van de snelheid is afhankelijk van het aantal te produceren spiraalbodems en het aantal benodigde werknemers. Wanneer er veel spiraalbodems geproduceerd moeten worden wordt er een kleinere taktijd gekozen. Op een rustigere productiedag werkt de fabriek op een hogere taktijd met minder medewerkers.

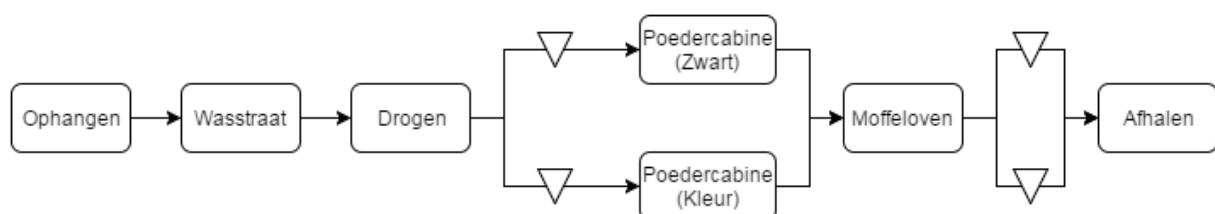
3.3.2 Lakkerij

Het volgende gedeelte in het productieproces na de laslijnen is de lakkerij. Bij de lakkerij komen de spiraalbodems en de onderdelen samen. Beide dienen gelakt te worden. Alle spiralen worden zwart gelakt. De onderdelen worden in tien mogelijke kleuren gelakt, waaronder zwart. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de mogelijke kleuren.

Tabel 3.2 Overzicht kleuren

Product	Kleuren
Spiraal/Onderdeel	Deep Black
Onderdeel	Pure White
Onderdeel	Aluminium
Onderdeel	Skin
Onderdeel	Sparkling Bronze
Onderdeel	Brique
Onderdeel	Copper
Onderdeel	Busty Red
Onderdeel	Night Blue
Onderdeel	Carbon Black

Het lakken van de spiraalbodems en de onderdelen bestaat uit diverse processen die achtereenvolgend dienen te worden uitgevoerd. Figuur 3.7 geeft de verschillende processen weer. Het gehele lakproces wordt uitgevoerd met behulp van een railsysteem. De eerste stap is het ophangen van de spiralen of onderdelen aan de ladingdragers. In totaal bevat het railsysteem 200 ladingdragers. De tijd tussen de ladingdragers is 47 seconden. Elke 47 seconden arriveert een lege ladingdrager bij het ophangproces, om er vervolgens een spiraalbodem of een onderdeel aan op te hangen. Het ophangproces zorgt voor een veranderende mix in de productievolgorde van de spiraalbodems en de onderdelen.



Figuur 3.7: Lakkerij

¹ Bijlage C geeft een schematische tekening weer van een greeplijst in combinatie van een netwerk.

Dit zorgt voor het volgende probleem binnen de staalproductie, namelijk wat de beste volgorde van ophangen is van spiraalbodems en onderdelen, rekening houdend met de kleur van een onderdeel.

Wanneer een spiraal of een onderdeel is opgehangen, dan gaat de ladingdrager eerst door de wasstraat. Hier wordt het gereinigd met een chemicaliën bad. Vervolgens gaat de ladingdrager de droogcabine in voor een langere tijd. Aan het eind van de droogcabine is er een sorteerder om de ladingdragers te verdelen over de twee bufferbanen. Het volgende station is de poedercabine. Voor de poedercabines is er een sorteerder om de ladingdragers naar de juiste poedercabine te sturen. Eén van de poedercabines wordt gebruikt voor het lakken van de spiralen en de zwarte onderdelen, de andere poedercabine wordt gebruikt voor het lakken van de onderdelen met de overige kleuren. Het wisselen van kleur in de poedercabine zorgt voor omsteltijden. Om de omsteltijd te minimaliseren worden de onderdelen gesorteerd op kleur. Vanuit de poedercabines gaat de ladingdrager naar de moffeloven om te drogen. Wanneer een ladingdrager uit de moffeloven komt is er een sorteerder. Deze sorteerder verdeelt de ladingdragers over twee grote bufferbanen. Deze bufferbanen komen samen bij een laatste sorteerder. Vanaf deze sorteerder gaat de ladingdrager naar het einde van het railsysteem waar het product van de ladingdrager wordt gehaald en vervolgens naar de montage gaat.

3.3.3 Montage

Het laatste gedeelte van de staalfabriek is de montage. De montage bestaat uit twee processen. Het eerste proces is de spiraalmontage. Als een spiraalbodem vanuit de lakkerij wordt aangeleverd, gaat deze naar de spiraalmontage. Bij de spiraalmontage wordt de spiraalbodem ingepakt en klaargezet voor transport. Figuur 3.8 laat een gemonteerde en ingepakte spiraalbodem zien. Het andere proces is de kleinmontage. De afdeling kleinmontage bestaat uit montagetafels met daar omheen KANBAN-stellingen met onderdelen. De werkzaamheden die gedaan worden zijn assembleren en verpakken van stalen bedonderdelen. Verwerkte producten worden klaargelegd voor de expeditie.

De werkdruk van de spiraalmontage is afhankelijk van de aanlevering van de lakkerij. In de ideale situatie is er een mix in de aanlevering vanuit de lakkerij en levert de lakkerij in constante tijdsintervallen een product aan. Dit zorgt voor een goede verdeling van het werk op de montageafdeling. In de huidige situatie is de aanlevering vanuit de lakkerij niet gemixt en is de aanlevering niet altijd in constante tijdsintervallen.



Figuur 3.8: Gemonteerde spiraalbodem

3.5 Conclusie hoofdstuk 3

Deze paragraaf geeft een samenvatting dit hoofdstuk, dat de huidige situatie beschrijft. De huidige situatie is beschreven aan de hand van de verschillende producten, de productiewijze en het productieproces.

Paragraaf 3.1 geeft een overzicht van de producten van Auping. Uit het overzicht van de producten blijkt dat Auping veel meer producten verkoopt, dan alleen bedden. Vervolgens is gekeken welke producten de staalfabriek produceert van het totale assortiment. De staalfabriek produceert en lakt spiraalbodems. Naast de spiraalbodems lakt de staalfabriek losse onderdelen voor verschillende producten.

Paragraaf 3.2 bespreekt de productiewijze van Auping. Het literatuuronderzoek bevat een beschrijving van vier verschillende productiewijzen. Het productieproces van Auping is gebaseerd op 'Make-to-Order'. De productie van een product start pas als er een klantorder is. Er is geen voorraad van eindproducten. Alleen de grondstoffen en benodigde materialen liggen op voorraad.

Paragraaf 3.3 bevat de beschrijving van het productieproces. Het productieproces bestaat uit drie verschillende gedeeltes namelijk de laslijnen, de lakkerij en de montage. Figuur 3.5 geeft het productieproces weer. De productie van de spiraalbodems begint bij de laslijnen. Er is een laslijn voor de vlakke spiraalbodems en een laslijn voor de verstelbare spiraalbodems. Na de laslijnen komen de vlakke en verstelbare spiraalbodems samen bij de opspanlijn. De opspanlijn plaatst het opgespannen netwerk in een spiraalbodem. Bij de lakkerij komen de spiraalbodems en de onderdelen samen. Beide dienen gelakt te worden. Alle spiralen worden zwart gelakt. De onderdelen worden in tien verschillende kleuren gelakt, waaronder zwart.

4. Simulatiemodel op basis van de eisen en randvoorwaarden

Dit hoofdstuk bespreekt de eisen en randvoorwaarden die aan de oplossing gesteld worden. Het geeft antwoord op de derde onderzoeksvraag:

Wat zijn de eisen en randvoorwaarden voor het balanceren van het productieproces van de staalfabriek bij Auping?

Paragraaf 4.1 bespreekt de eisen en randvoorwaarden waaraan een mogelijke oplossing moet voldoen met betrekking tot de productiecapaciteit van de staalfabriek. Paragraaf 4.2 bespreekt de eisen waaraan de productieplanning van de staalfabriek aan moet voldoen. Voorts bevat paragraaf 4.3 de beschrijving van het simulatiemodel op basis van de eisen en randvoorwaarden.

4.1 Productiecapaciteit

Voor de productiecapaciteit van de staalfabriek gelden verschillende eisen. De eerste eis die aan het machinepark gesteld wordt is dat alle machines op de huidige plaats blijven staan. Bovendien is geen mogelijkheid tot het aanschaffen van een extra machine. De lay-out van de staalfabriek kan alleen worden aangepast bij de lakkerij om te productiecapaciteit te verhogen. Er is een mogelijkheid om extra bufferbanen toe te voegen aan het railsysteem. Deze extra bufferbanen kunnen worden toegevoegd aan de bufferbaan voor de poedercabines en de bufferbanen aan het eind van de moffeloven. Naast het toevoegen van extra bufferbanen is het mogelijk om in de poedercabine waar normaal gesproken alleen onderdelen met kleur gelakt worden, zwarte onderdelen en spiraalbodems te lakken. In de huidige situatie is het mogelijk om de kleur zwart te lakken in de kleurpoedercabine. De laatste mogelijke aanpassing is het versnellen van het railsysteem in de lakkerij. De snelheid van het railsysteem in de wasstraat kan versneld worden. In plaats van een tijd van 47 seconden tussen een ladingdrager wordt de tijd tussen een ladingdrager teruggebracht naar maximaal 44 tot 45 seconden. De productiecapaciteit van de laslijnen kan iets verhoogd worden. Door de lasrobots te optimaliseren kan de cyclustijd van het lassen van een spiraalspiraalbodem iets verlaagd worden. Beide optimalisaties van de productiecapaciteit vereisen een investering. Dit heeft niet de voorkeur van het management van Auping.

4.2 Productieplanning

Zoals eerder eisen werden gesteld aan de productiecapaciteit van de staalfabriek, zijn er ook eisen op te stellen voor de productieplanning. De belangrijkste eis is dat alle producten op tijd geleverd worden. Het streven is om alle producten binnen twee weken na bestellen te leveren. Indien mogelijk wordt een kortere levertijd afgegeven. Voor de productieplanning betekent dit dat er op het moment van bestellen bepaald kan worden op welke dag in welke week het product uiterlijk geleverd moet worden. Een andere eis van de productieplanning is productievolgorde van de spiraalbodems. Om de omsteltijden te minimaliseren is het van belang om met productievolgorde rekening te houden met breedte van de spiraalbodems. Er dient van smal naar breed of van breed naar smal geproduceerd te worden om de omsteltijd te minimaliseren.

Verder moet de productieplanning zorgen voor een goede balans in de staalfabriek. De klantorders dienen in een goede mix geproduceerd te worden. Daarnaast moet de productieplanning slim omgaan met de beschikbare buffers in het productieproces.

4.3 Simulatiemodel

Voor het simulatiemodel is het programma Plant Simulation gebruikt. De Universiteit Twente heeft een licentie voor Plant Simulation en dit programma is gebruikt tijdens het bachelor onderwijs. Hoofdstuk 2 bespreekt diverse karakteristieken van simulaties. De karakteristieken van het model voor dit onderzoek zijn statisch, stochastisch en niet-terminerend. In een statisch model wordt het systeem gepresenteerd op een bepaald tijdstip. De toestand van het productieproces verandert op tijdstippen gedurende werkdagen. In de tijd tussen de tijdstippen verandert de staat van het productieproces niet. Er is een mate van onzekerheid door de fluctuaties in de aantallen van de klantorders. Het productieproces kent geen natuurlijk einde. De toestand aan het eind van een productiedag heeft invloed op de volgende productiedag. Aan de hand van de karakteristieken is er een simulatiemodel gekozen. Om de werkelijkheid te modelleren in een simulatiemodel is gekozen voor een 'discrete event' simulatie. De toestand van het productieproces verandert niet continu en het productieproces is te complex voor een Monte Carlo of een spreadsheet.

Paragraaf 4.3.1 bespreekt de simplificaties van het simulatiemodel. Voorts beschrijft paragraaf 4.3.2 het model van de staalfabriek. Paragraaf 4.3.3 beschrijft de input data voor het simulatiemodel. Ten slotte bespreekt paragraaf 4.3.4 de validatie en verificatie van het model.

4.3.1 Aannames

Om de huidige situatie te beschrijven in een simulatiemodel, zijn de volgende aannames gedaan:

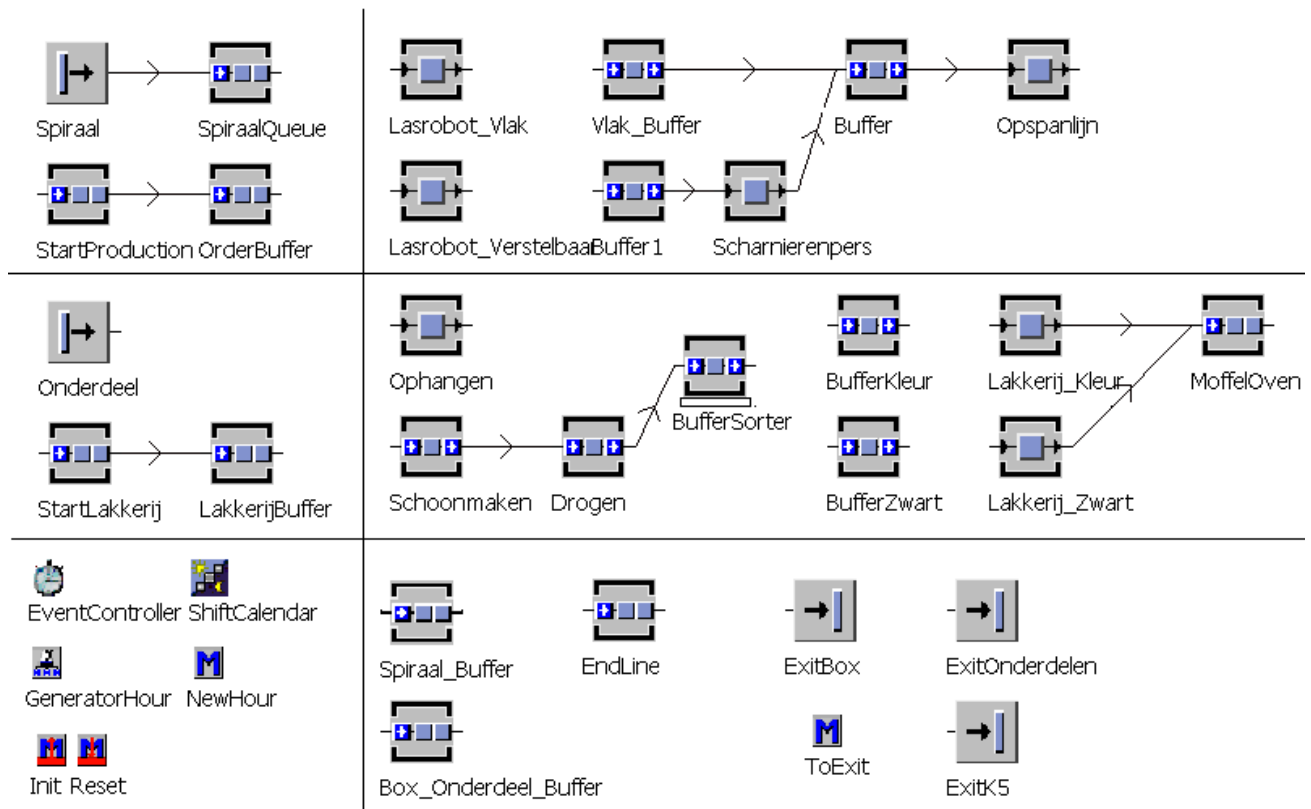
- Het aantal klantorders is gamma verdeeld (Zie bijlage D). Elke werkdag creëert het simulatiemodel het aantal klantorders op basis van de gammaverdeling.
- De procestijden van de lasrobots zijn deterministisch. De procestijd van de lasrobots hangt alleen af van de breedte en het aantal motoren van een spiraalbodem.
- De procestijd van de opspanlijn is deterministisch. De procestijd van de opspanlijn is afhankelijk van de taktijd in de staalfabriek. Deze varieert op basis van de productieaantallen.
- De machines in de staalfabriek vallen niet uit. Dit is in de werkelijkheid niet zo. Echter is er geen data beschikbaar over de uitval van machines in de staalfabriek.
- Er is geen afkeur van geproduceerde producten.
- Er zijn altijd voldoende materialen op voorraad om te produceren. Het bepalen en beheren van de voorraad van materialen om te produceren valt buiten dit onderzoek.
- Elk workstation heeft altijd een operator. Dit is in de werkelijkheid niet waar, maar het is te complex om de gehele werkvloer te modelleren.
- De ladingdragers in de lakkerij worden getransporteerd doormiddel van een railsysteem. Op basis van de huidige snelheid van het railsysteem is de tijd tussen twee ladingdragers 47 seconden. Elke 47 seconden kan er dus een onderdeel of een spiraalbodem opgehangen worden.

4.3.2 Model van de staalfabriek

Figuur 4.1 geeft een overzicht van het simulatiemodel. De simulatie start met klantorders voor een spiraalbodem. Op het moment dat de klantorder het systeem binnenkomt, gaat het planningsalgoritme het productiemoment bepalen. Een spiraal wordt geproduceerd op maandag tot en met vrijdag. Elke werkdag is opgedeeld in twee shifts. Het productiemoment bestaat dus uit een dag en een starttijd van shift op de dag. Op het tijdstip van het productiemoment van een spiraalbodem wordt de order in de orderbuffer geplaatst. Vervolgens bepaalt het planningsalgoritme de volgorde waarin de orders van spiraalbodems geproduceerd worden. De productie van een vlakke spiraalbodem start bij de vlakke lasrobot, de productie van de verstelbare spiralen start bij de andere

lasrobot. Na de lasrobots vervolgen de beide varianten spiraalbodems elk hun eigen route om samen te komen voor de opspanlijn. Na de opspanlijn komen de spiraalbodems in de lakkerij buffer terecht.

Naast het produceren en lakken van de spiraalbodems, lakt de staalfabriek losse onderdelen in tien verschillende kleuren. Elke werkdag creëert het simulatiemodel een aantal losse onderdelen op basis van een gammaverdeling. Deze losse onderdelen komen samen met de spiraalbodems in de wachtrij van de lakkerij terecht. Vanuit de wachtrij worden de spiraalbodems en onderdelen opgehangen om de lakkerij in te gaan.



Figuur 4.1: Overzicht simulatiemodel

4.3.3 Inputdata

De inputdata voor het simulatiemodel bestaat uit data over de klantorders van spiraalbodems, de onderdelen en over het productieproces. Allereerst bespreekt deze paragraaf de inputdata van de spiraalbodems en van de onderdelen. Voorts wordt de data over het productieproces besproken.

Het aantal klantorders per dag voor een spiraalbodem is gamma verdeeld (Zie tabel 4.1). Een gedetailleerde berekening van de verdeling van het aantal orders is te vinden in bijlage D.

Tabel 4.1: Verdeling klantorders van een spiraalbodem

Aantal klantorders	Alfa	Bèta
Gamma Verdeling	20,56	12,51

Een klantorder bestaat uit verschillende karakteristieken. De eerste karakteristiek is het type spiraalbodem. Een spiraalbodem kan een normale (K5) of een boxspring spiraalbodem (Box) zijn. Tabel 4.2 geeft de kans weer van de spiraalbodems op een uniforme verdeling. De percentages betekenen dat gemiddeld 34% van de spiraalbodems een K5 vlak is. De overige percentages in deze paragraaf geven de kans weer op basis van de uniforme verdeling, net als bij de verdeling van het type spiraalbodem. De tweede karakteristiek is het aantal motoren van een verstelbare spiraalbodem. Een normale spiraalbodem (K5) is hand verstelbaar of heeft een, twee of drie motoren. Een boxspring spiraalbodem is niet hand verstelbaar en heeft dus een, twee of drie motoren. Tabel 4.3 geeft de percentages weer van het aantal motoren van een verstelbare spiraalbodem op basis van een uniforme verdeling.

Tabel 4.2: Verdeling type spiraalbodem

Type Spiraal	Percentage
K5 Vlak	0,34
K5 Verstelbaar	0,33
Box Vlak	0,23
Box Verstelbaar	0,10

Tabel 4.3: Verdeling aantal motoren

Aantal Motoren	K5	Box
Hand verstelbaar	0,18	0,00
1m	0,24	0,24
2m	0,46	0,65
3m	0,12	0,11

Een andere karakteristiek is de breedte van een spiraalbodem. De breedte van een spiraalbodem varieert van 70 centimeter tot en met 140 centimeter. Tabel 4.4 geeft de percentages weer van de breedtes van een spiraalbodem. De laatste karakteristiek van een klantorder is de afleverdag. Een klantorder wordt geleverd op maandag tot en met vrijdag. De verdeling van de afleverdagen is te zien in tabel 4.5.

Tabel 4.4: Verdeling breedte spiraalbodem

Breedte (cm)	Percentage
70	0,04
80	0,22
90	0,60
100	0,07
120	0,03
140	0,04

Tabel 4.5: Verdeling afleverdag klantenorder

Afleverdag	Percentage
Maandag	0,16
Dinsdag	0,23
Woensdag	0,20
Donderdag	0,21
Vrijdag	0,20

Naast het produceren van spiraalbodems lakt de staalfabriek losse onderdelen in tien verschillende kleuren. Het aantal losse onderdelen is afhankelijk van het aantal te produceren spiraalbodems op een dag. Op basis van de informatie van een procesengineer van Auping is het aantal te lakken losse onderdelen per dag normaal verdeeld met gemiddelde 59 % van het aantal te produceren spiraalbodems en een standaardafwijking van 13 % van dit zelfde aantal. Tabel 4.6 geeft de verdeling van de tien verschillende kleuren weer. De meeste voorkomende kleur van de losse onderdelen is zwart. De overige kleuren hebben een veel kleiner percentage.

Tabel 4.6: Verdeling kleur onderdelen

Kleur	Percentage
Deep Black	0,69
Pure White	0,10
Aluminium	0,05
Skin	0,02
Sparkling Bronze	0,04
Brique	0,02
Copper	0,01
Busty Red	0,03
Night Blue	0,01
Carbon Black	0,03

Tabel 4.7: Procestijden laslijnen

Machine	Procestijden (sec)
Lasrobot Vlak	87 - 130
Lasrobot Verstelbaar	90 - 160
Scharnierenpers	104 - 166
Opspanlijn	65, 85, 100, 120, 150

De input data van het productieproces bestaat uit procestijden en buffercapaciteiten. De procestijden van de machines zijn deterministisch. Tabel 4.7 geeft de procestijden weer van de machines bij de laslijnen. De procestijden van de lasrobots en de scharnierenpers zijn afhankelijk van het type spiraal, het aantal motoren en de breedte. De procestijd van de opspanlijn is variabel, afhankelijk van het aantal productieorders. Bijlage E geeft een overzicht van de procestijden. Tabel 4.8 laat de buffercapaciteit van bufferbanen voor elke machine bij de laslijnen zien. Ten slotte geeft tabel 4.9 de omsteltijden weer van de opspanlijn en de kleurenpoedercabine.

Tabel 4.8: Buffercapaciteit laslijnen

Bufferbaan	Capaciteit
Lasrobot Vlak	4
Lasrobot Verstelbaar	1
Scharnierenpers	3
Opspanlijn	5

Tabel 4.9: Omsteltijden

Machine	Omsteltijd (min)
Opspanlijn	20
Poedercabine Kleur	10

De doorlooptijd van een onderdeel of een spiraalbodem is afhankelijk van het totaal aantal ladingdragers in het systeem. De oorzaak is de mogelijke wachtrij in een van de buffers van in lakkerij. De eerste buffer is de droogbaan. Aansluitend op de droogbaan en voor de poedercabines zijn er twee parallelle bufferbanen. De laatste twee bufferbanen zijn twee parallelle banen aan het einde van de lakkerij na de moffeloven. Tabel 4.10 geeft de capaciteiten van de buffers in de lakkerij weer. Daarnaast is de doorlooptijd afhankelijk van het einde van een werkdag. Wanneer een ladingdrager aan het einde van de werkdag in een buffer is, dan blijft deze ladingdrager in de buffer tot de volgende werkdag. De doorlooptijd varieert afhankelijk van de bovengenoemde oorzaken. De procestijden van de lakkerij zijn wel constant. Tabel 4.11 laat de procestijden van de verschillende deelprocessen in de lakkerij zien.

Tabel 4.10: Buffercapaciteit lakkerij

Bufferbaan	Capaciteit (producten)
Droogbaan	50
Poedercabine 1	30
Poedercabine 2	30
Bufferbaan 1	33
Bufferbaan 2	33

Tabel 4.11: Procestijden lakkerij

Proces	Procestijden
Ophangen	47 sec
Wasstraat	20 min
Drogen	55 min
Poedercabine	50 sec
Moffeloven	75 min
Afhalen	47 sec

4.3.4 Verificatie en Validatie

Verificatie en validatie worden gebruikt ter bevestiging van de nauwkeurigheid van het simulatiemodel. Nauwkeurigheid betekent dat het simulatiemodel gebruikt kan worden voor het doel van de simulatie. Verificatie controleert de nauwkeurigheid van de transformatie van het conceptuele model naar het computermodeel (Davis, 1992). Validatie controleert of het simulatiemodel nauwkeurig genoeg is voor het doel van de simulatie (Carson, 1986). De eerste methode voor het verifiëren en valideren van het model is conceptuele modelvalidatie. Er is geen formele methode voor het valideren van een conceptueel model (Robinson, 2004). Het model is gevalideerd op basis van de aannames. Het valideren is uitgevoerd in samenwerking met de productiemanager. Wij concludeerden dat het model voldoet aan de vooraf gestelde eisen en randvoorwaarden is.

De tweede toegepaste methode voor de verificatie en validatie in dit onderzoek is 'white-box' validatie. Dit methode van validatie bestaat uit drie verschillende methodes (Robinson, 2004). De eerste van 'white-box' validatie is het controleren van de geprogrammeerde code of de juiste data en business logica is toegepast. In samenwerking met de procesengineer van Auping is de business logica en de geprogrammeerde code van het simulatiemodel gecontroleerd. Uit de controle bleek dat de juiste data en business logica is toegepast. De tweede methode van 'white-box' validatie is het toepassen van visuele checks. In dit onderzoek is de logica en het gedrag van de simulatie getest door gebruik te maken van debuggen. De laatste methode van 'white-box' validatie is het inspecteren van specifieke resultaten van de output van het systeem. In dit onderzoek zijn de resultaten van de verschillende processen in de staalfabriek afzonderlijk geanalyseerd.

De laatste toegepaste methode voor de verificatie en validatie is 'black-box' validatie. Deze methode valideert het totale gedrag van het simulatiemodel. Figuur 4.2, waar I_R de input is voor het werkelijke systeem, I_S de input voor het simulatiemodel, O_R de uitkomst van het werkelijke systeem en O_S de uitkomst van het simulatiemodel. De methode vergelijkt de output van het werkelijke systeem en de output het simulatiemodel. Wij vergelijken de levertijd, de geproduceerde aantallen per dag en de werkuren per dag uit de werkelijkheid met de uitkomst van het simulatiemodel. De geproduceerde aantallen per dag in de werkelijk systeem zijn gemiddeld 257 spiraalbodems. In de output van het simulatie is het gemiddeld aantal geproduceerde spiraalbodems per dag 245. In werkelijkheid is de levertijd gemiddeld 10 werkdagen. In de simulatie is de levertijd gemiddeld 12 dagen. In de werkelijke

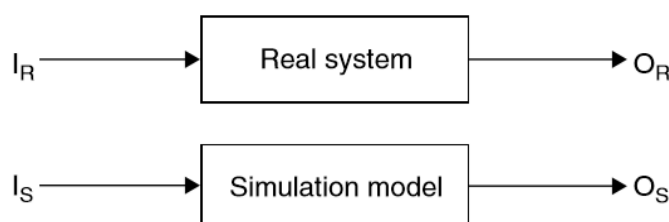


Figure 4.2: Black-box validation (Robinson, 2004)

situatie is er een werkdag van gemiddeld 8 uur. In de simulatie is de werktijd gemiddeld 6,5 uur zonder pauzes, opstarten van de productiedag en het afsluiten van een productiedag.

Op basis van de output van productieaantallen per dag, de levertijd en waarden van de KPI om de onbalans te meten in de output (zie paragraaf 5.1) is de warm-up periode, het aantal replicaties en de runlengte bepaald van het simulatie model. De hoogste waarde is gebruikt.

WARM-UP PERIODE

De warm-up periode is de tijd die een simulatie nodig heeft om in een realistische conditie te komen. Aan het begin van de simulatie is het model nog niet gevuld met klantorders. Dit is in werkelijkheid niet zo. Het model heeft een tijd nodig om in een realistische toestand te komen (Robinson, 2004). De vraag hierbij is dus hoeveel dagen aan het begin van de simulatie genegeerd moet worden bij het analyseren van de data. Aan de hand van de 'Marginal Standard Error Rule' (MSER) hebben we de warm-up periode bepaald. Het doel van de MSER is om het betrouwbaarheidsinterval van de simulatieoutput na de warm-up periode te minimaliseren (White, 1997). De MSER(d) als functie van de lengte d van de warm-up periode is als volgt:

$$MSER(d) = \frac{1}{(m-d)^2} \sum_{i=d+1}^m (Y_i - \bar{Y}(m,d))^2$$

Waarbij: d = dag
 m = totaal aantal dagen
 $\bar{Y}$ = gemiddelde waarde van outputdata vanaf dag d+1 tot en met dag m.
 Y_i = waarde van de outputdata op dag i

De lengte van de warm-up periode is de d waarbij de waarde van MSER(d) het laagst is. Bijlage F geeft een grafiek met de berekening van de minimale MSER(d) weer. De waarde van de MSER(d) is het laagst bij 23, 15 en 24 dagen. De hoogste 24, is de warm-up periode van de simulatie.

AANTAL REPLICATIES

Het doel van meerdere replicaties is een betrouwbaardere schatting van de output van de simulatie. De vraag is dus hoeveel replicaties nodig zijn voor een betrouwbare schatting van de output. Dit onderzoek gebruikt de betrouwbaarheidsinterval methode. Als betrouwbaarheidsdrempel nemen we net als bij de runlengte 5 %. Dit betekent dat in 95% van de simulaties het aantal replicaties voldoende is voor een betrouwbare schatting van de output. Het aantal benodigde replicaties wordt bepaald zodat de breedte van het betrouwbaarheidsinterval in verhouding met het gemiddelde (relatieve fout) onder de drempelwaarde is. De formule hiervoor is (Robinson, 2004):

$$\frac{t_{n-3, 1-\alpha/2} \sqrt{S^2/n}}{|\bar{X}|} < d$$

Waarbij: S = standaardafwijking van de output data van de replicaties
 n = aantal replicaties
 $\bar{X}$ = het gemiddelde van de outputdata voor de replicaties
 $d = 0.05$ (Betrouwbaarheidsdrempel)
 $t_{\{n-1, \alpha/2\}}$ = waarde van t-verdeling met n-1 vrijheidsgraden en een betrouwbaarheidsdrempel van $\alpha/2$

Het aantal vrijheidsgraden is n-3, aangezien er twee geschatte parameters zijn, namelijk het gemiddelde en de variantie. De grafiek in bijlage G geeft de breedte van het betrouwbaarheidsinterval

in verhouding met het gemiddelde weer. Uit de berekening met behulp van de formule voor het bepalen zijn het aantal replica's 4, 5 en 5. De hoogste waarde van het aantal replicaties voor de simulatie is 5.

RUNLENGTE

De runlengte is de tijd dat een simulatie minimaal moet lopen om een betrouwbaar resultaat te geven. Bij een niet terminerende simulatie gaat de output uiteindelijk naar een constante waarde convergeren. De vraag is dus hoeveel dagen de simulatie moet lopen voordat de convergentie betrouwbaar genoeg is. Een manier om dit te bepalen is de mate van convergentie (Robinson, 2004). In dit onderzoek zijn er 5 replicaties gebruikt voor het bepalen van de runlengte. De mate van convergentie wordt bepaald door de volgende formule:

$$C_i = \frac{\text{Max}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3}, \bar{Y}_{i4}, \bar{Y}_{i5}) - \text{Min}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3}, \bar{Y}_{i4}, \bar{Y}_{i5})}{\text{Min}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3}, \bar{Y}_{i4}, \bar{Y}_{i5})}$$

Waarbij: C_i = convergentie in dag i

$\bar{Y}_{ij}$ = cumulatief gemiddelde van de data in dag i voor replicatie j.

De runlengte is afhankelijk vanaf het moment dat de mate convergentie stabiel en acceptabel is. Wij hebben bij dit onderzoek gekozen voor een acceptatie grens van 5%. Dit houdt in dat in 95% van simulaties de runlengte voldoende is voor een betrouwbare output. Bijlage H bevat een grafiek die de convergentie weergeeft van vijf verschillende replica's. De convergentie is blijvend onder de 5% vanaf 92, 189, 149 dagen. De hoogste waarde van runlengte voor de simulatie is 189 dagen.

4.4 Conclusie hoofdstuk 4

Deze paragraaf geeft een samenvatting van hoofdstuk vier. Hoofdstuk vier bespreekt de eisen en randvoorwaarden. Vervolgens bevat hoofdstuk vier een beschrijving van het simulatiemodel.

Paragraaf 4.1 bevat de eisen en randvoorwaarden voor dit onderzoek met betrekking tot de productiecapaciteit. De lay-out van de staalfabriek kan alleen worden aangepast bij de lakkerij om te productiecapaciteit te verhogen. Er is een mogelijkheid om extra bufferbanen toe te voegen aan het railsysteem. Naast het toevoegen van extra bufferbanen is het mogelijk om in de poedercabine waar normaal gesproken alleen onderdelen met kleur gelakt worden, zwarte onderdelen en spiraalbodems te lakken. Paragraaf 4.2 licht de eisen en randvoorwaarden met betrekking tot de planning toe. De belangrijkste eis is dat alle producten op tijd geleverd worden. Het streven is om alle producten binnen twee weken na bestellen te leveren

Paragraaf 4.3 bespreekt het simulatiemodel. Het type simulatiemodel is een 'discrete event' simulatie. Als eerste zijn de simplificaties van het simulatiemodel besproken. Op welke punten het model afwijkt van de werkelijkheid. Daarnaast zijn de details van het simulatiemodel van de staalfabriek toegelicht. De volgende paragraaf beschreef de input data voor het simulatiemodel. Het aantal klantorders is stochastisch. Dit zorgt voor variatie in de productieaantallen van de spiraalbodems. Ten slotte besprak de laatste paragraaf de validatie en verificatie van het model. De warm-up periode van de simulatie is 24 dagen, de runlengte is 189 dagen en het aantal replicaties is 5.

5. Onderzoeksresultaten

Dit hoofdstuk bespreekt de onderzoeksresultaten van de verschillende experimenten die zijn uitgevoerd met de simulatiestudie. Het geeft antwoord op de vierde onderzoeksvraag:

Welke oplossingen zijn er voor de hoofdonderzoeksvraag met betrekking tot de problemen, eisen en randvoorwaarden?

Paragraaf 5.1 bespreekt de resultaten van de experimenten die zijn uitgevoerd met de simulatie in de huidige situatie. Het eerste gedeelte van de experimenten in paragraaf 5.1 bestaat uit het simulaties van de huidige situatie met verschillende prioriteitsregels. Voorts bestaan de experimenten in het tweede gedeelte uit een variabele processnelheid bij de opspanlijn. Paragraaf 5.2 bespreekt twee toekomstige scenario's. De eerste scenario is een groei in de productieaantallen van de onderdelen. Het tweede scenario is een groei van de klantorders voor spiraalbodems.

5.1 Experimentele resultaten

Deze paragraaf bespreekt de resultaten van de experimenten in de huidige situatie. In experimenten 1 tot en met 12 zijn de huidige procestijden bij Auping toegepast. In deze experimenten zijn de instellingen van de machines als in de huidige situatie bij Auping. Tabel 5.1 geeft de resultaten weer van de huidige situatie. De tabel geeft vier verschillende KPI's weer. De eerste twee KPI's geven de gemiddelde afwijking per dag in de verdeling van de output van de lakkerij weer. KPI III geeft de geproduceerde aantallen per dag weer. Dit zijn spiraalbodems en onderdelen. KPI IV geeft de levertijd weer in dagen. In experimenten 13 tot en met 22 is de procestijd van de opspanlijn variabel. De procestijd van de opspanlijn varieert tussen de 65 en 150 seconden.

In de ideale situatie bestaat de output van opvolgende zes ladingdragers uit twee onderdelen, twee vlakke spiraalbodems en twee verstelbare spiraalbodems. De eerste KPI geeft de afwijking weer in de gehele output, bestaande uit vlakke spiraalbodems, verstelbare spiraalbodems en onderdelen. In het geval dat elke zes ladingdragers bestaan uit twee onderdelen, twee vlakke en twee verstelbare spiraalbodems is de afwijking nul. Een maat om de afwijking te berekenen is de standaardafwijking. Het nadeel van de standaardafwijking om de afwijking te meten is het feit dat de standaardafwijking de afwijking meet ten opzichte van het gemiddelde. In de situatie van Auping is het gewenst om de afwijking te meten ten opzichte van de gewenste situatie in plaats van ten opzichte van het gemiddelde. In dit onderzoek is de keuze gemaakt om de afwijking op een andere manier te berekenen. Onderstaand is de formule weergegeven voor de berekening van de KPI.

$$\text{Afwijking Totaal} = \frac{\sum_{i=1}^n (|2 - \text{Aantal onderdelen}_{\{i\}}| + |2 - \text{Aantal vlakke}_{\{i\}}| + |2 - \text{Aantal verstelbare}_{\{i\}}|)}{n} * (1/8)$$

Waarbij: i = set i van 6 ladingdragers
 n = totaal aantal sets van 6 ladingdragers

De berekening van de KPI gaat per zes ladingdragers. Dit aantal van zes ladingdragers is bepaald in overeenstemming met de productiemanager. Per zes ladingdragers bij het afhaalproces in de lakkerij wordt bepaald hoeveel ladingdragers onderdelen bevatten en hoeveel ladingdragers een vlakke of verstelbare spiraalbodems bevat. Vervolgens wordt er gekeken naar de afwijking ten opzichte van het gewenste aantal 2 voor elk van de producten. De maximale waarde voor de afwijking is 8 en de minimale waarde is 0. Ten slotte wordt de waarde vermenigvuldigd met 1/8 om de KPI te normaliseren op een interval tussen 0 en 1. Figuur 5.1 laat twee mogelijk situaties zien van de output van zes ladingdragers. In het eerste geval is de afwijking 0. Van elk product bevat de output precies 2. In het tweede geval is de afwijking 0,5. Er zijn vier onderdelen, één verstelbare en één vlakke. De totale

afwijking in de output per dag is de som van alle afwijkingen per zes ladingdragers gedeeld door alle werkdagen van de runlengte.



Figure 5.1: Output voorbeeld

De tweede KPI geeft de afwijking weer van in de output van de spiraalbodems. Idealiter bestaat de output van vier ladingdragers met spiraalbodems uit twee vlakke en twee verstelbare spiraalbodems. De KPI geeft afwijking van de spiraalbodems weer. In het geval dat de output van elke vier ladingdragers met spiraalbodems bestaat uit twee vlakke en twee verstelbare spiraalbodems is de afwijking nul. De derde KPI geeft het gemiddelde aantal output aan ladingdragers per dag aan, bestaande uit onderdelen en spiraalbodems. KPI IV geeft de gemiddelde levertijd van een spiraalbodem weer. De levertijd is de tijd vanaf het bestelmoment tot aan de dag dat de spiraalbodem geleverd kan worden.

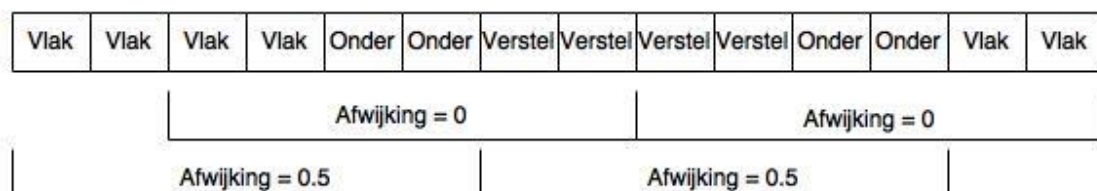
De tweede KPI geeft de afwijking tussen de vlakke en verstelbare spiraalbodems weer. Onderstaand is de formule weergegeven voor de berekening van de KPI.

$$\text{Afwijking Spiraal} = \frac{\sum_{i=1}^n (|2 - \text{Aantal vlakke}_{\{i\}}| + |2 - \text{Aantal verstelbare}_{\{i\}}|)}{n} * (1/4)$$

Waarbij: i = set i van 4 ladingdragers
 n = totaal aantal sets van 4 ladingdragers

De berekening van de KPI gaat per vier ladingdragers. Per vier ladingdragers bij het afhaalproces in de lakkerij wordt bepaald hoeveel van de ladingdragers vlakke spiraalbodems en hoeveel van de ladingdragers verstelbare spiraalbodems bevatten.

Een beperking van de KPI's is het feit dat er altijd vanaf de eerste ladingdrager wordt gekeken. Het is mogelijk dat er een bepaalde volgorde in de output zit waaruit blijkt dat de totale afwijking gerekend vanaf de eerste lading een grote afwijking heeft, terwijl bij het kijken vanaf de derde ladingdrager de afwijking nul is. Dit probleem bij het bepalen van de afwijking is echter beperkt door de onzekerheid in het gehele productieproces. Theoretisch is deze situatie mogelijk, echter zal het praktisch zelden voorkomen. De kans dat een hele productiedag deze verdeling in de output laat zien is zeer klein.



Figuur 5.2: Output voorbeeld

Voor alle experimenten geldt dat de productievolgorde en de prioriteitsregel bij de laslijnen hetzelfde is. De productievolgorde is gebaseerd op het Heijunka principe. De definitie van Heijunka is: ‘het gelijkmatig verdelen van het productievolume en de mix van diverse producten over een bepaalde tijd’ (Dennis, 2007). De te produceren spiraalbodems worden op basis van breedte geselecteerd. Er wordt geproduceerd van smal naar breed. Binnen de breedtemaat worden de spiraalbodems gebalanceerd op zowel aantal motoren bij de verstelbare spiraalbodems als op de verdeling K5 en boxspring spiraalbodems. Door het balanceren van de verschillende spiraalbodems worden de pieken en dalen van de procestijden bij de laslijnen opgevangen.

Tabel 5.1: Huidige situatie per dag

KPI I	KPI II	KPI III	KPI IV
Afwijking Totaal	Afwijking Spiraalbodems	Aantallen	Levertijd (dagen)
0.545	0.489	380	11

Tabel 5.2 geeft een overzicht van de uitgevoerde experimenten in de huidige situatie. De experimenten bestaan uit de prioriteitsregels bij het ophangproces van de ladingdragers en bij het einde van moffeloven/afhaalproces in de lakkerij. Het ophangproces kent drie prioriteitregels, dit zijn het first-in-first-out (FIFO) principe, een spiraalbodem heeft de hoogste prioriteit of de kleur zwart heeft de hoogste prioriteit. Voor het FIFO-principe geldt er een ratio voor het ophangproces. Dit betekent dat 2 van de 3 ladingdragers een spiraalbodem moet zijn, tenzij een spiraalbodem niet op tijd bij de lakkerij is. Voor de andere twee prioriteitsregels geldt dat de hoogste prioriteit altijd voorgaat, tenzij het product met de hoogste prioriteit niet op tijd bij de lakkerij is. Bijvoorbeeld bij de regel dat een spiraalbodem de hoogste prioriteit heeft, dan wordt er altijd een spiraalbodem opgehangen, behalve als er geen spiraalbodem meer is, dan wordt er een onderdeel opgehangen. De tabel laat alleen de relevante experimenten zien. In totaal zijn er 50 experimenten uitgevoerd. De weergegeven 12 experimenten geven de beste resultaten, om die reden zijn de overige experimenten niet weergegeven.

Tabel 5.2: Experimenten 1-12

Ophangproces			Afhaalproces			
Experiment	Prioriteit	Ratio Spiraal	Afkorting	Bufferbanen	Ratio Spiraal	Afkorting
1	Spiraal	-	Lak.Sp	2	2 v/d 3	Buf(1)
2	Spiraal	-	Lak.Sp	2	2 v/d 3	Buf(2)
3	Spiraal	-	Lak.Sp	3	4 v/d 6	Buf(3)
4	FiFo	2 v/d 3	Lak.Fi.R(2/3)	2	2 v/d 3	Buf(1)
5	FiFo	2 v/d 3	Lak.Fi.R(2/3)	2	2 v/d 3	Buf(2)
6	FiFo	2 v/d 3	Lak.Fi.R(2/3)	3	4 v/d 6	Buf(3)
7	FiFo	3 v/d 4	Lak.Fi.R(3/4)	2	2 v/d 3	Buf(1)
8	FiFo	3 v/d 4	Lak.Fi.R(3/4)	2	2 v/d 3	Buf(2)
9	FiFo	3 v/d 4	Lak.Fi.R(3/4)	3	4 v/d 6	Buf(3)
10	Kleur	3 v/d 4	Lak.Ke.R(3/4)	2	2 v/d 3	Buf(1)
11	Kleur	3 v/d 4	Lak.Ke.R(3/4)	2	2 v/d 3	Buf(2)
12	Kleur	3 v/d 4	Lak.Ke.R(3/4)	3	4 v/d 6	Buf(3)

Hieronder worden de experimenten toegelicht:

- Experimenten 1, 2 en 3 hebben als prioriteitsregel bij het ophangproces van de lakkerij, dat een spiraalbodem altijd de hoogste prioriteit heeft. Deze prioriteitsregel wordt verder in het onderzoek afgekort als Lak.Sp. De bufferbanen aan het eind van de moffeloven worden verschillend gebruikt in de experimenten. Experiment 1 gebruikt de bufferbanen als in de huidige situatie. Eén bufferbaan is voor K5 spiraalbodems, de andere bufferbaan is voor de boxspring spiraalbodems en de onderdelen. Bij het eind van de bufferbanen geldt de volgende prioriteitsregel: per drie ladingdragers zijn er twee van de K5 bufferbaan en een van de andere bufferbaan. Dit wordt verder in dit onderzoek afgekort als Buf(1). Experiment 2 gebruikt een andere indeling voor de bufferbanen. Eén baan is voor spiraalbodems, de andere bufferbaan is voor onderdelen. Bij het eind van de bufferbanen geldt de volgende prioriteitsregel: per drie ladingdragers zijn er twee van de eerste bufferbaan met spiraalbodems en een van de andere bufferbaan. Dit wordt verder in het onderzoek afgekort als de Buf(2). In experiment 3 is een bufferbaan toegevoegd aan het eind van de moffeloven. De eerste bufferbaan is vlakke spiraalbodems, de tweede bufferbaan is voor de verstelbare spiraalbodems en de laatste bufferbaan is voor onderdelen. Bij het eind van de bufferbanen geldt de volgende prioriteitsregel per zes ladingdragers zijn er twee vlakke spiraalbodems, twee verstelbare spiraalbodems en twee onderdelen. Dit wordt verder in het onderzoek afgekort als Buf(3).
- Experimenten 4 tot en met 9 hebben als prioriteitsregel bij het ophangproces van de lakkerij, dat een gedeelte van de ladingdragers een spiraalbodem bevat. Dit aantal wordt bepaald door een ratio. Dit wordt verder in het onderzoek afgekort al Lak.Fi.R(*ratio*). De bufferbanen aan het eind van de moffeloven worden verschillende gebruikt in de experimenten. Experimenten 4 en 7 gebruikt de bufferbanen als in de huidige situatie. Experimenten 5 en 8 gebruiken de nieuwe indeling van de bufferbanen. Experimenten 6 en 9 maken gebruik van het toevoegen van een bufferbaan.
- In experimenten 10 tot en met 12 wordt er onderscheid gemaakt op basis van de kleur van een spiraalbodem of onderdeel. De prioriteitsregel bij het ophangproces van de lakkerij wordt bepaald op basis van kleuren. In dit experiment geldt dat dat drie van de vier ladingdragers de kleur zwart is, waarbij een zwarte spiraalbodem altijd voor een zwart onderdeel gaat. Dit wordt verder in dit onderzoek afgekort als Lak.Fi.R(2/3). De bufferbanen aan het eind van de moffeloven worden verschillende gebruikt in de experimenten. Experiment 10 gebruikt de bufferbanen als in de huidige situatie. Experiment 11 gebruikt de nieuwe indeling van de bufferbanen anders. In experiment 12 is een bufferbaan toegevoegd aan het eind van de moffeloven.

Tabel 5.3 geeft de resultaten weer van de verschillende experimenten. De geproduceerde aantallen zijn nagenoeg gelijk aan de huidige situatie. Hetzelfde geldt voor de levertijd. De kleine verschillen worden veroorzaakt door het einde van een productiedag. In de huidige situatie blijven aan het einde van een productiedag ladingdragers in de bufferbanen van de lakkerij. Dit zorgt voor een extra dag levertijd. In de experimenten blijven er minder ladingdragers in de bufferbaan.

De resultaten van beide KPI's voor de afwijking van de gewenste situatie is het laagst bij experiment 5. Op basis van de huidige productieaantallen met bijbehorende variabelen is de totale output het beste gebalanceerd bij de prioriteitsregels van experiment 4 tot en met experiment . De mix in de output van de spiraalbodems is het beste gebalanceerd bij de prioriteitsregels van experimenten 2, 5, 8 en 11. De verschillen in de afwijkingen van de spiraalbodems is echter klein. Dit heeft te maken met de gebalanceerde aanvoer vanuit de laslijnen.

Tabel 5.3: Resultaten experimenten 1-12

Experiment	Prioriteitsregel Ophangproces	Prioriteitsregel Afhaalproces	Afwijking Totaal	Afwijking Spiraal
1	Lak.Sp	Buf(1)	0.468	0.358
2	Lak.Sp	Buf(2)	0.466	0.351
3	Lak.Sp	Buf(3)	0.472	0.363
4	Lak.Fi.R(2/3)	Buf(1)	0.433	0.358
5	Lak.Fi.R(2/3)	Buf(2)	0.431	0.351
6	Lak.Fi.R(2/3)	Buf(3)	0.443	0.366
7	Lak.Fi.R(3/4)	Buf(1)	0.433	0.358
8	Lak.Fi.R(3/4)	Buf(2)	0.431	0.351
9	Lak.Fi.R(3/4)	Buf(3)	0.443	0.366
10	Lak.Ke.R(3/4)	Buf(1)	0.468	0.358
11	Lak.Ke.R(3/4)	Buf(2)	0.466	0.351
12	Lak.Ke.R(3/4)	Buf(3)	0.472	0.363

Uit de resultaten van de experimenten met de huidige productieaantallen met alle bijbehorende verdelingen van de variabelen blijkt het toevoegen van een bufferbaan geen positief effect te hebben met betrekking tot het balanceren van de output van de lakkerij. De waardes van de KPI voor het meten van de afwijking in de totale output en de KPI voor het meten van de afwijking in de spiraalbodems output, zijn beide niet beter ten opzichte van andere experimenten waarbij er geen bufferbaan is toegevoegd. De beste resultaten worden bereikt door de experimenten 5 en 8. De beste prioriteitsregel bij het ophangproces is de Lak.Fi.R(*ratio*), waarbij de ratio 2 van de 3 of 3 van de 4 kan zijn. De bufferbanen bij het afhaalproces hebben een andere indeling in experimenten 5 en 8. De Lak.Fi.R(*ratio*) in combinatie met de nieuwe indeling van de bufferbanen leidt tot de beste balans in de output.

In experimenten 13 tot en met 22 is de procestijd van de opspanlijn variabel. De procestijd van de opspanlijn varieert tussen de 65 en 150 seconden, afhankelijk van het aantal operators aanwezig bij de opspanlijn. Bij de experimenten is dezelfde inputdata gebruikt als bij de huidige situatie. In de experimenten geldt bij het ophangproces de volgende prioriteitsregel: Lak.Fi.R(2/3). De ratio voor de spiraalbodems is 2 van de 3 bij het ophangproces. De indeling van de bufferbanen verschillen tussen de even en oneven experimenten. Bij de even experimenten wordt de nieuwe indeling gebruikt. Bij de oneven experimenten is een bufferbaan toegevoegd.

Tabel 5.5: Resultaten experimenten 13-22

Experiment	Prioriteitsregel Afhaalproces	Procestijd Opspanlijn (sec)	Afwijking Totaal	Afwijking Spiraal	Aantallen	Levertijd (dagen)
13	Buf(2)	150	0.657	0.241	266	14
14	Buf(3)	150	0.668	0.259	266	14
15	Buf(2)	125	0.644	0.213	254	12
16	Buf(3)	125	0.652	0.225	253	12
17	Buf(2)	100	0.431	0.351	388	10
18	Buf(3)	100	0.443	0.366	388	10
19	Buf(2)	85	0.412	0.362	406	9
20	Buf(3)	85	0.415	0.366	407	10
21	Buf(2)	65	0.458	0.365	406	8
22	Buf(3)	65	0.461	0.373	408	8

Tabel 5.5 geeft de resultaten weer van experimenten 13 tot en met 22. De totale output is het best gebalanceerd bij een procestijd van 125 seconden voor de opspanlijn. Echter leidt een procestijd van 125 seconden tot een langere levertijd. De afwijking in de gewenste output van de spiralen is lager bij een hogere procestijd voor de opspanlijn. Het verschil in totaal aantal te geproduceerde spiraalbodems en onderdelen is 142 stuks tussen de minimale en maximale procestijd van de opspanlijn. Verder blijkt uit deze experimenten dat het toevoegen van een extra bufferbaan niet leidt tot betere prestaties voor elke procestijd van de opspanlijn.

5.2 Toekomstige situaties

Deze paragraaf bespreekt de resultaten van mogelijke scenario's. Het eerste scenario is de verandering in de productieaantallen van de onderdelen. Het aantal te produceren onderdelen is gelijk aan de productieaantallen van de spiraalbodems. Het tweede scenario is het variëren van de procestijd van de opspanlijn. Het derde scenario is een stijging in de klantvraag naar spiraalbodems.

Het eerste scenario is de verandering van het aantal onderdelen dat per dag geproduceerd moet worden. In de experimenten 23 tot en met 28 is het aantal onderdelen per dag gelijk aan het productieorders van de spiraalbodems. Bij experimenten 23 tot en met 25 geldt de prioriteitsregel: Lak.Fi.R(1/2). De ratio voor de spiraalbodems is 1 van de 2 bij het ophangproces. Bij experimenten 26 tot en met 28 geldt de prioriteitsregel: Lak.Fi.R(2/3). Het ratio voor de spiraalbodems is 2 van de 3 bij het ophangproces. De prioriteitsregel van het afhaalproces verschilt per experiment. Bij experimenten 23 en 26 zijn de bufferbaan gebruikt als in de huidige situatie. Bij experimenten 24 en 27 is de nieuwe indeling gebruikt van de bufferbanen. In experimenten 25 en 28 is een bufferbaan toegevoegd aan het eind van de moffeloven. Tabel 5.4 geeft de resultaten weer van de experimenten van het eerste scenario weer. De procestijd van de opspanlijn is 100 seconden.

Tabel 5.4: Resultaten experimenten 23-28

Experiment	Prioriteitsregel Afhaalproces	Prioriteitsregel Afhaalproces	Afwijking Totaal	Afwijking Spiraal	Aantallen	Levertijd (dagen)
23	Lak.Fi.R(1/2)	Buf(1)	0.412	0.291	506	11
24	Lak.Fi.R(1/2)	Buf(2)	0.412	0.291	506	11
25	Lak.Fi.R(1/2)	Buf(3)	0.478	0.341	455	18
26	Lak.Fi.R(2/3)	Buf(1)	0.412	0.291	506	11
27	Lak.Fi.R(2/3)	Buf(2)	0.412	0.291	506	11
28	Lak.Fi.R(2/3)	Buf(3)	0.478	0.341	455	18

Uit de resultaten van tabel 5.4 blijkt dat de waarde van de balans in de totale output en de levertijd bij experimenten 25 en 28 het hoogst is. Dit wordt veroorzaakt door de indeling van de bufferbanen. In deze experimenten is er een bufferbaan toegevoegd. Het toevoegen van een bufferbaan leidt niet tot een betere balans in de output bij een toename van onderdelen. De beste resultaten worden bereikt door de overige experimenten. De nieuwe indeling van de bufferbanen leidt in deze situatie niet tot betere resultaten. De ratio bij het ophangproces kan 1/2 of 2/3 zijn. Deze ratio's geven de zelfde resultaten.

Het laatste scenario is een stijging in de klantvraag naar spiraalbodems. Voor dit scenario is in overleg met de productiemanager uitgegaan van een stijging van 50%. Bij de experimenten van dit scenario is dezelfde input gebruikt als bij de eerste experimenten, alleen varieert de procestijd van de opspanlijn en is de vraag naar spiralen toegenomen tot 150%. Voor de experimenten geldt bij het ophangproces de Lak.Fi.R(2/3) prioriteitsregel. De prioriteitsregels bij het afhaalproces verschillen tussen de even en

oneven experimenten. Bij de even experimenten is de nieuwe indeling van de bufferbanen gebruikt. Bij de oneven experimenten is een bufferbaan toegevoegd aan het eind van de moffeloven.

Table 5.6: Resultaten experimenten 29-34

Experiment	Prioriteitsregel Afhaalproces	Procestijd Opspanlijn (sec)	Afwijking Totaal	Afwijking Spiraal	Aantallen	Levertijd (dagen)
29	Buf(2)	100	0.625	0.266	282	13
30	Buf(3)	100	0.573	0.352	335	13
31	Buf(2)	85	0.399	0.399	481	11
32	Buf(3)	85	0.438	0.438	468	11
33	Buf(2)	65	0.367	0.418	531	9
34	Buf(3)	65	0.417	0.464	507	9

Tabel 5.6 geeft de resultaten van de experimenten van het tweede scenario weer. De output is het best gebalanceerd bij een procestijd van 85 seconden voor de opspanlijn. Het verschil in totaalaantal te produceren spiraalbodems en onderdelen is 275 stuks tussen de minimale en maximale procestijd van de opspanlijn.

5.3 Conclusie hoofdstuk 5

Deze paragraaf geeft een samenvatting van dit hoofdstuk. Dat bespreekt de resultaten van dit onderzoek.

Paragraaf 5.1 bevat de resultaten van de huidige situatie. In de huidige situatie zijn eerst twaalf experimenten uitgevoerd, waarin de prioriteitsregels zijn getest. Uit de resultaten van deze twaalf experimenten blijkt dat het toevoegen van bufferbaan aan het eind van de lakkerij niet leidt tot een betere balans in de output. De beste resultaten voor het verbeteren van de balans in de output is het aanpassen van de twee huidige bufferbanen. Eén bufferbaan is dan voor alle onderdelen en één bufferbaan is voor alle spiraalbodems. Het aanpassen van de bufferbaan in combinatie met het toepassen van een ratio voor de spiraalbodems 2 van de 3 of 3 van de 4 bij het ophangproces leidt tot een afname van 19% in de afwijking van de totale output. De afname in de afwijking van alleen de spiraalbodems is 27%. Vervolgens is in de huidige situatie is de procestijd van de opspanlijn variabel gemaakt. De procestijd van de opspanlijn varieert tussen de 65 en 150 seconden. Uit de resultaten blijkt dat de afwijking in de gewenste output van de spiralen is lager bij een hogere procestijd voor de opspanlijn. Echter leidt dit tot een aanzienlijk langere levertijd en lagere productieaantallen per dag.

Paragraaf 5.2 bevat de resultaten van verschillende scenario's. Het eerste scenario is de verandering van het aantal onderdelen dat gelakt moet worden. De productieaantallen op een dag van de spiraalbodems en de onderdelen zijn gelijk. Het tweede scenario is een stijging in de klantvraag naar spiraalbodems. Op basis van de uitgevoerde experimenten heeft het toevoegen van een bufferbaan aan het eind van de lakkerij geen positief effect op de balans van de output in elk van de scenario's. Voor elk scenario geldt dat het aanpassen van de huidige bufferbanen leidt tot een betere balans in de output. Voor het tweede scenario geldt dat het aanpassen van de huidige bufferbanen en het verhogen van de procestijd van de opspanlijn leidt tot een lage afwijking in output van de spiraalbodems. Het verhogen van de procestijd van de opspanlijn leidt echter wel tot aanzienlijk lagere productieaantallen per dag.

6. Conclusies, beperkingen en aanbeveling

Dit hoofdstuk geeft antwoord op de hoofdvraag van dit onderzoek. Paragraaf 6.1 geeft de conclusie van dit onderzoek. Paragraaf 6.2 bespreekt de beperkingen van dit onderzoek. Paragraaf 6.3 bevat de aanbevelingen voor Auping. Ten slotte geeft paragraaf 6.4 suggesties voor verder onderzoek.

6.1 Conclusies

Deze paragraaf bevat de conclusie van dit onderzoek. De hoofdvraag van dit onderzoek is:

‘Hoe kan de productielijn van de staalfabriek bij Auping gebalanceerd worden met betrekking tot de productieaantallen?’

Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn vier deelvragen opgesteld. Paragraaf 6.1.1 geeft per deelvraag een korte samenvatting. Paragraaf 6.1.2 beantwoordt de hoofdvraag.

6.1.1 Antwoorden op de deelvragen

De eerste deelvraag is: *Welke kennis is er vanuit de literatuur aan te dragen voor de situatie bij Auping?*

Hoofdstuk 2 bevat het literatuuronderzoek. Aan bod zijn gekomen: productiewijzen, Lean manufacturing, productieplanning, simulatiemodellen en Kritische prestatie-indicatoren.

De tweede deelvraag is: *Hoe ziet de huidige situatie van de staalfabriek bij Auping eruit?*

Hoofdstuk 3 bespreekt de huidige situatie aan de hand van de huidige producten, de productiewijze en het productieproces. De productiewijze van Auping is ‘Make-to-Order’. Een product wordt pas geproduceerd als er een klantorder is. Het productieproces bestaat uit drie verschillende fases, namelijk de laslijnen, de lakkerij en de montage (Zie figuur 3.5). De route van het productieproces is bijna identiek voor elke spiraalbodem. Het verschil wordt veroorzaakt bij de laslijnen. Er zijn twee laslijnen, één lijn voor de vlakke spiraalbodems en één lijn voor de verstelbare spiraalbodems. De volgende stap in het productieproces is de lakkerij. In de lakkerij worden niet alleen de spiraalbodems, maar ook alle stalen onderdelen gelakt. Het laatste gedeelte van de staalfabriek is de montage. In het montageproces worden de laatste montagewerkzaamheden uitgevoerd. Uiteindelijk wordt de spiraalbodem verpakt in het montageproces. Het montageproces is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

De derde deelvraag is: *Wat zijn de eisen en randvoorwaarden voor het balanceren van het productieproces van de staalfabriek bij Auping?*

Hoofdstuk 4 bevat de eisen en randvoorwaarden voor dit onderzoek met betrekking tot de productiecapaciteit en planning. De lay-out van de staalfabriek kan alleen worden aangepast bij de lakkerij om te productiecapaciteit te verhogen. Er is een mogelijkheid om extra bufferbanen toe te voegen aan het railsysteem. Naast het toevoegen van extra bufferbanen is het mogelijk om in de poedercabine waar normaal gesproken alleen onderdelen met kleur gelakt worden, zwarte onderdelen en spiraalbodems te lakken. De belangrijkste eis van de planning is dat alle producten op tijd geleverd worden. Het streven is om alle producten binnen twee weken na bestellen te leveren

De vierde deelvraag is: *Welke oplossingen zijn er voor de hoofdonderzoeksvraag met betrekking tot de problemen, eisen en randvoorwaarden?*

Hoofdstuk 5 bevat de resultaten van dit onderzoek. In de huidige situatie zijn twaalf experimenten uitgevoerd. De resultaten van deze twaalf experimenten laten zien dat het toevoegen van een bufferbaan aan het eind van de lakkerij niet leidt tot een betere balans in de output. De beste resultaten voor het verbeteren van de balans in de output is het aanpassen van de twee huidige bufferbanen. Eén bufferbaan is dan voor alle onderdelen en één bufferbaan is voor alle spiraalbodems. Naast de huidige situatie zijn er experimenten uitgevoerd voor verschillende scenario's. Het eerste scenario is de verandering van het aantal onderdelen. Het aantal onderdelen is gelijk aan de productieaantallen van de spiraalbodems. Het tweede scenario is het variëren van de procestijd van de opspanlijn. Het derde scenario is een stijging in de klantvraag naar spiraalbodems. Op basis van de uitgevoerde experimenten heeft het toevoegen van een bufferbaan aan het eind van de lakkerij geen effect op de output in elk van de toekomstige scenario's. Voor elk scenario geldt dat het aanpassen van de huidige bufferbanen leidt tot een betere balans in de output. Het aanpassen van de huidige bufferbanen en het verhogen van de procestijd van de opspanlijn leidt tot een lage afwijking in output van de spiraalbodems. Het verlagen van de procestijd van de opspanlijn leidt echter wel tot lagere productieaantallen per dag.

6.1.2 Antwoord op de hoofdvraag

De hoofdvraag is: *Hoe kan de productielijn van de staalfabriek bij Auping gebalanceerd worden met betrekking tot de productieaantallen?*

Uit de resultaten van de experimenten blijkt dat de onbalans in de output van spiraalbodem en onderdelen afneemt met 19%. De afwijking in de output van spiraalbodems neemt af met 27%. De balans in de output van de lakkerij is verbeterd. Deze resultaten zijn bereikt door het aanpassen van de productievolgorde bij de laslijnen en de prioriteitsregels bij de lakkerij. Het Heijunka principe is toegepast bij de laslijnen. De spiraalbodems worden gesorteerd op basis van breedte. Er wordt geproduceerd van smal naar breed. Binnen de breedtemaat worden de spiraalbodems gebalanceerd op zowel aantal motoren bij de verstelbare spiraalbodems als op de verdeling K5 en boxspring spiraalbodems. Door het balanceren van de verschillende spiraalbodems worden de pieken en dalen van de procestijden bij de laslijnen opgevangen. Naast het toepassen van het Heijunka principe bij de laslijnen zijn de prioriteitsregels bij de lakkerij veranderd om de balans in de output te verbeteren. Uit de resultaten blijkt dat bij het ophangproces aan het begin van de lakkerij een ratio van 2 van de 3 het beste resultaat geeft. Van de drie ladingdragers zijn er twee voor spiraalbodems en één voor onderdelen. De prioriteitsregel bij het afhaalproces aan het eind van de lakkerij geeft het beste resultaat bij een ratio van 2 van de 3 voor de spiraalbodems in combinatie met het aanpassen van de indeling van de bufferbanen. In de huidige situatie is één bufferbaan voor K5 spiraalbodems en de andere bufferbaan voor boxspring spiraalbodems en onderdelen. De afwijking in de totale output als in de afwijking van de spiraalbodems is het laagst bij een andere indeling van de bufferbanen. In de nieuwe indeling is één bufferbaan voor alle spiraalbodems en de andere bufferbaan voor onderdelen.

Naast een nieuwe indeling van de bufferbanen is het toevoegen van een derde bufferbaan aan het eind van de lakkerij getest. Om de derde bufferbaan te testen zijn er drie verschillende scenario's gesimuleerd. Het eerste scenario is de verandering van het aantal onderdelen. Het aantal onderdelen is gelijk zijn aan het aantal productieaantallen van de spiraalbodems. Het tweede scenario is het variëren van de procestijd van de opspanlijn. Het derde scenario is een stijging in de klantvraag naar spiraalbodems. Op basis van de uitgevoerde experimenten heeft het toevoegen van een bufferbaan aan het eind van de lakkerij geen effect op de output in elk van de scenario's. Voor elk scenario geldt

dat het aanpassen van de huidige bufferbanen leidt tot een betere balans in de output. Het aanpassen van de huidige bufferbanen en het verhogen van de procestijd van de opspanlijn leidt tot een lage afwijking in output van de spiraalbodems. Het verlagen van de procestijd van de opspanlijn leidt echter wel tot aanzienlijk lagere productieaantallen per dag.

De balans in het productieproces van de staalfabriek van Auping is te verbeteren op basis van de bovengenoemde resultaten uit het simulatiemodel.

6.2 Beperkingen

Deze paragraaf bevat de discussie over de beperkingen van dit onderzoek. Eerst bespreekt deze paragraaf de beperkingen van het simulatiemodel. Voorts geeft deze paragraaf de beperkingen van de gebruikte data. Ten slotte bespreekt deze paragraaf de beperkingen van de gebruikte KPI's.

De eerste beperking van de aannames is de aankomst van een klantorder. Alle klantorders komen niet tegelijk aan. Het effect van de aankomst is te verwaarlozen. Het productiemoment van een klantorder wordt pas om 23:55 berekend door het systeem. De tweede beperking van de aannames is de uitval van machines. In werkelijkheid valt een machine uit, door onderhoud, reparaties of andere onverwachte gebeurtenissen. De derde beperking is de voorraad van materialen. In het simulatiemodel is er altijd voldoende materiaal om te produceren. Er wordt geen rekening gehouden met een mogelijke productiestop voor producten als de materialen op zijn.

Er zijn beperkingen met de gebruikte data voor het onderzoek. De eerste beperking is de data voor een afleverdag van een klantorder. De correlatie tussen de dag van bestellen en de afleverdag is niet onderzocht. De invloed van meerdere afleverdagen voor een gebied gedurende een week is buiten beschouwing gelaten in dit onderzoek. Echter is de invloed van meerdere afleverdagen te verwaarlozen. Slechts een paar gebieden worden meerdere keren per week geleverd, zo is de invloed van meerdere afleverdagen te verwaarlozen. Een andere beperking met de gebruikte data is de procestijd van de poedercabines in de lakkerij. In het simulatiemodel is de procestijd van de poedercabines deterministisch. Dit is in de werkelijkheid niet zo. De procestijd voor de poedercabine varieert per onderdeel. De oorzaak van deze variatie is de vakkundigheid van een medewerker en de complexiteit van het poederen van een onderdeel. Echter was er geen data beschikbaar over variatie van de procestijd van de poedercabine binnen Auping.

Een beperking van toepaste KPI's is dat alleen de totale output en de balans in de output is gemeten. In dit onderzoek is het aantal te laat geleverde klantorders niet gemeten. De enige indicatie is de gemiddelde levertijd.

6.3 Aanbeveling

Deze paragraaf bevat aanbevelingen voor Auping. Dit onderzoek laat zien dat de balans in de output verbeterd kan worden in de huidige en toekomstige situaties voor Auping. De output is het best gebalanceerd bij een combinatie van beslissingen in het productieproces.

De eerste beslissing is het bepalen van de productievolgorde bij de lakkerij. De input van de lakkerij bestaat uit de spiraalbodems, die worden aangeleverd vanuit de laslijnen, en losse onderdelen. Om de output te balanceren blijkt uit de resultaten dat de productievolgorde aan het begin van de lakkerij met ratio van 2 van de 3 het beste resultaat geeft. De ratio 2 van de 3 houdt in dat van de drie ladingdragers in de lakkerij zijn er twee voor spiraalbodems en één voor onderdelen.

De tweede beslissing is de volgorde van het afhaalproces aan het eind van de lakkerij. Het afhaalproces is afhankelijk van de twee bufferbanen tussen de moffeloven en het afhaalproces. De focus bij de

laatste beslissing ligt bij de indeling van de bufferbanen. Dit onderzoek bekijkt drie alternatieven, namelijk de huidige indeling, een nieuwe indeling en het toevoegen van een bufferbaan. Uit de resultaten blijkt dat het toevoegen van een bufferbaan niet leidt tot een betere balans in de output. Dit geldt zowel voor de huidige situatie als toekomstige situaties. Het toevoegen van een bufferbaan heeft dan niet de voorkeur. In de huidige situatie is één bufferbaan voor K5 spiraalbodems en de andere bufferbaan voor boxspring spiraalbodems en onderdelen. De balans in de output is het beste bij een andere indeling van de bufferbanen. In de nieuwe indeling is één bufferbaan voor alle spiraalbodems en de andere bufferbaan voor onderdelen. De nieuwe indeling leidt tot een betere balans.

Binnen Auping wordt er veel te weinig data verzameld over het productieproces. Er is te weinig bekend over uitval, onderhoud en procestijden van verschillende machines en producten. Een oplossing hiervoor is het implementeren van een manufacturing execution system (MES) systeem. De beloften van een MES systeem zijn zorgen voor een betere planning en een nauwkeurig schatting, biedt ondersteuning voor procesverbeteringen, lagere productiekosten, een betere naleving van regels en het verminderen van handmatig invoeren van gegevens. Een MES systeem verzamelt gegevens en voert analyses uit over een productieproces. Dit zijn (Naedele, 2015):

- Opslag en analyse van historische gegevens uit het verleden over het proces.
- Real-time informatie over het productieproces.
- Het analyseren van toekomstige planningen en productieruns om vroegtijdige waarschuwingen af te geven bij afwijkingen.

In de huidige situatie is het montageproces afhankelijk van de output van de lakkerij. Is de balans in de output niet goed, dan ontstaan er verstoringen in het montageproces. Door het montageproces zo in te richten, dat de balans in aanvoer niet meer van belang is, kan de focus in de rest van het productieproces verschuiven naar een maximale productiecapaciteit. Dit kan bereikt worden door het montageproces op te delen in kleinere handelingen. De maximale productiecapaciteit kan bereikt worden door het railsysteem in de lakkerij te versnellen. De tijd tussen de ladingdragers neemt dan af naar 44 seconden. In combinatie met het versnellen van het railsysteem, kan de poedercabine van de kleuren zwart poederen. Door deze aanpassingen neemt de capaciteit van de lakkerij toe.

Samenvattend beveelt dit onderzoek Auping het volgende aan:

- Het niet toevoegen van een extra bufferbaan. Het toevoegen van een extra bufferbaan leidt niet tot betere resultaten.
- Het bijhouden van data over het productiesysteem doormiddel van een 'manufacturing execution system' (MES).
- Het montageproces aanpassen om onafhankelijk te zijn van de balans in output van de lakkerij. Door onafhankelijk te worden van de balans kan de focus gelegd worden op maximale productiecapaciteit.

6.4 Verder onderzoek

Dit onderzoek heeft een simulatie uitgevoerd met als doel de output van de staalfabriek bij Auping in balans te brengen. Het productieproces is gemodelleerd in een computermodel, waarmee de prestaties van het productieproces zijn geanalyseerd. Echter, zijn er een aantal onderdelen die nog verder onderzocht kunnen worden om ervoor te zorgen dat het productieproces optimaler verloopt. Een aantal suggesties voor verder onderzoek worden hier gedaan:

- Het verminderen van de omsteltijden. Door het Lean principe 'Single-Minute exchange of Die' toe te passen neemt mogelijke de omsteltijden af. Dit houdt in dat bij de productievolgorde van de laslijnen er niet eerst gesorteerd hoeft te worden op de breedtemaat van een spiraalbodem.
- In dit onderzoek is de er geen rekening gehouden met uitval van machines. Dit gebeurt echter wel. De invloed van de uitval van een machine op het productieproces is nog niet onderzocht. Verder onderzoek is nodig om aanbeveling te doen met betrekking tot de uitval van de machines en het effect op het productieproces.
- Het veranderen van 'Make-to-Order' naar 'Make-to-Stock voor de reguliere producten. Door reguliere producten niet direct op klantvraag te produceren, neemt de variabiliteit in het productieproces af.
- Het aanpassen van het montageproces om de balans in de output minder belangrijk te maken en meer focus te leggen op de maximale productiecapaciteit. Verder onderzoek is nodig om te bepalen op welke manier het montageproces onafhankelijk kan worden van de output van de lakkerij.

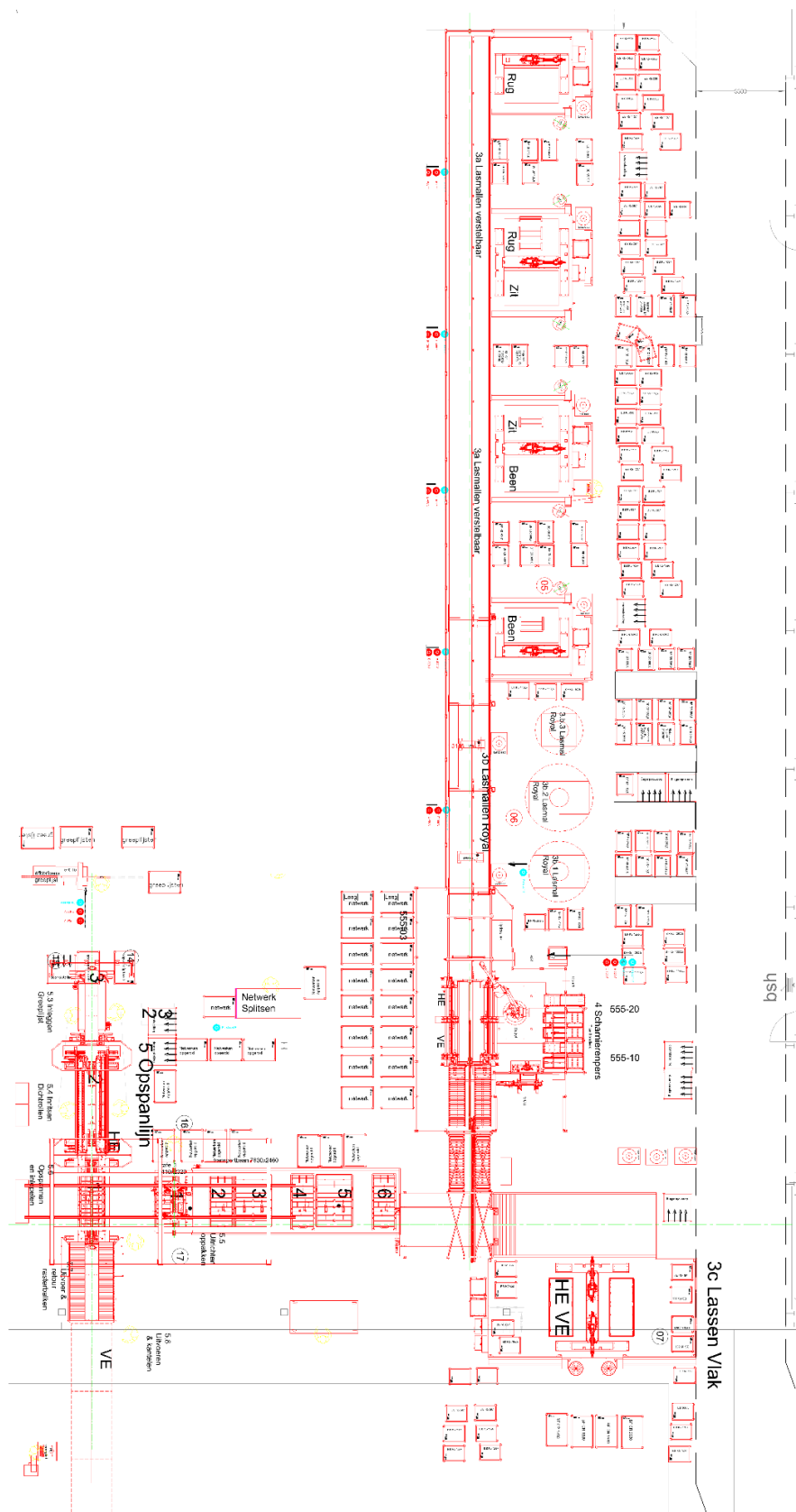
7. Bibliografie

- Accent Organisatie Advies B.V.. (2006). *Handboek Lean Manufacturing*. Zwolle, Nederland: Accent Organisatie.
- Baker, K.R. (1974), Introduction to sequencing and scheduling, Wiley, New York.
- Blackstone, J.H., Phillips, D.T., and Hogg, G.L. (1982), "A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations", *International Journal of Production Research* 20/1, 27-45.
- Bohnen, F., Buhl, M., & Deuse, J. (2013). Systematic procedure for leveling of low volume and high mix production. *Journal of manufacturing science and technology*, 6, 53-58.
- Carson, J.S. (1986) "Convincing users of model's validity is challenging aspect of modeler's job". *Industrial Engineering*, 18(6), 74–85.
- Davis, P.K. (1992) Generalizing concepts of verification, validation and accreditation (VV&A) for military simulation. R-4249-ACQ, October 1992, RAND, Santa Monica, CA.
- Dennis, P., 2007, *Lean Production Simplified*, second ed. New York, Productivity Press.
- Eilon, S. (1979), 'Production scheduling', in: K.B. Haley (ed.), *Operations Research '78*, North-Holland Publishing Company, 237-266.
- Ewert R, Wagenhofer A. (2008), *Interne Unternehmensrechnung*. 7th ed. Berlin [u.a.]: Springer;.
- Fitz-Gibbon CT. *Performance indicators*. Clevedon, Avon, England, Philadelphia: Multilingual Matters; 1990.
- Hartini, S., & Ciptomulyono, U. (2015). The Relationship between Lean and Sustainable Manufacturing on Performance: Literature Review. *Procedia Manufacturing*, 4, 38-45.
- Heerkens, H., & Winden, A. van. (2012). *Geen Probleem*. Nieuwegein, Netherlands: Van Winden Communicatie.
- Hill, J. A., Berry, W. L., & Schilling, D. A. (2003). Revising the master production schedule in sequence dependent processes. *International journal of production research*, 41(9), 2021-2035.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory physics*. Waveland Press.
- Hüttmeir, A., de Treville, S., van Ackere, A., Monnier, L., Prenninger, J., 2009, Trading off Between Heijunka and Just-in-Sequence, *International Journal of Production Economics*, 118:501–507.
- Jacobs, F., Berry, W., Whybark, D., & Vollman, T. (2011). *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. New York, United States: McGraw-Hill Education.
- King, J.R., and Spachis, A.S. (1980), 'Scheduling: Bibliography and review', *International Journal of Physical Distribution and Materials Management* 10/3, 105-132.
- Lam, N. T., Toi, L. M., & Tuyen, V. T. T. (2016). Lean Line Balancing for an Electronics Assembly Line. *Procedia CIRP*, 40, 437-442.
- Melton, T. (2005). The benefits of lean manufacturing. *Chemical Engineering Research and Design*, 12.

- Meier, Horst, et al. 'Key performance indicators for assessing the planning and delivery of industrial services.' *Procedia Cirp* 11 (2013): 99-104.
- Naedele, M., Chen, H. M., Kazman, R., Cai, Y., Xiao, L., & Silva, C. V. (2015). Manufacturing execution systems: A vision for managing software development. *Journal of Systems and Software*, 101, 59-68.
- Neely A, Gregory M, Platts K. (1995), Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*;15(4):80–116.
- Olhager, J. (2012). The Role of Decoupling Points in Value Chain Management. *Contributions to Management Science*, 1, 37-47. doi:10.1007/978-3-7908-2747-7_2
- Reulink, N., & Lindeman, L. (2005). *Dictaat kwalitatief onderzoek*. Geraadpleegd van [http://www.cs.ru.nl/~tomh/onderwijs/om2%20\(2005\)/om2_files/syllabus/kwalitatief.pdf](http://www.cs.ru.nl/~tomh/onderwijs/om2%20(2005)/om2_files/syllabus/kwalitatief.pdf)
- Robinson, S. (2004). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Runkler, T.A. (2011). Controlling discrete manufacturing processes using Kanban and Heijunka approaches, 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 181–186.
- Roser, C. (2015, 4 januari). Introduction to One-Piece Flow Leveling. Geraadpleegd van <http://www.allaboutlean.com/one-piece-flow-leveling1/>
- Sharman, G. (1984). The rediscovery of logistics. *Harvard Business Review*, 62(5), 71–80.
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2013). *Operations Management* (7e ed.). Harlow, Groot-Brittannië: Pearson Education.
- White, K.P. (1997). An Effective Truncation Heuristic for Bias Reduction in Simulation Output. *Simulation*, 69: 323-334.
- Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2004). *Operations research: applications and algorithms*. Brooks/Cole, Cengage learning. 4th edition.

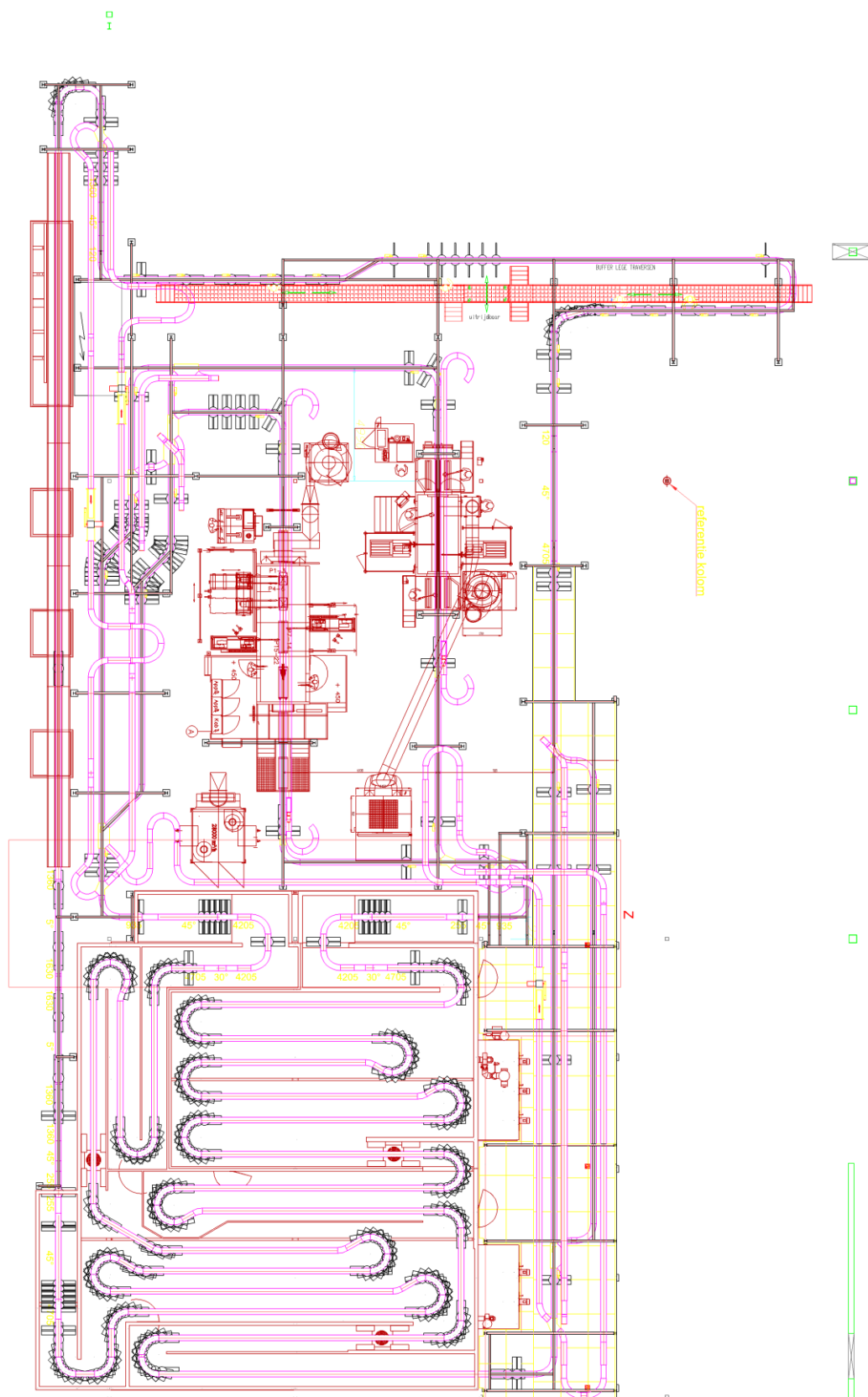
Bijlagen

Bijlage A: Laslijnen



Figuur A.1: Laslijnen

Bijlage B: Lakkerij



Figuur B.1: Lakkerij

Figuur C.1: Greeplijsten



Bijlage D: Verwachte verdeling

Het aantal klantorders per dag is een random variabele. Voor deze random variabele is een chi-kwadraat toets uitgevoerd. Het doel van de chi-kwadraat is om de verwachte theoretische kansverdeling te vergelijken met de waargenomen aantallen uit de praktijk.

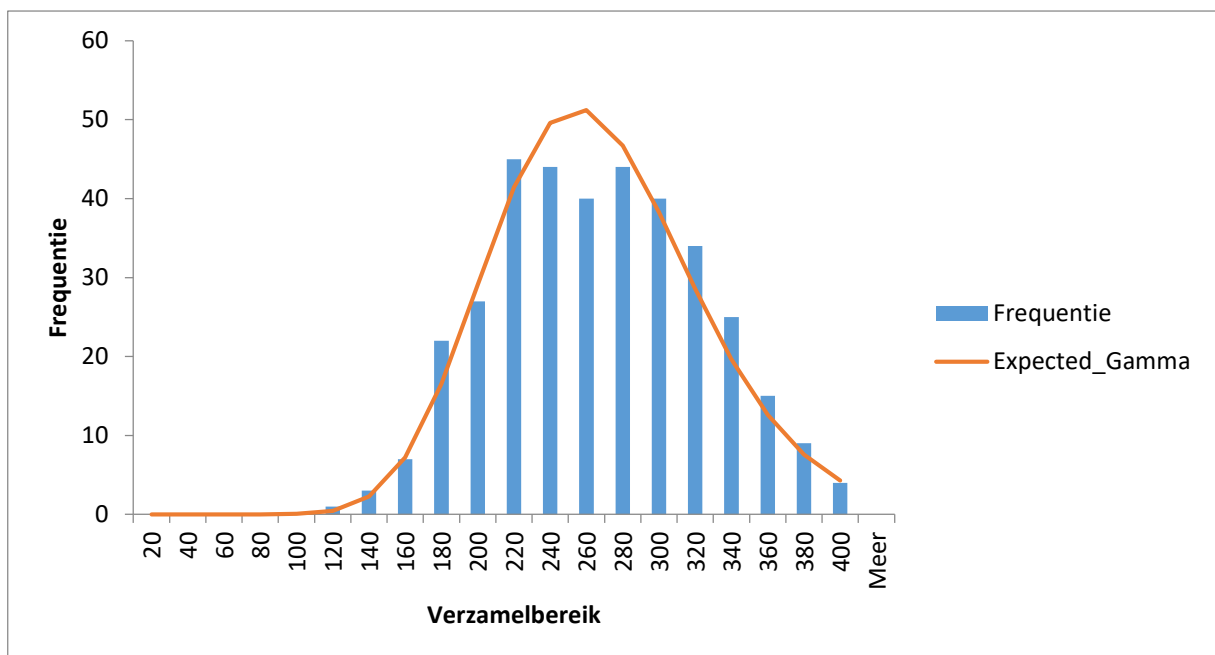
De chi-kwadraat toets splitst een distributie in meerdere bins. Het doel van de bins zijn om de waarnemingen per bin te vergelijken met de verwachte aantallen per bin op basis van de theoretische verdeling. Het aantal waarnemingen per bin wordt vergeleken met de aantallen van de theoretisch verdeling. Als de aantallen per bin van de waarnemingen te veel afwijkt van het theoretische aantal dan past de verdeling van de waarnemingen niet in de verwachte theoretische verdeling. De vergelijking van de chi-kwadraat is hieronder weergegeven. Waarbij W de werkelijk waarde is en V de verwachte theoretische waarde is. Uit de vergelijking blijkt dat X^2 de waarde weergeeft van het kwadratische verschil tussen de waargenomen data en de theoretische verdeling.

$$X^2 = \sum (W - V)^2 / V$$

Een theoretische verdeling wordt niet verworpt als de waarde van X^2 kleiner is dan de kritische waarde van de chi-kwadraat toets. De kritische waarde van de chi-kwadraat toets is afhankelijk van de geaccepteerde foutmarge. Wanneer we de chi-kwadraat toets toepassen blijkt dat de waargenomen data van de klantorder verdeling overeenkomt met de verwachte gamma verdeling met een foutmarge van vijf procent. Tabel 8.1 geeft de waarde van X^2 en kritische waarde van de chi-kwadraat toets weer. Verder geeft grafiek 8.1 de waargenomen data en de verwachte verdeling weer.

Tabel 8.1: Chi-kwadraat toets

X^2	Kritische waarde
9,817289	27,58711164



Grafiek D.1: Verwachte gamma verdeling

Bijlage E: Overzicht procestijden

Deze bijlage bevat een overzicht van de lastijden van een spiraalbodem, afhankelijk van het aantal motoren (Zie tabel E.1 en E.2). Verder bevat deze bijlage een overzicht van de procestijden van de schanierenpers op basis van het aantal motoren van een spiraalbodem (Zie tabel E.3).

Tabel E.1: Procestijden vlakke spiraalbodems

Type Spiraal	Procestijd (sec)
K5 Vlak	87
Box Vlak	130

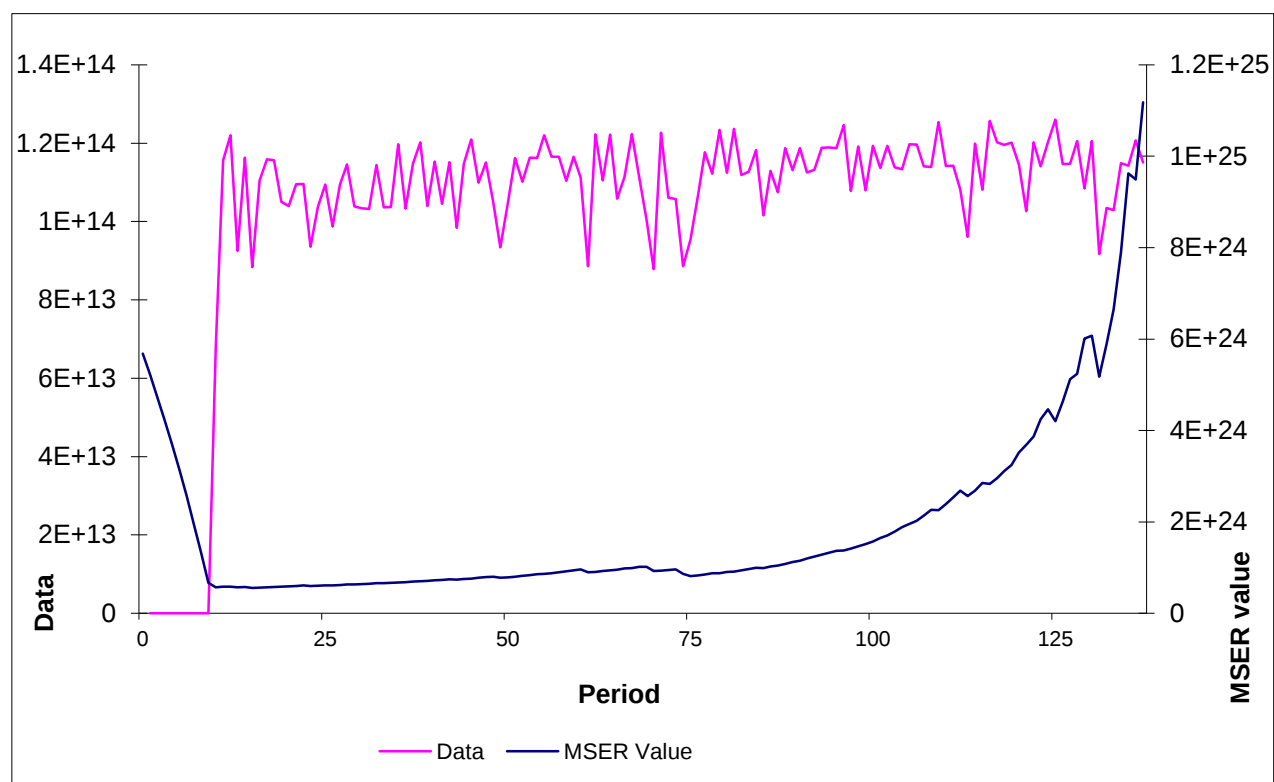
Tabel E.2: Procestijden verstelbare spiraalbodems

Aantal motoren	Breedte	Procestijd (sec)
Handverstelbaar	100<	87
Handverstelbaar	>100	136
1	100<	81
1	>100	129
2	100<	117
2	>100	134
3	100<	120
3	>100	158

Tabel E.2 Procestijden Schanierenpers

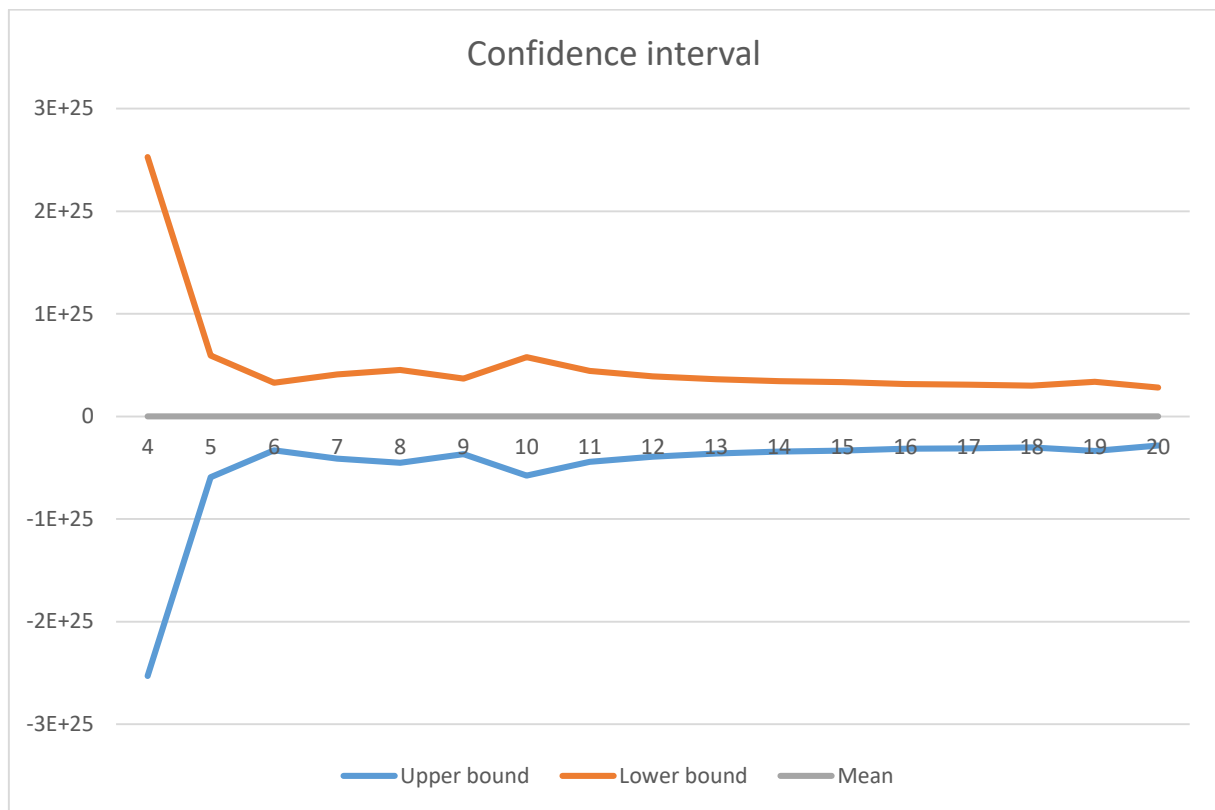
Aantal motoren	Procestijd (sec)
Handverstelbaar	104
1	104
2	136
3	166

Bijlage F: Warm-up



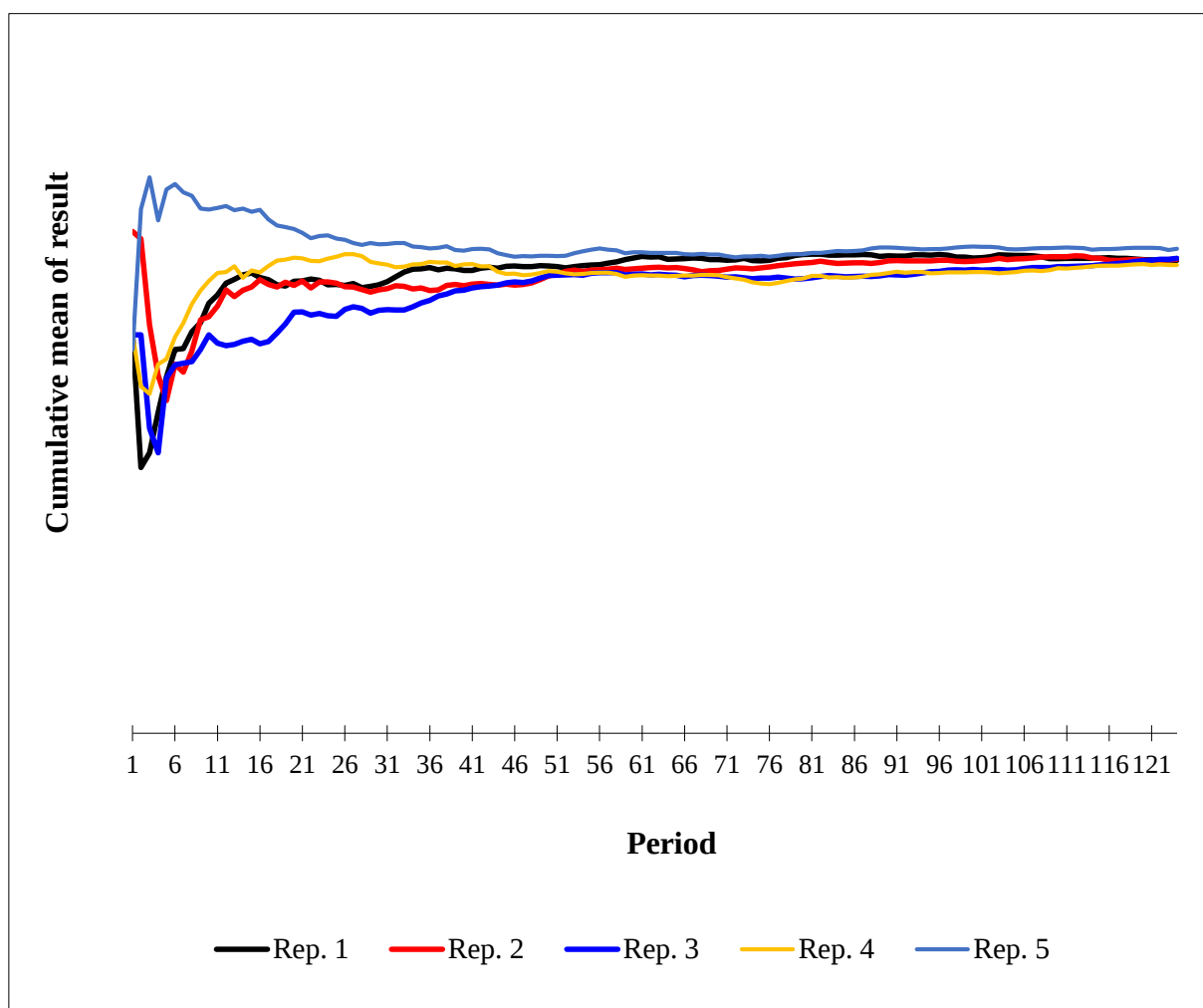
Grafiek F.1: Warm-up periode

Bijlage G: Replicaties



Grafiek G.1: Aantal replicaties

Bijlage H: Runlengte



Grafiek H.1: Runlengte